



# **La cécité aux changements : le défi de sa prévention en situations complexes et dynamiques**

**Thèse**

**Benoît Roberge-Vallières**

**Doctorat en psychologie**

Philosophiae doctor (Ph.D.)

Québec, Canada

© Benoît Roberge-Vallières, 2015



## RÉSUMÉ

La capacité à repérer les événements pertinents dans notre environnement visuel est cruciale dans la surveillance de situations dynamiques telles que le contrôle du trafic aérien. La Cécité aux Changements (CaC) renvoie à la difficulté à détecter des changements visuels. La CaC peut être causée par, soit l'incapacité de l'individu à diriger son attention vers l'objet ayant subi le changement (source perceptive) ou par l'incapacité de l'individu à attribuer suffisamment de ressources attentionnelles à l'objet afin de prendre conscience du changement qu'il a subi (source attentionnelle). Étant donné que la CaC est une cause importante d'erreurs humaines, certaines solutions technologiques ont été conçues pour soutenir la détection des changements. L'historique explicite des changements (CHEX) est efficace pour prévenir la CaC lorsque l'individu n'a qu'à détecter les changements qui surviennent dans une situation dynamique. Le premier objectif de la thèse est d'examiner l'ampleur de la CaC dans un contexte de travail multitâche dynamique au sein duquel la détection des changements est sous-jacente à la réalisation d'une tâche de prise de décision plus complexe. Le deuxième objectif vise à déterminer si le CHEX demeure efficace lorsqu'il est utilisé pour soutenir la détection des changements dans ce contexte multitâche dynamique. Un micromonde est employé pour simuler la tâche d'évaluation du risque et de gestion de la réponse (ERGR) et les conditions de travail des activités de commandement et contrôle (C2). La thèse confirme que les individus qui doivent surveiller et gérer des situations complexes et dynamiques sont vulnérables à la CaC. Dans ce contexte, le CHEX semble exacerber la prévalence de la source attentionnelle de la CaC, provoque une augmentation de la charge de travail perçue, et nuit à l'efficacité de la défense du navire. Le CHEX n'est efficace que lorsque la détection des changements est effectuée seule. La thèse suggère que, pour être réellement efficace dans des contextes de travail multitâches dynamiques, une aide à la détection des changements doit être adaptée aux ressources attentionnelles disponibles de l'utilisateur. Elle démontre qu'il est important d'adopter une approche holistique d'évaluation des systèmes d'aide à la décision, car un outil conçu spécifiquement pour aider une fonction cognitive de l'utilisateur peut aussi avoir des conséquences inattendues sur d'autres facettes de son travail.



# TABLE DES MATIÈRES

<i>Résumé</i> .....	<i>iii</i>
<i>Table des matières</i> .....	<i>v</i>
<i>Liste des tableaux</i> .....	<i>vii</i>
<i>Liste des figures</i> .....	<i>ix</i>
<i>Remerciements</i> .....	<i>xiii</i>
<i>Avant-propos</i> .....	<i>xv</i>
Introduction générale.....	1
Chapitre I.....	5
D'un contexte unitâche statique à un contexte multitâche dynamique.....	6
Contexte unitâche statique.....	6
Contexte unitâche dynamique.....	11
Contexte multitâche dynamique.....	16
Mouvements oculaires et identification d'une seconde source de CaC.....	21
Modèle NSEEV.....	28
Solutions technologiques pour aider à la détection des changements.....	31
Objectifs de la présente thèse.....	35
Chapitre II.....	39
Micro-cognition versus Macro-cognition.....	41
Simulation fonctionnelle.....	43
Complexité.....	44
Dynamisme.....	45
Opacité.....	45
Micromonde.....	46
Prise de décision en commandement et contrôle maritime.....	51
Fonctions cognitives impliquées dans le C2.....	53
Description des tâches impliquées dans le C2 maritime.....	55
Micromonde S-CCS.....	56
Configuration de S-CCS pour la présente thèse.....	61
Tâche d'évaluation du risque et de gestion de la réponse simulée dans S-CCS.....	62
Ingénierie des systèmes cognitifs.....	66
Approche holistique et plan d'analyse.....	69
Suivi des mouvements oculaires.....	70
Conclusion.....	72
Chapitre III.....	73
Objectifs expérimentaux de la présente étude.....	76
Expérience 1.....	78
Méthode.....	80
Résultats et Discussion.....	84
Expérience 2.....	94
Méthode.....	95
Résultats et Discussion.....	98
Discussion du Chapitre 3.....	103

Le CHEX et les deux sources de CaC .....	105
Qualité de l'évaluation du risque et l'efficacité de la réponse .....	108
Utilisation sporadique du CHEX.....	109
Conclusion .....	113
Chapitre IV .....	115
Résumé des objectifs de la thèse et des principaux résultats .....	116
Contribution méthodologique .....	118
Approche macro-cognitive expérimentale .....	120
Contribution théorique.....	121
Modèle NSEEV et les deux sources de la CaC .....	122
Implications pratiques.....	128
Réduction de la charge visuelle du CHEX.....	132
Types et niveaux d'automatisation.....	133
Limites méthodologiques.....	140
Travaux futurs.....	142
Modifications du design du CHEX .....	143
Aide intégrée à la vue principale de l'utilisateur.....	144
Systèmes de notifications auditives.....	147
Entraînement à la détection des changements .....	148
Conclusion générale .....	151
Références .....	153

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. <i>Résultats associés aux mesures comportementales et aux mouvements oculaires selon l'utilisation des outils d'aide à la détection des changements disponibles durant l'Expérience 1. Les nombres entre parenthèses sont des écarts-types</i> .....	90
Tableau 2. <i>Corrélations entre la performance de détection des changements et les métriques d'utilisation pour les conditions CHEX et HCR de l'Expérience 1.</i> .....	92
Tableau 3. <i>Résultats associés aux mesures comportementales et aux mouvements oculaires selon l'utilisation des outils d'aide à la détection des changements disponibles durant l'Expérience 2. Les nombres entre parenthèses sont des écarts-types</i> .....	102
Tableau 4. <i>Corrélations entre la performance de détection des changements et les métriques d'utilisation du CHEX pour l'Expérience 2.</i> .....	102



## LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1.</i> Illustration du paradigme du clignotement ( <i>Flicker paradigm</i> ). Dans l'image A', le mur derrière la statue est plus bas que dans l'image originale A.....	8
<i>Figure 2.</i> Illustration du paradigme des éclaboussures ( <i>Mudsplash paradigm</i> ). L'ombre de l'avion de l'image du centre est plus grosse que celle des deux autres images.....	9
<i>Figure 3.</i> Scène visuelle dynamique surveillée dans l'expérience 1 de l'étude de Boot et coll. (2006).....	13
<i>Figure 4.</i> Interface géospatiale utilisée dans l'étude de St. John et coll. (2005). ....	15
<i>Figure 5.</i> Interface géospatiale de l'étude de DiVita et coll. (2004). ....	19
<i>Figure 6.</i> Carte de la conscience de la situation du système de commandement et contrôle FBCB2 dans l'étude de Durlach et coll. (2008).....	21
<i>Figure 7.</i> Plateforme expérimentale SYnRGY sur la gestion de crise en sécurité civile. ....	47
<i>Figure 8.</i> Interface du micromonde DURESS II (tirée de Christoffersen et coll., 1998).....	48
<i>Figure 9.</i> Distribution du réalisme et du contrôle expérimental en fonction de la validité interne et de la validité externe. ....	49
<i>Figure 10.</i> Vue d'ensemble des composantes et des tâches comprises dans les activités de C2 maritime (adaptée de Benaskeur & Kabanza, 2009).....	55
<i>Figure 11.</i> Exemple de deux interfaces S-CCS différentes pouvant être programmées. ....	59
<i>Figure 12.</i> Fichier XML contenant les paramètres d'un scénario ainsi que les attributs des aéronefs et les changements qu'ils effectuent.....	60
<i>Figure 13.</i> Interface S-CCS. Trois zones y sont délimitées : 1) l'écran radar, 2) la liste des paramètres et 3) les boutons d'action. ....	62
<i>Figure 14.</i> Boutons de classification de la menace des contacts radars du micromonde S-CCS.....	63
<i>Figure 15.</i> Boutons d'évaluation de l'imminence de la menace du micromonde S-CCS. ....	64
<i>Figure 16.</i> Distribution des probabilités d'une neutralisation réussite selon les cinq régions définies par les quatre cercles concentriques tracés sur l'écran radar. ....	65
<i>Figure 17.</i> Illustration des trois composantes du système cognitif conjoint (MacMillan et coll., 2002). ....	67

<i>Figure 18.</i> Outil d'aide à la planification (image tirée de Tremblay et coll., 2012). .....	69
<i>Figure 19.</i> Salle d'expérimentation : on retrouve à la gauche la station avec l'appareil de suivi des mouvements oculaires Tobii et à la droite la station d'enregistrement et d'analyses des mouvements oculaires.....	71
<i>Figure 20.</i> Interface du micromonde S-CCS pour la condition avec-CHEX de l'Expérience 1. L'outil est à la droite de l'écran radar. ....	81
<i>Figure 21.</i> Interface du micromonde S-CCS pour la condition avec-HCR de l'Expérience 1. Le HCR est situé sous l'écran radar. ....	82
<i>Figure 22.</i> Pourcentage moyen de changements non-détectés (Panneau A) et vitesse de détection moyenne pour les conditions avec-CHEX, avec-HCR et sans-DSS de l'Expérience 1. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95% calculés selon la méthode de Masson et Loftus (2003). ....	85
<i>Figure 23.</i> Pourcentage moyen de changements non-détectés selon s'ils ont été fixés (Panneau A) ou non (Panneau B) pour les conditions sans-DSS, avec-CHEX et avec-HCR de l'Expérience 1. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95% calculés selon la méthode de Masson et Loftus (2003). ....	87
<i>Figure 24.</i> Moyennes des scores obtenus sur les échelles de charge mentale et de pression temporelle du questionnaire NASA-TLX pour les conditions sans-DSS, avec-CHEX et avec-HCR de l'Expérience 1. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95%.....	88
<i>Figure 25.</i> Pourcentage moyen des sélections d'aéronefs effectuées dans l'outil (Panneau A), pourcentage moyen des fixations sur l'outil (Panneau B) et temps moyen passé à regarder l'outil (Panneau C) en fonction de l'ordre de passation des tests pour les conditions avec-CHEX et avec-HCR de l'Expérience 1. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance intra-sujet à 95%.....	91
<i>Figure 26.</i> Pourcentage moyen des classifications correctes (Panneau A) et pourcentage moyen d'hostiles frappant le navire (Panneau B) pour les conditions sans-DSS, avec-CHEX et avec-HCR de l'Expérience 1. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95%. ....	93
<i>Figure 27.</i> Interface du micromonde S-CCS pour la condition sans-CHEX de l'Expérience 2. Les flèches pointent vers les changements apportés à la liste des paramètres et aux boutons d'action pour adapter l'interface au contexte de détection des changements effectuée seule. ....	96
<i>Figure 28.</i> Interface du micromonde S-CCS pour la condition avec-CHEX de l'Expérience 2. ....	98

*Figure 29.* Pourcentage moyen de changements non détectés (Panneau A) et vitesse de détection moyenne (Panneau B) pour les conditions avec-CHEX et sans-CHEX de l'Expérience 2. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95%. ..... 99

*Figure 30.* Pourcentage moyen de changements non détectés selon s'ils ont été fixés (Panneau A) ou non (Panneau B) pour les conditions sans-CHEX et avec-CHEX de l'Expérience 2. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95% calculés selon la méthode de Masson et Loftus (2003)..... 100

*Figure 31.* Moyennes des scores obtenus sur les échelles de charge mentale et de pression temporelle du questionnaire NASA-TLX pour les conditions sans-CHEX et avec-CHEX de l'Expérience 2. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95%. ..... 101

*Figure 32.* Pourcentage moyen de sélections d'aéronefs par l'entremise de l'outil (Panneau A), pourcentage moyen de fixations sur l'outil (Panneau B) et temps moyen passé à regarder le tableau de l'outil (Panneau C) en fonction de l'ordre de passation des tests pour la condition avec-CHEX de l'Expérience 2. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance intra-sujet à 95%. ..... 103



## REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord remercier Dr. Sébastien Tremblay, mon directeur de thèse, pour son soutien et ses conseils judicieux tout au long de mon cheminement au doctorat. Le dévouement de Sébastien durant ma formation m'a permis non seulement d'acquérir les aptitudes essentielles d'un bon chercheur, mais de réaliser l'importance de saisir toutes opportunités de dépassement de soi tant au plan professionnel qu'au plan personnel. Quoique l'accomplissement d'une thèse de doctorat n'est pas toujours évident et peut parfois générer de la frustration, je serai toujours reconnaissant envers Sébastien pour m'avoir impliqué dans des projets de recherche captivants qui m'ont amené à voyager dans plusieurs pays du monde, et à élargir mes intérêts de chercheur et ma curiosité scientifique. Grâce à lui, j'ai pu discuter de ma thèse avec des chercheurs de grande renommée en sciences cognitives et psychologie. Je le remercie également pour m'avoir montré qu'il ne faut jamais hésiter de remettre en question les théories et les connaissances existantes afin de mener des recherches innovantes et de réellement contribuer à l'avancement de la science.

Je souhaite aussi exprimer mon entière gratitude envers les Drs Simon Grondin et Daniel Lafond pour avoir siégé en tant que membres de mon comité de thèse. Vos conseils et commentaires avisés m'ont permis d'atteindre mes objectifs de recherche plus facilement et d'améliorer significativement la qualité scientifique de ma thèse. Nos discussions durant mes séminaires m'ont fait apprécier davantage mon cheminement au doctorat, et vos encouragements m'ont donné davantage confiance envers la qualité de mon travail et mes capacités de chercheur.

I would like to thank warmly Dr. Paula Durlach, Acting Director at Advanced Distributed Learning Co-Laboratory (Orlando, Floride), for supervising my doctoral research internship. You quickly included me in many projects at ADL showing me a completely new and immensely interesting area of research in cognitive sciences and educational psychology. I think you have seen in me a promising researcher and I wish to live up to your expectation.

Cela m'amène à saluer l'implication de mes collègues et de mes amis (amies) dans la réussite de mon doctorat. Plusieurs amitiés ont émergé au cours de mon cheminement, dont celles de Cindy Chamberland et Andrée-Anne Ouellet. Merci à Cindy pour ta franchise (parfois tranchante, mais c'est comme ça qu'elle est appréciée), ton aide incommensurable et les nombreuses visites au pub pour relaxer après une journée productive au bureau. Merci à Andy pour ton soutien moral et ton sens de l'humour incomparable qui te permet de rire à toutes mes blagues (bonnes et mauvaises, mais surtout bonnes). Des amitiés de plus longue date ont aussi contribué à ce que je suis devenu, et m'ont encouragé à poursuivre au doctorat et à me dépasser. Marc-André Roy et Dany Labrecque, bien que nous nous voyons moins souvent, vos amitiés me sont très chères et m'ont aidé dans des moments de ma vie plus difficiles. Finalement, merci au reste des membres de l'équipe dynamique du laboratoire Co-DOT (et LAC), plus particulièrement Jean-François Gagnon, un excellent partenaire de bureau et un grand amateur de bonne musique.

Évidemment, je ne peux passer sous silence le soutien inconditionnel de mes proches tout au long de mon doctorat. Merci d'abord à ma mère Diane et mon père Daniel pour toujours croire en moi, et pour m'encourager dans tout ce que je fais et entreprends, que ce soit au travail ou dans ma vie personnelle. Vous me poussez à être une meilleure personne, je vous aime. Merci à mon frère Simon d'être présent pour moi, de m'écouter quand ça va mal et de toujours me montrer que ça va aller bien. Sache que je serai toujours là pour toi aussi. Je suis tellement fier et choyé d'être l'oncle de Léa-Maude et le parrain de Laurie-Ève. Merci aussi à grand-maman pour son support et de montrer à toutes et tous sa fierté pour son petit-fils.

Je termine mes remerciements par un message à toutes et tous qui effectuent ou qui désirent faire un doctorat. Je crois fermement qu'il est important de ne pas investir toute son énergie uniquement dans la réalisation d'une thèse, et qu'il faut nourrir et entretenir d'autres parties de soi et de sa vie. Je remercie donc les membres de mon groupe de musique (Tony, Max et Martin) pour m'offrir cet exutoire qui m'a rendu moins stressé et plus créatif au travail.

## AVANT-PROPOS

La présente thèse est rédigée en français et présentée dans un format traditionnel. Néanmoins, les résultats présentés dans le chapitre 3 ont été publiés dans un article de conférence pour le 56e congrès annuel de la Human Factors and Ergonomics Society en 2012 à Boston. La référence précise est présentée ci-dessous :

Vallieres, B. R., Hodgetts, H. M., Vachon, F., & Tremblay, S. (2012). Supporting Change Detection in Complex Dynamic Situations: Does the CHEX Serve its Purpose? *Proceedings of the 56th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (pp.1708–1712). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.  
doi:10.1177/1071181312561342



# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

La capacité à discerner les objets et les événements pertinents dans notre environnement est cruciale dans l'exercice de plusieurs activités telles que la conduite automobile, la surveillance par caméra et le contrôle du trafic aérien (St. John, Smallman, & Manes, 2005). Par exemple, un automobiliste doit constamment surveiller la scène visuelle dynamique qui défile sous ses yeux pour avoir connaissance des panneaux de signalisation, conduire prudemment et éviter les accidents (Horswill & McKenna, 2004), alors qu'un contrôleur aérien doit effectuer le suivi des changements d'altitude et de trajectoire afin d'assurer la sécurité de l'espace aérien dont il est responsable (Durso, Truitt, Hackworth, Crutchfield, & Manning, 1998). La détection des changements est une fonction cognitive requise dans la surveillance et la gestion de plusieurs situations de travail, plus particulièrement celles caractérisées par des contraintes sévères telles que la pression temporelle, l'incertitude, le risque élevé et une charge de travail élevée (Durlach, 2004). Les individus ayant à gérer ces situations se retrouvent généralement dans un contexte multitâche au sein duquel la détection des changements est sous-jacente aux autres activités qu'ils doivent accomplir. La détection d'un changement est notamment cruciale au maintien d'une conscience de la situation et à la prise de décision, pour ainsi répondre adéquatement à l'évolution rapide et continue de cette situation (St. John et coll., 2005; Varakin, Levin, & Fidler, 2004)

L'intégration de nouveaux systèmes de surveillance et de collecte d'information au sein de ces environnements de travail a presque toujours conduit à une augmentation du volume et de la complexité de l'information présentée aux utilisateurs (Vachon, Vallières, Jones, & Tremblay, 2012). L'accroissement de la quantité d'informations à percevoir, à surveiller et à traiter avant de prendre une décision est la cause de défaillances de la conscience visuelle, soit l'ensemble des processus cognitifs par lesquels certains stimuli d'une scène visuelle sont sélectionnés pour être encodés en mémoire et peuvent être utilisés pour effectuer une tâche (Lamme, 2003; Varakin et coll., 2004). La Cécité aux Changements (CaC) est un exemple de défaillance de la conscience visuelle et se définit par la difficulté qu'a l'individu à remarquer un changement important dans la scène visuelle sous surveillance (Rensink, O'Regan, & Clark, 1997; Simons, Franconeri, & Reimer, 2000). Un changement qui demeure non détecté par un individu peut compromettre sa

capacité à maintenir une performance optimale dans l'exécution de ses activités de surveillance et de gestion de la situation. Dans la plupart des environnements de travail à haut risque (p.ex., contrôle du trafic aérien et combat de feux de forêt), les conséquences d'un changement manqué dans l'évolution de la situation peuvent être désastreuses (p.ex., pertes de vies humaines et dommage matériel; Varakin et coll., 2004). La principale solution envisagée pour prévenir les effets négatifs de la CaC demeure d'implanter des aides technologiques, telles que l'historique explicite des changements (*Change History EXplicity*; CHEX, voir Smallman & St. John, 2003), au sein de ces systèmes d'information pour soutenir le processus de détection des changements et la prise de décision dans des situations de travail exigeantes. D'ailleurs, le CHEX s'est révélé très efficace pour réduire la CaC lorsque la détection des changements est l'unique tâche à effectuer par l'opérateur (St. John et coll., 2005).

Jusqu'à présent, peu d'études ont visé à déterminer l'ampleur de la CaC en situation complexe (multitâche) et dynamique. La majorité des études sur la CaC ont employé des scènes visuelles statiques qui sont moins représentatives des situations rencontrées dans des environnements de travail à haut risque. La présente thèse a pour premier objectif de combler ce vide dans la littérature en étudiant la détection des changements lors d'une simulation des tâches de contrôle du trafic aérien réalisées dans un contexte maritime. Le deuxième objectif est de vérifier si les solutions technologiques qui ont été développées, comme l'outil CHEX, demeurent bénéfiques malgré la nature multitâche et dynamique de la situation qui est simulée. Tout en testant l'efficacité d'outils d'aide à la détection des changements, cette thèse contribue à approfondir les connaissances sur les sources de défaillances de l'attention et de la mémoire dans les situations multitâches et dynamiques.



## **CHAPITRE I**

### *CONTEXTE THÉORIQUE ET PROBLÉMATIQUE*

## ***D'un contexte unitâche statique à un contexte multitâche dynamique***

De nombreuses études portant sur l'acquisition et le traitement de l'information démontrent que, dans plusieurs circonstances, l'humain est vulnérable à deux types de défaillances majeures de la conscience visuelle : la cécité inattentionnelle et la cécité aux changements (CaC; Varakin et coll., 2004). La différence entre ces deux phénomènes apparentés réside dans l'attente ou la prévisibilité de l'événement d'intérêt. La cécité inattentionnelle est la difficulté de l'individu à remarquer la présence d'un nouveau stimulus important, mais inattendu, dans son environnement visuel lorsqu'il est occupé à traiter d'autres stimuli visuels (p.ex., un gorille dans une radiographie d'un cerveau; Drew, Vö, & Wolfe, 2013; Simon & Chabris, 1999). La CaC, quant à elle, désigne la difficulté à détecter des changements visuels attendus parmi les objets pertinents à la tâche à effectuer (p.ex., Rensink, O'Regan, & Clark, 1997; Simons et coll., 2000). La présente thèse s'intéresse au phénomène de la CaC; par conséquent, les changements qui ont lieu dans les tâches simulées sont attendus et doivent être détectés par les sujets.

### **CONTEXTE UNITÂCHE STATIQUE**

Une grande partie des connaissances sur la CaC a été acquise à partir d'études dans lesquelles l'individu ne devait rechercher activement qu'un seul changement soudain et attendu par scène visuelle statique présentée (images ou photos dans lesquelles aucun élément n'est en mouvement). Le changement à détecter et à identifier pouvait être l'apparition/la disparition, le déplacement dans l'image ou la modification de la couleur d'un objet (p.ex., Rensink, O'Regan, & Clark, 1997; O'Regan, Rensink, & Clark, 1999; Henderson & Hollingworth, 2003). La prémisse de ces études était que des événements visuels exogènes doivent survenir conjointement à la recherche visuelle de l'individu afin de bloquer la réception automatique par le système visuel du signal associé à la transition (*transient*) de l'état pré-changement à l'état post-changement de cet objet, et ainsi induire la CaC. Sans ces perturbations visuelles, le signal de transition spatio-temporel produit par le changement attirerait inévitablement l'attention de l'individu, menant obligatoirement à sa

détection (Kveraga & Hughes, 2005; Simons et coll., 2000). Les études sur la CaC incluant des scènes visuelles statiques employaient donc plusieurs techniques et paradigmes de perturbations visuelles afin de déterminer les conditions cognitives qui mènent à la CaC. Ces techniques visent sensiblement le même but, soit d'interrompre ou de nuire à la perception de la continuité naturelle de la transition visuelle entre l'état pré-changement vers l'état post-changement de l'image (Rensink, 2002). Plusieurs variantes de ces perturbations visuelles ont été employées pour induire la CaC : le paradigme du clignotement (*flicker paradigm*; Rensink et al., 1997), le paradigme des éclaboussures (*mudsplash paradigm*; O'Regan et al., 1999), le paradigme de saccades oculaires (*saccade-contingent paradigm*; McConkie & Currie, 1996), la technique du changement de position de l'image (Blackmore, Brelstaff, Nelson, & Troscianko, 1995), et le paradigme des clignements des yeux (*eye-blink contingent paradigm*; O'Regan, Deubel Clark, & Rensink, 2000).

Le paradigme du clignotement est celui qui a été le plus utilisé pour favoriser l'occurrence de la CaC. Il consiste à présenter tour à tour une image d'une scène, un écran vide (ou masque blanc), puis une version modifiée de l'image d'origine. Les deux images alternent, toujours en étant séparées par l'écran vide, jusqu'à ce que le participant détecte le changement (voir Figure 1, Caplovitz, Fendrich, & Hughes, 2008; Hewlett & Oezbek, 2012; Rensink et coll., 1997). Cette alternance rapide entre l'image d'origine, le masque et l'image modifiée vise à reproduire le phénomène de la suppression saccadique : lors des mouvements rapides des yeux, la rétine ne capte qu'une vision brouillée de la scène visuelle et cette vision floue masquerait le signal de transition produit par les changements (Simon & Ambinder, 2005). L'écran blanc reproduit donc le phénomène de la suppression saccadique en créant un changement de luminosité qui masque le signal de transition produit par le changement et qui induit ainsi la CaC (Hollingworth, Schrock, & Henderson, 2001). À l'aide de ce paradigme, Rensink et ses collègues (1997) ont démontré que les individus sont souvent incapables de détecter des changements flagrants dans la scène visuelle, malgré plusieurs alternances entre l'image d'origine et l'image modifiée. Il fallait significativement plus de temps aux participants pour détecter le changement que lorsque l'écran vide séparant les deux images était omis. De plus, le temps pris pour détecter un

changement dans un tel paradigme augmente considérablement lorsque la scène est plus complexe (*set size effect*) et lorsque les objets qui la composent ont des orientations similaires (Beck, Levin, & Angelone, 2007; Hewlett & Oezbek, 2012). En effet, dans ce dernier cas, la performance de détection diminuerait en raison du signal de transition plus faible que produirait l'objet, ce qui rendrait la comparaison pré-/post changement plus difficile (Zelinsky, 2001). Ces résultats peuvent s'appliquer aussi au type de contexte de travail qui est simulé dans la présente thèse. Par exemple, un contrôleur aérien doit diriger un grand nombre d'avions (25 à 50 aéronefs peuvent être présents sur son radar; voir Durso et coll., 1998; St. John et coll., 2005). Ces avions peuvent emprunter des directions et des trajectoires similaires. Alors, plus le nombre d'objets à surveiller est grand et plus ces derniers ont des orientations similaires, plus le signal de transition du changement que l'individu doit détecter pour maintenir la sécurité de l'espace aérien sera faible. Ce contexte de travail serait donc propice à la CaC.

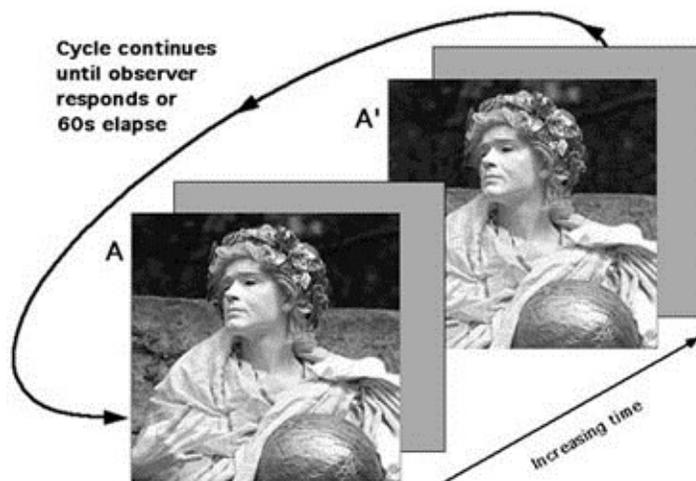


Figure 1. Illustration du paradigme du clignotement (*Flicker paradigm*). Dans l'image A', le mur derrière la statue est plus bas que dans l'image originale A.

D'autres études ont utilisé le paradigme des éclaboussures qui consiste à présenter une scène visuelle statique couverte partiellement de l'image de taches d'encre (ou autres formes géométriques) lorsque les changements surviennent. Les taches d'encre servent à camoufler certains indices contextuels qui permettent de repérer plus facilement les changements (voir Figure 2; O'Regan et coll., 1999). Étant donné qu'une certaine partie du

signal de transition demeure visible (contrairement au masquage complet par un écran vide), les participants ont tendance à détecter plus rapidement les changements (moins d'alternances entre l'image d'origine et l'image modifiée avec taches) que dans le paradigme du clignotement. Si les participants repéraient plus rapidement les objets ayant subi un changement, cette technique induisait tout de même un degré substantiel de CaC (O'Regan et coll., 1999).

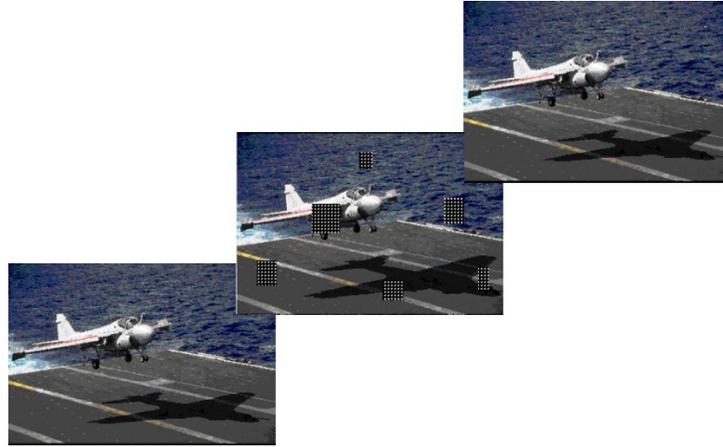


Figure 2. Illustration du paradigme des éclaboussures (*Mudsplash paradigm*). L'ombre de l'avion de l'image du centre est plus grosse que celle des deux autres images.

En somme, dans le contexte de scènes visuelles statiques, la CaC doit être induite artificiellement par l'expérimentateur en faisant coïncider le changement avec une distraction visuelle ou avec les mouvements des yeux du participant. Les paradigmes de perturbations visuelles visent à détourner le regard de l'individu (p.ex., distraction visuelle, bouger l'image au moment du changement; Blackmore et coll., 1995), à bloquer sa vision du changement (clignotements, éclaboussures; Rensink et coll., 1997; O'Regan et coll., 1999) ou à profiter de ses comportements oculaires (saccades ou clignements des yeux; Henderson & Hollingworth, 2003) afin de favoriser la CaC. Ces techniques bloquent la réception automatique par le système visuel du signal de transition que produit un objet lorsqu'il subit un changement (Rensink, 2002). Elles empêchent l'attention de l'individu d'être capturée par l'objet ayant subi le changement. Les études en contexte unitâche statique qui ont été recensées jusqu'à présent laissent croire que la source de la CaC serait principalement perceptive : l'individu manque un changement, car son regard était ailleurs

sur la scène visuelle ou sa vision du changement était obstruée par un événement exogène (Simon & Ambinder, 2005). Sans perturbation visuelle, le signal de transition attire le regard de l'individu et son attention est déployée sur l'objet afin de détecter le changement.

Pourtant, des études plus récentes prétendent que la détection des changements procéderait en quatre étapes, et impliquerait l'attention, la mémoire de travail et la conscience. Premièrement, la combinaison de la recherche visuelle et de l'attention permet de sélectionner les objets qui seront encodés en mémoire visuelle pour former une représentation de l'état pré-changement de la scène. Deuxièmement, la recherche visuelle et l'attention permettent de former une représentation post-changement de la situation en mémoire qui inclut les signaux de transition entre les états pré-changement et post-changement de l'objet ayant subi le changement. Troisièmement, les représentations actives en mémoire sont comparées. Et finalement, l'individu doit déterminer si un changement est survenu ou non (ce qui suppose qu'il a pris conscience qu'un changement s'est produit). À cette étape, l'individu doit être en mesure de comprendre ce qui s'est passé dans la situation pour prendre sa décision. Lamme (2003) utilise la notion de « rappel conscient du changement » pour définir cette combinaison de compréhension et de prise de décision. Un échec à l'une de ces étapes pourrait mener à la CaC (Beck & Levin, 2003; Beck & van Lamsweerde, 2011; Busch, 2013; Durlach, 2004; Caplovitz et coll., 2008; Mitroff, Simons, & Levin, 2004; Simons et coll., 2000; Zelinsky, 2001).

Ces études suggèrent que la CaC n'est pas seulement un phénomène perceptif. Par exemple, Mitroff, Simons et Levin (2004) ont démontré que leurs sujets étaient parfois capables d'identifier les objets pré-changement et post-changement dans des tests de reconnaissance, et ce, même s'ils ont été aveugles aux changements que ces objets ont produits. De plus, la performance de détection est améliorée par la présentation d'indices après qu'un changement soit survenu (Beck & van Lamsweerde, 2011). Ces résultats suggèrent qu'il a eu un certain traitement de l'information concernant l'objet visé par le changement, mais que l'individu n'en a pas pris conscience. En plus d'avoir une source perceptive, la CaC pourrait être causée par (1) une mauvaise sélection attentionnelle des éléments de la scène visuelle qui seront encodés en mémoire de travail, (2) une incapacité à

comparer les représentations pré-/post changements emmagasinées en mémoire en raison d'une trop grande charge de travail, et (3) une difficulté à comprendre ce qui s'est passé dans la situation qui mène à prendre une décision selon laquelle un changement n'est pas survenu (Lamme, 2003; Richards, Hannon, & Vitkovitch, 2012).

## **CONTEXTE UNITÂCHE DYNAMIQUE**

Malgré le fait que les scènes visuelles statiques ont été utiles pour montrer l'importance de l'attention, de la mémoire et de la conscience dans la détection des changements, deux arguments majeurs ont mené à l'emploi de scènes visuelles dynamiques pour approfondir nos connaissances sur la CaC. Premièrement, la présence nécessaire de perturbations visuelles pour induire la CaC a été remise en question par plusieurs auteurs, dont Simons et ses collègues (2000). Ces derniers ont démontré que l'individu peut être aveugle à des changements flagrants, mais qui apparaissent ou disparaissent graduellement (contrairement aux apparitions/disparitions et changements de couleur spontanés observés dans les études présentées ci-dessus) et qui, par le fait même ne produisent pas de signaux de transition suffisamment saillants pour attirer automatiquement son attention. Les changements graduels étaient des successions rapides d'images statiques (à un rythme de 12 images par seconde, pour un total de 144 images en 12 secondes) dans lesquelles un objet apparaissait ou disparaissait progressivement. En fait, ils ont obtenu un taux de CaC plus élevé lorsque les changements étaient présentés graduellement que lorsque ces mêmes changements étaient présentés selon le paradigme du clignotement. Bien qu'ils aient utilisé des images statiques, Simons et ses collègues ont démontré qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser des perturbations visuelles, car l'individu a naturellement plus de difficulté à détecter des changements graduels.

Deuxièmement, l'aspect stationnaire des scènes statiques n'est pas approprié à toutes les situations de la vie quotidienne et à tous les environnements de travail qu'un individu peut rencontrer. Certains types de changements ne peuvent pas être représentés dans ce contexte – par exemple, un avion perdant graduellement de l'altitude (Durlach, 2004). De plus, il nous arrive souvent d'avoir à détecter un changement dans un environnement visuel où plusieurs objets sont en mouvement et évoluent dans le temps. Par

exemple, un conducteur automobile doit repérer un piéton traversant la rue devant sa voiture tout en surveillant les mouvements des autres automobiles et des bicyclettes avec qui il partage la route (Horswill & McKenna, 2004). Des chercheurs ont soulevé une importante question : est-ce que les résultats obtenus en utilisant des paradigmes de recherche visuelle à l'aide de scènes visuelles statiques s'appliquent à des scènes plus complexes et dynamiques qui contiennent plusieurs objets et de multiples signaux de transition qui surviennent simultanément (Nikolic, Orr, & Sarter, 2004; Boot, Kramer, Becic, Wiegmann, & Kubose, 2006)?

Quelques études ont été menées afin de déterminer les conditions cognitives qui mènent à la CaC dans une scène visuelle dynamique, et ce, sans l'emploi de paradigmes de perturbations visuelles. Comme pour les scènes visuelles statiques, dans ces études, l'unique tâche du participant demeurerait de détecter des changements spécifiques dans la scène et de les rapporter explicitement (p.ex., les signaler en appuyant sur la barre d'espace d'un clavier d'ordinateur). Contrairement aux scènes visuelles statiques, dans les scènes dynamiques, plusieurs objets indépendants sont en mouvement et subissent fréquemment des changements, de façon imprévisible et parfois simultanée, ce qui rend les changements visuels naturellement plus difficiles à détecter et à traiter pour l'observateur (Boot, Kramer, Becic, Wiegmann, & Kubose, 2006; Durlach, Kring, & Bowens, 2008; St John et coll., 2005). Il y a des changements pertinents à la tâche du surveillant et des changements non pertinents qui doivent être ignorés. L'individu doit donc surveiller l'évolution de la situation pour détecter les changements qui sont importants à signaler. Compte tenu de ces particularités, les étapes de détection des changements qui ont été établies en contexte statique ne sont peut-être pas applicables aux scènes visuelles dynamiques. La surveillance de l'évolution d'une scène dynamique afin d'y repérer un changement ne fait peut-être pas intervenir les mêmes étapes que dans une scène statique; elles ne se succèdent pas nécessairement. Autrement dit, dans une situation dynamique comme la conduite automobile, il n'y a pas nécessairement de moment déterminé ou fixe pendant lequel l'individu peut prendre le temps de comparer la scène visuelle pré-changement à la situation en temps réel.

L'étude de Boot et ses collègues (2006) visait à déterminer le niveau de détectabilité de deux types de changements survenant dans une scène visuelle dynamique qui variait en complexité. Les participants surveillaient une scène visuelle dynamique dans laquelle plusieurs points de différentes couleurs (rouge, vert ou bleu) se déplaçaient sur un arrière-plan circulaire gris (Figure 3). Un essai durait 8 secondes et le nombre d'objets à surveiller variait entre 8 et 24 points. Deux types de changements pouvaient survenir : l'apparition d'un point supplémentaire ou le changement de couleur d'un point se trouvant déjà dans la scène dynamique. Les résultats de cette expérience démontrent que, même si environ 10 % des changements ont été manqués, les participants détectaient plus facilement les apparitions de nouveaux points que les changements de couleur. La performance globale de détection diminuait avec l'augmentation du nombre d'objets présents dans la scène visuelle. À l'instar des études de Zelinsky (2001) et de Hewlett et Oezbek (2012) à l'aide de scènes visuelles statiques, plus la scène dynamique était complexe, plus le niveau de CaC augmentait, et ce, indépendamment du type de changement. Cette étude comporte deux caractéristiques importantes des situations dynamiques. Premièrement, plusieurs objets en mouvement doivent être surveillés par le participant. Deuxièmement, il est plus difficile pour ce dernier de détecter les changements subis par des objets déjà présents dans la scène visuelle.

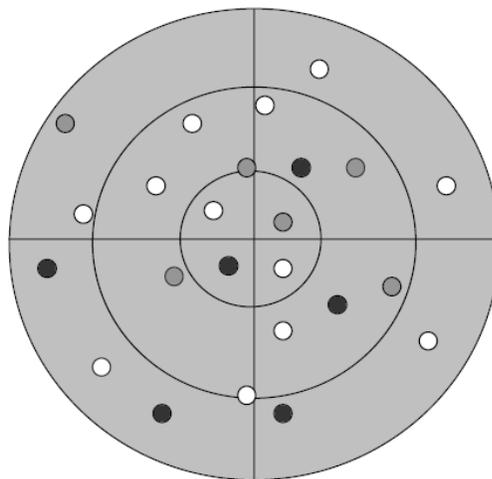


Figure 3. Scène visuelle dynamique surveillée dans l'expérience 1 de l'étude de Boot et coll. (2006).

St. John et ses collègues (2005) ont rapporté un niveau important de CaC lorsque les participants devaient surveiller une interface géospatiale affichant un espace aérien, et avaient à détecter et à identifier les aéronefs qui devenaient des menaces potentielles pour leur navire-mère (voir Figure 4). Le contexte expérimental simulait une situation de surveillance aérienne. Les changements critiques qui devaient être repérés par les participants concernaient les aéronefs hostiles et pouvaient prendre la forme d'un nouvel aéronef qui apparaît dans l'interface, d'un aéronef qui franchit une limite opérationnelle ou d'un aéronef qui quitte sa trajectoire. Cinquante aéronefs (hostiles et non-hostiles) étaient visibles en tout temps sur l'interface géospatiale et 36 changements importants survenaient durant les trois scénarios expérimentaux de 15 minutes. En tout, environ 13% des changements critiques étaient manqués par les participants. Cette étude comporte plusieurs caractéristiques essentielles d'une situation dynamique (par opposition aux scènes visuelles statiques) qui sont reproduites dans le contexte expérimental de la présente thèse. 1) La scène présente en tout temps plusieurs aéronefs qui sont en mouvement et qui empruntent des trajectoires différentes, mais qui parfois ont des orientations similaires. 2) Deux catégories de changements peuvent survenir : des changements pertinents à la tâche, et des changements non pertinents qui agissent comme distracteurs et qui doivent être ignorés. Dans ce cas, les autres objets présents dans la scène ne sont pas seulement en mouvement, mais peuvent effectuer des changements qui ne sont pas importants pour la tâche du participant. 3) Plus d'un changement pertinent doit être détecté lors d'un essai, ce qui est plus représentatif d'une situation de travail réelle (p.ex., un contrôleur aérien doit généralement détecter plus d'un changement d'altitude ou de trajectoire durant un quart de travail; Durso et coll., 1998). Par contre, dans le cas de l'étude de St. John et ses collègues (de même que celle de Boot et coll., 2006), il demeure que la détection et l'identification des changements sont les composantes de la seule tâche que le participant doit effectuer.

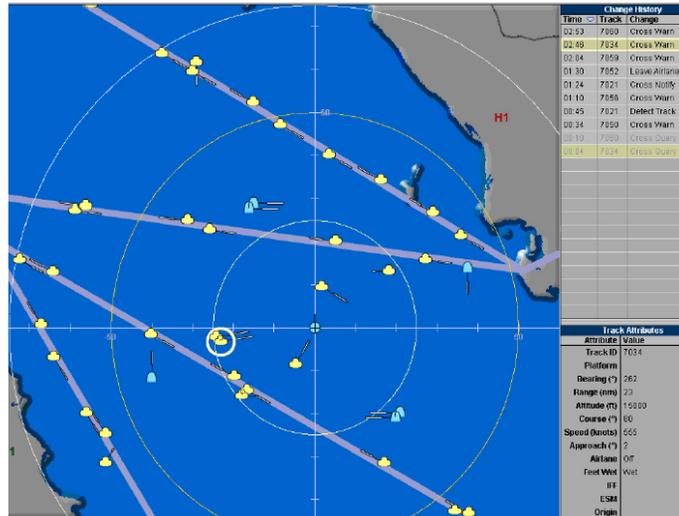


Figure 4. Interface géo-spatiale utilisée dans l'étude de St. John et coll. (2005).

À l'aide d'un contexte unitâche dynamique, ces deux études suggèrent que les signaux de transition associés aux changements importants sont naturellement moins faciles à détecter que ceux observés dans un contexte unitâche statique. Étant donné que de nombreux objets de la scène se déplacent (évoluent en continu) et peuvent agir comme distracteurs, davantage d'événements peuvent perturber le déploiement de l'attention de l'individu dans la scène dynamique et le détourner des changements importants (Boot et coll., 2006). La présence des signaux de transition produits par les changements non pertinents est suffisante pour réduire la détectabilité des signaux de transition associés aux changements pertinents à la tâche et induire la CaC (Vachon et coll., 2012). Cependant, bien que les signaux de transition des changements importants soient moins saillants parmi les mouvements et les changements des distracteurs présents dans la scène visuelle dynamique, les apparitions d'objet attirent davantage l'attention et sont détectées plus facilement que tous les autres types de changements (Cole, Kentridge, & Heywood, 2004; Franconeri, Simons, & Junge, 2004; Theeuwes, 2004). Ces résultats ont des implications pratiques pour la conception de systèmes d'aide à la décision. Par exemple, un système d'alarmes visuelles devrait privilégier l'apparition d'un signal saillant dans la scène visuelle dynamique qui est surveillée par l'opérateur pour l'alerter de l'occurrence d'événements importants afin de maintenir une bonne conscience de la situation. Ce type de changement était le plus facilement et le plus rapidement détecté parmi les mouvements et les

changements effectués par les distracteurs comparativement aux autres types de changements (Boot et coll., 2006). Encore ici, les auteurs attribuent la cause principale de la CaC à un problème plutôt perceptif (une absence de l'attention) : les changements non pertinents et les mouvements des objets distracteurs dans la scène visuelle détournent l'attention de l'individu des changements pertinents à la tâche. L'individu n'ayant pas porté attention à ces derniers ne parvient pas à les détecter et à les rapporter (Boot et coll., 2006; Durlach, 2004; Vachon et coll., 2012).

## **CONTEXTE MULTITÂCHE DYNAMIQUE**

Dans les études recensées jusqu'à présent, les participants n'avaient qu'une seule tâche à effectuer, soit de détecter le plus rapidement possible des changements qui surviennent dans une scène visuelle statique (p.ex., Rensink et coll., 1997) ou dynamique (p.ex., St. John et coll., 2005). Ces études rapportent des taux considérables de CaC, malgré le fait que le seul objectif du participant soit de détecter et de rapporter les changements. Il n'a donc pas à partager son attention entre plusieurs tâches. Sa charge de travail n'inclut qu'une seule activité. Par contre, dans les environnements de travail complexes et dynamiques tels que le contrôle du trafic aérien, la surveillance par caméra et le combat de feux de forêt, la détection des changements est rarement la seule tâche à effectuer; elle fait partie des nombreuses sous-tâches des activités de l'opérateur. Par exemple, un contrôleur aérien, après avoir détecté que deux avions empruntent le même corridor aérien et s'apprêtent à entrer en collision, doit informer les avions concernés et diriger l'un d'eux vers une nouvelle trajectoire.

En plus de présenter les caractéristiques d'une scène visuelle dynamique (plusieurs objets en mouvement dans la scène; présence de changements pertinents et de changements non pertinents pouvant survenir à la fois simultanément et consécutivement), plusieurs aspects de ces environnements de travail les distinguent grandement des contextes unitâches statique et dynamique. Tout d'abord, ces environnements de travail sont caractérisés par un contexte multitâche. La détection des changements est l'une des tâches que l'opérateur doit accomplir simultanément. Il ne peut donc pas concentrer son attention sur un seul aspect de ses activités (p.ex., la détection des changements) sans qu'il ait de

coûts à la performance aux autres tâches. Il doit partager son attention entre les activités à effectuer. Dans ces circonstances, la quantité de ressources cognitives nécessaires pour détecter un changement est donc davantage limitée que dans un contexte unitâche, puisque les autres aspects de son travail exigent aussi beaucoup de ressources (Parasuraman, Cosenzo, & De Visser, 2009). Ensuite, la détection des changements est importante, mais est sous-jacente à une tâche de plus grande envergure, c'est-à-dire que le fait de détecter un changement n'est pas une fin en soi, mais permettra une réalisation plus optimale des autres sous-tâches et mènera à une meilleure performance. Lorsque l'individu détecte un changement, il doit réagir à ce changement (effectuer une autre tâche) et déterminer en quoi ce dernier a modulé sa conscience de la situation et ajuster sa prise de décision (Vachon et coll., 2012). Dans le cas inverse, lorsque l'individu manque un changement, il ne dispose pas de tous les éléments d'information nécessaires pour effectuer les autres sous-tâches ou prendre les meilleures décisions. Manquer un changement nuit donc à la performance des tâches de l'individu (Durlach, 2004; St. John et coll., 2005; Varakin et coll., 2004). Étant donné qu'il y a d'autres tâches que la détection des changements à effectuer, la charge de travail d'un contexte multitâche dynamique est plus élevée que celle associée à un contexte unitâche statique ou dynamique (Perry, Wiggins, Childs, & Fogarty, 2013). Une partie de cette charge de travail plus élevée provient de la pression temporelle associée à ce contexte. Une situation de travail dynamique évolue de façon autonome. L'individu doit prendre des décisions et effectuer ses tâches en temps réel afin de gérer correctement cette situation. Il se peut donc que la situation nécessite (immédiatement) de prendre une décision ou d'exécuter une sous-tâche en particulier à un moment où l'individu n'est pas complètement prêt à l'effectuer (p.ex., il n'a pas terminé d'effectuer une autre sous-tâche; Brehmer, 1992). Finalement, le caractère à haut risque des environnements complexes et dynamiques a aussi une incidence sur la pression temporelle ressentie par l'individu. Par exemple, un contrôleur aérien sait que s'il n'agit pas à temps, s'il ne détecte pas le changement d'altitude d'un avion à temps, il pourrait s'ensuivre des conséquences désastreuses telles que des pertes de vies humaines (Durlach, 2004; Varakin et coll., 2004). L'ampleur de la CaC et les moyens pour la prévenir n'ont que très rarement été étudiés dans un contexte multitâche dynamique. Peu d'études ont tenté de reproduire les caractéristiques de ces

environnements de travail afin d'examiner l'influence qu'elles exercent sur le processus de détection des changements. La présente thèse vise à pallier cette lacune dans la littérature.

L'étude de DiVita, Obermayer, Nugent et Linville (2004) est un rare exemple d'étude sur la CaC dans laquelle la détection des changements est l'une des tâches à effectuer par le participant. À l'aide d'une simulation par ordinateur des activités menées dans un centre opérationnel (*combat information center*), ils ont examiné la performance relative à la détection des changements lorsque les participants avaient aussi à évaluer la validité du codage de cordialité (*amity coding*) des véhicules se déplaçant dans un espace opérationnel. Dans un tel contexte, les activités des opérateurs incluent l'évaluation de la situation, la gestion des communications et la manipulation de plusieurs interfaces informatiques déployées sur différents écrans d'ordinateur. Cet environnement de travail est associé à une charge d'information visuelle très élevée. La nature des activités de l'opérateur le force à déplacer son attention d'un écran à l'autre lorsqu'il doit alterner entre les différentes tâches à effectuer. Il est donc possible que la CaC survienne lors de ces déplacements attentionnels. Dans l'expérience de DiVita et ses collègues (2004), les participants devaient surveiller deux moniteurs d'ordinateur; un premier affichant l'interface géospatiale et divers éléments d'information sur les aéronefs, les véhicules et les installations se trouvant dans l'espace opérationnel sous surveillance, et un deuxième écran affichant des alertes, des avis et des questions auxquelles ils devaient périodiquement répondre. Les participants devaient sélectionner les objets sur l'interface géospatiale, les classer selon leur intention (allié, neutre ou hostile) et déterminer si le code de cordialité correspondait à l'information contenue dans la mesure de proximité des dangers (*close control readout*). Un changement de code de cordialité d'un objet était considéré critique et devait être détecté par les participants. Au moment d'un changement critique, l'interface géospatiale devenait noire et une alerte apparaissait sur le deuxième écran pour informer les participants de la nature du changement. Les participants devaient par la suite sélectionner l'objet ayant subi le changement signalé dans l'interface géospatiale (voir Figure 5). Le nombre de sélections effectuées avant que les participants identifient correctement l'objet a été prélevé. Les résultats de cette étude révèlent que dans 28,8 % des essais, les participants sélectionnaient plus de deux objets avant d'identifier le bon objet ayant subi le changement. Dans environ

15 % des scénarios expérimentaux, la performance relative à la détection des changements était équivalente au hasard; les participants avaient sélectionné aléatoirement plus de trois objets avant d'identifier l'objet ayant subi le changement. Cette étude démontre l'importance de l'attention visuelle dans la CaC. Lorsque l'opérateur dirige son regard et donc son attention sur une interface donnée, il y a de fortes chances que l'opérateur manque un changement survenant sur une autre interface. Il est crucial de trouver des moyens technologiques qui permettent de surmonter ces diversions naturelles de l'attention causées par le contexte multitâche de certains environnements de travail.



Figure 5. Interface géospatiale de l'étude de DiVita et coll. (2004).

L'étude de Durlach et ses collègues (2008), un autre exemple de contexte multitâche dynamique, visait à évaluer l'habileté des participants à détecter des changements visuels survenant sur la carte de conscience de la situation (*situation awareness map*; Figure 6) du système informatique actuellement employé par l'armée américaine : *Force XXI Battle Command Brigade and Below* (FBCB2). En termes opérationnalisés, le FBCB2 collecte les informations sur la position des véhicules des forces ennemies et des forces alliées sur le champ de bataille, et les projette sur la carte de

conscience de la situation. Ce système est utilisé par des officiers (sur le terrain ou dans un centre de commandement) qui doivent déployer leurs troupes de façon à maximiser leur sécurité et de façon avantageuse par rapport aux troupes ennemies. Une particularité de ce système est que l'information affichée sur la carte de conscience de la situation n'évolue pas en temps réel, mais à des intervalles de temps précis (*near real-time update*; un hybride entre une scène visuelle dynamique et une scène visuelle statique). De ce fait, tous les changements survenant entre deux rafraichissements de l'image apparaîtront simultanément lors du prochain rafraichissement de l'image. Cette étude évaluait le niveau de CaC lorsque 1, 2 ou 3 changements critiques survenaient conjointement. Un changement critique pouvait être, soit l'apparition d'une icône (p.ex., la position d'une unité ennemie apparaissait sur la carte) ou la disparition d'une icône (p.ex., une unité alliée quittait le réseau tactique). Les résultats démontrent que la détection d'un changement était plus rapide et plus probable lorsque le changement survenait seul (79 % de détections correctes), comparativement à lorsqu'il survenait conjointement à un (75.6 %) ou deux (69 %) autres changements d'icône. Les signaux de transition de changements pertinents à la tâche qui surviennent simultanément rivalisent pour obtenir l'attention de l'individu; ainsi, il est rare que tous ces changements soient détectés. Autrement dit, certains de ces changements ne sont pas détectés puisque l'individu ne leur a pas porté attention (Boot et coll., 2006; St. John et coll., 2005). Comme il a été démontré auparavant, les apparitions d'icônes étaient détectées plus rapidement et plus facilement que les disparitions d'icônes. Les auteurs concluent que la capacité limitée de l'opérateur à traiter l'information visuelle de plusieurs changements qui surviennent simultanément pourrait être supportée par un outil qui répertorie tous les changements et qui peut être consulté en tout temps pour prendre connaissance des changements manqués (Durlach et coll., 2008). Cet outil d'aide devrait aussi privilégier un mode de signalement qui inclut l'apparition d'un signal ou d'un indice de l'occurrence d'un changement, puisque les apparitions sont plus facilement détectées que les disparitions et les modifications d'objets déjà présents dans la scène visuelle.

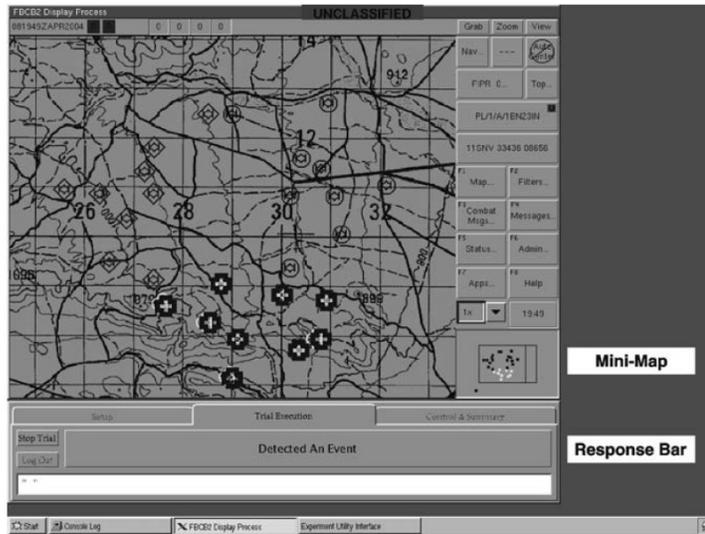


Figure 6. Carte de la conscience de la situation du système de commandement et contrôle FBCB2 dans l'étude de Durlach et coll. (2008).

## *Mouvements oculaires et identification d'une seconde source de CaC*

Au cours de la transition des études incluant un contexte unitâche statique vers des études incluant un contexte multitâche dynamique, certaines d'entre elles ont employé le suivi des mouvements oculaires afin d'examiner le déploiement de l'attention visuelle dans la détection des changements. Certaines d'entre elles ont d'ailleurs démontré que la CaC n'était pas seulement causée par l'incapacité de l'individu à diriger son attention sélective vers l'objet ayant subi un changement (voir Beck & Levin, 2003; Beck & van Lamsweerde, 2011; Hollingworth et coll., 2001; Mitroff et coll., 2004; Tse, 2004). Le suivi du déplacement du regard s'est révélé très utile pour déterminer comment (où et pendant combien de temps) un individu déploie son attention sur une scène visuelle (McCarley & Kramer, 2008; Rayner, 2009). Les mouvements oculaires se séparent en deux catégories : les fixations et les saccades. Une fixation est une période durant laquelle les yeux d'un individu restent pratiquement immobiles. Elle représente un moment durant lequel l'attention d'un individu est engagée vers une zone d'intérêt et pendant lequel de la nouvelle information peut être acquise et traitée. Une saccade est le mouvement balistique des yeux entre deux fixations. Elle représente le désengagement de l'attention pour changer

d'objet ou de zone d'intérêt. Durant une saccade, l'humain est aveugle et, donc, ne peut pas acquérir de nouvelles informations (Poole & Ball, 2006; Posner, 1980).

Plusieurs études sur l'attention et la mémoire abondent dans le sens de l'hypothèse de la correspondance (*eye-mind hypothesis*; Just & Carpenter, 1980) qui suggère une forte correspondance temporelle entre le lieu de fixation et le lieu du traitement de l'information (voir Awh, Armstrong, & Moore, 2006; Drieghe, Rayner, & Pollatsek, 2007; McCarley, & Kramer, 2008; Rayner, 2009). Les mouvements oculaires seraient non seulement importants pour l'encodage des éléments d'une scène visuelle (pour être encodé en mémoire, un élément doit avoir préalablement reçu l'attention de l'individu), mais aussi pour le maintien et le rappel de la représentation de la scène en mémoire (pour une revue, Tremblay & Saint-Aubin, 2009; Theeuwes, Belopolsky, & Olivers, 2009). Les mouvements oculaires semblent donc être impliqués à toutes les étapes du traitement de l'information, et être utiles pour tracer le chemin de l'attention visuelle de l'individu sur une interface lorsque l'individu doit effectuer une tâche de détection des changements.

Le modèle de Parker (1978), qui est cité et répliqué par Zelinsky (2001), souligne l'importance du rôle du regard dans une tâche de détection des changements et de l'information qu'une analyse des mouvements oculaires fournit sur la stratégie de déploiement de l'attention dans une telle tâche. La position des yeux sur la scène visuelle influencerait l'efficacité des opérations de comparaison entre la représentation de la scène en mémoire et celle de la scène une fois modifiée. Selon ce modèle, l'individu aurait tendance à garder son regard stable lorsqu'il analyse une scène visuelle, et surveillerait les régions périphériques de sa vision (régions extrafovéales de sa rétine dans lesquelles les détails de la scène sont en faible résolution) à l'affût d'un éventuel signal de transition associé à un changement (Kuhn & Frindlay, 2010; Zelinsky, 2001). Quand celui-ci pense avoir perçu un signal de transition, il effectuerait une saccade en direction de la portion de l'image dans laquelle le changement a plus de chances de s'être produit (saccade confirmatoire). Plus cette saccade est précise, c'est-à-dire que le point de fixation terminal de l'individu est prêt de la position du changement et que l'objet se situe dans la région fovéale de sa rétine (région à forte acuité visuelle), plus les opérations de comparaison pré-

post changement se feront en haute résolution et plus un grand nombre de détails de la scène pourra être traité (Kuhn & Frindlay, 2010). Cette stratégie *sit-and wait* favoriserait la détection des changements. Par contre, lorsque la position du regard aboutit loin de l'objet ayant subi un changement, les représentations en mémoire des scènes pré-post modification sont davantage dégradées, ce qui nuirait à la performance de détection des changements.

En plus de permettre l'acquisition d'information sur la stratégie de recherche visuelle idéale pour détecter un changement, le suivi des mouvements oculaires a permis de déterminer le rôle de certains facteurs reliés au traitement dirigé par les données et au traitement dirigé par les concepts dans la CaC. En contexte unitâche statique, Zelinsky (2001) a démontré que plus une scène se complexifie (quantité élevée et orientation similaire des objets), plus les participants ont tendance à abandonner la stratégie de déploiement de l'attention visuelle décrite par Parker (1978), c'est-à-dire de surveiller les régions extrafovéales de leur point de fixation afin d'y percevoir un changement. Ils recherchaient plus activement le changement et faisaient davantage de saccades oculaires pour déplacer leur focus attentionnel. Selon la suppression saccadique, plus l'individu fait de saccades, plus il passe de temps à être aveugle (Simon & Ambinder, 2005). Plus il déplace ses yeux, plus ses chances de percevoir et de porter son attention vers un changement diminuent.

Ce même résultat a été obtenu en contexte unitâche dynamique. Boot et ses collègues (2006) ont observé des différences individuelles quant à la stratégie de recherche visuelle choisie pour détecter les changements. Certains participants étaient des chercheurs actifs (*active scanners*) qui effectuaient plusieurs saccades et fixations (jusqu'à 20) durant les essais de 8 secondes. Ils croyaient à tort que s'ils cherchaient activement un changement, ils auraient de meilleures chances de le trouver. D'autres participants adoptaient la stratégie *sit-and-wait* : ils fixaient le centre de l'écran et tentaient de détecter les changements à partir de leur vision périphérique. Les auteurs ont constaté que plus les participants balayaient activement du regard la scène visuelle, plus ils manquaient de changements. Par contre, dans des environnements de travail complexes et dynamiques où la détection des changements est habituellement sous-jacente à plusieurs autres activités,

l'individu ne peut pas se permettre d'appliquer la stratégie *sit-and-wait* puisqu'il doit prêter attention à différentes parties de son interface pour accomplir ses autres sous-tâches et les consulter activement (Boot et coll., 2006; Vachon et coll., 2012). Étant donné qu'il doit effectuer des saccades oculaires pour voyager d'une partie de son interface à une autre, il est plus vulnérable à la source perceptive de la CaC. Pour prévenir cette source de CaC, les solutions technologiques de soutien à la détection devraient donc absolument pallier ces moments durant lesquels l'individu est aveugle. Ces solutions doivent aussi réduire au minimum le nombre de saccades oculaires.

Quelques études ont démontré que la CaC peut également survenir lorsque le changement se produit directement dans la zone de fixation de l'individu ou près de cette dernière (p.ex., Triesch, Ballard, Hayhoe, & Sullivan, 2003). L'attention sélective est donc nécessaire, mais ne garantit pas la détection des changements. Les regards aveugles de l'attention favoriseraient l'occurrence de la CaC (*attentive blank stares*; Caplovitz et coll., 2008). En employant le paradigme du clignotement, Caplovitz et ses collègues ont analysé les mouvements oculaires de participants ayant à détecter les changements qui survenaient dans des scènes visuelles statiques. Dans environ 40 % des essais expérimentaux, les participants n'ont pas réussi à détecter le changement bien qu'ils aient dirigé leur regard directement ou tout prêt de l'endroit où il s'est produit. Dans une étude sur la cécité inattentionnelle (c.-à-d., l'individu ne détecte pas un stimulus ou un événement inattendu dans sa scène visuelle; voir Imbert, Hodgetts, Parise et al., 2014; Mack & Rock, 1998), Simons et Levin (1998) ont quant à eux reproduit une situation de la vie réelle dans laquelle un piéton (un expérimentateur) demandait aux participants (échantillonnage accidentel) comment se rendre vers un édifice situé sur le campus de l'Université de Cornell. Au milieu de l'interaction entre l'expérimentateur-piéton et le participant, deux manutentionnaires (deux autres expérimentateurs) transportant une porte interrompaient la conversation en passant entre le piéton et le participant. Une fois que la vision du participant qu'avait de l'expérimentateur-piéton était obstruée par la porte, l'acteur jouant le piéton était changé pour un autre expérimentateur. Étonnamment, seulement la moitié des participants ont détecté le changement d'acteurs même s'ils avaient pris part activement à une discussion et que leur attention était portée sur l'interlocuteur. Ces résultats

confirment qu'il est parfois insuffisant d'accorder simplement son attention à la position d'un événement ou d'un changement pour pouvoir le détecter (Caplovitz et coll., 2008; Simons & Levin, 1998). Cela suggère qu'une certaine quantité de ressources attentionnelles est nécessaire pour prendre conscience qu'un changement s'est produit près du point de fixation de l'individu.

D'autres études ont vérifié si le phénomène des regards aveugles de l'attention pouvait se produire et causer la cécité inattentionnelle lorsque les objets qui produisent les événements inattendus sont manipulés par les participants. Les participants qui ont pris part à l'étude de Triesch, Ballard, Hayhoe et Sullivan (2003) avaient à manipuler des objets 3D dans un environnement virtuel produit par ordinateur. Ils devaient prendre des briques de différentes tailles et les déposer sur un tapis roulant selon une règle de décision qui variait de niveau de difficulté (p.ex., placer les petites briques sur le convoyeur le plus près et placer les grandes briques sur le tapis roulant le plus éloigné). À leur insu, les briques pouvaient changer de taille durant la manipulation, ce qui modifiait la façon de placer les briques sur le tapis roulant. Bien qu'ils n'aient pas été renseignés que de tels changements pouvaient se produire, le fait de les détecter était important pour la tâche des participants. Ces derniers recevaient comme consigne de rapporter à l'expérimentateur tout événement sortant de l'ordinaire. Les auteurs ont rapporté un niveau substantiel de cécité inattentionnelle (ou de CaC "implicite" tel que rapporté dans leur article) malgré le fait que les objets qui subissaient les changements étaient activement suivis par le regard des participants et que le résultat de ces changements de taille de briques affectait le choix du convoyeur sur lequel ils devaient mettre les objets.

Étant donné les preuves grandissantes que la CaC peut survenir même si le changement a reçu l'attention de l'individu, Vachon et ses collaborateurs (2012) ont réalisé une étude à l'aide du suivi des mouvements oculaires et de la pupillométrie afin de concrétiser l'existence de deux sources de CaC. Des travaux suggèrent que la variation du diamètre de la pupille est associée à la variation l'effort cognitif qu'un individu investit dans une tâche et à la variation de la charge de travail. En fait, une augmentation de la taille de la pupille serait associée à une augmentation de l'effort investi pour effectuer une tâche

et à une augmentation de la charge de travail (Hoeks & Levelt, 1993; Iqbal, Zheng, & Bailey, 2004). Une dilatation de la pupille serait aussi associée à la détection d'une cible visuelle à la position du point de fixation de l'individu, ce qui témoignerait de l'investissement d'un effort attentionnel pour détecter le changement (Privitera, Renninger, Carney, Klein, & Aguilar, 2010). Vachon et ses collègues font la distinction entre des changements qui sont manqués, du fait ils n'ont jamais reçu l'attention de l'individu, et des changements qui ont été regardés par l'individu, mais qui ne sont pas détectés consciemment par ce dernier en raison d'une insuffisance de ressources attentionnelles (échec des processus attentionnels). Plus précisément, la première source de CaC renvoie à l'idée que les changements n'ayant pas reçu l'attention de l'individu (source perceptive)—c.-à-d. ceux qui n'ont jamais été regardés—ont moins de chances d'être perçus et d'atteindre la conscience et, par conséquent, sont plus susceptibles de ne pas être détectés (Rensink et coll., 1997; Simons & Ambinder, 2005). La seconde source de CaC survient lorsqu'un changement est regardé à un moment où les processus attentionnels de l'individu sont surchargés par les exigences de la tâche à effectuer. À ce moment, une quantité insuffisante de ressources attentionnelles serait allouée à l'objet qui a subi le changement, ne permettant pas à l'individu d'en prendre conscience<sup>1</sup>. Cette incapacité à détecter le changement renvoie au phénomène des regards aveugles de l'attention (*attentive blank stares*) ou de regarder sans voir (Caplovitz et coll., 2008; Drew et coll., 2013; O'Regan et coll., 2000).

Dans la cadre de la thèse, la définition de la source attentionnelle de la CaC est élargie afin d'inclure les processus mnésiques, la compréhension et la prise de décision nécessaires à la détection des changements. Selon plusieurs auteurs, l'attention contrôle différentes fonctions cognitives, dont celles impliquées dans la détection des changements

---

<sup>1</sup> La source perceptive de la CaC est associée aux changements qui n'ont jamais été perçus par le système visuel et, donc n'ont pas reçu l'attention du participant. La source attentionnelle de la CaC, quant à elle, est associée aux changements qui ont été perçus par le système visuel, mais la demande attentionnelle des tâches de l'individu est trop grande pour permettre de poursuivre le traitement approfondi du stimulus et permettre au changement de parvenir à la conscience. La source perceptive peut se traduire par l'expression « ne pas regarder, donc ne pas voir », alors que la source attentionnelle est associée à l'expression « regarder sans voir ».

(Baddeley, 1993; Kane, Bleckley, Conway, & Engle, 2001; Shallice & Burgess, 1993). Elle chapeauterait la comparaison des états de la situation pré-post changement en mémoire, la compréhension du changement qui s'est produit (conscience de l'évolution de la situation) et la prise de décision (Lamme, 2003; Richards et al., 2012). Il se peut donc qu'un individu ne prenne pas conscience d'un changement, car il ne dispose pas suffisamment de ressources attentionnelles, soit (et entre autres) pour permettre l'encodage des éléments regardés, pour effectuer les comparaisons en mémoire, ou comprendre le changement qui s'est produit dans la situation (Beck & van Lamsweerde, 2011; Caplovitz et coll., 2008; Mitroff, Simons, & Levin, 2004). En résumé, la source perceptive de la CaC correspond à l'incapacité de déplacer son regard et son attention vers l'objet ayant subi un changement, alors que la source attentionnelle se définit par l'incapacité d'orienter suffisamment de ressources attentionnelles vers les objets ayant subi les changements pour permettre un traitement plus approfondi de l'information et effectuer les étapes nécessaires à la détection des changements.

Vachon et ses collaborateurs (2012) ont analysé les mouvements oculaires et les réponses pupillaires des participants qui jouaient le rôle d'un coordonnateur tactique sur une frégate dans une simulation par ordinateur d'un combat naval. Dans ce contexte multitâche dynamique, la détection des changements était sous-jacente à une tâche d'évaluation du risque et de gestion de la réponse (cf. DiVita et coll., 2004). Les participants devaient évaluer le niveau de risque des aéronefs qui apparaissaient sur leur radar (non-hostile, incertain ou hostile), juger de l'imminence du risque (proximité temporelle des aéronefs hostiles de leur navire) et neutraliser les contacts radars hostiles. La quatrième sous-tâche était de détecter les changements critiques : un aéronef passant d'un statut non menaçant à un statut hostile. Les résultats de cette étude révèlent que, parmi les changements critiques ayant reçu au moins une fixation avant et après qu'ils se soient produits, environ 18 % ont été manqués. Les auteurs ont calculé le pourcentage de variation de la taille de la pupille pour les changements fixés. Les changements non détectés fixés étaient associés à une augmentation importante de la taille de la pupille, mais qui n'atteignait pas la taille moyenne observée pour les changements détectés. Cela laisse supposer que même si les participants n'ont pas pris conscience de ces changements, une

certaine quantité d'effort attentionnel a été investie pour tenter de les détecter (cf. Privitera et coll., 2010). En fait, selon Vachon et ses collaborateurs, les signaux de transition produits par ces changements seraient captés automatiquement (de façon inconsciente) par le système visuel, mais l'individu serait incapable d'orienter suffisamment de ressources attentionnelles vers les objets ayant subi les changements pour permettre un traitement plus approfondi de l'information.

## **MODÈLE NSEEV**

Des efforts ont été faits afin de modéliser le déploiement attentionnel et les comportements oculaires dans des tâches de recherche visuelle et de détection des changements. Certains auteurs ont avancé que, de toute l'information contenue dans une scène visuelle, l'attention de l'individu sera d'abord portée sur les éléments qui prédominent selon leur importance par rapport à la tâche qu'il doit effectuer. Les détails associés à ces éléments seront les premiers à être encodés et à être représentés en mémoire (McConkie & Currie, 1996). Le degré d'importance de chacun des éléments présents dans une scène visuelle serait déterminé à la fois par le traitement dirigé par les données et par le traitement dirigé par les concepts (Porubanová-Norquist & Sikl, 2013). Selon les études recensées jusqu'à présent dans ce chapitre, il est clair que les propriétés de la scène ont une incidence sur la distribution de l'attention du participant. Le contraste objet/arrière-plan, la couleur, l'orientation, le contour et le mouvement d'un objet sont connus pour influencer sa saillance par rapport aux autres éléments présents dans la scène, et déterminent s'il attirera l'attention de l'individu ou pas. Hewlett et Oezbek (2012) ont montré que la complexité de la scène (le nombre d'éléments contenus dans l'image), le temps durant lequel le changement est visible et la durée du masque du paradigme du clignotement ont tous un impact sur le taux de CaC. Cependant, la combinaison de ces trois éléments augmente la probabilité qu'un changement soit manqué par l'individu. Par exemple, selon ces auteurs, la complexité de la scène se répercute sur le temps d'attention que chacun des éléments recevra de l'individu. Plus il y a d'éléments, plus l'individu doit gérer son temps et le partager entre tous les objets qu'il doit analyser, et moins ces derniers seront traités en profondeur. Si la durée du changement y est diminuée et la durée du masque y est

augmentée, l'individu aura encore moins de temps pour porter son attention sur l'objet ayant subi ledit changement, et la CaC a plus de chances de survenir (voir aussi Beck, Levin, & Angelone, 2007; Zelinsky, 2001).

Cependant, une forte saillance (une grande discriminabilité ou détectabilité) d'un changement ne garantit pas que l'objet en question capturera automatiquement l'attention (Wickens & Alexander, 2009). L'affectation de l'attention à une scène visuelle est aussi influencée par des facteurs reliés au traitement dirigé par les concepts tels que les connaissances et les attentes de l'individu, ainsi que les probabilités (Theeuwes et coll., 2009). Effectivement, il a été démontré que les changements qui surviennent dans les régions d'une scène visuelle préalablement jugées intéressantes par les participants sont détectés plus rapidement et plus facilement que ceux qui se manifestent dans les régions moins intéressantes (p.ex., Rensink et coll., 1997). Cela suggère qu'un individu a tendance à déployer son attention selon ses intérêts. Beck, Angelone et Levin (2004) ont avancé l'idée qu'un individu aurait des attentes quant à la probabilité qu'un certain changement survienne, et utilise ses attentes pour déployer son attention sur la scène visuelle et pour détecter les changements. Par exemple, dans le salon d'une maison, l'individu saurait que certains changements sont plus plausibles de se produire que d'autres. Les résultats de l'étude de Beck et ses collaborateurs (2004) ont démontré que les participants détectaient plus rapidement et un plus grand nombre de changements lorsque ces derniers sont plus probables et plausibles de survenir dans la vie réelle que lorsque ces changements ne surviennent que très rarement ou sont peu plausibles. D'autres études ont fait la preuve que les changements qui sont pertinents quant au contexte de la scène ou à la tâche à effectuer sont détectés plus rapidement que les changements non pertinents (p.ex., un couteau qui disparaît des mains d'une personne faisant la cuisine versus la disparition des lunettes du cuisinier). Cela suggère qu'un individu tend à déployer son attention sur les objets pertinents de la scène et à ne pas prendre en compte les objets non pertinents ou à leur prêter attention qu'en dernier (pour une revue, voir Porubanová-Norquist & Sikl, 2013).

Le modèle computationnel NSEEV (*Noticing = Salience, Expectancy, Effort and Value*) vise à intégrer les facteurs reliés au traitement dirigé par les données et les facteurs

reliés au traitement dirigé par les concepts identifiés par les études antérieures sur la recherche visuelle et la détection des changements afin de prédire la distribution de l'attention visuelle dans un espace de travail dynamique (Steelman, McCarley, & Wickens, 2011). Ce modèle prédit les comportements oculaires de l'individu (le pourcentage de temps passé à regarder une région d'intérêt avant l'apparition d'une cible et le nombre de mouvements oculaires effectués avant de fixer la cible après son apparition) sur une interface visuelle selon quatre facteurs : la saillance, l'effort, les attentes et la valeur. La *saillance* visuelle d'un élément d'information désigne son niveau de détectabilité par rapport aux autres parties d'information contenues dans la scène. Les auteurs distinguent deux types de saillance : la saillance statique, qui est le contraste entre l'objet d'intérêt et l'environnement qui l'entoure (voir Itti & Koch, 2000), et la saillance dynamique, qui représente les changements continuels (évolution) de la saillance statique (voir Yantis & Jonides, 1990). La distribution des fixations oculaires serait aussi influencée par l'*effort* requis pour déplacer son attention entre les différentes régions d'intérêt d'une interface visuelle, par les *attentes* de l'individu selon lesquelles la cible a plus de chances d'apparaître dans une région en particulier et par la *valeur* (pertinence quant à la tâche à effectuer) des différentes régions. Selon ce modèle, une région d'une scène visuelle qui est plus saillante, qui requiert peu d'effort pour être consultée, qui, selon les attentes des individus, a plus de chances de contenir la cible et qui contient de l'information de grande valeur sera davantage fixée et regardée par l'individu. Ce modèle a été validé, entres autres, à partir des données de mouvements oculaires de 17 pilotes d'avion commercial effectuant un vol dans un simulateur haute-fidélité d'un Boeing 747. Le modèle permettait de prédire 90 % de la variance des mouvements oculaires des pilotes pour toutes les régions d'intérêt et les phases de vol (voir Steelman et coll., 2011). Dans la présente thèse, ce modèle est utilisé afin d'interpréter les comportements oculaires des participants en contexte multitâche dynamique qui mènent à la CaC et de déterminer dans quelle mesure les moyens technologiques testés peuvent véritablement améliorer la détection des changements dans des conditions de travail très exigeantes.

## ***Solutions technologiques pour aider à la détection des changements***

Il a été établi que de nombreux facteurs liés à la fois au traitement dirigé par les concepts et au traitement dirigé par les données peuvent favoriser l'incidence des sources perceptives et attentionnelles de la CaC (p.ex., l'information concernant un changement n'est pas suffisamment saillante parmi l'ensemble de l'information contenue dans un système de surveillance). Les conséquences de ce phénomène peuvent être désastreuses dans un contexte de travail à haut risque et peuvent nuire à la performance des autres tâches de l'individu. Certains outils ont donc été développés pour soutenir la détection des changements, et par le fait même, pour aider l'individu à maintenir une conscience de la situation et à prendre de bonnes décisions. Smallman et St. John (2003) ont créé l'historique explicite des changements (CHEX, voir Figure 4) qui a pour but de faciliter la surveillance active d'un espace aérien et le maintien de la conscience de la situation. Le CHEX est une aide externe à la mémoire qui détecte et répertorie automatiquement tous les changements survenant dans la situation à l'intérieur d'un tableau intégré à la droite de l'interface géospatiale utilisée par l'opérateur. Contrairement aux systèmes de notifications visuelles qui signalent les changements directement sur l'interface géospatiale utilisée par l'opérateur (p.ex., les outils *Halo* et *Shadowmask*, Imbert et al., 2014) et aux contremesures cognitives qui retirent temporairement de l'information de l'interface géospatiale pour rendre les changements plus apparents (voir Dehais, Causse, & Tremblay, 2011), le CHEX est une section distincte de l'interface géospatiale qui fournit exclusivement de l'information additionnelle sous format textuel sur les changements qui sont survenus dans la situation. Il vise à soutenir la comparaison entre la perception actuelle de la situation et la représentation en mémoire de l'état passé de la situation qui sous-tend la détection des changements. Pour chaque entrée du tableau du CHEX, l'utilisateur obtient des renseignements sur l'identifiant (*ID*) de l'objet ayant subi un changement et sur le temps du changement, et a accès à une description de ce changement. Chaque entrée est reliée à son objet correspondant sur l'interface géospatiale. Autrement dit, le fait de sélectionner un

objet sur le radar met en surbrillance l'entrée dans le CHEX correspondant à l'objet sélectionné, et vice versa (*dynamic visual linking*; St. John & Smallman, 2008).

Dans l'étude de St. John et ses collègues (2005), le CHEX a été comparé à une condition sans outil et à trois autres solutions technologiques susceptibles d'aider à la détection des changements : deux types de reprises vidéo et un système de marqueurs explicites apparaissant sur tout objet ayant subi un changement et étant accompagné par un son indiquant l'occurrence de ce changement. La tâche des participants consistait à détecter le plus rapidement possible tout changement significatif (p.ex., croisement de la trajectoire de deux avions) survenant dans l'espace aérien qu'ils surveillaient activement et à rapporter explicitement la nature des changements. Contrairement au CHEX qui était implanté à la droite de l'interface géospatiale, les fonctionnalités des reprises vidéo et des marqueurs explicites étaient ajoutées directement à l'interface géospatiale utilisée par les participants pour effectuer leur tâche. Les participants de la condition CHEX devaient alors effectuer des saccades oculaires pour consulter le tableau de cet outil et pour revenir surveiller l'interface géospatiale, ce qui avait le potentiel d'augmenter le temps passé à être aveugle, donc à favoriser l'incidence de la source perceptive de la CaC. Pourtant, les résultats de cette expérience démontrent que les participants qui utilisaient le CHEX détectaient plus rapidement les changements significatifs, et faisaient moins d'omissions et d'erreurs que les participants qui utilisaient les autres outils. De plus, les participants de la condition CHEX rapportaient une charge de travail plus faible que ceux assignés aux autres conditions. Selon cette étude, le CHEX était l'outil le plus efficace pour prévenir la CaC. Les auteurs concluent que la supériorité du CHEX provenait du fait qu'il soutenait les deux composantes de la tâche du participant : la détection et l'identification des changements. Par exemple, les marqueurs explicites aidaient seulement la composante « détection » et les participants devaient inférer ce qui s'était passé en partant d'indices contextuels présents sur l'interface géospatiale, alors que le CHEX décrivait les changements dans son tableau. Selon les auteurs, le tableau du CHEX représentait le meilleur compromis entre l'accès à de l'information supplémentaire sur les changements et l'augmentation de sources de distraction sur l'interface géospatiale. Le CHEX n'ajoutait pas l'information concernant les changements directement sur l'interface géospatiale déjà chargée, ce qui limitait le nombre

de distracteurs. Il semble donc préférable de forcer un nombre plus grand de saccades oculaires pour consulter une aide externe à l'interface principale d'un système de surveillance plutôt que de surcharger cette dernière d'information supplémentaire sur les changements. Le CHEX est un outil très utile pour soutenir la détection des changements dans un contexte unitâche dynamique.

Une critique importante de cette étude porte sur le fait que la détection des changements était l'unique tâche à effectuer par les participants. Toutefois, les individus en situations multitâches dynamiques effectuent la détection des changements de façon sous-jacente à une tâche de plus grande envergure qui est constituée de plusieurs sous-tâches à réaliser simultanément. Par exemple, dans un contexte de défense aérienne, la détection des changements est inhérente à l'évaluation du risque qui exige l'intégration de plusieurs sources d'information, l'exécution de plusieurs autres sous-tâches qui sont parfois concurrentielles et l'identification d'information clé sur laquelle baser la prise de décision (Liebhaber & Feher, 2002). L'efficacité du CHEX doit être évaluée dans un contexte multitâche dynamique avant de le désigner comme un outil véritablement utile pour la détection des changements dans un environnement de travail réel. De plus, il serait important d'évaluer son niveau de prévention (réduction) des deux sources de CaC (pas seulement son niveau global de prévention de la CaC) identifiées par Vachon et ses collaborateurs (2012) et de déterminer, selon le modèle NSEEV, comment il influence les comportements oculaires de l'individu pour mener à une meilleure détection des changements (Steelman et coll., 2011).

Compte tenu de la distinction de deux sources de CaC, il est possible que le CHEX soit une arme à double tranchant en contexte multitâche. D'une part, si les participants manquent un changement parce que leur attention était ailleurs sur l'écran pour effectuer une autre sous-tâche (première source), le CHEX offre une deuxième chance à l'utilisateur de le détecter en répertoriant en permanence dans son tableau l'information qui lui est associée. Il n'a qu'à le consulter s'il croit avoir manqué des changements. D'autre part, fournir une source supplémentaire d'information visuelle à surveiller pourrait augmenter la charge cognitive de l'environnement de travail, particulièrement si les ressources

attentionnelles des participants sont déjà presque sollicitées à pleine capacité en raison de la nature de la tâche primaire. En effet, dans des environnements de travail multitâches dynamiques tels que le contrôle aérien, l'information à traiter est principalement présentée visuellement (voir DiVita et coll., 2004; Durlach et coll., 2008). Le fait de fournir une source additionnelle d'information visuelle à traiter dans un environnement déjà chargé par ce type d'information pourrait augmenter la charge cognitive associée au travail de l'individu. Cela serait particulièrement néfaste dans un contexte multitâche, étant donné que les ressources attentionnelles de l'individu sont souvent utilisées à presque pleine capacité (Perry et coll., 2013). L'accès au contenu du tableau du CHEX pourrait augmenter la charge de travail de l'individu et réduire la quantité de ressources attentionnelles disponibles pour effectuer ses tâches, dont celles nécessaires pour détecter un changement. L'ajout du CHEX à l'interface utilisée par l'individu pour effectuer l'ensemble de ses tâches pourrait involontairement augmenter le risque d'échecs attentionnels et exacerber la deuxième source de CaC (l'individu affecte une quantité insuffisante de ressources attentionnelles à un changement et n'en prend pas conscience; Vachon et coll., 2012).

Une version simplifiée du CHEX a été conçue dans le cadre de la présente thèse pour pallier le potentiel effet négatif du CHEX sur la seconde source de CaC (Vallières, Hodgetts, Vachon, & Tremblay, 2012). L'Historique des changements récents (HCR) offre la même fonctionnalité de détection automatique des changements (pertinents et non pertinents) que le CHEX, mais répertorie une quantité réduite d'information sur ces derniers dans son tableau. En effet, le contenu du tableau du CHEX peut être considéré comme redondant et a le potentiel de surcharger l'individu d'information visuelle : il décuple l'information qui est normalement accessible à partir des autres parties de l'interface utilisées par l'individu pour effectuer ses tâches. Par exemple, dans l'étude de St. John et ses collaborateurs (2005), lorsque le CHEX signale et répertorie, en format texte, un croisement des trajectoires de deux avions, ce croisement est visible dans l'interface géospatiale de l'individu. Pour réduire la charge en information du CHEX, le tableau du HCR ne répertorie que les quatre derniers changements survenus dans la situation dynamique surveillée et, contrairement à son prédécesseur, il ne décrit pas ces changements. En effet, on ne retrouve dans le tableau du HCR que l'identité de l'objet

ayant subi un changement et le moment auquel ce dernier est survenu. Bien que cette modification de l'outil vise à empêcher qu'il nuise à la seconde source de CaC (plutôt que d'améliorer), l'archive du HCR n'est pas permanente, c'est-à-dire que l'individu a accès à l'information d'un changement jusqu'à temps que quatre nouveaux changements soient survenus. Cela pourrait donc avoir un impact sur la source perceptive de la CaC. Le HCR doit aussi être évalué dans un contexte multitâche afin de déterminer son efficacité pour soutenir la détection des changements.

### ***Objectifs de la présente thèse***

La présente thèse vise, d'une part, à déterminer l'ampleur de la CaC et, d'autre part, à vérifier l'efficacité du CHEX et de sa version simplifiée (le HCR) pour soutenir la détection des changements dans un contexte expérimental qui simule les conditions de charge de travail élevée et de multitâche qui caractérisent les véritables opérations de commandement et contrôle (C2; par exemple, les opérations militaires, le contrôle du trafic aérien, la gestion de crise). Ce contexte est différent de celui qui a été employé pour créer et valider le CHEX, à savoir un contexte unitâche de détection des changements (voir St. John et coll., 2005). Le C2 est l'acte de planifier, diriger, coordonner et contrôler l'emploi et la distribution des ressources disponibles par un individu en autorité ou un leader dans le but d'accomplir une mission. Le C2 inclut l'ensemble des caractéristiques d'un environnement de travail multitâche dynamique. Le décideur doit tenir compte simultanément de plusieurs éléments qui sont en relation souvent non linéaire, et qui évoluent dans le temps à la fois indépendamment des actions du décideur et en fonction de ses décisions (Ilachinski, 1996; Brehmer, 1992). Alors, une série de décisions est nécessaire pour atteindre les buts d'un ensemble de tâches et de sous-tâches, et elles sont interdépendantes (les décisions sont contraintes par les décisions antérieures). Étant donné l'évolution continue de la situation, les décisions doivent être prises en temps réel et, parfois, sans que l'opérateur soit nécessairement prêt cognitivement à les prendre (Edwards, 1962).

Le micromonde S-CCS (Lafond et coll., 2009; Vachon et coll., 2012) est utilisé pour simuler une tâche de contrôle du risque aérien dans laquelle le participant joue le rôle

d'un opérateur radar qui doit détecter (et gérer) des changements critiques tout en effectuant la tâche d'évaluation du risque et de gestion de la réponse (ERGR). La détection des changements est sous-jacente à la tâche ERGR qui nécessite de catégoriser les aéronefs apparaissant sur un écran radar selon leur niveau de risque (non-hostile, incertain ou hostile), de planifier la réponse envers les aéronefs hostiles selon leur niveau d'imminence du risque et d'exécuter cette réponse. La détection des changements est donc une sous-composante d'une tâche de prise de décision dynamique plus complexe et des objectifs de la mission de l'opérateur. Ainsi, dans ce contexte multitâche et de charge de travail élevée, les ressources cognitives limitées de l'opérateur nécessaires pour repérer les changements dynamiques survenant dans la situation surveillée sont déjà soumises à des pressions puisque les autres sous-tâches nécessitant la catégorisation et la planification demandent aussi des ressources attentionnelles. Une différence entre les études en laboratoire portant sur la CaC et le contexte multitâche de C2 qui est simulé dans la présente thèse est que les opérateurs ont rarement à signaler explicitement les changements qu'ils détectent dans leurs interfaces comme objectif de leur mission. La détection correcte d'un changement pertinent à la tâche de l'opérateur est plutôt présumée lorsqu'il fait l'action qui est appropriée afin d'y répondre (Vachon et coll., 2012).

Le CHEX s'est avéré utile dans l'étude de St. John et ses collaborateurs (2005), mais pour être considéré comme un outil efficace de soutien à la détection des changements en C2, il doit d'abord être validé dans ce type d'environnement de travail multitâche à tempo élevé qui, par sa nature, est susceptible de nécessiter ce genre d'outil d'aide à la décision. La présente thèse adopte une approche d'évaluation cognitive et holistique de l'efficacité des outils d'aide à la détection. Les mouvements oculaires des participants sont enregistrés et analysés afin d'évaluer l'effet du CHEX et du HCR sur les deux sources de CaC. D'ailleurs, l'efficacité du HCR, une version ayant une charge en information plus faible que le CHEX, est aussi évaluée afin de déterminer s'il fournit suffisamment d'information pour aider à la détection des changements sans provoquer la potentielle surcharge de travail qui est associée au design actuel du CHEX. Grâce à cette approche holistique, la capacité du CHEX et de sa version simplifiée à prévenir la CaC est non seulement déterminée par leur efficacité à améliorer la détection des changements (fonction

cognitive qu'ils visent à soutenir), mais aussi par leur effet, positif ou négatif, sur les autres aspects des activités du participant : l'évaluation du risque (catégorisation) et la gestion de la réponse (planification des actions). Le suivi des mouvements oculaires contribue aussi au travail théorique de la thèse. Il permet d'établir comment les composantes du modèle NSEEV (saillance, effort, valeur et attentes) peuvent expliquer les comportements attentionnels dans la tâche ERGR et jusqu'à quel point les solutions technologiques peuvent véritablement améliorer la détection des changements dans des conditions de travail multitâches dynamiques (Steelman et coll., 2011).

La thèse est séparée en trois autres chapitres. L'objectif du chapitre 2 est de décrire la stratégie méthodologique qui est employée pour étudier la CaC et les moyens technologiques visant à prévenir ce phénomène. Principalement, il définit et justifie l'emploi d'une approche macro-cognitive expérimentale, et décrit en détail le C2 maritime, les fonctions cognitives impliquées dans cette activité, ainsi que le micromonde S-CCS et la tâche ERGR. Le chapitre 3 consiste en la démarche empirique complète de la thèse qui comprend deux expériences : la première vérifie l'efficacité du CHEX et du HCR à soutenir la détection des changements dans un contexte multitâche dynamique, et la seconde teste l'efficacité du CHEX dans un contexte unitâche dynamique similaire à celui de St. John et ses collaborateurs (2005). Finalement, le chapitre 4, en plus d'énoncer les contributions méthodologiques, théoriques et pratiques de la thèse, propose des modifications au design du CHEX afin d'améliorer sa capacité à soutenir la détection des changements, et présente d'autres solutions technologiques pouvant aider cette fonction cognitive.



## **CHAPITRE II**

### *STRATÉGIE MÉTHODOLOGIQUE : APPROCHE MACRO- COGNITIVE EXPÉRIMENTALE*

Le but du chapitre 2 est de décrire la stratégie méthodologique employée dans la démarche empirique du chapitre 3 pour atteindre les objectifs de la présente thèse. Cette approche méthodologique doit d'une part permettre d'étudier l'ampleur de la CaC et d'évaluer les moyens technologiques développés pour la prévenir dans des conditions expérimentales contrôlées afin d'obtenir des résultats valides et fiables. D'autre part, elle doit permettre de simuler la complexité et les multiples caractéristiques d'un environnement de travail multitâche dynamique pour examiner l'influence qu'elles exercent sur la détection des changements et sur l'efficacité des moyens technologiques évalués, et pour ainsi obtenir des résultats écologiquement valides. Contrairement aux études sur la CaC dans lesquelles la détection des changements est l'unique tâche à effectuer et la seule fonction cognitive étudiée (p.ex., O'Regan et coll., 1999; Boot et coll., 2006, etc.), les objectifs de la présente thèse nécessitent l'emploi d'une plateforme expérimentale qui permet à la fois de simuler la surveillance et la gestion d'une situation de C2 maritime et les activités cognitives qui leur sont associées, et d'y implémenter et de tester l'efficacité d'outils d'aide à la détection des changements. L'argument avancé est que de soutenir cette fonction cognitive et de prévenir (ou diminuer) la CaC permettrait d'améliorer l'efficacité et la qualité de la prise de décision lors de la gestion d'une situation de contrôle du trafic aérien opéré en C2 maritime (Durlach, 2004; Smallman & St. John, 2003; Varakin et coll., 2004).

À l'aide de cette plateforme, l'expérimentateur doit être en mesure de reproduire, dans un environnement expérimental contrôlé, la tâche de prise de décision dynamique en C2 maritime (ainsi que ses multiples facettes, activités et sous-tâches) et de créer des scénarios dans lesquels la détection des changements est mise à l'épreuve et est cruciale à l'exercice des autres sous-tâches du participant, mais dans lesquels elle n'est pas la tâche centrale. L'expérimentateur doit aussi être capable de reproduire une interface visuelle que l'individu utilise pour effectuer ses tâches et les outils d'aide à la décision testés en respectant un certain niveau de fidélité par rapport aux tâches et aux interfaces rencontrées lors de véritables opérations de C2 maritime afin de garantir un bon niveau de validité externe. La stratégie méthodologique proposée tente de répondre au dilemme exposé par Brehmer et Dorner (1993) : le désir de tout chercheur étudiant la prise de décision

d'accorder autant d'importance à la fidélité et à la validité des résultats et des conclusions d'une expérience, et à la généralisation de ces derniers à des contextes de travail réels (Gray, 2002). L'approche de la présente thèse établit un compromis entre assurer un bon contrôle expérimental (validité interne) des conditions dans lesquelles la détection des changements est étudiée et l'efficacité des outils de soutien à cette fonction cognitive est évaluée, et la généralisation des résultats obtenus aux véritables environnements multitâches dynamiques (validité externe; Lebiere & Best, 2009).

### ***Micro-cognition versus Macro-cognition***

Ce dernier point nécessite de prendre une certaine distance quant à la méthodologie des études traditionnelles de la psychologie expérimentale qui portent sur la cognition humaine et le traitement de l'information. Cette méthodologie a été décriée par plusieurs auteurs comme étant réductionniste. La micro-cognition est l'étude en laboratoire d'un seul aspect de la cognition pris en isolation à l'aide de conditions expérimentales très contrôlées. Normalement, on teste l'effet d'une manipulation de l'expérimentateur sur un processus cognitif, une variable mesurée. Cette approche a permis d'identifier les processus cognitifs qui sont à la base de la perception et de la pensée, et d'examiner, une par une, les conditions qui ont une incidence sur la cognition. Par exemple, les études sur la CaC en contexte unitâche statique adoptaient une approche micro-cognitive. Elles ont examiné l'effet d'une perturbation visuelle sur une fonction cognitive, soit la détection des changements (p.ex., paradigme du clignotement, Rensink et coll., 1997), et ont, entres autres, permis de déterminer le rôle de l'attention sélective dans la CaC. Les recherches en micro-cognition sont souvent reconnues pour accorder très peu d'importance au contexte dans lequel l'individu effectue une tâche (Klein, Ross, Moon, et al., 2003). En effet, le participant recruté pour ces études se retrouve dans des conditions de laboratoire peu représentatives du monde réel dans lequel il évolue (Gonzalez, Vanyukov, & Martin, 2005).

Étant donné que le but des expériences en micro-cognition est focalisé sur l'examen d'un seul aspect de la cognition humaine, les chercheurs tentent de contrôler un maximum

de facteurs confondants pouvant nuire ou altérer l'expression de la fonction cognitive à l'étude. Par conséquent, les résultats de ces expériences sont généralement très fiables concernant cette fonction et permettent la formulation de liens de causalité entre les variables indépendantes et dépendantes (Brewer, 2000). Par contre, lorsqu'il en vient à l'étude d'un phénomène ou d'une activité plus complexe telle que la prise de décision dans un contexte de surveillance et de gestion d'une situation multitâche et dynamique, le fait que le participant soit placé dans un environnement de travail artificiel visant à maximiser le contrôle expérimental serait suffisant pour que cette tâche soit effectuée différemment à ce qui serait normalement observé dans le monde réel (Hollnagel, 2001). Une approche micro-cognitive n'est pas appropriée pour étudier la CaC lorsque la détection des changements est l'une des nombreuses activités de prise de décision effectuées par l'individu. La complexité et le dynamisme d'un environnement de travail multitâche sont difficiles à opérationnaliser dans un contexte traditionnel de laboratoire (Klein et coll., 2003).

La macro-cognition se distingue de la micro-cognition par l'importance qu'elle porte aux éléments de pression temporelle, de risque élevé, de complexité et d'incertitude qui sont inhérents à une majorité de situations multitâches dynamiques (p.ex., contrôle du trafic aérien; Klein et coll., 2003). La macro-cognition est moins réductionniste que la micro-cognition, puisqu'elle s'intéresse à la fois aux fonctions cognitives impliquées dans une tâche et aux caractéristiques d'un contexte de travail pouvant moduler l'exécution de cette tâche. Par exemple, une étude en macro-cognition ne s'intéresserait pas seulement à examiner la détection des changements, mais à évaluer l'émergence de cette fonction cognitive parmi l'ensemble des tâches à effectuer et à observer comment les conditions de travail d'un environnement multitâche dynamique non manipulées par le chercheur semblent influencer cette fonction cognitive. Effectivement, les tenants de cette approche affirment que les fonctions cognitives impliquées dans la prise de décision seraient plus fidèlement étudiées dans un contexte de travail naturel à l'aide de recherches sur le terrain (*Natural Decision-Making*; Klein, 2008). Par exemple, l'observation directe, les entrevues avec des experts et l'analyse de protocole verbal (*think-aloud* d'experts qui effectuent des

tâches) permettent de prélever des données réalistes, et qui représentent mieux la complexité des activités et du milieu de travail dans lequel les sujets à l'étude évoluent.

La macro-cognition s'intéresse aux fonctions macro-cognitives qui résultent de l'interaction de plusieurs processus cognitifs et qui ne pourraient pas émerger dans un contexte de micro-cognition (ce contexte implique généralement l'étude d'un seul construit de la cognition à la fois). La macro-cognition permet d'étudier la détection de problèmes (qui inclut la détection des changements), l'adaptation, la coordination, la planification, la conscience de la situation et la prise de décision (Klein et coll., 2003). Par contre, le manque de contrôle expérimental des méthodes de collecte de données en milieu naturel augmente la difficulté d'obtenir des résultats statistiquement valides et empêche la formulation de tout lien de causalité entre les variables à l'étude. Elles ne peuvent qu'établir des associations entre les variables d'intérêt puisqu'aucune disposition n'est prise pour exclure les effets des facteurs confondants, ce qui limite la fiabilité des conclusions (Brewer, 2000). Par exemple, si un individu rapporte lors d'une entrevue qu'il a manqué des changements critiques dans l'état de la situation qu'il surveillait, cette incapacité peut être associée au contexte multitâche de son travail, mais être aussi associée à d'autres conditions de travail non contrôlées. De plus, ce type de recherche et de méthode de collecte de données est souvent plus dispendieux que les expériences en laboratoire qui sont effectuées sous la bannière de la micro-cognition et peut être difficile à réaliser étant donné le caractère à haut risque de certaines situations multitâches dynamiques (p.ex., le combat d'un feu de forêt; Stallings, 2007). Cependant, les résultats d'expériences en milieu naturel sont obtenus dans de véritables conditions de travail qui ne sont pas altérées par les manipulations d'un expérimentateur. Ils sont associés à un haut niveau de validité externe et sont plus facilement généralisables (Klein et coll., 2003).

### ***Simulation fonctionnelle***

Brehmer et Dörner (1993, p. 172) énoncent très bien la dualité entre la micro-cognition et la macro-cognition : « In field research there is too much [complexity] to allow for any more definite conclusions, and in laboratory research, there is usually too little

complexity to allow for any interesting conclusions. ». La présente thèse adopte donc une approche macro-cognitive expérimentale qui tente de rallier les positions opposées de la micro-cognition et de la macro-cognition, ainsi que leurs avantages respectifs, en créant des expériences qui contrebalancent de bons niveaux de validités interne (typique de la micro-cognition) et externe (typique de la macro-cognition) à l'aide d'une simulation fonctionnelle d'une tâche de prise de décision dynamique et du contexte de travail dans lequel elle est effectuée (Brehmer, 2004; Brehmer & Dörner, 1993; Gonzalez et coll., 2005; Jobidon, Rousseau, & Breton, 2004). En fait, une simulation fonctionnelle est une approche empirique qui permet d'émuler à différents niveaux de fidélité une situation du monde réel tout en permettant la manipulation de variables indépendantes, le contrôle des variables confondantes et la possibilité de répliquer plusieurs fois le même scénario. Elles permettent de recréer et de manipuler trois caractéristiques fondamentales des situations multitâches de prise de décision dynamique : leur complexité, leur dynamisme et leur opacité (Gonzalez, 2005).

## **COMPLEXITÉ**

Les situations multitâches de prise de décision dynamique sont complexes, puisque l'individu doit souvent effectuer plusieurs tâches de façon simultanée et doit prendre en compte plusieurs éléments d'information avant de prendre chacune de ses décisions. Ces tâches et ces éléments d'information sont interconnectés et ce, souvent de façon non linéaire (Funke, 1995). Par conséquent, il n'y a pas qu'une seule façon de gérer des situations de prise de décision dynamique. Selon Bar-Yam (2003), la complexité d'une tâche peut être quantifiée en fonction du nombre de bonnes et de mauvaises manières d'effectuer la tâche. Plus la probabilité de sélectionner une option erronée plutôt que correcte afin d'accomplir une tâche est grande, plus cette dernière est considérée comme complexe. Il arrive aussi que les buts de deux tâches entrent en conflit. Une décision prise pour agir sur une composante particulière de la situation peut involontairement influencer une autre composante (effet secondaire; Gonzalez et coll., 2005). De plus, il est difficile pour l'individu de considérer tous les éléments d'information (ainsi que tous les effets qu'une décision peut avoir sur l'état de la situation) qui lui permettraient de prendre la

décision optimale. Il doit souvent se contenter de consulter qu'une partie de ces éléments qui lui permettent d'opter pour une décision qui est satisfaisante (Gigerenzer & Todd, 1999; Shah & Oppenheimer, 2008). Une simulation fonctionnelle est idéale pour manipuler la charge de travail et la complexité associées à un environnement de travail multitâche. Elle permet d'étudier la détection des changements lorsqu'elle est sous-jacente à une tâche de prise de décision plus complexe et lorsqu'elle peut entrer en conflit avec l'exécution des autres sous-tâches du décideur. Une simulation fonctionnelle peut émuler une situation dans laquelle l'individu doit partager son attention entre plusieurs activités. La détection d'un changement dans la situation offre à l'individu un élément de plus sur lequel baser sa prise de décision.

## **DYNAMISME**

Le fait qu'il est difficile pour l'individu de considérer tous les éléments d'information disponibles avant de prendre une décision se rattache aussi au dynamisme des situations de prise de décision. Ces situations évoluent à la fois de façon autonome et en fonction des décisions prises par l'individu. Ce dernier doit donc agir en temps réel tout en considérant l'effet de ses décisions précédentes (Edwards, 1962). Il arrive que l'individu ne soit pas complètement prêt à prendre une décision, mais la situation exige qu'il doive faire un choix. Étant donné la pression temporelle élevée, il est possible que l'individu ne puisse pas consulter de façon exhaustive tous les éléments d'information nécessaires pour prendre une décision optimale (Brehmer, 1992; Gigerenzer & Todd, 1999; Shah & Oppenheimer, 2008). Dans une simulation fonctionnelle, il se peut que l'individu ait manqué un changement puisqu'il effectuait une autre sous-tâche qui était plus pressante pour assurer un bon contrôle de la situation.

## **OPACITÉ**

L'opacité d'une situation renvoie à l'accessibilité indirecte des éléments d'information nécessaires pour prendre une décision et des liens entre les décisions. Bien que ces éléments soient disponibles, ils ne sont seulement accessibles si le décideur sait où les retrouver. Pour connaître l'état d'une situation, l'individu doit consulter et interroger

activement les fonctionnalités du système qu'il utilise pour la gérer. Il arrive souvent que le décideur ne réussisse à comprendre qu'une partie de la situation. Les liens entre les tâches à effectuer, les éléments d'information et les décisions à prendre doivent être inférés par l'individu qui se retrouve dans la situation à gérer et à contrôler (Brehmer, 1992; Gonzalez et coll., 2005). Une simulation fonctionnelle permet d'étudier la CaC lorsque la détection des changements n'est pas la tâche principale, mais contribue à la gestion d'une situation complexe et dynamique. Effectivement, lorsque l'individu détecte un changement, il accède à de la nouvelle information pertinente à sa prise de décision dont il n'aurait pas disposé s'il était demeuré aveugle à ce changement. La détection des changements serait une des manières d'accéder à de l'information pertinente pour la prise de décision dans une situation opaque.

## **MICROMONDE**

Selon la taxonomie de Gray publiée en 2002, il existe cinq types de simulations fonctionnelles de tâches de prise de décision dynamique qui varient en complexité et en réalisme : les simulations à haute-fidélité de systèmes complexes, les simulations à haute-fidélité de systèmes simples, les mondes réduits (*scaled worlds*), les micromondes et les tâches traditionnelles en laboratoire (Gray, 2002). Des exemples de ces cinq types de simulations fonctionnelles couvrent plusieurs domaines de travail en passant par les opérations militaires, la sécurité civile et les réponses d'urgence. Une simulation fonctionnelle peut être complexe et peut représenter fidèlement la réalité comme la reproduction d'un centre de gestion de crise en sécurité civile du laboratoire Co-DOT utilisant la plateforme SYnRGY (voir Figure 7; Gagnon, Couderc, Rivest, Banbury, & Tremblay, 2011) et un simulateur de vol (voir Dehais, Tessier, Christophe, & Reuzeau, 2010).



*Figure 7.* Plateforme expérimentale SYnRGY sur la gestion de crise en sécurité civile.

Une simulation fonctionnelle peut aussi être simple et émuler qu'une partie d'une tâche réelle telle que le micromonde Duress II simulant seulement deux composantes de la gestion des systèmes hydrauliques et thermiques (voir Figure 8, Christoffersen, Hunter, & Vicente, 1998). Étant donné que chaque type de simulation fonctionnelle a ses avantages et ses inconvénients, et exerce une influence différente sur les validités interne et externe qu'auront les résultats d'une expérience donnée, les objectifs d'un projet de recherche doivent guider le choix de la simulation appropriée (Gray, 2002). Dans la présente thèse, un micromonde est utilisé pour étudier l'ampleur de la CaC et les outils de soutien à la détection des changements dans un contexte de surveillance et de gestion d'une situation complexe et dynamique pour les raisons mentionnées dans la section suivante.

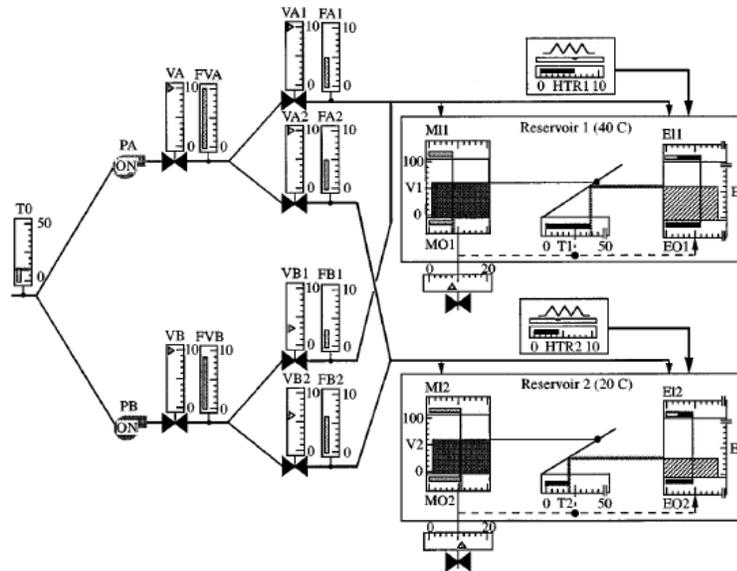


Figure 8. Interface du micromonde DURESS II (tirée de Christoffersen et coll., 1998).

Un micromonde est une simulation dynamique et interactive contrôlée par ordinateur qui recrée les caractéristiques essentielles d'une tâche de prise de décision du monde réel (Brehmer & Dörner, 1993). En effet, un micromonde ne simule pas tous les aspects d'une tâche réelle, mais seulement les aspects liés aux fonctions cognitives et aux comportements qui font l'objet du projet de recherche. Cela réduit la validité écologique d'une telle simulation, mais permet de bien suivre le fonctionnement cognitif des participants qui effectuent les tâches (Gonzalez et coll., 2005; Gray, 2002; Martin, Lyon, & Schreiber, 1998). La validité écologique est une sous-composante de la validité externe et réfère au degré de correspondance entre les interfaces, les procédures et les conditions de travail simulées en laboratoire, et celles qui sont rencontrées naturellement (p.ex., à quel point l'interface géospatiale utilisée par le participant ressemble à celle utilisée par un véritable contrôleur de trafic aérien). Généralement, un micromonde offre un niveau de réalisme mondain, mais un niveau de contrôle expérimental qui s'apparente aux expériences en micro-cognition et qui permet d'établir des liens de causalité entre les variables à l'étude. La Figure 9 schématise les niveaux de validité interne et de validité externe typiquement observés dans les études en laboratoire et les recherches sur le terrain, ainsi que le compromis offert par un micromonde. Cet outil de simulation permet d'étudier les fonctions cognitives qui sous-tendent la prise de décision dynamique dans un contexte

de travail sans risque, et ce, lorsque les études sur le terrain ne peuvent pas être effectuées pour des raisons éthiques, logistiques ou pratiques (p.ex., le risque de pertes de vies humaines lors du contrôle du trafic aérien; Brehmer, 1992; Gonzalez et coll., 2005). Un micromonde semble donc approprié pour étudier la détection des changements dans des conditions de travail contrôlées et relativement fidèles aux véritables environnements multitâches dynamiques.

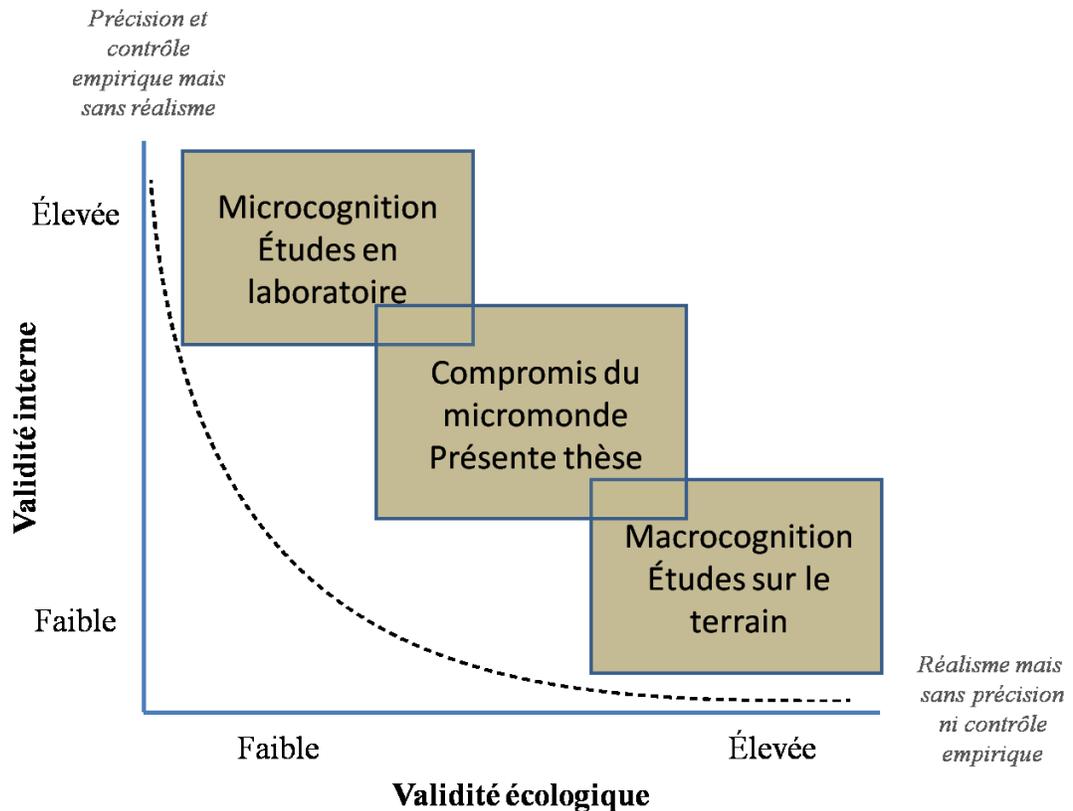


Figure 9. Distribution du réalisme et du contrôle expérimental en fonction de la validité interne et de la validité externe.

Selon Elliot, Dalrymple, Schiflett et Miller (2004), le réalisme des interfaces, des procédures et des aspects techniques du contexte de travail simulé est de moindre importance lorsque les scénarios de la simulation sont assez réalistes pour offrir un bon niveau de fidélité fonctionnelle (c.-à-d. ils représentent des situations réelles du domaine de travail). En d'autres mots, un micromonde est l'outil de simulation idéal lorsque l'étude porte sur les fonctions cognitives impliquées dans une tâche de prise de décision

dynamique, plutôt que sur les aspects physiques de la tâche (p.ex., la fidélité de la reconstruction des interfaces géospatiales d'un contrôleur aérien). Un micromonde doit être une simplification d'une situation réelle afin de s'assurer d'une bonne compréhension du comportement observé chez des sujets non experts (Brehmer, 2004). Plus la situation simulée est complexe (plus on se rapproche d'une étude sur le terrain), plus il est difficile d'établir des liens de causalité (Gray, 2002). Par contre, une trop grande simplification ne permettra pas d'observer les comportements complexes associés à la prise de décision dynamique. Un micromonde suit alors l'approche de la fidélité psychologique : la calibration (trouver le degré adéquat) de la complexité des interfaces, des procédures et des conditions de travail simulées afin d'assurer que des participants non experts soient en mesure d'effectuer la tâche, soient motivés par cette dernière, et que l'accent de l'étude demeure l'évaluation des fonctions cognitives impliquées dans la prise de décision dynamique (Elliot et coll., 2004). Dans la présente thèse, le rôle, les responsabilités et les composantes de la tâche du participant qui sont simulés par le micromonde ont été simplifiés pour conserver le focus de la démarche empirique sur l'évaluation de la CaC et des moyens pour prévenir son occurrence lors de la surveillance et de la gestion d'une situation complexe et dynamique.

Les micromondes permettent de simuler des situations qui sont difficiles ou impossibles à reproduire (p.ex., le combat de feux de forêt; Granlund, Johansson, & Persson, 2001). Par contre, ces derniers demeurent des simplifications de situations réelles et ne permettent pas une généralisation directe des résultats obtenus. La généralisation des résultats est tributaire de la validité de la théorie qui sous-tend l'étude; si la tâche simulée dans le micromonde est suffisamment fidèle à la tâche retrouvée dans le monde réel (Brehmer, 2004). Lorsqu'un micromonde est créé selon les recommandations de sujets experts dans le domaine de travail simulé et selon des paradigmes expérimentaux valides, cet outil de simulation serait le meilleur compromis entre les études sur le terrain et les études traditionnelles en laboratoire. Il permettrait d'établir des relations causales entre les variables d'intérêt qui seraient généralisables aux tâches de prise de décision dynamique réelles (Brehmer, 2005). Un micromonde est l'outil approprié pour examiner la détection des changements dans un environnement expérimental contrôlé qui simule de façon

fonctionnelle une situation de prise de décision en commandement et contrôle (C2) maritime.

### ***Prise de décision en commandement et contrôle maritime***

Le C2 consiste en la direction et la gestion des ressources disponibles par une entité à qui on a conféré l'autorité et le leadership pour accomplir une mission (Keane, 2005). La définition du C2 est générale et témoigne de l'omniprésence de ces activités dans plusieurs domaines de travail. Bien que le C2 soit principalement associé aux opérations militaires, on le retrouve dans plusieurs autres environnements extrêmes de travail comme le combat de feux de forêt (voir Lafond, Tremblay, Dubé, Rousseau, & Breton, 2010), la gestion de crise en sécurité civile (voir Gagnon et coll., 2011), le contrôle du trafic aérien (voir Giraudet, Bérenger, Imbert, Tremblay, & Causse, 2014), et la médecine d'urgence (voir Kramer, Dubé, Parush et coll., 2012), où des vies humaines sont en danger. Des concepts reliés au C2 (souvent énoncés différemment) sont aussi observés dans des environnements de travail sans risque pour les vies humaines tels que les sports, le droit, la gestion d'entreprises et les jeux vidéo (p.ex., Dreier, 2012; Richards, 2004). La tâche de prise de décision dynamique et le contexte de travail qui sont simulés par le micromonde de la présente thèse sont fortement inspirés des véritables opérations de C2 maritime pratiquées sur les frégates de l'armée canadienne de classe Halifax (voir Benaskeur & Kabanza, 2009). Le C2 maritime consiste en des opérations de défense navale qui sont effectuées en mer, au large des côtes d'un pays, par opposition au C2 littoral qui est pratiqué près des côtes d'un pays.

Le C2 est un ensemble d'activités qui mène au contrôle d'une situation complexe et dynamique. Bien que la détection des changements soit un aspect central des tâches de C2, elle est généralement l'une des nombreuses sous-tâches à être effectuées simultanément. Le décideur doit gérer sous pression temporelle élevée une multitude de ressources et de systèmes hétérogènes qui interagissent ensemble, et ces interactions sont non-linéaires et opaques (elles ne sont pas évidentes, ces liens ne sont pas directement divulgués au décideur). L'ensemble des activités de C2 est compromis si le décideur manque un

changement dans l'état de la situation qu'il tente de gérer et de contrôler. Par exemple, dans le cas du combat d'un feu de forêt, le chef des opérations doit planifier les déplacements sur le territoire de divers types d'unités (p.ex., camions de pompiers, bulldozer à tranchées, camions-citernes de ravitaillement, etc.) pour limiter la propagation du feu, évacuer les résidents des maisons à risque et sauver des vies humaines. S'il manque un changement dans la direction du vent, il ne déploiera pas ses unités de façon adéquate, ce qui peut mener à l'embrassement de maisons et à des pertes de vies humaines (Tremblay, Vachon, Lafond, & Kramer, 2011). Dans le contexte maritime simulé dans cette thèse, l'officier responsable des opérations doit considérer l'information collectée par plusieurs capteurs différents (p.ex., rapports d'intelligence), gérer un ensemble de systèmes et de méthodes de réponses contre les menaces (p.ex., la dissuasion), parfois se défendre contre des attaques survenant de façon simultanée, et doit prendre les meilleures décisions possibles afin d'atteindre les objectifs de sa mission malgré ses contraintes (p.ex., les règles d'engagement) et de protéger son navire et ses occupants (Benaskeur & Kabanza, 2009; Brehmer, 2007).

Le C2 maritime est l'exemple parfait d'un environnement multitâche dynamique. Les ressources cognitives des décideurs dans ce contexte sont mobilisées à pleine capacité par les multiples tâches qu'ils doivent effectuer simultanément. Ils doivent détecter les changements dans l'état de la situation pour la gérer adéquatement. La détection des changements, bien qu'elle soit sous-jacente à toutes ces activités, est primordiale pour maintenir une conscience de la situation et pour prendre les meilleures décisions. Par exemple, s'il ne remarque pas le changement de valeur d'un capteur, l'officier basera ses décisions sur un rapport d'intelligence erroné. Pour défendre son navire et neutraliser les menaces qui l'entourent, l'officier doit atteindre le plus haut niveau de conscience de la situation : l'anticipation (Endsley, 1995). Il doit non seulement percevoir les éléments et les propriétés de l'environnement qui pourraient contraindre ou suggérer des séries d'actions, mais il doit comprendre les éléments perçus avant d'être en mesure de projeter les séries d'actions possibles dans le futur. Lorsqu'il atteint le dernier niveau de conscience de la situation, l'officier peut évaluer les effets possibles de différentes séries de décisions et choisir la plus appropriée pour défendre son navire contre les menaces (Breton &

Rousseau, 2005; Endsley, 1995; Klein, 2008). La détection des changements est nécessaire pour acquérir et maintenir une conscience de la situation. Si l'officier manque un changement, il ne peut pas comprendre complètement la situation et il ne peut pas anticiper les effets de ses décisions pour choisir la meilleure action. Il est donc important de créer, de tester et de valider des outils de soutien à la détection des changements dans un contexte simulé de C2 maritime pour déterminer lequel est le plus efficace pour aider les officiers à acquérir et maintenir une conscience de la situation et, par le fait même, pour augmenter leur sécurité et celle de leur équipage lors des missions.

## **FONCTIONS COGNITIVES IMPLIQUÉES DANS LE C2**

Les activités impliquées en C2 comprennent la planification, la direction, la coordination, et le contrôle de l'affectation et du déploiement des ressources disponibles pour atteindre les objectifs d'une mission. La réalisation de ces activités nécessite la mise en action d'une variété de fonctions cognitives telles que le suivi de la situation, la recherche d'information (visuelle, auditive, etc.), la reconnaissance, l'apprentissage causal, la planification, le jugement et la prise de décision (Gonzalez et coll., 2005). De plus, plusieurs chercheurs affirment que le succès d'une mission de C2 est tributaire de l'habileté du ou des décideur(s) à bien gérer ses (leurs) ressources cognitives sous pression temporelle (Garstka & Alberts, 2004).

Plusieurs modèles ont été développés pour décrire les activités de C2. Tous situent et démontrent l'importance de la détection des changements dans les opérations de C2 (voir Alberts, Garstka, Hayes, & Signori, 2001; Brehmer, 2005; Garstka & Alberts, 2004; Lawson, 1981; Wohl, 1981). L'ensemble de ces modèles laisse supposer que le C2 peut se résumer en deux phases. Durant la phase problème, le décideur doit être conscient de ce qui l'entoure, comprendre la situation dans laquelle il se retrouve et déterminer quel est le problème à résoudre. La détection des changements serait primordiale dans cette phase, puisque les changements sont partie intégrante de l'état de la situation et la CaC nuirait à la conscience que l'individu a de cette dernière. Durant la phase solution, le décideur doit choisir, planifier et réaliser la série de décisions nécessaires pour résoudre le problème. Un

décideur ayant manqué des changements dans l'état de la situation n'aurait pas tous les éléments nécessaires pour effectuer un raisonnement optimal.

Suite à une synthèse des modèles de C2, Lafond, Vachon, Rousseau et Tremblay (2010) séparent les fonctions cognitives impliquées dans le C2 en trois catégories : 1) le suivi de la situation, 2) le contrôle de l'attention et 3) la planification et la coordination des activités. 1) Le suivi de la situation comprend la perception, la reconnaissance et l'interprétation des éléments contenus dans un environnement de travail afin de développer une conscience de la situation. La détection des changements est l'une des fonctions cognitives qui déterminent l'efficacité du suivi de la situation. Selon ces auteurs, il est important de tester le suivi de la situation d'un décideur en employant le paradigme de la CaC lors d'une simulation d'une situation de C2. Les scénarios de cette simulation devraient inclure des changements imprévus dans l'état de la situation auxquels l'opérateur devra régir. Autrement dit, l'opérateur effectue ses tâches et à divers moments d'un scénario l'état de la situation change. Il doit ajuster sa prise de décision selon ces changements. Le fait de manquer un changement nuirait à sa conscience de la situation et aux autres sous-tâches de C2 à effectuer. 2) La deuxième catégorie concerne le déplacement volontaire et la capture de l'attention. Les auteurs affirment qu'un déploiement efficace de l'attention est un élément clé dans la réalisation des activités de C2. Il a été démontré que plusieurs facteurs dirigés par les données et dirigés par les concepts affectent le déploiement de l'attention et que ce dernier joue un rôle important dans la détection des changements (p.ex., saillance, attentes, valeur et effort; Steelman et coll., 2011). Il est important de déterminer comment ces facteurs influencent la détection des changements lors d'une simulation des opérations de C2 pour mieux orienter la conception des interfaces visuelles et d'outils d'aide à la décision. Un déploiement de l'attention plus efficace sur une interface pourrait améliorer la détection des changements et, donc assurer un meilleur suivi de la situation (Lafond et coll., 2010). 3) La planification et la coordination des activités consistent en la réalisation des multiples tâches impliquées dans le C2 selon l'ordre de priorité dicté par la situation. Lors d'un changement de priorité, le décideur doit interrompre la tâche qu'il effectue et accomplir la tâche qui est la plus pressante. Encore ici, la détection des changements est sous-jacente à cette fonction et

permet de détecter les modifications dans l'ordre de priorité des tâches à réaliser. Par exemple, si le décideur détecte une nouvelle menace dans l'espace opérationnel sous surveillance, il doit interrompre ce qu'il faisait et traiter cette menace pour protéger son navire.

## DESCRIPTION DES TÂCHES IMPLIQUÉES DANS LE C2 MARITIME

Cette section décrit les tâches de C2 maritime afin de mieux comprendre les origines du micromonde employé dans la présente thèse et la tâche de prise de décision dynamique qui y est simulée. Le C2 maritime est un environnement de travail multitâche dynamique. Tel qu'illustré par la Figure 10, les activités impliquées dans le C2 maritime peuvent se diviser entre quatre fonctions, chacune étant composée d'un ensemble de tâches qui doivent être effectuées dans des délais raisonnables pour assurer le succès de la mission et impliquent une série de décisions à prendre : 1) l'élaboration d'une représentation de la situation (*picture compilation*), 2) l'évaluation de la menace (*threat evaluation*), 3) l'évaluation de la capacité d'engagement (*engageability assessment*), et 4) la gestion des puissances de combat (*combat power management*).

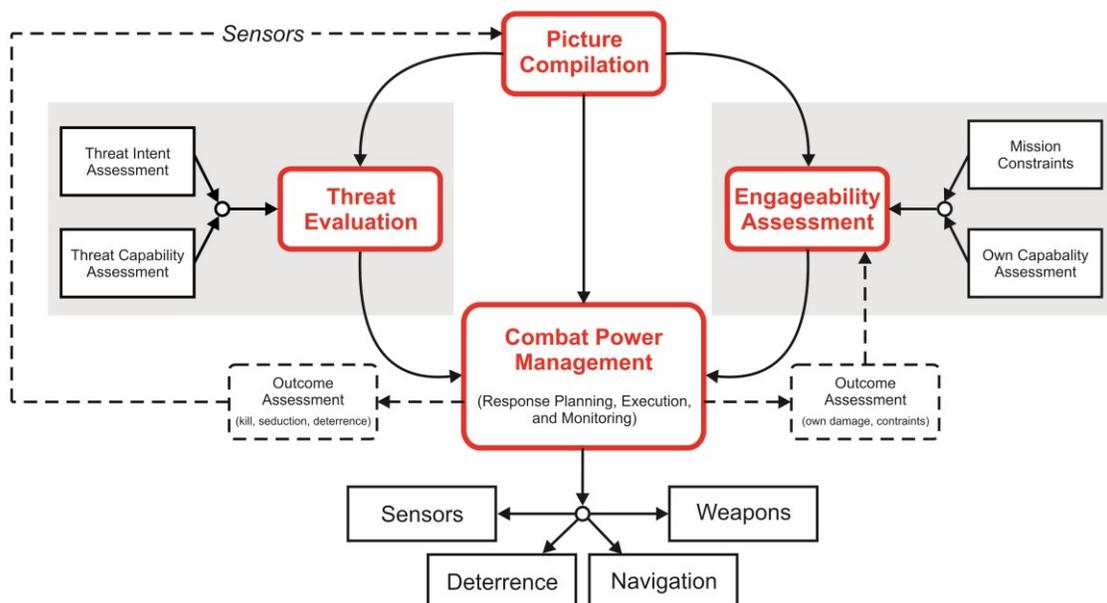


Figure 10. Vue d'ensemble des composants et des tâches comprises dans les activités de C2 maritime (adaptée de Benaskeur & Kabanza, 2009).

L'élaboration d'une représentation de la situation consiste à rassembler l'information provenant d'un capteur ou d'une combinaison de plusieurs capteurs (p.ex., radar, rapports d'intelligence) et de créer une représentation géospatiale des objets aériens, navals, sous-marins ou terrestres qui entourent le navire (Benaskeur & Kabanza, 2009). La représentation géospatiale aide au premier niveau de conscience de la situation en permettant au décideur d'avoir connaissance des objets et de les localiser dans l'environnement immédiat de son navire (Endsley, 1995; Breton & Rousseau, 2005). L'évaluation de la menace est l'une des composantes principales du C2 maritime et vise à déterminer si chacun des objets présents dans la représentation géospatiale a l'intention (*threat intent*) et est en mesure (*threat capability*) d'infliger des dommages au navire ou à des forces alliées (Benaskeur & Kabanza, 2009). Le résultat de l'évaluation de la menace permet de déterminer quels sont les objets qui nécessitent une action de la part du décideur et contribue à sa compréhension de la situation (Endsley, 1995; Breton & Rousseau, 2005). L'évaluation de la capacité d'engagement vise à déterminer si les différents systèmes et différentes méthodes de réponses contre les menaces disponibles sur le navire sont prêts à être utilisés. Suite à cette évaluation, le décideur entreprend la gestion des puissances de combat qui est l'attribution d'une méthode de réponse à une menace à neutraliser. Cette composante du C2 peut être décomposée en une succession de trois phases : la planification de la réponse, l'exécution de la réponse envers les menaces et son suivi, et l'évaluation des résultats de la réponse. L'évaluation de la capacité d'engagement et la gestion des puissances de combat permettent de déterminer quelle série de décisions sera prise pour résoudre le problème et d'exécuter ce plan d'action. Il nécessite de projeter ces séries d'actions dans le futur et de choisir celle qui est la plus optimale pour contrôler la situation.

### ***Micromonde S-CCS***

Le micromonde Simulated Combat Control System (S-CCS) a été créé sur mesure pour étudier la cognition durant la prise de décision dynamique dans un contexte de C2 maritime. Il a d'ailleurs été utilisé dans plusieurs autres études (p.ex., Lafond et coll., 2009; Tremblay, Vachon, Rousseau, & Breton, 2012; Vachon, Tremblay, Nicholls, & Jones,

2011). Historiquement, plusieurs micromondes ont été utilisés pour étudier la prise de décision dynamique (individuelle ou en équipe) dans un contexte de C2 tels que Argus (Schoelles & Gray, 2001), DDD (Miller, Young, Kleinman, & Serfaty, 1998), TANDEM (Dwyer, Hall, Volpe, Cannon-Bowers, & Salas, 1992), et TITAN (NTT Systems; Bryant, 2007). La plupart de ces environnements de simulation par ordinateur ne comprennent que les activités reliées à l'évaluation de la menace et n'exigent pas des participants y prenant part de planifier et d'appliquer des mesures défensives contre les objets menaçants, et ignorent d'autres aspects importants du C2 tels que l'évaluation de l'imminence des menaces.

S-CCS est une émulation simplifiée des caractéristiques essentielles du C2 maritime qui est pratiqué à bord des frégates de la marine canadienne qui cible les fonctions cognitives fondamentales impliquées dans ce type d'activités. Des experts dans le domaine du C2 maritime ont validé les composantes du micromonde S-CCS afin d'assurer que la simulation est suffisamment fidèle aux activités réelles et de garantir une bonne validité écologique des résultats (Benaskeur & Kabanza, 2009; Benaskeur, Irandoust, Baker, & Banbury, 2009). Cet outil offre une simulation fonctionnelle de l'évaluation de la menace et de la gestion de la réponse (c.-à-d. la planification des mesures de défenses, leur exécution et leur suivi) qui sont exercées sur un navire de l'armée. Il est à noter que le contexte de défense navale est un domaine de travail parmi plusieurs autres et que les fonctions cognitives pouvant être étudiées à l'aide de S-CCS sont aussi impliquées dans plusieurs autres contextes de C2. Les résultats obtenus à l'aide de S-CCS visent à être généralisés à l'activité de surveillance et gestion d'une situation complexe et dynamique.

Un scénario typique dans S-CCS comprend plusieurs aéronefs (contacts) qui se déplacent dans l'environnement immédiat de la frégate, dont certains peuvent représenter une menace pour le navire et nécessitent d'être neutralisés. Le participant joue le rôle d'un coordonnateur tactique à bord d'un navire de la marine canadienne qui doit demeurer attentif aux changements effectués par les aéronefs dans l'espace opérationnel sous surveillance et détecter les changements critiques lorsqu'ils surviennent. Il doit aussi catégoriser les aéronefs selon leur niveau de risque et les mettre en ordre de priorité, et

planifier et exécuter les mesures défensives contre les contacts hostiles. La simulation est dynamique, puisqu'elle évolue à la fois selon différents scénarios créés par l'expérimentateur et selon les actions des participants.

La flexibilité de la configuration de S-CCS permet la manipulation de son interface visuelle, la création sur mesure de différents scénarios, l'implémentation de systèmes d'aide à la décision pour tester leur efficacité, la reproduction de divers paradigmes issus de la psychologie cognitive expérimentale, la collecte et la gestion d'une base de données, et l'extraction de plusieurs métriques relatives à ces paradigmes et de mesures de performance. Bien qu'il soit nécessaire de connaître le langage de programmation C++, la disposition et les propriétés (taille, couleur, etc.) de chaque élément de l'interface visuelle de S-CCS peuvent être déterminées et manipulées par l'expérimentateur via un fichier XML. De ce fait, l'expérimentateur peut choisir de donner accès aux participants à un système d'aide à la décision en ajoutant ses fonctionnalités à l'interface de S-CCS. La Figure 11 montre deux configurations de l'interface S-CCS qui ont été programmées aux fins de la thèse. L'interface illustrée par l'image du haut contient davantage de fonctionnalités (présence des boutons de classification, de priorisation et de neutralisation; ces éléments sont décrits dans la section suivante) que celle illustrée par l'image du bas.



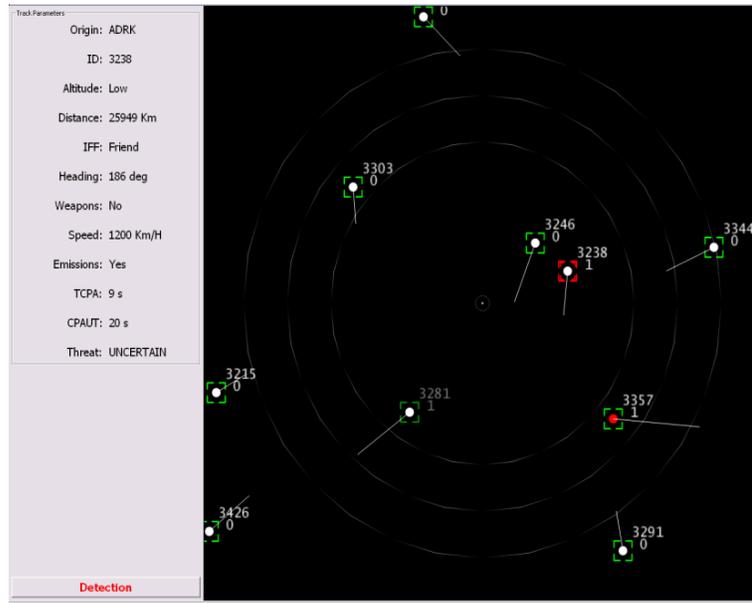


Figure 11. Exemple de deux interfaces S-CCS différentes pouvant être programmées.

Les paramètres d'un scénario peuvent être facilement définis en utilisant un autre fichier XML (voir Figure 12) et un outil d'édition (outil de simulation des scénarios permettant de visualiser le résultat de ce fichier). Dans ce fichier, l'expérimentateur détermine le nombre d'aéronefs qui apparaîtront dans l'espace opérationnel sous surveillance, ainsi que leur identifiant, leurs attributs (pays d'origine, altitude, identification d'intention, présence d'armement, présence d'émissions militaires), leur trajectoire (direction, distance), leur vitesse et les changements que certains feront au cours du scénario. Dans la Figure 12, l'entête permet, entre autres, de déterminer la condition expérimentale associée à ce scénario et sa durée (dans ce cas-ci, 240 secondes, soit 4 minutes). Ensuite, chaque aéronef qui sera présent dans le scénario est désigné par l'attribut « track ». La première ligne de chaque « track » détermine quand cet aéronef apparaîtra durant le scénario et quelles seront les valeurs de ses attributs. Chaque « track » peut être associée à un « event », c'est-à-dire à un changement non pertinent à la tâche. La ligne « event » est insérée après celle décrivant ses attributs de départ et son temps d'apparition. Une « track » peut aussi être associée à un « event\_critical » qui est un changement pertinent à la tâche. Ces lignes de commandes permettent de déterminer quels sont les attributs de l'aéronef qui changeront et quand ce changement aura lieu durant le scénario. Une « track » peut être associée à la fois à un changement pertinent (« event\_critical ») et à

un changement non pertinent (« event »). C'est aussi via ce fichier XML que l'expérimentateur peut insérer des interruptions de tâches et de la distraction auditive au scénario pour reproduire les paradigmes d'interruption et de distraction issus de la psychologie cognitive expérimentale (Lafond et coll., 2010). L'expérimentateur peut alors ajuster avec précision la difficulté, la pression temporelle et la charge cognitive d'un scénario, gérer l'apparition/la disparition des objets, et déterminer le moment d'un événement imprévu.

```

3 <own_ship assess_hit_delay="2.0" radar_lock_delay="2.0" weapon_speed="1250.0">
4
5 <hit_range chance_to_hit="0.0" id="1" width="2000.0"/>
6
7 <hit_range chance_to_hit="100.0" id="2" width="41537.0"/>
8
9 <hit_range chance_to_hit="50.0" id="3" width="12560.0"/>
10
11 <hit_range chance_to_hit="25.0" id="4" width="12560.0"/>
12 </own_ship>
13 <message file="masc3_instructions.html"/>
14
15 <burst complexity="0" condition="0" duration="240" id="55">
16
17 <track altitude="0" bearing="482.415701299" distance="11328.3498553" heading="220.619093612" id="3281" iff="3" origin="2" pitch="0" speed="1300">
18 <event emission="1" heading="276.510258511" speed="1700.16962296" time="20"/>
19 </track>
20 <track altitude="0" bearing="205.477242827" distance="29634.7055653" heading="455.005242827" id="3357" iff="2" origin="3" pitch="0" speed="1500.0207901">
21 </track>
22 <track altitude="1" bearing="429.477242827" distance="45939.7055653" heading="266.005242827" id="3238" iff="3" origin="1" pitch="0" speed="1200.0207901">
23 <event emission="1" heading="185.510258511" speed="1200.16962296" time="15"/>
24 <event critical="1" heading="263.510258511" iff="1" speed="800.16962296" time="25" weapon="1"/>
25 </track>
26 <track altitude="0" bearing="314.477242827" distance="67769.7055653" heading="480.005242827" id="3303" iff="2" origin="1" pitch="0" speed="1200.0207901">
27 <event heading="535.510258511" speed="1000.16962296" time="10"/>
28 <event heading="480.510258511" speed="600.16962296" time="30" weapon="1"/>
29 <event critical="1" emission="1" iff="1" speed="1400.16962296" time="45"/>
30 </track>
31 <track altitude="1" bearing="513.477242827" distance="99000.7055653" heading="350.005242827" id="3291" iff="2" origin="1" pitch="0" speed="1100.0207901">
32 <event critical="1" emission="1" heading="299.510258511" iff="1" speed="1800.16962296" time="65" weapon="1"/>
33 </track>
34 <track altitude="0" bearing="231.477242827" distance="130000.7055653" heading="410.005242827" id="3426" iff="3" origin="1" pitch="0" speed="1500.0207901">
35 <event heading="450.010258511" speed="1000.16962296" time="60" weapon="1"/>

```

Figure 12. Fichier XML contenant les paramètres d'un scénario ainsi que les attributs des aéronefs et les changements qu'ils effectuent.

Chaque action du participant ainsi que son impact sur la situation de C2 maritime est enregistrée dans une base de données sous format .csv pouvant être synchronisée avec les données du suivi des mouvements oculaires (le suivi des mouvements oculaires est décrit dans une section subséquente). Ces données sont suffisamment détaillées pour permettre des analyses quantitatives. En fait, chaque ligne de la base de données qui combine les données de S-CCS et les mouvements oculaires correspond à un enregistrement (à chaque 120 millisecondes) de l'état de la situation dans le micromonde S-CCS et à la saisie de la fixation oculaire qui lui est associée. De cette façon, la position du regard du participant est déterminée à chaque enregistrement de l'état de la situation S-CCS. Ceci permet aussi de déterminer si un changement effectué par un aéronef a été

regardé par le participant ou non, ce qui est utile pour mesurer la prévalence des deux sources de CaC en situation de C2 maritime.

### **CONFIGURATION DE S-CCS POUR LA PRÉSENTE THÈSE**

L'interface visuelle de S-CCS incorpore différentes fonctionnalités de base qui offrent un soutien cognitif à certaines sous-tâches comprises dans les activités de C2 simulées. Elle est séparée en trois parties : une interface géospatiale tactique de type écran radar (Figure 13, numéro 1), une liste de paramètres en format texte (Figure 13, numéro 2) et un ensemble de boutons d'action (Figure 13, numéro 3). 1) L'écran radar représente les objets qui évoluent en temps réel dans l'environnement aérien immédiat du navire du participant. Son arrière-plan est noir et le point blanc en son centre correspond à la frégate du participant. Un aéronef (contact) peut apparaître à tout endroit sur l'écran radar et est illustré par un point blanc entouré par un cadre vert. Les contacts se déplacent sur le radar à différentes vitesses et empruntent des trajectoires variées. La ligne blanche qui est attachée à chacun des contacts pointe vers la direction qu'ils empruntent. La taille de la ligne est un indicateur de la vitesse de l'aéronef : plus elle est grande, plus l'aéronef se déplace rapidement. Pour sélectionner un aéronef, les participants doivent cliquer de gauche avec la souris de l'ordinateur sur son icône et son cadre deviendra rouge. 2) La liste de paramètres, située en haut à gauche de l'interface, fournit de l'information sur 11 attributs de l'aéronef sélectionné. Le choix des paramètres (ou attributs de l'aéronef) s'est reposé sur une revue de la littérature portant sur l'évaluation de la menace en situation de C2 maritime (p.ex., Liebhaber & Smith, 2000; Liebhaber & Feher, 2002). 3) Les boutons d'action permettent aux participants de déterminer le niveau de menace et le niveau d'imminence de la menace des contacts radar, et de neutraliser les aéronefs hostiles. Les événements qui surviennent durant la simulation sont scénarisés par l'expérimentateur, et ce dernier peut manipuler un grand nombre de variables telles que le nombre de missiles pouvant être envoyés par le participant pour se défendre, la valeur des paramètres de chacun des aéronefs, le nombre de contacts présents sur le radar, etc.



Figure 13. Interface S-CCS. Trois zones y sont délimitées : 1) l'écran radar, 2) la liste des paramètres et 3) les boutons d'action.

## TÂCHE D'ÉVALUATION DU RISQUE ET DE GESTION DE LA RÉPONSE SIMULÉE DANS S-CCS

En tant que coordonnateur tactique, la tâche des participants est composée de trois sous-tâches de base qui doivent être effectuées simultanément et à tout moment durant les scénarios expérimentaux : 1) l'évaluation du risque, 2) l'évaluation de l'imminence du risque, 3) la neutralisation des aéronefs hostiles. Premièrement, les participants doivent classifier tous les aéronefs qui apparaissent progressivement sur leur écran radar selon trois niveaux de menace : non-hostile, incertain ou hostile. En référence au C2 maritime, cette sous-tâche correspond à déterminer si l'aéronef sélectionné a l'intention d'attaquer la frégate (*threat intent*) et si ce dernier a les capacités d'attaquer la frégate (*threat capability*). Normalement, le tutoriel d'une expérience fournit une règle de classification aux participants afin qu'ils puissent effectuer cette catégorisation. Quoiqu'elle puisse être manipulée par l'expérimentateur, la règle de classification des expériences de cette thèse nécessite de consulter la valeur de cinq paramètres de la liste : *Origin*, *Altitude*, *Identification Friend-or-Foe (IFF)*, *Military Electronic Emissions*, et *Detection of Weapons*. Ces cinq paramètres ont la même importance (poids) dans la règle et tous

peuvent prendre soit une valeur menaçante ou non menaçante. Le nombre de paramètres ayant une valeur menaçante établit le niveau du risque du contact radar sélectionné : a) non-hostile lorsque 0 ou 1 paramètre de la règle de classification est menaçant, b) incertain quand le contact a 2 ou 3 paramètres ayant une valeur menaçante et c) hostile lorsque 4 ou 5 paramètres sont menaçants. Les participants appuient sur le bouton de classification correspondant à leur choix pour enregistrer le résultat de la catégorisation (voir Figure 14). Chacun des niveaux de menace est associé à une couleur différente. De ce fait, lorsqu'un aéronef est classifié par le participant, le point blanc représentant le contact radar sélectionné devient rouge lorsqu'on appuie sur le bouton de classification hostile, jaune sur le bouton incertain ou vert sur le bouton non-hostile. Étant donné que le niveau d'hostilité d'un contact radar peut changer à tout moment durant un scénario, les participants reçoivent l'instruction de vérifier régulièrement les aéronefs déjà classifiés afin de s'assurer si ces derniers nécessitent d'être catégorisés de nouveau.



Figure 14. Boutons de classification de la menace des contacts radars du micromonde S-CCS.

Deuxièmement, pour tous les aéronefs classifiés comme hostiles, les participants doivent déterminer le niveau d'imminence de leur menace en calculant leur proximité temporelle quant au navire-mère. Ils additionnent la valeur des paramètres TCPA (*time to closest point of approach*) et CPAIUT (*CPA in units of time*) afin de planifier leurs actions en ordre de priorité. L'imminence de la menace peut être élevée (<15 s par rapport à la frégate), modérée (15 à 30 s) ou faible (>30 s). Ce résultat indique le temps qu'il reste avant que le contact hostile frappe le navire, et est donc la fenêtre temporelle lors de laquelle le participant peut encore réagir et engager des mesures pour se défendre. Les participants appuient sur le bouton d'imminence de la menace correspondant à leur décision après avoir effectué l'addition (1 à 3, respectivement, voir Figure 15). Cette sous-tâche correspond à l'évaluation des capacités de la menace et à la priorisation des ressources défensives lors de la planification des actions de représailles (gestion des puissances de combat).

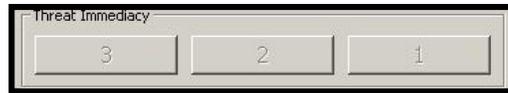


Figure 15. Boutons d'évaluation de l'imminence de la menace du micromonde S-CCS.

Troisièmement, l'attribution d'un type de puissance de combat n'est pas simulée dans S-CCS. La seule action défensive disponible est l'envoi d'un missile afin de détruire les hostiles. Effectivement, étant donné que tous les contacts radars hostiles sont programmés pour entrer en collision avec la frégate, les participants doivent défendre leur navire par l'envoi de missiles visant à neutraliser les menaces. Après avoir déterminé le niveau d'imminence d'un contact hostile, les participants doivent établir un plan de défense en priorisant l'hostile posant la menace la plus imminente et en considérant la probabilité d'une neutralisation réussite (*probability of successful engagement*; PSE). Quatre cercles concentriques divisent l'écran radar en cinq régions, chacune est associée à une PSE différente (voir Figure 16). La PSE augmente plus l'objet se rapproche de la frégate, à l'exception du cercle qui entoure directement la frégate dans lequel la PSE est nulle. Les participants n'ont qu'à sélectionner l'aéronef qu'ils désirent neutraliser et à appuyer sur le bouton *Engage* pour envoyer un missile en sa direction. Il y a un court délai entre la commande d'engagement et le tir du missile afin de représenter les opérations de mise en place des missiles. Le projectile est représenté par un petit point blanc sur l'écran radar. Seulement un missile peut être envoyé à la fois. Le participant doit attendre que le missile disparaisse (soit suite à une neutralisation réussite ou suite à une autodestruction due à une neutralisation manquée) avant d'engager les mesures défensives envers un autre hostile. Durant cette attente, le bouton « Engage » devient gris et ne fonctionne pas tant qu'il ne redevienne rouge. Cette troisième sous-tâche simule l'exécution et le suivi de la réponse durant l'application des mesures de défense du C2 maritime. Évidemment, dans de réels combats navals, le ou les décideurs auraient accès à d'autres méthodes de réponse contre les menaces (p.ex., la dissuasion), et auraient plusieurs autres étapes et règles d'engagement à suivre avant d'employer une force létale afin de détruire un aéronef hostile. Cependant, cette sous-tâche est simplifiée aux fins de cette thèse, de façon à ce que des individus sans expertise puissent l'effectuer.

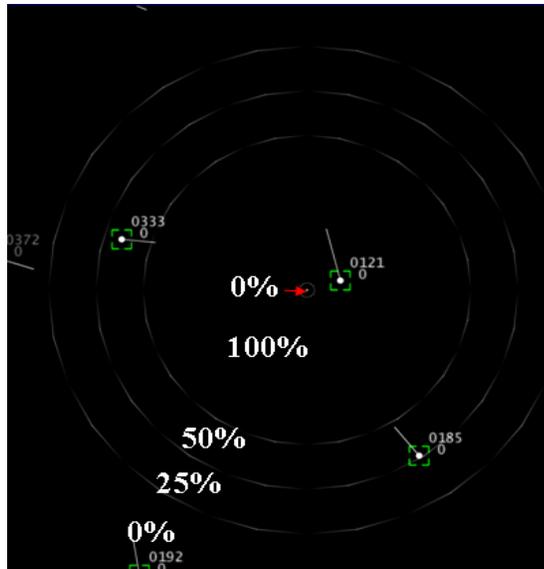


Figure 16. Distribution des probabilités d'une neutralisation réussie selon les cinq régions définies par les quatre cercles concentriques tracés sur l'écran radar.

**Détection des changements.** Cette section décrit la sous-tâche de détection des changements qui est sous-jacente à la tâche d'évaluation du risque et de gestion de la réponse simulée en S-CCS. Les participants ont à détecter les changements importants qui surviennent dans l'espace aérien sous surveillance de façon concurrente aux trois autres sous-tâches présentées ci-dessus. Le niveau de menace d'un aéronef est soit non-hostile ou incertain lorsqu'il apparaît sur l'écran radar du coordonnateur tactique. Au cours d'un scénario, certains contacts radar peuvent changer de statut, c'est-à-dire passer de non-hostile ou incertain vers un niveau de menace hostile lorsque 4 ou 5 paramètres de ces aéronefs prennent une valeur menaçante. Ces changements sont considérés critiques et doivent être détectés par les participants puisque les aéronefs hostiles sont programmés pour attaquer la frégate. Les changements d'un statut non menaçant vers un autre niveau non menaçant (p.ex., non-hostile vers incertain) sont considérés non-critiques. Chaque changement critique est accompagné par un changement de vitesse (p.ex., une accélération) et/ou de direction (l'aéronef détourne sa trajectoire et fonce directement vers la frégate) afin d'être visible sur le radar. Cependant, de tels changements de vitesse et/ou de direction n'indiquent pas toujours l'occurrence d'un changement critique. Les participants doivent

alors demeurer sensibles à ces changements visuels et déterminer s'ils sont critiques ou non en consultant la liste des paramètres.

Contrairement aux études en contextes unitâches statique et dynamique, les opérateurs en C2 maritime ont rarement à rapporter explicitement la détection d'un changement. La détection est assumée par l'action qui la suit, c'est-à-dire si l'opérateur effectue la tâche adéquate pour répondre au changement, le changement est considéré comme détecté. Dans le cadre de la tâche ERGR, étant donné que la détection d'un changement critique ne peut être signalée explicitement (p.ex. rapporter à haute voix ou en appuyant sur un bouton) par les participants, un changement critique est considéré détecté si l'aéronef est sélectionné au cours d'une période de 15 s suivant ce changement. La sélection du contact radar est l'action qui est appropriée à effectuer puisque l'aéronef étant hostile représente dès lors une menace pour la frégate. Une fois le contact sélectionné, les participants doivent réévaluer son niveau de menace et mesurer le niveau d'imminence de ce nouveau risque avant de pouvoir neutraliser l'aéronef. Advenant que le contact hostile ne soit pas sélectionné dans les 15 s post-changements, le changement est considéré non-détecté. La sous-tâche de détection des changements se rattache à certains aspects de l'élaboration d'une représentation de la situation du C2 maritime et de l'évaluation de la menace, plus spécifiquement la localisation des objets dans l'espace opérationnel sous surveillance qui représentent de nouvelles menaces pour le navire.

### ***Ingénierie des systèmes cognitifs***

Un des objectifs de cette thèse est d'évaluer l'efficacité du CHEX et de sa version simplifiée (HCR) à prévenir ou à diminuer la CaC lorsque la détection des changements est sous-jacente à une tâche de prise de décision dynamique en C2. Le micromonde S-CCS offre aux chercheurs une plateforme expérimentale pour évaluer les interactions entre les utilisateurs humains et les nouvelles solutions technologiques avant de les tester à l'aide de simulations qui se rapprochent encore plus du milieu naturel (p.ex., simulations haute fidélité) et éventuellement les implémenter dans de véritables systèmes. S-CCS est l'environnement idéal pour tester la résilience d'un système d'aide à la décision à diverses

conditions de travail (p.ex., présence de distraction auditive et/ou d'interruptions tâches, différents niveaux de charge de travail, etc.), et, dans un processus itératif, modifier, ajuster et améliorer ses fonctionnalités afin qu'il puisse mieux soutenir la cognition humaine.

De ce fait, le micromonde S-CCS permet l'application du cadre interprétatif de la triade de l'ingénierie des systèmes cognitifs pour expliquer l'utilisation des outils par les participants recrutés dans le cadre de cette thèse (*Joint Cognitive System*; Figure 17; voir MacMillan, Paley, Levchuk, Entin, Serfaty, & Freeman, 2002). La triade est composée de l'agent humain, des ressources technologiques qui sont mises à sa disposition et des tâches à effectuer. La triade comprend les facteurs associés à l'humain (ses capacités limitées de traitement de l'information de l'humain, son expertise et ses habiletés), les facteurs associés au domaine de travail (les buts, la complexité des tâches, le risque, l'incertitude et les relations entre les différentes tâches) et les facteurs associés à l'équipement (systèmes d'information utilisés par l'agent humain pour effectuer ses tâches, la qualité et la quantité de l'information qu'ils fournissent). Selon cette approche, l'agent humain doit faire équipe avec le système d'aide à la décision mis à sa disposition (ou autre artéfact technologique). Ils doivent former un système cognitif conjoint (*joint cognitive system*) afin de comprendre, de contrôler et de s'adapter à la situation, et ainsi atteindre les buts d'une tâche. Cette approche s'intéresse aux interactions entre l'humain et la tâche, et entre l'humain et l'outil, plutôt qu'à chacun de ces éléments pris séparément (Hollnagel & Woods, 2005).



Figure 17. Illustration des trois composantes du système cognitif conjoint (MacMillan et coll., 2002).

Selon Potter, Woods, Roth, Fowlkes et Hoffman (2006), cinq conditions de base doivent être atteintes par le système cognitif conjoint afin que celui-ci puisse mener efficacement ses activités et performer adéquatement dans un contexte de travail donné : l'observabilité (le système cognitif conjoint doit être capable de comprendre l'information contenue dans l'environnement de travail), la directabilité (le système cognitif conjoint doit être en mesure de rediriger facilement ses ressources vers d'autres activités), le travail d'équipe (l'agent humain et l'outil doivent coordonner et synchroniser leurs activités), l'attention dirigée (le système cognitif conjoint peut changer ou réorienter son attention vers d'autres aspects de la situation), et la résilience (il est possible pour le système cognitif conjoint d'anticiper et de s'adapter aux changements dans la situation ou aux événements imprévus). L'observabilité peut être associée au suivi de la situation du C2 maritime. Le système cognitif conjoint doit effectuer le suivi de la situation afin d'acquérir et de maintenir une conscience de la situation. Un manque d'observabilité pourrait être associé à l'incapacité du système cognitif conjoint à détecter un changement dans l'état de la situation. De plus, la condition de base de l'attention dirigée est étroitement liée au contrôle de l'attention du C2 alors que la planification/coordination des activités renvoie à la directabilité du système cognitif conjoint (Lafond et coll., 2010; Potter coll., 2006).

Par exemple, S-CCS a permis de tester l'efficacité d'un outil d'aide à la planification (*Temporal Overview Display*; TOD) qui vise à soutenir l'aspect temporel de la conscience de la situation (voir Tremblay et coll., 2012). Les participants devaient effectuer la tâche d'évaluation du risque et de gestion de la réponse décrite dans la section précédente et pouvaient utiliser le TOD qui était implémenté à la droite du radar dans l'interface de S-CCS (voir Figure 17). Cet outil représente le temps restant avant qu'un aéronef hostile frappe le navire (fenêtre temporelle pour prendre une décision) en présentant visuellement chaque objet sous la forme d'un rectangle placé sur une ligne du temps. Un aéronef frappe le navire quand l'extrémité droite de son rectangle franchit la ligne rouge. Les participants qui utilisaient le TOD avaient une meilleure conscience de la situation, et étaient plus rapides pour juger la menace des aéronefs et pour se défendre contre les hostiles. Cependant, la qualité de leurs jugements et la performance de leur défense étaient plus faibles que ce qui a été observé dans la condition sans-TOD. Le TOD et l'agent humain ne

formaient pas une alliance cognitive (un système cognitif conjoint) assez efficace pour leur permettre d'avoir une performance adéquate dans ce contexte de travail.

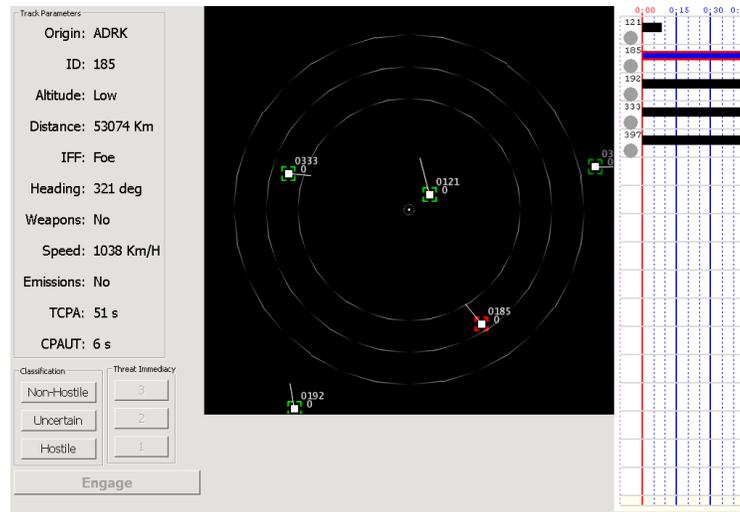


Figure 18. Outil d'aide à la planification (image tirée de Tremblay et coll., 2012).

### ***Approche holistique et plan d'analyse***

Le micromonde S-CCS permet aussi l'emploi d'une approche holistique dans l'analyse des résultats (p.ex., Vachon, Lafond, Vallières, Rousseau, & Tremblay, 2011; Tremblay et al., 2012). Premièrement, il permet de mesurer à la fois l'effet d'une combinaison de plusieurs variables et d'évaluer leur effet respectif lorsqu'elles sont prises séparément afin d'acquérir la compréhension la plus complète de l'impact de ces variables sur la performance. Cette approche est particulièrement importante lors de l'évaluation de l'efficacité d'un système d'aide à la décision. Il arrive qu'un outil soit efficace pour soutenir la fonction cognitive qu'il vise à aider, mais qu'il nuise à une autre fonction cognitive ou à un autre aspect des activités de son utilisateur. Par exemple, les participants qui utilisaient le TOD étaient plus rapides pour effectuer les tâches de C2, mais la performance relative à ces tâches était plus faible que celle associée aux participants qui n'avaient pas accès au TOD (Tremblay et coll., 2012). Deuxièmement, S-CCS permet d'aller au-delà des mesures de performance. Il permet la passation de questionnaires (p.ex., le questionnaire NASA-TLX sur la charge travail subjective et le *Quantitative Analysis of Situational Awareness* lors des interruptions de tâche, voir Vachon et coll., 2011; 2012), de

prélever des mesures de l'utilisation des outils qui sont implantés dans son interface (voir Chapitre 3) et de synchroniser les données du suivi des mouvements oculaires des participants à sa propre base de données.

## **SUIVI DES MOUVEMENTS OCULAIRES**

Dans la présente thèse, le suivi des mouvements oculaires est utilisé pour évaluer le déploiement attentionnel des participants sur l'interface S-CCS au moment qu'ils effectuent la tâche ERGR. Les fixations oculaires servent principalement à déterminer si un changement critique est regardé ou non par le participant (examiner la prévalence des deux sources de CaC) et sont utilisées comme un indice d'utilisation des outils qui sont testés. La figure 18 illustre les installations expérimentales qui sont constituées de deux stations. L'expérimentateur est assis à la station de droite où se retrouve le logiciel d'enregistrement et d'analyse des mouvements oculaires Tobii Studio. Les participants effectuent la tâche ERGR à la station de gauche. Leurs mouvements oculaires sont captés par l'appareil Tobii T1750 à un taux d'échantillonnage de 50 hertz. La position du regard des participants est donc captée et enregistrée à toutes les 20 millisecondes. Les sujets sont assis devant un écran d'ordinateur à une distance d'environ 60 centimètres afin de maximiser la qualité de la capture des mouvements oculaires. Des caméras infrarouges de suivi des mouvements oculaires sont intégrées à même le moniteur, ce qui permet aux participants de déplacer librement la tête. L'interface visuelle du micromonde S-CCS a une largeur de 1024 pixels et une hauteur de 768 pixels, ce qui correspond à la résolution de l'écran de l'ordinateur. Une fixation est une période de temps durant laquelle le regard du pilote demeure stable pendant au moins 100 ms et ne bouge pas plus rapidement que 30 degrés par seconde. Une saccade oculaire est tout mouvement oculaire plus rapide que 30 degrés par seconde (voir Regis, Dehais, Tessier, Gagnon, 2012). Le champ de vision fonctionnel - zone de la scène visuelle regardée lors d'une fixation et de laquelle de l'information utile peut être extraite) correspond à un cercle ayant un rayon de 50 pixels, ce qui totalise environ 2,5 degrés d'angle visuel de hauteur et de largeur (pour une revue sur la taille du champ de vision fonctionnel lors de la perception d'une scène visuelle et de la recherche visuelle, voir Rayner, 2009).

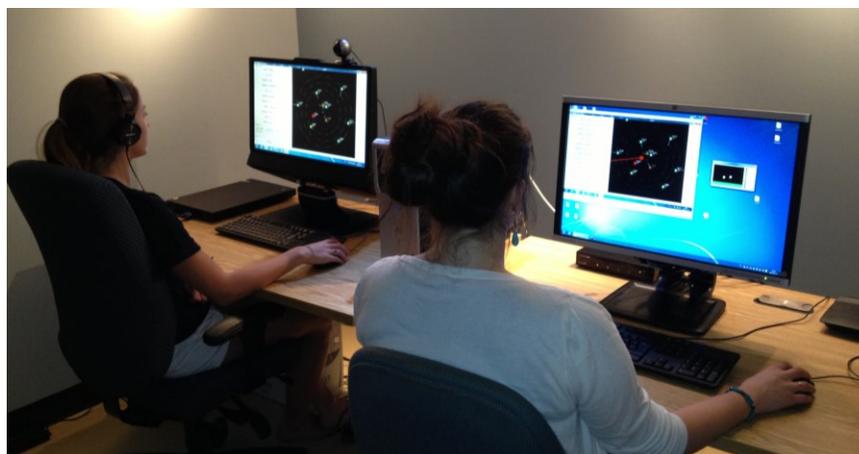


Figure 19. Salle d'expérience : on retrouve à la gauche la station avec l'appareil de suivi des mouvements oculaires Tobii et à la droite la station d'enregistrement et d'analyses des mouvements oculaires.

La combinaison du micromonde S-CCS et du suivi des mouvements oculaires a déjà été employée dans plusieurs autres études, dont celle de Lafond et ses collaborateurs (2009). Effectivement, dans cette étude, le suivi des mouvements oculaires a permis de tracer le chemin décisionnel des participants qui effectuaient la tâche ERGR. Les fixations oculaires ont permis de déterminer quels étaient les paramètres consultés par les participants avant de classer les aéronefs qui apparaissaient sur le radar. Bien qu'ils devaient suivre une règle de classification bien précise impliquant trois paramètres de la liste et un indice visible sur le radar, les résultats ont montré que les participants n'étaient pas exhaustifs dans leur recherche d'information et ne consultaient en moyenne qu'un seul des trois paramètres de la liste prescrits par la règle avant de prendre une décision (Lafond et coll., 2009). Le suivi des mouvements oculaires est donc très utile lorsqu'il en vient à prélever des données sur les processus cognitifs sous-jacents à la prise de décision sans perturber l'exécution de la tâche. Contrairement à des méthodes de collecte de données telles que les questionnaires et le protocole verbal (*think aloud*), le suivi des mouvements oculaires ne nuit pas à l'immersion du participant dans le micromonde et dans les activités de C2. Cette technique est une fenêtre sur les processus cognitifs du participant. Elle permet de les mesurer sans moduler leur expression (Morrison, Marshall, & Moore, 1997; Poole & Ball, 2006).

## ***Conclusion***

Le micromonde S-CCS est utilisé pour simuler la tâche ERGR dans un contexte d'opérations de C2 maritime. Ce type de simulation fonctionnelle offre le meilleur compromis entre la validité interne et la validité écologique. S-CCS permet aussi de tester l'efficacité du CHEX et de sa version simplifiée (HCR) selon les principes de l'ingénierie des systèmes cognitifs. L'analyse des résultats s'effectue selon une approche holistique, c'est-à-dire l'efficacité des outils est non seulement déterminée par leur effet sur la fonction cognitive qu'ils ont été conçus pour soutenir, mais sur d'autres aspects des activités de l'utilisateur. Les fixations oculaires sont un indice de l'utilisation des outils et leur suivi permet de déterminer si les changements non-détectés sont regardés ou non.

## **CHAPITRE III**

### *DÉMARCHE EMPIRIQUE*

Une recension exhaustive des écrits indique que la majorité des études sur la cécité aux changements (CaC) ont été effectuées à l'aide de scènes visuelles statiques et employaient un contexte unitâche de détection des changements. Diverses techniques de perturbations visuelles devaient être utilisées pour empêcher la capture automatique, par le système visuel, du signal de transition provoqué par l'objet qui subissait le changement pour ainsi susciter la CaC (p.ex., paradigme du clignotement, des éclaboussures et des saccades oculaires). La tâche de ces études était relativement simple : une image originale est d'abord présentée au participant et ensuite une version modifiée de cette image lui est présentée dans laquelle il doit désigner ce qui a changé. Afin que le changement ne soit pas évident et rapidement détecté, les images originale et modifiée pouvaient être séparées d'un masque (paradigme du clignotement; Rensink et coll., 1997), l'image modifiée pouvait être partiellement couverte par des taches d'encre (paradigme des éclaboussures; O'Regan et coll., 1999) ou l'occurrence du changement dans l'image pouvait concorder avec une saccade oculaire (paradigme des saccades; McConkie & Currie, 1996).

Un nombre restreint d'études ont examiné l'ampleur de la CaC à l'aide de scènes visuelles dynamiques dont les caractéristiques de la tâche à effectuer et de la situation à surveiller se rapprochaient davantage à celles rencontrées dans le monde réel (voir Boot et coll., 2006; Durlach & Chen, 2003; Simons & Levin, 1998). La tâche de ces études consistait à suivre l'évolution d'une situation et à détecter les changements importants à signaler selon les directives reçues (p.ex., détecter et rapporter les croisements de trajectoires d'avions dans une tâche de contrôle du trafic aérien; voir Smallman & St. John, 2003). Plusieurs objets étaient en mouvement, plusieurs changements pouvaient se produire lors d'un essai et il y avait des changements pertinents à la tâche (importants à être signalés) et d'autres à ignorer (non pertinents et qui ne doivent pas être rapportés). Ces études indiquent des taux de CaC importants et, ce malgré qu'elles n'employaient pas de techniques de perturbations visuelles pour camoufler les signaux de transition des changements importants. Ces changements pertinents à la tâche des participants étaient naturellement plus difficiles à détecter parmi les changements effectués par les distracteurs (Boot et coll., 2006; Vachon et coll., 2012).

Certains outils ont par la suite été créés pour soutenir la détection des changements dans l'état d'une situation dynamique. Ces changements dynamiques sont plus subtils (modification d'un objet déjà présent sur une interface) et semblent plus difficiles à détecter que des apparitions et des disparitions d'objets dans une scène visuelle (Boot et coll., 2006). Smallman et St. John (2003) ont créé le CHEX pour pallier la CaC dans ce contexte unitaire de détection des changements en situations dynamiques. Cet outil dispose d'un système de détection automatique des changements qui surviennent dans la situation dynamique. Ces changements sont ensuite répertoriés dans son tableau afin d'aider à la comparaison entre les états pré- et post-changements de la situation qui est nécessaire pour les détecter. Ces mêmes auteurs ont démontré que les utilisateurs du CHEX détectaient plus rapidement les changements lorsqu'ils surveillaient une simulation d'une circulation aérienne. En fait, cet outil d'aide à la détection des changements permettait de prévenir totalement la CaC (St. John et coll., 2005).

Cependant, les études de Smallman et St. John et la majorité des études de la recension des écrits sur la CaC ont tous un point en commun : la détection des changements est l'unique tâche à effectuer par le participant que ce soit lors de la surveillance d'une scène visuelle statique ou d'une situation dynamique. Par conséquent, l'efficacité du CHEX n'a été démontrée que dans ce contexte expérimental. Pourtant, la détection des changements est rarement la seule tâche à effectuer lors de la surveillance et la gestion de situations de travail exigeantes et à haut risque telles que le C2 maritime. Peu de recherches ont été réalisées pour estimer l'ampleur de la CaC et pour trouver des moyens de la prévenir en situations multitâches dynamiques dans lesquelles la détection des changements est sous-jacente à une tâche de plus haut niveau (Divita et coll., 2004; Liebhaber & Feher, 2002). Pour être considéré comme un outil véritablement bénéfique à la détection des changements, le CHEX doit d'abord être validé à l'aide d'un environnement multitâche dynamique; un contexte de travail qui serait plus susceptible d'exiger un tel système de soutien à la décision.

## *Objectifs expérimentaux de la présente étude*

La présente étude vise à pallier aux lacunes dans la littérature décrites ci-haut en examinant d'une part l'ampleur de la CaC en situation multitâche dynamique à l'aide d'une simulation fonctionnelle des véritables opérations de C2 maritime (le micromonde S-CCS; Lafond et coll., 2009; Vachon et coll., 2012). D'autre part, le CHEX est utilisé dans un contexte différent de celui qui a servi à le valider (situation dynamique et détection des changements comme unique tâche à effectuer). Ce chapitre vérifie si cet outil (et sa version simplifiée, HCR) demeure efficace lorsque son soutien est employé dans une simulation des conditions multitâche et de charge de travail élevée du C2 maritime. De plus, l'évaluation du CHEX comme un outil d'aide à la détection des changements comporte une mesure de son efficacité à prévenir les deux sources de CaC en employant le suivi des mouvements oculaires. Les comportements oculaires des participants sont interprétés selon le cadre théorique du modèle NSEEV (Steelman et coll., 2011).

Dans l'Expérience 1, les participants doivent effectuer la tâche ERGR du micromonde S-CCS, tout en demeurant attentifs aux changements critiques imprévus (c.-à.-d. un aéronef qui passe d'un statut non menaçant vers un statut menaçant) qui peuvent compromettre la sécurité de leur frégate. La tâche ERGR inclut la catégorisation des aéronefs qui apparaissent sur l'écran radar en fonction de leur niveau de menace (évaluation du risque) et la planification des mesures défensives à appliquer contre les aéronefs hostiles (gestion de la réponse). Les participants doivent détecter les changements critiques afin de s'assurer que les aéronefs soient catégorisés correctement et de défendre efficacement leur navire. Les nouvelles menaces sont toujours signalées par un changement critique. Par conséquent, détecter les changements critiques rend les participants davantage prédisposés à reclassifier les aéronefs et à engager les mesures pour se défendre.

Dans l'Expérience 1, la détection des changements est sous-jacente à la tâche ERGR. Les participants n'ont pas à rapporter de manière explicite l'occurrence des changements critiques, mais la détection de ces changements leur permet de réagir et d'effectuer les actions nécessaires pour protéger leur navire. L'outil CHEX (version très

similaire à celle de ses concepteurs; Smallman & St. John, 2003), conçu pour soutenir la détection des changements, est implémenté dans l'interface S-CCS et son efficacité est évaluée selon une approche holistique : l'évaluation de l'efficacité d'un outil d'aide à la décision inclut non seulement son effet sur la fonction cognitive qu'il a été conçu pour aider (dans le cas présent, la détection des changements), mais aussi son influence sur d'autres fonctions cognitives mises en œuvre dans les activités des coordonnateurs tactiques telles que la catégorisation et la planification (voir Lafond et coll., 2010; Vachon et coll., 2011). En adoptant cette approche, l'efficacité du CHEX est déterminée par sa capacité à prévenir la CaC, ainsi que par son effet (positif ou négatif) sur l'évaluation du risque, la gestion de la réponse et la charge de travail perçue.

L'Expérience 1 vise donc à évaluer l'efficacité du CHEX et d'une version épurée de cet outil (historique des changements récents, HCR) à prévenir la CaC dans un contexte multitâche dynamique. Le tableau du HCR offre une quantité d'information plus réduite que le tableau du CHEX, ce qui pourrait prévenir les problèmes potentiels liés à une charge attentionnelle trop élevée. Dans l'Expérience 2, le micromonde S-CCS est utilisé de nouveau, mais cette fois-ci les participants n'ont qu'à effectuer une tâche de détection explicite (tâche similaire à celle retrouvée dans les études de Smallman & St. John, 2003 et St. John et coll., 2005), plutôt qu'à effectuer la tâche ERGR complète.

Parallèlement à l'évaluation de l'efficacité du CHEX et de sa version moins chargée en information à améliorer la performance globale de détection des changements, le pourcentage de changements non-déTECTÉS est séparé en deux catégories : les changements non détectés fixés ou non fixés. De cette façon, l'efficacité du CHEX est aussi déterminée par sa contribution à prévenir ou à réduire les deux sources de CaC (voir Vachon et coll., 2012). Les changements non détectés non fixés sont associés à la première source de CaC—l'incapacité à diriger son attention vers l'objet ayant subi le changement—tandis que les changements non détectés fixés témoignent de l'occurrence de la seconde source de CaC—le changement n'est pas détecté consciemment dû à une quantité insuffisante de ressources attentionnelles dirigées vers l'objet.

L'utilisation des outils d'aide à la détection est aussi évaluée par les actions effectuées dans leur tableau ainsi que par le suivi des mouvements oculaires des participants (p.ex., Morrison et al., 1997; Poole & Ball, 2006; Tremblay, Vachon, Rousseau, & Breton, 2012). Afin d'analyser comment les participants utilisent les outils, l'interface S-CCS est divisée en zones d'intérêts (ZIs). La Figure 13 illustre la délimitation de trois ZIs dans l'interface originale de S-CCS qui est utilisée pour la condition sans-DSS (sans outil d'aide à la détection des changements) de l'Expérience 1. Une quatrième ZI y est ajoutée lorsqu'un outil (DSS) est disponible dans l'interface, c'est-à-dire pour les conditions avec-CHEX et avec-HRC (voir Figures 20 et 21). Cette délimitation permet de comparer le nombre de sélections d'aéronefs effectuées en utilisant l'outil au nombre de sélections effectuées dans le radar. L'extraction de métriques associées aux mouvements oculaires permet de déterminer comment les participants déploient leur attention sur l'interface. En effet, il s'est révélé que les mouvements oculaires manifestes vers un emplacement donné (déplacement physique des yeux) sont généralement précédés par le déplacement de l'attention visuelle sélective à cet endroit (p.ex., McCarley & Kramer, 2008; Rayner, 2009). Le temps passé à regarder l'outil—la somme de toutes les durées des fixations effectuées sur une ZI—et le pourcentage de fixations sur le DSS servent d'indices de l'affectation de l'attention sur l'outil (Hauland, 2003).

Finalement, le questionnaire NASA-TLX est employé afin de mesurer le niveau de charge de travail perçue par les participants assignés aux conditions CHEX, HCR ou sans-DSS (Hart & Staveland, 1988) : procédure d'évaluation multidimensionnelle qui produit un score global de charge de travail basé sur une moyenne pondérée des notes obtenues à six sous-échelles. Aux fins de la présente thèse, seules les sous-échelles mesurant la charge mentale et la pression temporelle sont conservées, et sont corrélées avec la performance de détection des changements et la performance relative à la tâche ERGR.

## *Expérience 1*

Le CHEX offre une aide en temps réel à l'écran visant à soutenir les processus attentionnels et mémoriels de l'utilisateur. Ce dernier s'est révélé efficace pour améliorer la

détection des changements dans un contexte où elle est la seule tâche à effectuer. Cependant, la manière dont le CHEX présente l'information reliée aux changements (c.-à-d., dans un tableau situé en périphérie de l'écran) pourrait ne pas être optimale. La charge d'information visuelle supplémentaire imposée par l'outil pourrait provoquer l'augmentation de la charge de travail perçue comparativement à ce qui serait observé en l'absence d'un outil dans l'interface (Perry et al., 2013). Conséquemment, le CHEX pourrait plutôt nuire à la détection des changements lorsque ce dernier est employé dans une situation multitâche dynamique. Le tableau du CHEX pourrait aussi devenir rapidement encombré étant donné qu'il doit répertorier tous les changements (non-critiques et critiques) qui surviennent dans la situation dynamique. Cette hypothèse va donc à l'encontre des résultats de St. John et ses collaborateurs (2005) qui démontrent une grande efficacité du CHEX dans un contexte unitâche de détection des changements. L'expérience 1 vise à tester cette hypothèse et ainsi évaluer l'efficacité de l'outil CHEX lorsque la détection des changements est sous-jacente à la tâche ERGR. Le HCR, une version épurée du CHEX qui a été conçue aux fins de la présente thèse, est aussi testé afin d'évaluer s'il fournit suffisamment d'information pour aider à la détection des changements sans provoquer une surcharge de travail. Le HCR offre la même fonctionnalité de détection automatique des changements que le CHEX, mais le tableau du HCR, situé sous le radar, ne présente que les quatre derniers changements (critiques ou non) qui sont survenus dans un scénario. Ces modifications ont été effectuées afin de réduire la charge en information de l'outil et de prévenir un éventuel encombrement de données associé au design actuel du CHEX. Basée sur la méthode établie par Vachon et ses collaborateurs (2012), cette expérience comporte un devis expérimental inter-sujet dans lequel les résultats associés à la détection des changements, la charge de travail perçue et la performance à la tâche ERGR sont comparés entre trois groupes de participants : un premier groupe qui effectue la tâche avec l'aide du CHEX (condition CHEX), un deuxième groupe qui utilise le HCR (condition HCR) et un troisième n'ayant pas accès à un outil (condition sans-DSS).

## MÉTHODE

**Participants.** L'échantillon se compose de 60 étudiant(e)s de l'Université Laval (28 hommes, âge moyen = 22,8 ans) rapportant une vision normale ou corrigée. Les sujets reçoivent une compensation monétaire de 20\$ pour leur participation à une séance expérimentale de deux heures. Les participants sont assignés aléatoirement soit à la condition avec-CHEX, à la condition avec-HCR ou à la condition sans-DSS pour un total de 20 sujets par groupe.

**Micromonde et Tâche ERGR.** S-CCS et la tâche ERGR sont utilisés pour cette expérience, et sont décrits en détail dans le chapitre 2 de la présente thèse. La Figure 13 illustre l'interface de base de S-CCS de la condition sans-DSS.

**Outils d'aide à la détection des changements.** Dans la condition avec-CHEX, l'outil est ajouté à la droite de l'écran radar (Figure 20). Le CHEX détecte automatiquement et répertorie de façon permanente tous les changements qui surviennent dans l'espace aérien surveillé par le participant. Le tableau de l'outil est séparé en trois colonnes pouvant être triées à la guise du participant : temps du changement (en millisecondes; *time*), l'identité de l'aéronef (*ID*) et les paramètres ayant changé (*event*). Chaque fois qu'un changement survient (critique ou non), le CHEX répertorie les paramètres modifiés, un sous l'autre, avec le temps et l'ID qui leur sont associés. Le changement le plus récent est situé au haut du tableau et les changements antérieurs se déplacent vers le bas de ce dernier. Étant donné le grand nombre de changements qui s'accumulent dans son tableau, le CHEX dispose d'une barre de défilement pour permettre aux participants de consulter les changements qui sont survenus au début d'un scénario et qui se retrouvent au bas du tableau. L'automatisation du CHEX est statique (fixe). Les fonctionnalités de l'outil ne peuvent pas être désactivées par son utilisateur et le tableau ne peut pas être minimisé (il est toujours apparent à l'écran). Le rôle du CHEX se situe au niveau de l'acquisition de l'information sur les changements. Les entrées du tableau ne sont pas filtrées (p.ex., en ordre d'importance) et aucune analyse plus approfondie n'est effectuée sur ces éléments d'information. Les participants peuvent consulter le CHEX en tout temps pour déterminer quel type de changement a subi un contact radar donné et quand

ce changement est survenu durant le scénario. Le CHEX et l'écran radar sont dynamiquement et visuellement reliés puisque sélectionner un aéronef via l'écran radar met en surbrillance l'information associée au contact sélectionné dans le tableau du CHEX, et vice versa. La sélection du contact radar qui a subi un changement critique—l'action appropriée à effectuer dans les 15s post-changements pour que ce dernier soit considéré comme détecté—peut se faire par l'entremise de l'écran radar ou du tableau du CHEX.



Figure 20. Interface du micromonde S-CCS pour la condition avec-CHEX de l'Expérience 1. L'outil est à la droite de l'écran radar.

Dans la condition HCR, le tableau est situé sous l'écran radar (Figure 21). Tout comme le CHEX, le HCR détecte automatiquement tous les changements qui surviennent durant un scénario et les répertorie dans un tableau relié visuellement et dynamiquement avec l'interface géospatiale. L'automatisation du HCR est aussi statique (fixe) et ne peut pas être ajustée par son utilisateur. Par contre, cet outil se distingue du CHEX quant à la quantité d'information concernant les changements qu'il répertorie. Contrairement au CHEX, seulement quatre changements peuvent être listés à la fois dans les boîtes du HCR et l'information fournie pour chaque changement se limite au numéro d'identifiant (ID) et au moment auquel le changement s'est produit (en millisecondes). L'information à propos du changement le plus récent est toujours présentée dans la boîte située à l'extrémité gauche du tableau, et chaque fois que le HCR enregistre un nouveau changement, l'information sur les changements antérieurs se déplace vers la droite de l'écran. Par conséquent, les changements effectués par les contacts radars durant un scénario ne sont

pas toujours disponibles dans le HCR. Les participants peuvent sélectionner un aéronef en cliquant sur la boîte du tableau HCR qui contient l'information sur le changement qu'il a subi ou en cliquant sur son icône dans l'écran radar. De façon similaire à la condition CHEX, la sélection du contact radar qui a subi un changement critique peut se faire par l'entremise de l'écran radar ou du tableau du HRC.

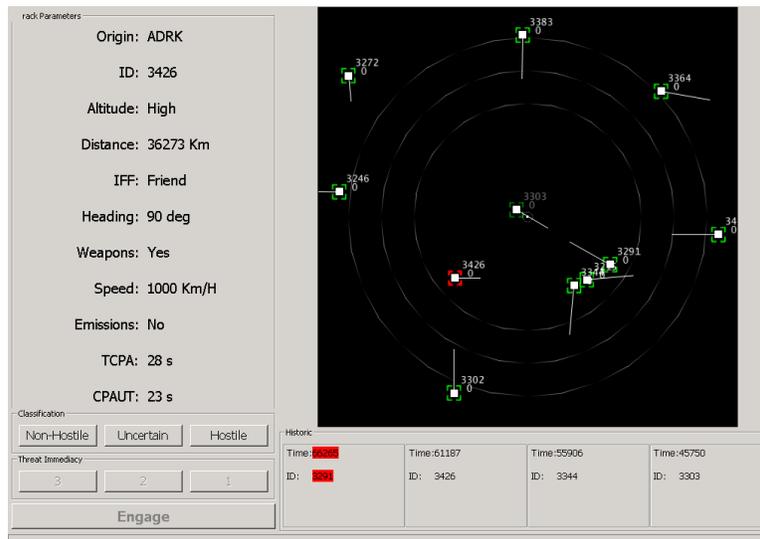


Figure 21. Interface du micromonde S-CCS pour la condition avec-HCR de l'Expérience 1. Le HCR est situé sous l'écran radar.

**Suivi des mouvements oculaires.** La description de l'appareil de capture des mouvements oculaires et les détails techniques concernant l'analyse des données se retrouvent dans le Chapitre 2 de la présente thèse. Tel que montré dans la Figure 13, l'interface de S-CCS pour la condition contrôle (sans-DSS) est séparée en trois zones d'intérêt : 1) l'écran radar, 2) la liste de paramètres et 3) les boutons d'action qui comprennent les boutons de classification, d'imminence de la menace et de neutralisation des hostiles. Pour les conditions avec outil, une quatrième zone est ajoutée aux trois autres zones d'intérêt : 4) le tableau du CHEX à la droite de l'écran radar (Figure 20) ou le tableau du HCR en dessous de l'écran radar (Figure 21). L'analyse des mouvements oculaires porte sur les fixations dans ces zones d'intérêt ainsi que sur les fixations effectuées sur des aéronefs spécifiques durant les 15 secondes qui suivent un changement. Une fixation sur un contact radar ayant subi un changement critique durant cette fenêtre temporelle indique un

changement fixé, par opposition à un changement critique non fixé. Plus précisément, un changement critique est considéré comme ayant été regardé si l'aéronef qui a subi ledit changement (ou les entrées qui lui sont associées dans le tableau d'un des outils, si disponibles) s'est retrouvé à moins de 50 pixels du centre du point de fixation du participant au moins une fois au cours de la période de 15 s après le changement et si cette fixation a duré au moins 100 ms.

**Procédure.** Avant de commencer l'expérience, un tutoriel est présenté aux participants pour les familiariser au contexte de la simulation ainsi qu'aux tâches qu'ils doivent effectuer. Pour les participants assignés aux conditions avec-outil (CHEX ou HCR), le tutoriel démontre aussi l'utilité des outils d'aide à la décision. Après avoir lu les instructions, les sujets ont à effectuer l'évaluation du risque et de l'imminence du risque à partir de neuf captures d'écran du micromonde pour vérifier leur compréhension de ces deux sous-tâches. Ensuite, ils prennent part à deux sessions pratiques (chacune étant composée de 4 scénarios de 3 minutes) afin qu'ils s'adaptent à l'environnement dynamique de S-CCS. Après avoir calibré le système de suivi des mouvements oculaires, les participants effectuent quatre blocs expérimentaux présentés de façon aléatoire et séparés les uns des autres par une pause de cinq minutes. Chaque bloc est composé de quatre scénarios de quatre minutes qui sont, eux aussi, présentés de façon aléatoire; la session expérimentale dure 64 minutes. Tous les scénarios tests sont d'une difficulté similaire et chacun de ceux-ci comporte un ensemble de 27 aéronefs : 11 non-hostiles, 8 incertains et 8 hostiles qui empruntent des trajectoires variées et qui se déplacent à différentes vitesses. Un maximum de 10 aéronefs peut se retrouver en même temps sur l'écran radar. Un total de 33 changements survient durant un scénario test : 25 sont non-critiques et 8 sont critiques. Au moins 15 secondes s'écoulent entre deux changements critiques. En tout, un participant doit détecter 128 changements critiques. Après chaque scénario test de 4 minutes, les participants répondent à voix haute à deux questions du questionnaire portant sur la charge de travail perçue NASA-TLX. Une première question porte sur la charge mentale et une seconde concerne la pression temporelle : 1) Quel est le niveau de charge mentale que vous ressentez sur une échelle de 1 à 10 (1 étant très faible et 10 étant très élevé) ? 2) Quel est le

niveau de pression temporelle que vous ressentez sur une échelle de 1 à 10 (1 étant très faible et 10 étant très élevé) ?

## RESULTATS ET DISCUSSION

Les groupes avec-CHEX, avec-HCR et sans-DSS sont comparés selon trois types d'activités des coordonnateurs tactiques : 1) la performance de détection des changements, 2) la charge de travail perçue par les participants et 3) la performance à la tâche ERGR. En plus de ces métriques reliées à la performance des participants, l'utilisation du CHEX et du HCR est mesuré par l'entremise des sélections d'aéronefs effectuées dans le tableau et des fixations oculaires sur les outils : le pourcentage de fixations et le temps total passé à regarder le tableau des outils. Le niveau alpha est fixé à .05 et les tests de comparaisons multiples emploient la correction de Bonferroni.

**Détection des changements globale.** Tel que montré dans la Figure 22A, 15,9 % des changements critiques sont manqués dans la condition CHEX, 14,6 % dans la condition HCR, et 13,4 % dans la condition sans-DSS, ce qui confirme que les individus qui se retrouvent dans un contexte multitâche dynamique de surveillance sont vulnérables à la CaC (DiVita et coll., 2004; Durlach et coll., 2008; Vachon et coll., 2012). De plus, le nombre de changements non détectés ne diffère pas significativement entre les trois conditions,  $F(2, 57) = 1.05$ ,  $p = .358$ ,  $\eta^2_p = .035$  (Figure 22A), et, de façon similaire, la vitesse de détection ne diffère pas selon les conditions expérimentales,  $F(2, 57) = 1.642$ ,  $p = .203$ ,  $\eta^2_p = .054$  (Figure 22B). Ces résultats démontrent que, contrairement aux conclusions de St. John, Smallman & Manes (2005), le CHEX et sa version simplifiée (HCR) n'améliorent pas la détection des changements critiques qui surviennent dans l'espace aérien surveillé.

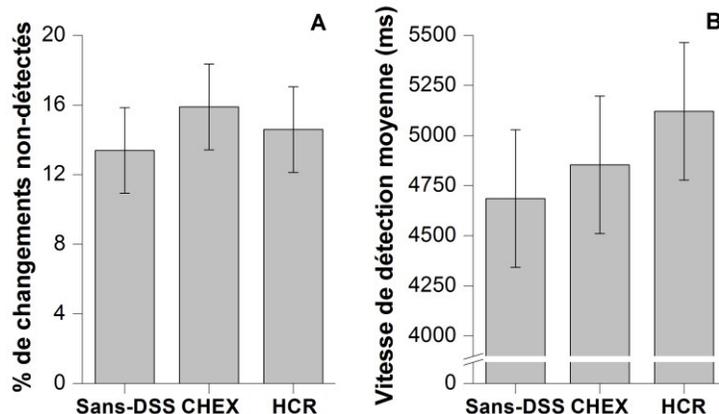


Figure 22. Pourcentage moyen de changements non-détectés (Panneau A) et vitesse de détection moyenne pour les conditions avec-CHEX, avec-HCR et sans-DSS de l'Expérience 1. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95% calculés selon la méthode de Masson et Loftus (2003).

Il est à noter que l'ajout d'un outil d'aide à la détection à l'interface S-CCS provoque une variation de la taille du radar selon les trois conditions de l'expérience. Cette variation pourrait influencer la performance des participants. Bien que, pour les conditions avec-CHEX et avec-HCR, l'espacement entre les objets radar soit légèrement plus petit que celui de la condition sans-DSS, la taille des icônes des avions demeure la même et les changements critiques sont toujours accompagnés des mêmes changements de vitesse et/ou de direction visibles sur le radar. Ces changements qui surviennent sur le radar sont évidents et sans équivoques, et les avions qui les produisent ne sont jamais cachés par d'autres objets. Par conséquent, l'effet de la variation de la taille du radar sur la détection des changements serait négligeable.

**Changements non détectés fixés vs non fixés.** Quatre participants de la condition sans-DSS sont retirés des analyses suivantes en raison d'un manque de données associées à leurs mouvements oculaires. Tout d'abord, il est important de décrire la distribution des résultats pour chacune des conditions expérimentales. Pour la condition sans-DSS, la moitié de tous les changements non détectés sont fixés (50,4 %) et l'autre moitié de ces changements sont non fixés (49,6 %). En ce qui concerne la condition avec-CHEX, 65,4 % des changements non détectés sont fixés, alors que 36,6 % sont non fixés. Pour la condition avec-HCR, 62,3 % des changements non détectés sont fixés et 37,7 % sont non fixés. À la lumière de ces résultats, il semble que le CHEX et le HCR provoquent une augmentation

du nombre de changements non détectés fixés, c'est-à-dire une augmentation de la prévalence de la source attentionnelle de la CaC contrairement à ce qui est observé dans la condition sans-DSS.

Afin de vérifier la tendance décrite ci-dessus, tous les changements critiques (incluant les changements détectés et les changements non détectés) sont maintenant séparés en deux catégories : non fixés ou fixés. Un pourcentage de changements non détectés (un taux de CaC) est calculé pour chacune des catégories, et ce, pour chacune des conditions expérimentales. Parmi tous les changements critiques, 90,8 % (1860 sur 2048 changements) sont fixés dans la condition sans-DSS, 86,9 % (2221 sur 2560 changements) dans la condition avec-CHEX et 88,9 % (2277 sur 2560 changements) dans la condition avec-HCR. Il est important de noter qu'il y a, en moyenne, 8,5 fois moins de changements critiques non fixés que de fixés. La Figure 23 est séparée en deux panneaux afin de mieux observer l'effet des conditions expérimentales sur les taux des deux sources de CaC.

Une ANOVA mixte 2 (fixation)  $\times$  3 (condition) révèle un effet principal de fixation significatif,  $F(1, 53) = 201.73$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .792$ . Le pourcentage moyen de changements non fixés non détectés est plus élevé que le pourcentage moyen de changements fixés non détectés (Figure 23). L'effet principal de condition n'est pas significatif,  $F(2, 53) = 1.76$ ,  $p = .182$ ,  $\eta^2_p = .062$ , mais l'ANOVA révèle un effet d'interaction marginalement significatif,  $F(2, 53) = 2.73$ ,  $p = .074$ ,  $\eta^2_p = .093$ . Les analyses d'effets simples sont effectuées pour décomposer l'interaction puisque l'êta-carré partiel suggère une taille d'effet presque moyenne et que l'un des objectifs de ce chapitre prévoyait ces tests a priori. Pour les changements critiques non fixés, le pourcentage de changements non détectés ne diffère pas entre les trois conditions. Cependant, les résultats des tests d'effets simples démontrent que pour les changements fixés, la condition CHEX est associée avec un pourcentage de changements non détectés plus élevé que ce qui est observé dans la condition sans-DSS ( $p = .049$ ). Le CHEX semble augmenter la probabilité qu'un changement, ayant reçu l'attention de l'individu, demeure non détecté. Il n'y a pas de différence entre le pourcentage de changements non détectés fixés obtenu dans la condition HCR et ceux observés dans les conditions avec-CHEX ( $p = .423$ ) et sans-DSS ( $p = .865$ ). Bien qu'en

présence du HCR ce pourcentage ne soit pas plus élevé, cet outil ne permet pas de le réduire.

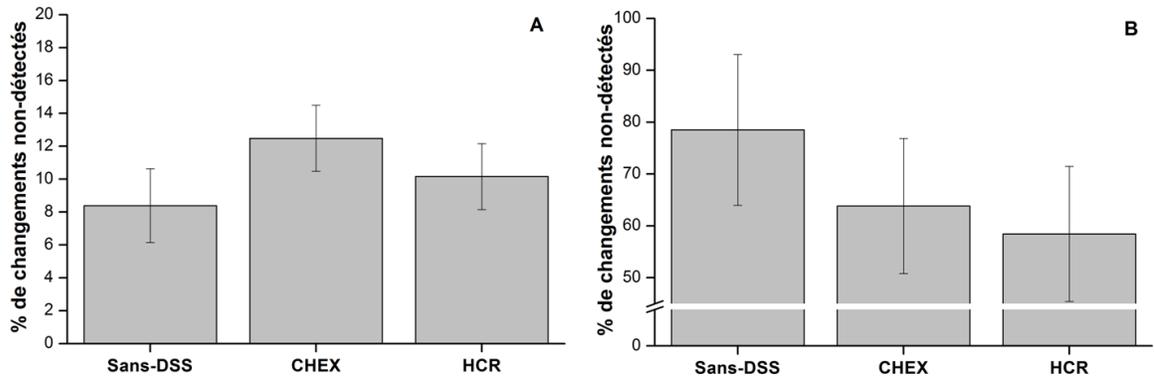


Figure 23. Pourcentage moyen de changements non-détectés selon s'ils ont été fixés (Panneau A) ou non (Panneau B) pour les conditions sans-DSS, avec-CHEX et avec-HCR de l'Expérience 1. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95% calculés selon la méthode de Masson et Loftus (2003).

Le résultat selon lequel le CHEX a tendance à provoquer une augmentation du nombre de changements fixés non détectés (changements ayant reçu une certaine quantité de ressources attentionnelles de l'opérateur, mais qui demeurent non détectés) indique que cet outil semble exacerber la prévalence de la source attentionnelle de la CaC (Vachon et coll., 2012). Étant donné que la tâche ERGR est déjà complexe et exigeante (quatre sous-tâches à effectuer de façon concurrente), l'ajout de l'outil CHEX à l'interface peut avoir surchargé les capacités attentionnelles des participants et peut même avoir provoqué des interruptions temporaires de leurs processus attentionnels. Ces failles attentionnelles seraient responsables de l'augmentation du nombre de changements critiques qui ont été manqués par les participants. Bien que le HCR ajoute aussi une charge en information à l'interface S-CCS, son tableau la présente sous un format réduit et ne représente pas le même fardeau attentionnel pour les participants comparativement au CHEX. Conséquemment, le HCR n'augmente pas la prévalence de la seconde source de la CaC.

**Charge de travail perçue.** Les mesures de charge de travail perçue sont extraites à l'aide des sous-échelles « Charge mentale » et « Pression temporelle » du questionnaire NASA-TLX (voir Figure 24). Une ANOVA à plan simple révèle que le niveau de charge

mentale subjective diffère entre les conditions expérimentales,  $F(2, 57) = 5.064$ ,  $p = .009$ ,  $\eta^2_p = .151$ . La condition avec-CHEX est associée au niveau de charge mentale perçue le plus élevé lorsque comparé au niveau obtenu dans les conditions sans-DSS ( $p = .014$ ) et avec-HCR ( $p = .046$ ). Aucune différence significative n'est obtenue entre les conditions sans-DSS et avec HCR quant à cette sous-échelle de la charge de travail subjective ( $p = .684$ ). De façon similaire, les participants rapportent des niveaux moyens de pression temporelle différents d'une condition à l'autre,  $F(2, 57) = 3.657$ ,  $p = .032$ ,  $\eta^2_p = .114$  (voir Figure 24). Les tests de comparaisons multiples révèlent deux différences marginalement significatives : les participants se considéreraient davantage pressés par le temps en présence du HEX ( $p = .064$ ) qu'en présence du HCR ou qu'en l'absence d'un DSS ( $p = .072$ ). Les conditions HCR et sans-DSS obtiennent des niveaux moyens de pression temporelle similaires ( $p = .968$ ).

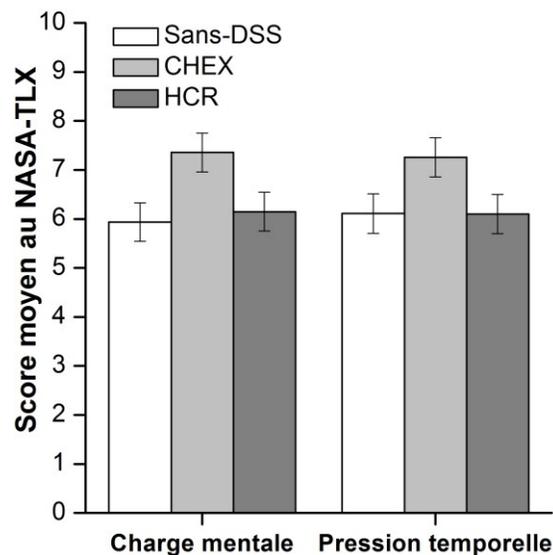


Figure 24. Moyennes des scores obtenus sur les échelles de charge mentale et de pression temporelle du questionnaire NASA-TLX pour les conditions sans-DSS, avec-CHEX et avec-HCR de l'Expérience 1. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95%.

Ces résultats suggèrent que les participants en situation multitâche dynamique ne sont pas en mesure de comprendre complètement l'information reliée aux changements contenue dans le HEX puisque leurs ressources cognitives sont déjà grandement

mobilisées par les autres tâches qu'ils doivent effectuer. Dans un contexte à charge de travail élevée, le CHEX serait donc moins efficace comparativement à ce qui avait été démontré par les études en contexte unitâche de détection des changements. La charge de travail induite par la version simplifiée de l'outil est plus faible que celle imposée par le CHEX, mais n'est pas différente de celle obtenue en l'absence d'un outil d'aide à la décision. Cela appuie les résultats présentés précédemment selon lesquels, contrairement au CHEX, le HCR ne provoque pas d'augmentation de la prévalence de la CaC, mais n'améliore pas la détection de changements comparativement à ce qui est observé lorsque l'opérateur ne dispose pas d'un outil de soutien cognitif. Dans ce contexte où l'opérateur est sous pression temporelle élevée, doit consulter diverses sources d'information et effectue plusieurs tâches simultanément, les indices contextuels qui lui permettent de détecter consciemment un changement ne sont peut-être pas assez saillants pour être repérés rapidement dans le tableau de l'outil (Steelman et coll., 2011).

**Utilisation du CHEX.** Malgré que les outils testés n'aient pas réussi à prévenir ou à réduire la CaC, il est tout de même intéressant d'évaluer à quel point les participants trouvent les outils utiles pour soutenir leurs tâches. Le tableau 1 montre les résultats des métriques qui sont extraites afin d'estimer l'utilisation des outils par les participants. Les participants utilisent très peu le CHEX et le HCR. En effet, ils ne passent que 2,74 % de la durée des scénarios à regarder le CHEX alors que ce pourcentage diminue à 1,19 % pour la condition HCR. Cette différence est statistiquement significative,  $t(38) = 2.49$ ,  $p = .017$ ,  $d = 0.79$ . Cependant, il n'y a pas de différence significative entre la condition HCR et la condition CHEX quant au pourcentage de sélections effectuées dans le tableau des outils,  $t(38) = 1.32$ ,  $p = .193$ ,  $d = 0.27$  (9,82 % et 14,4 % de sélections d'aéronefs, respectivement). Le contenu du tableau des outils s'ajoute à un contexte de travail déjà exigeant et à une charge visuelle déjà élevée. Il se peut que les participants n'aient pas eu suffisamment de temps et de ressources attentionnelles afin d'utiliser correctement les outils, ce qui expliquerait leur utilisation sporadique.

Tableau 1. *Résultats associés aux mesures comportementales et aux mouvements oculaires selon l'utilisation des outils d'aide à la détection des changements disponibles durant l'Expérience 1. Les nombres entre parenthèses sont des écarts-types.*

	Condition avec-CHEX	Condition avec-HCR
Nombre moyen de sélections d'aéronef		
Dans l'outil	104,8 (86,13)	81,6 (89,58)
Dans le radar	624,4 (132,64)	724,2 (218,86)
% de sélections sur l'outil	14,4 (11,74)	9,82 (9,88)
Mouvements oculaires sur l'outil		
% du temps passé à regarder	2,74 (2,61)	1,19 (0,95)
% de fixations	4,3(3,66)	1,8 (1,57)

Étant donné que les dernières analyses sont basées sur des moyennes de l'utilisation des outils de tous les scénarios expérimentaux, il est possible que l'utilisation sporadique du CHEX soit due à un abandon graduel de l'outil par les participants au cours de l'expérience. Pour vérifier cette possibilité, les trois métriques d'utilisation des outils sont maintenant comparées entre les quatre blocs de scénarios pris dans leur ordre de passation. Les résultats des ANOVAs à mesures répétées sont sans équivoques : il n'y a pas de différence significative entre les blocs tests en ce qui concerne le pourcentage de sélections d'aéronefs faites dans le tableau du CHEX,  $F(3, 57) = 1.72, p = .173, \eta^2_p = .083$  (Figure 25A), le pourcentage de fixations sur le tableau du CHEX,  $F(3, 57) = 1.95, p = .131, \eta^2_p = .093$  (Figure 25B), et le temps passé à regarder l'outil,  $F(3, 57) = 1.10, p = .357, \eta^2_p = .055$  (Figure 25C). Ces résultats démontrent que le CHEX est utilisé de façon minimale tout au long de l'expérience. Pour le HCR, le pourcentage de sélections dans l'outil ne varie pas au fil du temps,  $F(3, 57) = 2.577, p = .063, \eta^2_p = .119$  (Figure 25A). Par contre, le temps passé à regarder l'outil varie significativement selon les blocs tests,  $F(3, 57) = 3.895, p = .013, \eta^2_p = .170$  (Figure 25C), de même que les quatre blocs tests sont associés à des pourcentages de fixations sur l'outil significativement différents,  $F(3, 57) = 5.521, p = .002, \eta^2_p = .225$  (Figure 25B). Bien qu'aucune des comparaisons multiples (avec correction de

Bonferroni) effectuées suite aux ANOVAs ne soit significative, des analyses de tendance révèlent que le temps passé à regarder le HCR,  $F(1, 19) = 6.978, p = .016, \eta^2_p = .269$ , et le pourcentage de fixations sur l’outil,  $F(1, 19) = 8.913, p = .008, \eta^2_p = .319$ , ont tendance à diminuer de manière linéaire au cours des scénarios expérimentaux. Ces résultats laissent supposer que l’utilisation minimale du HCR semble même diminuer au cours de l’expérience, ce qui pourrait montrer un abandon progressif de l’outil. Cela porterait à croire que les participants pensent être en mesure de détecter les changements tout aussi bien sans l’aide du HCR.

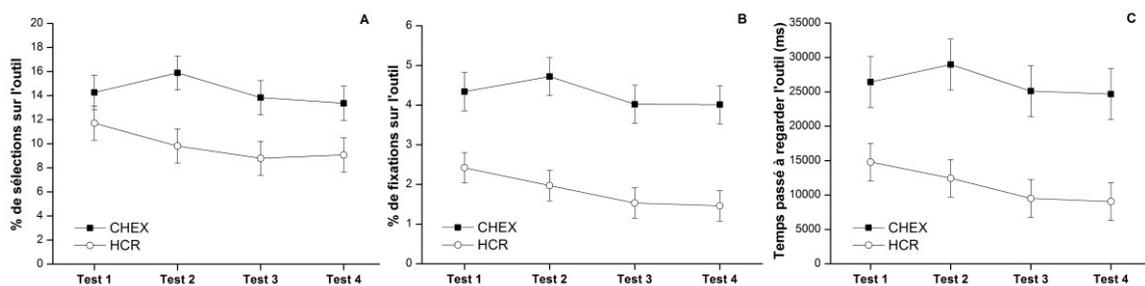


Figure 25. Pourcentage moyen des sélections d’aéronefs effectuées dans l’outil (Panneau A), pourcentage moyen des fixations sur l’outil (Panneau B) et temps moyen passé à regarder l’outil (Panneau C) en fonction de l’ordre de passation des tests pour les conditions avec-CHEX et avec-HCR de l’Expérience 1. Les barres d’erreur représentent les intervalles de confiance intra-sujet à 95%.

Afin de vérifier si la performance globale de détection des changements est reliée à l’utilisation des outils par les participants, le pourcentage de changements non détectés et la vitesse de détection sont corrélés aux trois métriques d’utilisation présentées ci-dessus (voir Tableau 2). Pour la condition avec-CHEX, aucune des métriques d’utilisation n’est corrélée à la performance de détection des changements. De tels résultats suggèrent qu’en plus d’une utilisation sporadique de l’outil, faire davantage de sélections d’aéronefs dans le tableau du CHEX ou regarder davantage ce système d’aide ne sont pas associés à une potentielle augmentation de la performance de détection des changements. Cependant, une plus grande utilisation du HCR est associée à certains bénéfices relatifs à la détection des changements : fixer davantage le HCR et sélectionner davantage de contacts par l’entremise de son tableau ont tendance à améliorer la capacité des participants à détecter les changements. Ceci suggère que le HCR semble fournir, d’une manière fonctionnelle, de

l'information utile aux participants. Utiliser davantage le HCR pourrait aider les participants à détecter plus de changements critiques, mais ils ne seraient pas nécessairement plus rapides à les repérer.

Tableau 2. *Corrélations entre la performance de détection des changements et les métriques d'utilisation pour les conditions CHEX et HCR de l'Expérience 1.*

Mesure	Prop. de fixations sur le CHEX	Temps passé à regarder le CHEX	Prop. de sélections dans le CHEX	Prop. de fixations sur le HCR	Temps passé à regarder le HCR	Prop. de sélections dans le HCR
% de changements non détectés	-.260	-.327	-.379	-.478*	-.441*	-.654**
Vitesse de détection (ms)	-.029	-.102	-.361	.066	.02	-.047

\*  $p < .05$

\*\*  $p < .01$

**Performance ERGR.** La qualité de l'évaluation du risque (pourcentage de classifications d'aéronefs correctes) et l'efficacité de la défense (pourcentage d'hostiles frappant le navire) sont mesurées dans le but de compléter l'évaluation holistique de l'efficacité des outils d'aide à la décision. Tel que montré par la Figure 26A, le pourcentage de classifications correctes tend à être inférieur en présence du CHEX, mais l'ANOVA à plan simple ne révèle aucune différence significative entre les trois conditions,  $F(2, 57) = 1.898, p = .159, \eta^2_p = .062$ . En ce qui concerne l'efficacité de la défense, le pourcentage de contacts hostiles qui frappent le navire est significativement différent entre les trois conditions expérimentales,  $F(2, 57) = 5.261, p = .008, \eta^2_p = .156$  (voir Figure 26B). La présence du CHEX provoque une augmentation significative du pourcentage d'hostiles frappant le navire comparativement à ce qui est obtenu dans les conditions avec-HCR ( $p = .043$ ) ou sans-DSS ( $p = .011$ ), alors qu'il n'y a pas de différence entre les conditions HCR et sans-DSS ( $p = .515$ ). L'ajout du CHEX à l'interface S-CCS nuit à la performance de la

tâche ERGR. Le navire des participants est plus vulnérable aux attaques des contacts hostiles lorsqu'on donne accès à cet outil d'aide à la décision qu'en l'absence d'un tel système.

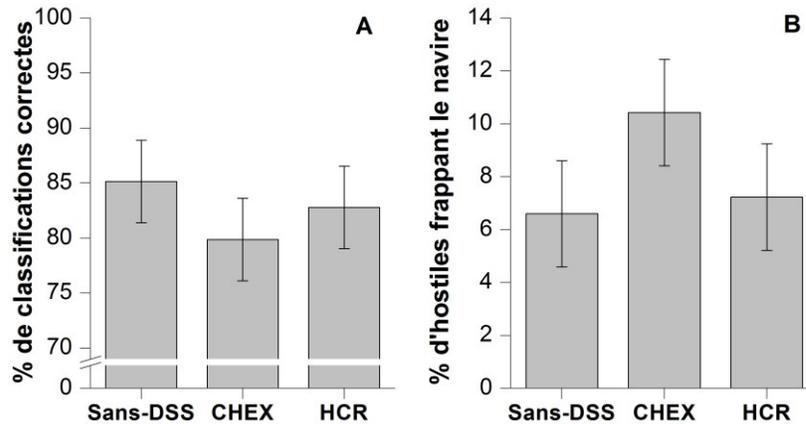


Figure 26. Pourcentage moyen des classifications correctes (Panneau A) et pourcentage moyen d'hostiles frappant le navire (Panneau B) pour les conditions sans-DSS, avec-CHEX et avec-HCR de l'Expérience 1. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95%.

L'augmentation de la charge de travail observée dans la condition CHEX semble aussi expliquer la diminution de la performance ERGR. De tels résultats indiquent que l'ajout de ce DSS à l'interface imposerait aux participants une source d'information additionnelle à consulter qui serait responsable d'une augmentation de la charge cognitive de la tâche (Perry et coll., 2013). En effet, le tableau du CHEX répertorie tous les changements (critiques et non-critiques) qui surviennent dans la situation complexe et dynamique, et augmente donc la quantité d'information visuelle que l'opérateur doit traiter avant de prendre ses décisions. Il a aussi été démontré que la seule présence d'un outil ou une simple modification d'une partie d'une interface peut modifier la façon dont une tâche est effectuée comparativement à ce qui est observé avant un tel changement (McCrickard, Catrambone, Chewar, & Stasko, 2003; Rousseau, Tremblay, Lafond, Vachon, & Breton, 2007. Par conséquent, l'ajout du CHEX à l'interface peut moduler la capacité des participants à évaluer correctement le risque des contacts radars et à gérer efficacement la réponse envers les hostiles, laissant ainsi la frégate plus exposée aux attaques (hostiles frappant le navire). Le HCR, version du CHEX créée pour diminuer la charge en

information imposée par l'outil, ne nuit pas à la performance relative à la tâche ERGR comparativement à ce qui est obtenu avec le CHEX. Toutefois, cette version de l'outil n'améliore pas la performance des participants comparativement à la condition sans-DSS.

*Résumé des résultats de l'Expérience 1.* Ni la version originale du CHEX ni la version simplifiée de cet outil ne réduisent la prévalence de la CaC lorsque la détection des changements est sous-jacente à une tâche plus complexe. Le CHEX nuit même à certains aspects cognitifs liés à l'accomplissement des autres sous-tâches de l'opérateur. La différence majeure entre cette étude et celles qui ont montré un effet bénéfique du CHEX (voir Smallman & St. John, 2003; St. John et coll., 2005) est que la détection des changements dans la tâche ERGR n'est qu'une des nombreuses sous-tâches à effectuer par les participants au lieu d'être le seul but de l'expérience. Il se pourrait que l'effet bénéfique du CHEX sur la performance de détection des changements précédemment démontré par St. John et ses collègues émerge dans le présent contexte de C2 maritime si la détection des changements était la seule tâche à effectuer.

## *Expérience 2*

Jusqu'à présent, le résultat principal de cette thèse est l'incapacité des outils CHEX et HCR à prévenir la CaC lorsque la détection des changements est sous-jacente à une autre tâche, ce qui semble être en contradiction avec l'étude de St. John et ses collaborateurs (2005) qui a démontré une réduction nette de la CaC grâce au soutien du CHEX. Bien que l'Expérience 1 de ce chapitre et l'étude de St. John et ses collaborateurs (2005) utilisent des micromondes similaires qui simulent, de façon fonctionnelle, une situation complexe et dynamique de surveillance de la circulation aérienne, cette contradiction dans les résultats pourrait s'expliquer par la différence entre les exigences générales des tâches que les participants doivent effectuer dans chaque contexte. Plus précisément, dans l'Expérience 1 de ce chapitre, la détection des changements était une composante d'une tâche de plus haut niveau, alors que dans l'expérience de St. John et ses collègues (2005), la détection des changements était la seule tâche à effectuer. Dans l'Expérience 2, pour tester cette hypothèse, l'interface du micromonde S-CCS est modifiée afin de retirer tous les éléments

associés aux sous-tâches d'évaluation du risque et de gestion de la réponse. Les participants n'ont maintenant qu'à détecter et à désigner les changements critiques en surveillant la valeur du nouveau paramètre « *Threat* » qui indique le niveau de risque de l'aéronef sélectionné. De cette façon, la capacité du CHEX à soutenir la détection des changements peut être évaluée dans le même contexte de combat aérien de l'Expérience 1, mais à l'aide d'une tâche qui impose une charge travail moins élevée aux participants. Si le CHEX permet d'améliorer la détection des changements dans ce contexte expérimental modifié (ce qui répliquerait les résultats de St. John et coll., 2005), la capacité du CHEX à réduire ou non la CaC serait attribuable aux exigences de la tâche à effectuer.

## MÉTHODE

**Participants.** L'échantillon de l'Expérience 2 est composé de 39 participants : vingt sont assignés à la condition sans-CHEX (10 hommes, âge moyen : 24,5 ans) et les autres sont assignés à la condition avec-CHEX (9 hommes, âge moyen : 26,3 ans). Aucun de ces participants n'a participé à l'Expérience 1.

**Tâche.** Pour cette seconde expérience, les sujets n'ont à effectuer qu'une seule tâche : la tâche de détection des changements dans laquelle ils doivent appuyer sur le bouton *Detection* (voir Figure 27) pour signaler les changements critiques qu'ils détectent (un aéronef qui passe d'un statut non menaçant vers un statut hostile). Bien que les participants doivent sélectionner un contact radar et consulter le paramètre « *threat* » de la liste (voir Figure 27) pour connaître son statut, chaque changement critique subi par un aéronef est accompagné par un changement de vitesse et/ou de direction visible sur l'écran radar, comme tel était le cas pour l'expérience précédente. Le point blanc représentant le contact radar devient rouge et les lignes du tableau du CHEX (lorsqu'il est disponible) qui sont associées à cet aéronef deviennent grises lorsque les sujets appuient sur le bouton *Detection*. Cette manipulation est effectuée afin de permettre aux participants de garder la trace des changements qu'ils ont déjà rapportés. Tout comme l'Expérience 1, il y a huit changements critiques par scénario.



Figure 27. Interface du micromonde S-CCS pour la condition sans-CHEX de l'Expérience 2. Les flèches pointent vers les changements apportés à la liste des paramètres et aux boutons d'action pour adapter l'interface au contexte de détection des changements effectuée seule.

Afin d'éviter que les participants appuient systématiquement sur le bouton *Detection* aussitôt qu'ils voient le statut hostile dans la liste des paramètres et qu'ils focalisent plutôt leur attention seulement sur les avions qui deviennent des hostiles, deux contacts hostiles agissent en tant que fausses alarmes et apparaissent sur l'écran radar au début de chaque scénario expérimental. Le point représentant ces hostiles est blanc tout comme les autres avions lorsqu'ils apparaissent sur le radar. Le tutoriel comporte des instructions qui avertissent les participants de l'existence de ces fausses alarmes, et par conséquent, ces derniers ont connaissance que la présence d'un avion hostile sur le radar ne signifie pas automatiquement qu'un changement critique est survenu. Les participants sont informés de ne pas détecter ni de rapporter ces fausses alarmes (hostiles ne faisant pas de changements) et de se concentrer exclusivement sur l'apparition de nouvelles menaces. Lorsque les participants aperçoivent un changement de vitesse et/ou de direction sur leur radar, ils doivent sélectionner l'avion concerné et vérifier le paramètre *threat* afin de déterminer si ce changement est critique (c.-à-d., un changement d'un statut non menaçant vers un statut hostile) ou non (c.-à-d., un avion demeure non menaçant pour la frégate ou est hostile depuis le début du scénario).

**Micromonde.** Le micromonde est pratiquement identique à celui utilisé dans l'Expérience 1 et celui décrit dans le chapitre 2 de la présente thèse, à l'exception des modifications suivantes. Tel qu'illustré par la Figure 27, l'attribut « *threat* », qui indique le niveau de menace réelle de l'aéronef sélectionné, est ajouté à la liste des paramètres. Cette modification de l'interface est effectuée puisque les participants n'ont qu'à détecter les changements des statuts de contacts radar—c.-à-d., repérer les nouveaux hostiles— et n'ont plus à classifier les aéronefs qui apparaissent sur l'écran radar. La classification des aéronefs est maintenant effectuée par l'ordinateur et le résultat de cette catégorisation est fourni par le paramètre *threat*. Alors, les participants doivent détecter les changements de statut (risque) en se basant sur des indices visuels (c.-à-d., changement de vitesse et/ou de direction) qui surviennent sur le radar et/ou dans le CHEX (si disponible), et doivent déterminer si ces changements sont critiques ou non en consultant le paramètre *threat*. Les autres paramètres sont maintenant non pertinents à la tâche. Le bouton *Detection* remplace le bouton *Engage* qui, dans l'expérience précédente, était utilisé pour lancer des missiles vers les hostiles. Ce bouton permet aux participants de rapporter explicitement tout changement critique. Les boutons de classification et d'imminence du risque sont retirés de l'interface en raison des objectifs de cette expérience. Les sujets n'ont plus à accomplir les autres sous-tâches ERGR étant donné que la détection des changements est l'unique tâche à effectuer dans l'Expérience 2. Dans la condition sans-CHEX (voir Figure 27), les participants doivent détecter les changements critiques sans outil d'aide à la décision alors que dans la condition avec-CHEX (voir Figure 28), les participants ont accès au CHEX.



Figure 28. Interface du micromonde S-CCS pour la condition avec-CHEX de l'Expérience 2.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

**Détection des changements globale.** Tel qu'illustré dans la Figure 29A, le pourcentage de changements non détectés<sup>2</sup> est significativement plus élevé dans la condition sans-CHEX que dans la condition avec-CHEX,  $t(37) = 4.922$ ,  $p < .001$ ,  $d = 1.592$ . Les participants sont significativement plus rapides à détecter les changements critiques dans la condition avec-CHEX que dans la condition sans-CHEX,  $t(37) = 4.28$ ,  $p < .001$ ,  $d = 1.37$  (voir Figure 29B). Il semble donc que le CHEX améliore la détection des changements lorsqu'elle est la seule tâche à réaliser par les participants, ce qui reproduit les résultats de St. John et coll. (2005). Dans ce contexte, le CHEX est très efficace pour réduire la CaC.

<sup>2</sup> Bien que les participants n'ont qu'à effectuer la tâche de détection des changements, le pourcentage de changements non détectés obtenu dans la condition sans-CHEX est néanmoins beaucoup plus élevé que ce qui est observé dans la condition sans-CHEX de l'Expérience 1. Un tel résultat contre-intuitif pourrait s'expliquer par une sous-estimation des pourcentages de changements non détectés pour l'expérience précédente. En effet, lorsque la détection des changements est sous-jacente à la tâche ERGR, les détections correctes résultent des actions faites sur les contacts radars en question. Il est donc possible que dans un tel contexte, certains changements qui n'ont jamais été perçus par les participants soient enregistrés comme étant détectés puisque les participants ont sélectionné les aéronefs ayant subi les changements dans les 15 secondes post-changements sur la base des exigences des autres sous-tâches qu'ils avaient à accomplir (et non pas parce qu'ils avaient réellement remarqué le changement). Cette sous-estimation est impossible lorsque la détection de changement est la seule tâche à effectuer.

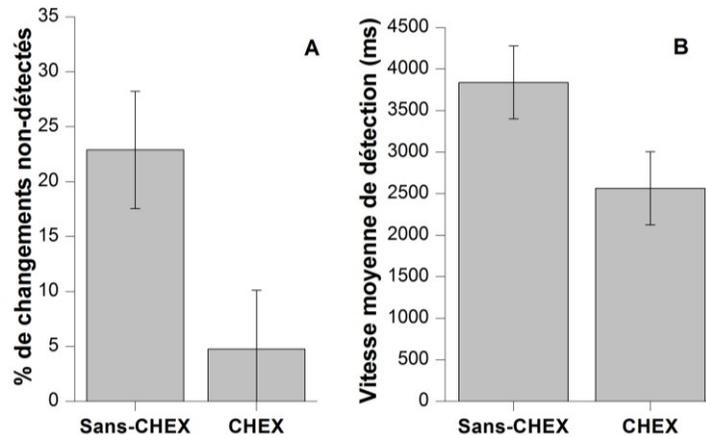


Figure 29. Pourcentage moyen de changements non détectés (Panneau A) et vitesse de détection moyenne (Panneau B) pour les conditions avec-CHEX et sans-CHEX de l'Expérience 2. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95%.

**Changements non détectés fixés vs non fixés.** Pour la condition sans-CHEX, 68 % des changements non détectés sont fixés et 32 % sont non fixés. En ce qui concerne la condition avec-CHEX, 70,8 % des changements non détectés sont fixés, alors que 29,2 % sont non fixés. Cependant, tel montré précédemment, le niveau global de changements non détectés est nettement plus bas dans la condition avec-CHEX (4,8 %) que ce qui est observé dans la condition sans-CHEX (22,9 %). Tel qu'il a été effectué pour l'Expérience 1, pour déterminer l'effet du CHEX sur les deux sources de CaC, les changements critiques (incluant les changements détectés et les changements non détectés) sont maintenant séparés en deux catégories : non fixés ou fixés. Un pourcentage de changements non détectés (un taux de CaC) est calculé pour chacune des catégories, et ce, pour chacune des conditions expérimentales. Parmi tous les changements critiques, 88 % (2253 sur 2560 changements) sont fixés dans la condition sans-DSS et 92,9 % (2259 sur 2432 changements) dans la condition avec-CHEX. Alors, il y a environ, en moyenne 10 fois moins de changements critiques non fixés que de fixés. La Figure 30 est séparée en deux panneaux afin de mieux observer l'effet des conditions expérimentales sur les taux des deux sources de CaC.

Une ANOVA mixte 2 (fixation) X 2 (condition) est effectuée pour comparer ces résultats entre les deux conditions expérimentales. Cinq participants de la condition avec-CHEX sont retirés de cette analyse puisqu'ils ont fixé tous les changements critiques et

seraient considérés comme des données manquantes. L'ANOVA révèle des effets principaux significatifs de fixation,  $F(1, 32) = 69.29, p < .001, \eta^2_p = .684$ . et de condition,  $F(1, 32) = 19.12, p < .001, \eta^2_p = .374$  (voir Figure 30). L'effet d'interaction est aussi significatif,  $F(1, 32) = 8.464, p = .007, \eta^2_p = .209$ . Cette interaction provient du fait que, malgré qu'il y ait une moins grande proportion de changements fixés non détectés que de changements non fixés non détectés, cette différence est significativement atténuée par la présence du CHEX comparativement à ce qui est obtenu dans la condition contrôle ( $p = .007$ ). Ces résultats suggèrent que lorsque la détection des changements est la seule tâche à accomplir, le CHEX est un outil efficace pour réduire les deux sources de CaC et plus particulièrement, les changements qui sont manqués en raison d'un échec des ressources attentionnelles déployées vers ceux-ci.

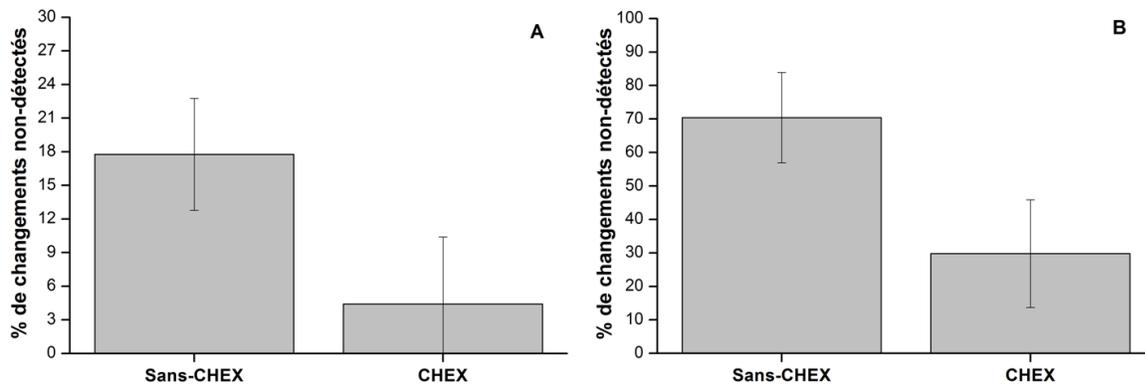


Figure 30. Pourcentage moyen de changements non détectés selon s'ils ont été fixés (Panneau A) ou non (Panneau B) pour les conditions sans-CHEX et avec-CHEX de l'Expérience 2. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95% calculés selon la méthode de Masson et Loftus (2003).

**Charge de travail perçue.** Les participants qui ont accès à l'aide du CHEX rapportent des niveaux de charge mentale,  $t(36) = -2.04, p = .049, d = .661$ , et de pression temporelle,  $t(36) = -2.08, p = .045, d = .675$ , significativement plus bas que les participants qui ne profitent pas du soutien de cet outil (Figure 31). Il semble donc que, contrairement à ce qui est observé dans l'Expérience 1, le CHEX permet de réduire la charge de travail subjective, mais seulement lorsque la détection des changements est la seule tâche à effectuer. Étant donné que les demandes cognitives de la tâche sont moins élevées que ce qui est observé dans l'Expérience 1, une certaine quantité des ressources attentionnelles de

l'opérateur demeurent disponibles pour lui permettre d'utiliser l'outil à son avantage. Il est possible que les participants soient conscients que tous les changements qui surviennent dans un scénario sont automatiquement répertoriés dans le tableau du CHEX. De ce fait, les participants se sentiraient moins chargés mentalement et moins pressés dans le temps puisqu'ils savent qu'ils peuvent toujours se référer à l'archive offerte par l'outil pour compléter ce qu'ils ont manqué sur le radar.

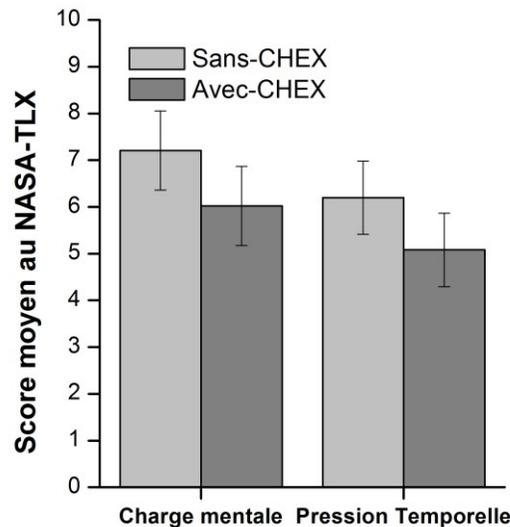


Figure 31. Moyennes des scores obtenus sur les échelles de charge mentale et de pression temporelle du questionnaire NASA-TLX pour les conditions sans-CHEX et avec-CHEX de l'Expérience 2. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance inter-sujet à 95%.

**Utilisation du CHEX.** Tel que montré dans le Tableau 3, quand la détection des changements est la seule tâche à effectuer, les participants font significativement plus de sélections d'aéronefs en utilisant le tableau du CHEX que lorsque la détection des changements est sous-jacente à la tâche ERGR (Expérience 1),  $t(37) = -2.96, p = .005, d = 0.936$ . Les participants passent 11,5 % de la durée des scénarios tests de l'Expérience 2 à regarder le CHEX, ce qui est significativement supérieur à ce qui est obtenu dans la condition avec-CHEX de l'Expérience 1 (2,7 %),  $t(37) = -3.49, p = .001, d = 1.105$ .

Tableau 3. *Résultats associés aux mesures comportementales et aux mouvements oculaires selon l'utilisation des outils d'aide à la détection des changements disponibles durant l'Expérience 2. Les nombres entre parenthèses sont des écarts-types.*

	Condition avec-CHEX
Nombre moyen de sélections d'aéronef	
Dans l'outil	724 (765,81)
Dans le radar	1119,95 (1062,7)
% de sélections sur l'outil	45,54 (45,63)
Mouvements oculaires sur l'outil	
% du temps passé à regarder	11,5 (10,95)
% de fixations	28 (22,33)

Le tableau 4 liste les corrélations entre la performance de détection des changements et les métriques d'utilisation du CHEX. Plus les participants sélectionnent des aéronefs à l'aide du tableau du CHEX, plus le pourcentage de changements non détectés tend à diminuer. De plus, la vitesse de détection des changements est non seulement corrélée à une augmentation du nombre de sélections d'aéronefs effectuées sur le CHEX, mais aussi à une augmentation du nombre de fixations et du temps passé à regarder l'outil. En somme, une utilisation plus fréquente du CHEX tend à améliorer la performance de détection des changements, ce qui démontre son efficacité en tant que soutien à la décision lorsque les demandes cognitives de la tâche à effectuer sont plus faibles.

Tableau 4. *Corrélations entre la performance de détection des changements et les métriques d'utilisation du CHEX pour l'Expérience 2.*

Mesure	Prop. de fixations sur le CHEX	Temps passé à regarder le CHEX	Prop. de sélection dans le CHEX
% de changements non détectés	-.377	-.262	-.587**
Vitesse de détection (ms)	-.460*	-.478*	-.601**

\*  $p < .05$

\*\*  $p < .01$

Des ANOVAs à mesures répétées sont effectuées afin de déterminer si les résultats associés aux métriques d'utilisation du CHEX varient selon l'avancement des tests expérimentaux. Le pourcentage de sélections faites par l'entremise de l'outil est significativement différent selon le temps de mesure,  $F(3, 54) = 5.49, p = .022, \eta_p^2 = .234$  (Figure 32A). Bien qu'aucun des tests de comparaisons multiples effectués ne soit significatif, une analyse de tendance montre que le pourcentage de sélections sur le CHEX a tendance à augmenter de façon linéaire selon les quatre scénarios tests,  $F(1, 18) = 6.286, p = .022, \eta_p^2 = .259$ . Plus les participants deviennent habitués au fonctionnement du CHEX, plus ils ont tendance à réaliser que d'utiliser cet outil est avantageux et pourrait les aider à effectuer leurs tâches. Le temps passé à regarder le CHEX ne varie pas dans le temps,  $F(3, 54) = 1.48, p = .231, \eta_p^2 = .076$  (Figure 32C), de même que le pourcentage de fixations sur l'outil ( $F < 1$ ; Figure 32B).

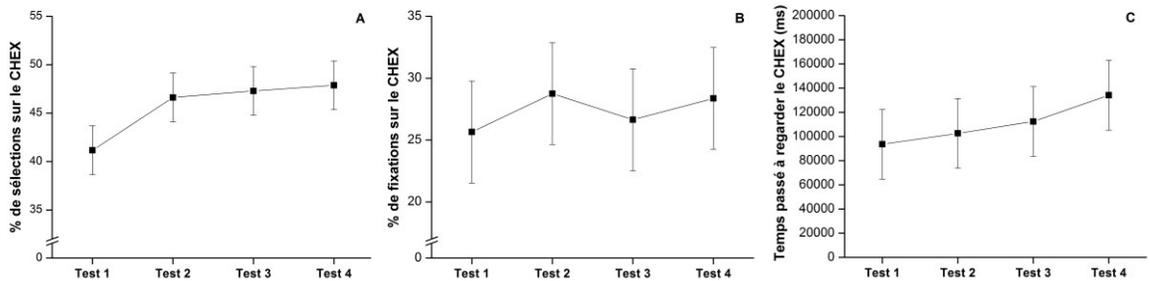


Figure 32. Pourcentage moyen de sélections d'aéronefs par l'entremise de l'outil (Panneau A), pourcentage moyen de fixations sur l'outil (Panneau B) et temps moyen passé à regarder le tableau de l'outil (Panneau C) en fonction de l'ordre de passation des tests pour la condition avec-CHEX de l'Expérience 2. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance intra-sujet à 95%.

### *Discussion du Chapitre 3*

Dans la présente étude, le CHEX est utilisé dans un contexte expérimental dynamique et multitâche au sein duquel la détection des changements est sous-jacente à la tâche principale. Ce contexte est différent de celui dans lequel il a été créé, validé et s'est révélé très efficace, où la détection des changements était la seule tâche à effectuer (voir Smallman & St. John, 2003). Les résultats de l'Expérience 1 montrent que le CHEX n'aide pas les participants, puisqu'il semble provoquer une augmentation de la prévalence de la

source attentionnelle de la CaC, produit une diminution de l'efficacité de la défense, et mène à des niveaux de charge de travail perçue plus élevés. Le HCR, une version épurée du CHEX qui présente une quantité moindre d'information dans le tableau et ainsi impose un coût de traitement plus faible, est perçu par les participants comme exigeant une moins grande charge de travail et est associé à une meilleure efficacité de la défense que son prédécesseur. Bien que le HCR n'ait pas d'effet négatif sur la performance, il ne permet pas d'améliorer ni le taux ni la vitesse de détection des changements lorsqu'elle est sous-jacente à la tâche ERGR. En fait, les résultats qui lui sont associés sont similaires à ceux obtenus dans la condition sans-DSS. L'efficacité d'un outil comme le CHEX à soutenir la détection des changements semble donc dépendre des exigences du contexte de travail dans lequel il est utilisé. Effectivement, l'Expérience 2 réplique les résultats de St. John et ses collègues (2005), mais cette fois-ci, au sein de la simulation de surveillance radar en contexte de C2 maritime de la présente étude. Le CHEX est très efficace pour réduire la prévalence des deux sources de CaC lorsque la détection des changements critiques est effectuée seule. Dans ce contexte, le CHEX offre un répertoire des changements qui est complémentaire à l'écran radar et qui soutient réellement la cognition humaine. Cependant, dans un contexte multitâche, seule sa présence semble suffisante pour augmenter la charge d'information visuelle de l'interface, la charge de travail subjective, et sa consultation semble demander une grande quantité de ressources attentionnelles, n'en laissant qu'une quantité moindre pour effectuer les autres sous-tâches. Par conséquent, il est crucial que la conception de tels systèmes d'aide à la décision prenne en compte chacune des composantes du système cognitif conjoint formé de l'outil, l'utilisateur et la situation de travail. Dans le cas présent, l'alliance cognitive entre ces trois parties du système conjoint n'est pas établie de façon optimale.

Le modèle NSEEV sur le comportement attentionnel (Noticing = Saliency, Effort, Expectancy, Value; Steelman et coll., 2011) offre un cadre théorique très utile pour expliquer et interpréter les résultats de la présente étude sur la détection des changements. Il permet de prédire le déploiement de l'attention d'un individu dans un espace de travail visuel dynamique sur la base de facteurs liés au traitement dirigé par les données et de facteurs associés au traitement dirigé par les concepts. La capacité à remarquer des

éléments pertinents dans une scène visuelle dépend d'une combinaison de la saillance d'une région d'intérêt, des attentes qu'un événement donné survienne dans une partie spécifique de la scène, de la valeur de l'information contenue dans cette région et de l'effort nécessaire pour diriger son attention vers l'item en question (distance par rapport au point de fixation actuel). Ces facteurs sont considérés dans l'interprétation des résultats de l'étude quant à la prévalence des deux sources de CaC ainsi que pour expliquer la sous-utilisation des outils.

## **LE CHEX ET LES DEUX SOURCES DE CAC**

La source perceptive de la CaC consiste en l'incapacité à diriger son attention vers l'objet ayant subi un changement (p.ex., Durlach, 2004; Henderson & Hollingworth, 2003; O'Regan et coll., 2000; Rensink et coll., 1997; Simons & Ambinder, 2005; St. John et coll., 2005). Il ne fait nul doute que si un participant ne regarde jamais en direction du changement, ce dernier a plus de chances de demeurer non détecté. Le déploiement de l'attention d'une région d'intérêt à une autre peut demander beaucoup d'effort, particulièrement lorsque l'espace de travail visuel comporte de nombreux objets radars, une liste détaillée des attributs de ces aéronefs et plusieurs boutons d'action. Les items ou les événements qui se retrouvent plus loin du point de fixation de l'individu sont plus susceptibles d'être manqués (Ballard, Hayhoe, & Pelz, 1995;; Steelman et coll., 2011; Wickens et al., 2008). Malgré l'ajout d'une région d'intérêt à l'interface S-CCS dans les conditions avec-CHEX et avec-HCR – qui aurait pu augmenter la probabilité que les participants regardent au mauvais endroit au mauvais moment –, le nombre de fixations sur les outils est minimal et il n'y a pas de différence entre les conditions quant aux changements manqués en raison que l'attention des participants se retrouvait ailleurs sur la scène visuelle. Les outils n'améliorent/n'aggravent pas cette source de CaC.

L'attention sélective (dirigée vers l'objet ayant subi un changement critique) est nécessaire, mais ne garantit pas en elle seule la détection d'un changement (voir Beck, Peterson, & Angelone, 2007; Simons et coll., 2000; Simons & Rensink, 2005). Un changement peut demeurer non détecté en raison de l'échec des processus attentionnels de l'individu (voir Vachon et coll., 2012). Cette seconde source de CaC survient lorsque l'attention du participant est dirigée et engagée sur l'objet d'intérêt (le participant regarde le

changement), mais la quantité de ressources attentionnelles allouées à cet objet est insuffisante pour permettre l'extraction et le traitement approfondi de l'information visuelle nécessaire pour détecter consciemment le changement (cf. Privitera, Renninger, Carney, Klein, & Aguilar, 2010). La détection d'un changement nécessite une comparaison entre la représentation mentale de l'état pré-changement de l'objet et son état actuel. Dans la tâche de la présente étude, la comparaison en mémoire et le rappel de l'évolution subtile des attributs dynamiques d'un changement peuvent être particulièrement exigeants comparativement à la comparaison de la modification plus abrupte des attributs statiques d'un changement. La compréhension qu'un changement dynamique subtile s'est produit demande davantage de ressources attentionnelles. En effet, le modèle NSEEV distingue la saillance statique (le contraste entre l'objet d'intérêt et l'environnement qui l'entoure; voir Itti & Koch, 2000) de la saillance dynamique (les changements continuels de la saillance statique; voir Yantis & Jonides, 1990). Il se peut que les individus ayant à effectuer la tâche ERGR soient plus vulnérables à la CaC en raison de l'absence de caractéristiques reliées à la saillance statique qui permettraient de distinguer un contact ayant subi un changement critique de tout autre objet présent sur l'écran radar (p.ex., couleur, luminosité, orientation). Le cercle blanc qui représente un aéronef devient vert, jaune ou rouge une fois que le participant l'a classifié comme non-hostile, incertain ou hostile respectivement. Par contre, ce changement de couleur n'offre pas d'information pertinente quant à un potentiel changement critique. Seules les caractéristiques reliées à la saillance dynamique d'un aéronef (accélération/décélération ou changement de direction) permettent à un participant de percevoir un potentiel changement critique sur l'écran radar.

Le modèle NSEEV propose aussi que la taille du champ visuel fonctionnel a tendance à rétrécir plus la charge de travail et le stress augmentent. La tâche ERGR est susceptible de demander un déploiement attentionnel de plus grande envergure (une étendue attentionnelle plus large) afin de, à la fois, détecter les changements dynamiques et d'effectuer les autres sous-tâches. La taille du champ visuel fonctionnel nécessaire pour effectuer cette tâche est donc vulnérable à l'augmentation de la charge de travail. La condition avec-CHEX est associée à une charge de travail plus élevée, entraînant une difficulté à détecter ces changements dynamiques. Le tableau du CHEX est un répertoire

permanent (disponible en tout temps) de tout changement qui survient dans la situation surveillée ainsi que des attributs modifiés qui lui sont associés. Cette aide augmente la quantité d'information disponible à l'écran concernant les changements en vue de soutenir la comparaison en mémoire des états pré-changement et post-changement nécessaire à la détection de ces derniers. Par contre, le tableau du CHEX ne permet pas de rendre plus saillante l'information importante et pertinente aux changements critiques afin de réellement soutenir cette fonction cognitive. En effet, le tableau ne permet pas de distinguer les changements critiques des changements non critiques. Bien que l'utilisation de cet outil soit minimale, le fait de consulter occasionnellement sa liste des changements peut demander davantage d'effort pour diviser son attention afin de vérifier si son tableau encombré de données peut fournir de l'information utile pour gérer la situation surveillée. De plus, la simple présence du CHEX à l'écran peut avoir augmenté la charge de travail en créant une condition dans laquelle l'opérateur doit, en plus de faire ses tâches, choisir s'il veut diriger son attention vers l'outil ou non et surtout quand il peut le faire. Cette condition de charge de travail élevée (CHEX + Tâche ERGR) serait donc reliée à un rétrécissement de l'étendue du déploiement attentionnel, ce qui réduirait la probabilité de diriger suffisamment de ressources attentionnelles vers un changement afin de le détecter. La version simplifiée de l'outil (HCR) est composée d'un tableau beaucoup moins chargé en information. D'ailleurs, les mesures autorapportées indiquent des niveaux de charge de travail perçue plus bas en présence du HCR comparativement aux niveaux obtenus en présence de la version originale du CHEX. Par conséquent, dans la condition avec-HCR, de même que dans la condition sans-DSS, une plus grande quantité de ressources attentionnelles demeurent disponibles, ce qui permet à un plus grand nombre de changements fixés d'atteindre la conscience. Par contre, bien que le HCR ne perturbe pas la performance des participants comme ce qui est obtenu avec le CHEX, l'ajout du HCR à l'interface n'est pas bénéfique. Malgré que son tableau soit moins encombré, les items critiques ne sont pas plus saillants que les items non critiques.

Dans l'Expérience 2, les exigences de la tâche et la charge de travail sont réduites, puisque les participants n'ont qu'à détecter les changements critiques. Dans ce contexte, la version originale du CHEX est très efficace pour réduire la prévalence des deux sources de

CaC. Dans une situation multitâche dynamique, le déploiement attentionnel doit couvrir plusieurs zones d'intérêt et parfois, certains changements peuvent demeurer non détectés s'ils ne sont pas suffisamment saillants pour capter l'attention de l'individu. Le CHEX, en détectant automatiquement et en répertoriant de façon continue tous les changements d'état de la situation, peut compenser ces écarts momentanés de l'attention. Lorsqu'il le peut, l'opérateur peut s'aider du CHEX pour redéployer son attention vers l'information qu'il a besoin pour rapporter un changement qui était, auparavant, non détecté. De plus, dans un environnement unitâche (plutôt que dans un environnement multitâche), le CHEX réduit considérablement la source attentionnelle de la CaC comparativement à ce qui est obtenu dans la condition sans-DSS. Dans ce contexte, le CHEX semble aider à décharger les processus attentionnels et mémoriels des participants plutôt que de les surcharger, tel qu'observé dans l'environnement multitâche de l'Expérience 1. Les participants sont plus en mesure d'utiliser l'aide du CHEX pour répondre aux requêtes d'attention (*calls for attention*) produites par les changements critiques. En résumé, le contexte à charge de travail élevée de l'Expérience 1 provoquerait un rétrécissement du champ de vision fonctionnel (largeur du focus attentionnel) qui rend la détection des changements fixés plus difficile. Ce contexte compromettrait la capacité de l'individu à détecter et à extraire l'information dynamique des changements critiques. Cependant, dans le contexte à tâche unique de l'Expérience 2, le CHEX permet de réduire la charge de travail. Le focus attentionnel plus large permettrait de détecter et d'extraire plus facilement l'information relative aux changements critiques lorsque les avions ayant subi ces changements sont fixés.

## **QUALITÉ DE L'ÉVALUATION DU RISQUE ET L'EFFICACITÉ DE LA RÉPONSE**

La simple présence du CHEX à l'écran serait suffisante pour nuire à la performance ERGR. Il est possible qu'une quantité insuffisante de ressources cognitives soient accordées à l'exécution des sous-tâches ERGR lorsque ces dernières sont mobilisées par l'accomplissement d'actions non nécessaires telles que la vérification de la véracité des changements notifiés par le CHEX (Dixon & Wickens, 2006). Ce manque de ressources

nuirait à l'efficacité des participants à planifier les réponses de défenses contre les hostiles. Tel que démontré par plusieurs études, la simple modification d'une partie d'une interface peut changer les comportements oculaires et de recherche d'information, de même que les processus décisionnels et, par conséquent, peut moduler la façon qu'un individu effectue une tâche (McCrickard et coll., 2003). Suivant ce point, les modifications apportées à l'interface S-CCS lors de l'ajout d'un outil pourraient changer la manière d'effectuer la tâche ERGR, et pourraient expliquer la baisse de performance des participants.

## **UTILISATION SPORADIQUE DU CHEX**

Il existe plusieurs raisons plausibles de la sous-utilisation des outils dans l'Expérience 1. Premièrement, les participants peuvent s'empêcher d'utiliser davantage le CHEX ou le HCR croyant être capables de détecter facilement les changements par eux-mêmes (sans aide; la *Cécité* à la *Cécité aux Changements*; Levin, Momen, Drivdahl, & Simons, 2000; Levin, Drivdahl, Momen, & Beck, 2002). Deuxièmement, la charge de travail élevée associée à la réalisation concurrente de l'ensemble des sous-tâches ERGR peut ne laisser qu'une faible quantité de ressources cognitives disponibles pour consulter l'outil (Wickens, 2002). Faire usage du CHEX signifie que les participants doivent investir du temps et des ressources pour comprendre les données répertoriées dans le tableau de l'outil. Il se peut que les participants pensent manquer trop d'information clé présentée par les autres zones critiques de l'interface qui sont nécessaires pour accomplir les activités ERGR. Le fait que l'utilisation du CHEX demeure sporadique dans le temps suggère que les sujets tentent de l'utiliser tout au long des quatre scénarios tests. Cependant, ils ne consultent le tableau du CHEX que peu fréquemment étant donné la charge de travail élevée imposée par le contexte multitâche dynamique. Effectivement, dans le contexte unitâche de l'Expérience 2, une plus grande quantité de ressources cognitives demeure disponible pour effectuer la détection des changements et pour extraire l'information pertinente aux changements critiques à partir du tableau du CHEX. De plus, dans l'Expérience 2, il n'y a plus de risque de manquer de l'information importante lors des visites du CHEX puisque les participants n'ont qu'à détecter les changements critiques.

L'utilisation minimale du CHEX peut aussi être due au manque de confiance des participants envers l'automatisation du CHEX. Le cœur de l'outil repose sur un système de détection automatique des changements qui surviennent dans la situation dynamique. Étant donné que la majorité des changements répertoriés dans le tableau du CHEX sont non critiques et non pertinents à la tâche (fausses alarmes), les participants peuvent être moins enclins à répondre aux changements qui y sont signalés et peuvent considérer l'outil comme étant peu fiable (*cry-wolf effect*; Brenitz, 1983; Wickens, Rice, Keller et coll., 2009). Cependant, les résultats montrent une utilisation sporadique, mais constante du CHEX tout au long de l'expérience, alors que l'effet crier-au-loup supposerait une diminution progressive de l'utilisation au fur et à mesure que l'outil perd de sa crédibilité. Il est possible que les participants considèrent que de distinguer (trier) les changements critiques (vrais positifs) des changements non critiques (fausses alarmes) demanderait trop de temps et de ressources cognitives. Par conséquent, ils décident plutôt d'utiliser le radar pour détecter les changements. De plus, l'automatisation d'un outil n'a pas besoin d'être parfaite pour être utile (Wickens et coll., 2009; St. John et coll., 2005; McGuirl & Sarter, 2006). Néanmoins, le CHEX pourrait bénéficier de l'ajout d'un algorithme qui filtrerait les changements répertoriés selon leur importance et leur pertinence à la tâche. Le design actuel du CHEX sur-avertit les participants de tout événement survenant sur le radar. En limitant le nombre de fausses alarmes, le tableau du CHEX serait moins encombré de données, son coût de traitement (de consultation) diminuerait et il serait plus facile d'y trouver l'information nécessaire pour détecter un changement.

Le résultat selon lequel le CHEX est utilisé de façon constante tout au long de l'Expérience 1 permet de rejeter la possibilité que l'utilisation sporadique de l'outil soit due à un manque d'entraînement ou de familiarité à l'outil. Si tel était le cas, l'utilisation du CHEX aurait augmenté dans le temps, jusqu'à atteindre son maximum au dernier scénario expérimental (c.-à-d. après 88 minutes de familiarisation à l'outil). De plus, le même patron de résultats est obtenu dans l'Expérience 2. Les participants utilisent davantage le CHEX, et ce après avoir reçu les mêmes instructions et la même familiarisation à l'outil que dans l'Expérience 1. Cela suggère que le tutoriel et les sessions de pratique sont suffisants pour permettre aux participants de comprendre comment fonctionne le CHEX.

Le modèle NSEEV permet également d'expliquer la sous-utilisation des outils. Il est possible que les participants ne veuillent pas investir l'effort nécessaire pour déplacer leur attention vers l'extrémité droite de l'interface, lorsque l'information qu'ils ont besoin pour effectuer les autres sous-tâches ERGR se trouve au centre et à l'extrémité gauche de l'écran (le radar et la liste des paramètres, respectivement). Ce modèle réduit la prévalence des grands déplacements de l'attention en incluant un filtre spatial qui réduit la saillance des stimuli périphériques, et qui imitent les propriétés inhibitrices de l'effort et de la faible acuité visuelle associées aux longues saccades. Tandis que le radar et la liste des paramètres sont essentiels pour effectuer les principales sous-tâches ERGR, le CHEX peut être considéré comme une option supplémentaire demandant trop d'effort pour être traitée dans des conditions de charge de travail élevée. Cela expliquerait pourquoi les participants ne déplacent leur attention (saccades) que rarement vers cet outil. Autrement dit, si les participants sont activement engagés dans les tâches ERGR qui nécessite un traitement de l'information présentée sur la liste des paramètres (côté gauche de l'écran) et sur le radar (centre), ils peuvent être moins enclins à investir l'effort requis pour déplacer leur attention vers le tableau du CHEX (côté droit de l'écran) comparativement à s'ils n'avaient pas à effectuer de telles tâches (environnement unitâche). Effectivement, dans l'Expérience 2, la liste des paramètres située à la gauche de l'écran a moins d'importance lorsque la détection des changements est l'unique tâche à effectuer. Les participants peuvent consacrer plus de leur temps à consulter l'outil situé à la droite de l'écran sans avoir à effectuer de longues saccades oculaires pour circuler d'une zone à une autre.

De plus, le modèle NSEEV souligne l'importance des attentes pour déterminer si un changement a plus de chances d'être détecté ou non, et si un participant présume que certaines zones de l'interface sont plus utiles que d'autres pour la détection des changements. La sous-utilisation du CHEX peut être exacerbée par la tendance subjective des participants à se fier à des outils qui reproduisent ou imitent le réalisme spatio-temporel de la scène visuelle (*naïve realism*; Smallman & St. John, 2005). Ce biais cognitif peut les empêcher de considérer le CHEX comme un outil utile pour les aider à réaliser leurs tâches. Effectivement, la transposition des événements qui surviennent dans la situation en entrées verbales (en texte) répertoriées dans un tableau peut être moins attirante pour les

participants que la présentation spatio-temporelle de l'écran radar. Selon le point de vue du modèle NSEEV, il est possible que les participants attribuent plus de valeur au réalisme naïf du radar qu'au tableau textuel et encombré du CHEX. Ceci pourrait aussi être combiné à une attente selon laquelle les changements critiques seraient plus apparents sur le radar qui présente l'information dynamique sur les changements (vitesse et direction) que sur un tableau qui comporte de l'information écrite et difficile à filtrer. Encore une fois, l'utilisation du CHEX demeure sporadique dans le temps, ce qui laisse supposer une certaine volonté des participants à utiliser cet outil. Par conséquent, il est plus plausible que la charge de travail élevée par le contexte multitâche soit la cause de la sous-utilisation des outils. Dans l'Expérience 2, étant donné que la détection des changements est effectuée seule, il est possible que les participants attribuent plus de valeur au tableau du CHEX et s'attendent à ce que cet outil facilite leur tâche. Cela expliquerait l'utilisation nettement plus élevée du CHEX dans ce contexte. Les attentes du participant concernant l'endroit où il croit trouver l'information la plus utile à sa tâche influence donc ses comportements oculaires.

L'approche de l'ingénierie des systèmes cognitifs suggère que l'opérateur doit faire équipe avec l'outil qui est à sa disposition, former un système cognitif conjoint (alliance cognitive) afin d'accomplir ses tâches (p.ex., Hollnagel & Woods, 2005). La prévalence plus élevée de la CaC due à l'échec des processus attentionnels (seconde source) obtenue dans l'Expérience 1 peut être expliquée par la difficulté de ce système cognitif conjoint, dans des conditions de charge de travail élevée, à combiner l'information répertoriée par le CHEX à celle recueillie et traitée par l'opérateur à partir de l'écran radar. Dans ces conditions, il semble difficile pour l'opérateur de comprendre à l'aide du CHEX les patrons et les relations entre les différents éléments d'information qui leur permettraient de mieux gérer la situation (manque d'observabilité; voir Potter & Rousseau, 2010; Woods, 1995). En d'autres mots, l'alliance cognitive entre le participant et le CHEX n'est pas bien établie pour permettre une détection optimale des changements. Ce manque de cohésion peut expliquer en partie pourquoi les participants, dans l'Expérience 1, qui doivent effectuer toutes les sous-tâches ERGR de façon concurrente, choisissent de ne pas utiliser le CHEX pour détecter les changements.

## *Conclusion*

La présente étude suggère que, pour être réellement efficace (soutenir la cognition) dans des contextes de travail multitâches et dynamiques, un système d'aide à la décision doit être adapté aux ressources attentionnelles disponibles de l'utilisateur. Elle est une démonstration que, parfois, une solution technologique conçue spécifiquement pour soutenir une fonction cognitive de l'utilisateur peut aussi avoir un effet contre-productif et des conséquences inattendues sur la prise de décision dynamique et sur d'autres fonctions cognitives (Trafton & Ratwani, 2014). Le présent chapitre montre l'importance d'évaluer l'efficacité d'un outil d'aide à la décision en combinant l'application du cadre méthodologique de l'ingénierie de systèmes cognitifs (voir Potter & Rousseau, 2010) et l'application d'une approche holistique d'analyse des résultats (voir Vachon et coll., 2012).

L'approche holistique permet de démontrer que de changer la nature et les exigences d'une tâche de prise de décision dynamique peut rendre un outil, qui a été prouvé très efficace à prévenir la CaC dans un environnement unitâche de détection des changements effectuée, inefficace lorsqu'il est employé dans un contexte multitâche. En plus de ne pas améliorer la détection des changements, le CHEX nuit à d'autres aspects des activités de l'opérateur. L'approche holistique fournit une évaluation cognitive exhaustive d'un système de support qui va au-delà de la mesure de la fonction cognitive qu'il a été conçu pour soutenir (voir Lafond et coll., 2010). Clairement, le taux de prévalence de la CaC est susceptible d'être très élevé dans les tâches de surveillance de situations complexes et dynamiques de la vie réelle. Il est impératif de continuer à créer et à valider des outils de soutien cognitif afin de prévenir ce phénomène.

Selon le point de vue de l'ingénierie des systèmes cognitifs, le changement de la nature et des exigences de la tâche de prise de décision altérerait la cohésion cognitive entre l'opérateur humain et le système de soutien (Rasmussen, Pejtersen, & Goodstein, 1994). Ce changement modulerait les interactions entre l'opérateur et le CHEX (le HCR aussi), et influencerait négativement la capacité de ce système cognitif conjoint à détecter les changements importants dans l'état de la situation. En fait, cette étude fournit est une

preuve empirique supplémentaire du principe de spécificité de la tâche qui prétend qu'un outil prouvé efficace dans un contexte particulier peut être inefficace dans un contexte différent (voir Hegarty, 2011). Le CHEX doit donc être adapté aux conditions de travail du nouveau contexte dans lequel il est utilisé.

La présente étude permet aussi d'approfondir les connaissances sur l'existence des deux sources de CaC précédemment démontrée par Vachon et ses collègues (2012). Conséquemment, l'évaluation d'un système de soutien à la détection des changements doit inclure une mesure de son efficacité à prévenir les deux sources de CaC en employant le suivi des mouvements oculaires. Les mouvements oculaires permettent de montrer que le CHEX tend à augmenter le nombre de changements fixés non détectés, ce qui révèle une exacerbation de la prévalence de la seconde source de CaC—l'incapacité à attribuer une quantité suffisante de ressources attentionnelles pour prendre conscience de l'occurrence d'un changement et de le détecter—alors que le pourcentage global de changements non détectés est similaire à celui obtenu lorsque la tâche ERGR est effectuée sans cette aide technologique. Un support efficace à la détection des changements doit aider l'opérateur à identifier les changements, tout en limitant le coût en ressources attentionnelles nécessaires pour traiter l'information qu'il offre. Ce coût doit être particulièrement réduit lorsque l'opérateur se retrouve dans un contexte de travail où ses ressources cognitives sont déjà sur-mobilisées.

## **CHAPITRE IV**

### *DISCUSSION GÉNÉRALE*

## ***Résumé des objectifs de la thèse et des principaux résultats***

La présente thèse a deux principaux objectifs. Le premier est de pallier les lacunes actuelles dans l'étude de la CaC, un phénomène qui a été principalement examiné à l'aide d'un contexte expérimental où la tâche unique était de détecter les changements dans une scène visuelle statique. Le but est de déterminer l'ampleur des deux sources de la CaC lorsque la détection des changements est une tâche essentielle à la réalisation d'un ensemble d'activités liées au C2 maritime (contexte multitâche dynamique). Dans l'Expérience 1, la détection des changements est sous-jacente à la tâche d'évaluation du risque et de la gestion de la réponse (ERGR) qui s'inscrit dans les activités de C2 maritime simulées par le micromonde S-CCS. Cette expérience démontre qu'environ 15 % des changements critiques qui surviennent dans l'espace opérationnel sous surveillance sont manqués par l'opérateur; cela confirme que les individus qui doivent surveiller et gérer des situations complexes et dynamiques sont vulnérables à la CaC (DiVita et coll., 2004; Durlach et coll., 2008; Vachon et coll., 2012). La condition contrôle (sans outil) de l'Expérience 1 montre que la moitié des changements critiques non détectés sont non fixés. Ils sont associés à la source perceptive de la CaC : les participants n'y ont pas prêté attention. L'autre moitié des changements critiques non détectés sont fixés par les participants, et sont donc associés à la source attentionnelle de la CaC. Les participants n'ont pas pris conscience de ces changements puisqu'ils étaient incapables d'attribuer une quantité suffisante de ressources attentionnelles aux objets en question pour les traiter de façon approfondie et effectuer l'ensemble des étapes requises pour détecter les changements (ce qui inclut les processus mnésiques, la compréhension et la prise de décision selon si un changement s'est produit ou non).

Le deuxième objectif est de vérifier si le CHEX, une solution conçue et s'étant révélée efficace pour prévenir la CaC dans un contexte de tâche de détection simple, demeure efficace malgré la nature multitâche et dynamique de la simulation du C2 maritime. Le HCR, la version simplifiée du CHEX, a été conçu dans le cadre de la thèse afin de pallier le potentiel effet néfaste de la surcharge en information du tableau du CHEX sur la CaC. Le but est d'évaluer l'efficacité du CHEX et du HCR pour prévenir ou réduire

la prévalence des deux sources de la CaC lorsque leur fonction d'aide à la détection des changements est employée dans un contexte multitâche dynamique. Contrairement au contexte de surveillance du trafic aérien de St. John et ses collègues (2005), dans lequel la détection des changements était l'unique tâche à effectuer par les participants, dans le cadre de la démarche empirique de la présente thèse, la détection des changements est sous-jacente à la réalisation optimale de la tâche ERGR. Les résultats de l'Expérience 1 constituent des appuis empiriques clairs de l'incapacité du CHEX et du HCR à améliorer la détection des changements dans un contexte multitâche dynamique. Ces résultats viennent à l'encontre de ceux de l'étude de St. John et ses collaborateurs en contexte unitâche dynamique, dans laquelle le CHEX permettait de prévenir la CaC. Le CHEX semble même mener à une augmentation de la prévalence de la source attentionnelle de la CaC lorsque la détection des changements est sous-jacente aux autres sous-composantes de la tâche ERGR. Même si les participants utilisent sporadiquement le CHEX tout au long de l'expérience, cet outil nuit à d'autres aspects des activités de C2 maritime. Les participants rapportent un niveau de charge de travail plus élevé et sont moins efficaces pour défendre leur navire lorsqu'ils ont accès au CHEX. Quant à la version simplifiée du CHEX, les participants utilisent peu l'aide à la détection des changements offerte par le HCR. Cette sous-utilisation de l'outil a même tendance à diminuer au cours des scénarios. Contrairement au CHEX, le HCR ne nuit pas à la détection des changements, mais ne réduit pas non plus la prévalence de la CaC par comparaison à la condition sans-outil. Le HCR n'influence pas négativement la charge de travail de l'opérateur et sa performance à la tâche ERGR.

L'Expérience 2 vise à répliquer le contexte unitâche dynamique de détection des changements dans lequel le CHEX permettait d'abolir la CaC (voir St. John et coll., 2005), mais cette fois au sein du micromonde S-CCS. Dans cette expérience, les participants n'ont qu'à détecter les changements critiques qui surviennent dans l'espace opérationnel surveillé. Contrairement à l'Expérience 1, les participants utilisent davantage le soutien du CHEX, et cette utilisation a tendance à augmenter au cours de l'Expérience 2. Conformément à ce qui a été démontré par St. John et ses collègues, l'utilisation du CHEX

permet de réduire les deux sources de la CaC et la charge de travail perçue lorsque la détection des changements est l'unique tâche à effectuer par les participants.

### ***Contribution méthodologique***

La présente thèse propose une classification des études sur la CaC en trois catégories : contexte unitâche statique, contexte unitâche dynamique et contexte multitâche dynamique. La majorité des connaissances sur la CaC ont été acquises à l'aide d'un contexte expérimental unitâche statique. La tâche du participant dans ces études en laboratoire est uniquement de détecter les changements survenant dans les scènes visuelles statiques présentées (p.ex., Caplovitz et coll., 2008). La CaC doit y être induite artificiellement par des événements visuels exogènes (p.ex., masque, taches d'encre, distractions) perturbant la saisie par le système cognitif du signal de transition produit par le changement (Kveraga & Hughes, 2005; Rensink, 2002). Bien qu'elles permettent d'expliquer, de façon fiable et facilement reproductible, les comportements de recherche visuelle et les dispositions cognitives qui mènent à la CaC, les études en contexte unitâche sont moins représentatives du travail cognitif des individus qui doivent surveiller et gérer des situations complexes et dynamiques telles que le contrôle du trafic aérien et la surveillance par caméra. Il y a une différence entre surveiller l'apparition d'un objet dans une image statique et détecter le changement de trajectoire d'un avion parmi les mouvements et l'évolution rapide des autres objets présents sur le radar d'un contrôleur aérien (voir Durso et coll., 1998).

Peu d'études se sont intéressées à la CaC lorsque l'individu doit surveiller l'évolution d'une situation et détecter, sous pression temporelle, des changements importants parmi les mouvements des autres objets présents dans la scène visuelle (p.ex., la circulation aérienne dans un espace opérationnel; St. John et coll., 2005). Dans ce contexte unitâche dynamique, le participant doit distinguer les changements pertinents à la mission parmi les changements non pertinents (mouvements des distracteurs). Ces études montrent que les techniques de perturbations visuelles employées en statique ne sont pas nécessaires pour provoquer la CaC en contexte unitâche dynamique. Dans une scène visuelle statique,

un seul objet produit un signal de transition pré-post changement. Il n'y pas de signaux de transition associés à des changements non pertinents ou aux déplacements des autres objets présents dans la scène. En contexte dynamique, il est donc naturellement plus difficile pour l'individu de repérer les signaux de transition des changements à détecter parmi les signaux de transition produits par les mouvements et les changements associés aux objets distracteurs (Boot et coll., 2006). Par contre, ces études ne représentent pas la complexité de la surveillance et de la gestion de situations dynamiques à haut risque (Klein et coll., 2003). Les participants n'ont qu'à surveiller la situation pour détecter des changements pertinents selon une règle de décision. Ces études ne reproduisent pas la conséquence de manquer le changement de trajectoire d'un avion sur les autres tâches qu'un contrôleur aérien doit effectuer, sur la qualité de son travail et sur la sécurité publique (Varakin et coll., 2004).

Quelques études récentes se sont intéressées à la CaC en contexte multitâche dynamique où l'individu doit traiter l'information provenant des objets présents dans la scène visuelle, dont les propriétés telles la vitesse et la trajectoire sont susceptibles de changer, afin d'être en mesure de prendre des décisions quant à ses tâches principales (voir DiVita et coll., 2004; Durlach et coll., 2008; Vachon et coll., 2012). La surveillance et la gestion de situations complexes et dynamiques exigent que l'individu répartisse son temps et ses ressources cognitives entre plusieurs tâches à effectuer. Dans ce contexte plus écologique, la détection des changements représente un enjeu considérable, mais n'est pas la seule activité de l'individu. La capacité à détecter les changements critiques est considérée comme une fonction cognitive qui permet de bien suivre et de comprendre la situation, et d'ajuster sa prise de décision. La détection des changements est donc sous-jacente à la réalisation de l'ensemble des activités que l'individu doit réaliser. De plus, l'individu doit transiger avec une charge de travail élevée et effectuer l'ensemble de ses tâches sous pression temporelle. Le fait de manquer un changement entraîne une diminution de la conscience de la situation, nuit à la prise de décision dans les tâches principales et peut ultimement mener à des conséquences désastreuses (Durlach, 2004; Parasuraman et coll., 2009; Vachon et coll., 2012; Varakin et coll., 2004).

## **APPROCHE MACRO-COGNITIVE EXPÉRIMENTALE**

La présente thèse adopte une approche macro-cognitive expérimentale qui permet de poursuivre l'acquisition de connaissances fiables et reproductibles sur la CaC. La stratégie méthodologique est d'utiliser un micromonde qui offre le meilleur compromis possible entre le contrôle expérimental associé aux études expérimentales sur la CaC (contexte unitâche statique ou dynamique) et la validité écologique. Le micromonde S-CCS simule les caractéristiques multitâches et dynamiques du C2 maritime. Le participant joue le rôle d'un opérateur radar dont les activités comprennent la surveillance de l'espace opérationnel, l'évaluation du risque des aéronefs apparaissant dans l'espace opérationnel, l'évaluation de l'imminence du risque des aéronefs hostiles et la gestion de la réponse. Ces activités requièrent un suivi optimal de la situation, ainsi que la détection de tout changement pertinent.

Tel que mentionné par Lafond et ses collègues (2010), la détection des changements est sous-jacente au C2. En plus de permettre la création de scénarios sollicitant les activités cognitives liées au C2, le micromonde S-CCS permet de manipuler l'occurrence de changements critiques et de changements non critiques (à ignorer) dans la situation à surveiller et à gérer afin de créer des circonstances propices à la CaC. Les changements critiques sont des aéronefs passant d'un statut non menaçant à un statut menaçant (cf. DiVita et coll., 2004; Durlach et coll., 2008; Vachon et coll., 2012). Les changements critiques influencent l'accomplissement des tâches principales de C2 maritime. Détecter un tel changement mène à l'ajustement de l'évaluation du risque de l'aéronef et à une meilleure planification de la défense contre cet élément hostile. Les résultats de l'Expérience 1 de la thèse convergent avec ceux des études antérieures quant à la présence et à l'ampleur de la CaC en situation complexe et dynamique. En effet, le niveau de CaC observée (Expérience 1; 13,4 %) est comparable aux résultats obtenus par Vachon et ses collègues (2012; environ 13 %), DiVita et ses collègues (2004; environ 15 %) et Durlach et ses collaborateurs (2008; environ 11 %) qui simulent des contextes multitâches dynamiques de C2. Le travail empirique de la thèse contribue à l'avancement des connaissances sur les

conditions de travail d'un contexte multitâche dynamique qui favorisent la prévalence de la CaC.

Le niveau de CaC obtenu est une base fiable (une valeur étalon) pour comparer l'efficacité de solutions visant à soutenir la détection des changements en contexte multitâche dynamique. La stratégie méthodologique combine l'emploi du suivi des mouvements oculaires et l'application d'une approche holistique dans l'analyse des résultats. Le suivi des mouvements oculaires est utilisé à la fois pour expliquer le déploiement attentionnel associé à la détection des changements, analyser les interactions entre l'opérateur et les outils qui sont mis à sa disposition, et déterminer comment les outils aident au déploiement attentionnel sur l'interface, et l'effet de ce dernier sur leur efficacité à réduire la prévalence des sources de CaC. La thèse démontre aussi l'importance d'adopter une approche holistique dans l'analyse de l'efficacité des outils : l'efficacité d'un outil n'est pas seulement déterminée par sa capacité à prévenir ou à réduire la CaC, mais par son effet sur les autres aspects des activités de C2 de l'opérateur, soit la catégorisation des aéronefs, la planification des actions contre les éléments hostiles et la charge de travail perçue.

### ***Contribution théorique***

Les études sur la détection des changements en contextes unitâches statique et dynamique ont principalement permis de caractériser la source perceptive de la CaC : l'individu manque un changement car il n'a pas porté son attention sur l'objet en question. En contexte statique, les techniques de perturbations visuelles camouflent le signal de transition produit par le changement afin d'induire la CaC, alors qu'en dynamique, les signaux de transition des mouvements des distracteurs détournent l'attention que le participant doit prêter sur les changements pertinents afin de les détecter. Ces études identifient les caractéristiques particulières de la scène et des objets (facteurs liés au traitement dirigé par les données) et les facteurs liés au déploiement volontaire de l'attention (traitement dirigé par les concepts) qui exercent une influence sur la capacité d'un individu à détecter des changements. La saillance du changement parmi les autres objets dans la scène est un des facteurs déterminants de la détection des changements. Par

exemple, plus le nombre d'objets à surveiller dans la scène est grand, moins le changement est saillant. L'individu doit effectuer plusieurs saccades oculaires pour trouver le changement. Plus le nombre de saccades oculaires augmentent, plus l'individu demeure potentiellement aveugle aux événements survenant à l'écran (Beck, Levin, & Angelone, 2007; Boot et coll., 2006; Hewlett & Oezbek, 2012; Zelinsky, 2001). La suppression saccadique est donc en partie responsable de la source perceptive de la CaC (Simons & Ambinder, 2005). En ce qui concerne le traitement dirigé par les concepts, les attentes de l'individu semblent influencer la détection des changements. Les changements qui sont pertinents, probables et qui surviennent dans les régions d'intérêt d'une scène visuelle sont plus faciles à détecter (Theeuwes et coll., 2009). Alors, il semble que l'individu a tendance à déployer stratégiquement son attention sélective dans une scène visuelle. Par contre, des changements saillants ont plus de chances de capter son attention; cela faciliterait leur détection. La présente thèse contribue à l'avancement des connaissances sur la CaC en offrant d'une part une preuve supplémentaire de l'existence d'une seconde source de ce phénomène. Grâce aux mouvements oculaires, il est possible de déterminer que la moitié des changements critiques non détectés sont fixés par les participants; ils portent donc leur attention sur les objets qui ont subi un changement, mais n'en ont pas conscience. D'autre part, la présente thèse démontre que les facteurs liés au traitement dirigé par les données (p.ex., la saillance) et au traitement dirigé par les concepts (p.ex., les attentes de l'individu) qui servent à expliquer l'occurrence de la source perceptive de la CaC permettent aussi d'expliquer la source attentionnelle de ce phénomène en contexte multitâche dynamique.

## **MODÈLE NSEEV ET LES DEUX SOURCES DE LA CAC**

La présente thèse s'appuie sur le modèle NSEEV pour décrire les causes possibles des deux sources de la CaC. En plus d'inclure la saillance et les attentes, ce modèle ajoute la valeur des régions d'une scène visuelle et l'effort nécessaire pour déplacer son regard d'une région à une autre afin de prédire le déploiement attentionnel de l'individu dans un espace de travail dynamique. Selon ce modèle, l'individu préférerait prêter son attention aux régions d'une scène visuelle qui contiennent de l'information importante pour la réalisation de ses tâches (qui ont une grande valeur; Steelman et coll., 2011). Par

conséquent, les changements qui surviennent dans l'une de ces régions à grande valeur auraient plus de chances d'être détectés que ceux qui se produisent dans une région moins importante pour l'ensemble des tâches de l'individu. L'effort nécessaire pour déplacer son attention d'une région à une autre est fonction de la distance entre le point de fixation actuel de l'individu et la région de la scène qu'il doit consulter. Plus cette distance est grande, moins l'individu a tendance à investir l'effort nécessaire pour déplacer son attention vers la région à consulter (Steelman et coll., 2011). Par extrapolation, un individu aurait moins tendance à déplacer son regard vers un changement qui survient dans une région de la scène qui se situe loin de son point de fixation, ce qui favoriserait l'occurrence de la CaC. Selon les résultats de la thèse, en contexte multitâche dynamique, la CaC ne serait pas seulement tributaire de la saillance d'un changement et des attentes du participant, mais aussi de la pertinence (valeur pour les tâches à effectuer) de la région de la scène visuelle dans laquelle le changement survient et l'effort que le participant doit fournir afin de déplacer son regard vers le changement.

Dans la condition sans-outil de l'Expérience 1, le suivi des mouvements oculaires indique que la moitié des changements critiques manqués ne sont pas fixés, c'est-à-dire que l'opérateur n'a pas dirigé son attention vers les objets ayant subi un changement. N'ayant pas dirigé son attention vers ces objets, il ne peut pas effectuer les comparaisons pré-post changements nécessaires pour les détecter. L'attention sélective est requise pour détecter un changement (Rensink, 2002). La source perceptive de la CaC dans ce contexte multitâche dynamique peut être principalement expliquée par la suppression saccadique et le manque de saillance des changements pertinents par rapport aux changements non pertinents. L'opérateur doit déplacer son regard entre plusieurs régions de l'interface pour effectuer la tâche ERGR. Les saccades oculaires nécessaires pour circuler du radar vers la liste des paramètres et vers les boutons d'actions (vice versa) pour catégoriser les aéronefs et planifier la réponse causent de la suppression saccadique (Simons & Ambinder, 2005). De plus, dans le contexte de surveillance aérienne simulé dans la présente thèse, tous les changements critiques à détecter sont subis par des aéronefs déjà présents sur le radar. Ce type de changements est reconnu pour être plus difficile à repérer que des apparitions ou à

des disparitions d'objets dans la scène visuelle (DiVita et coll., 2004; Durlach et coll., 2008; Simons et coll., 2000).

Aussi, les propriétés visuelles (couleur, contraste, contour, etc.) des objets ayant subi des changements critiques ne sont pas différentes de celles associées aux changements critiques. Les changements critiques et les changements non critiques partagent la même saillance statique (Itti & Koch, 2000). Les changements critiques et les changements non critiques partagent également la même saillance dynamique (Yantis & Jonides, 1990). Les deux types de changements subis par les aéronefs sont indiqués par les mêmes signaux de transition visuels, soit des changements de vitesse et/ou de direction. Certains objets présents sur le radar changent de vitesse et/ou de direction, sans toutefois passer d'un statut non menaçant à un statut menaçant. Un changement de vitesse et/ou de direction est donc un signal de transition visuel indifférencié; il n'indique pas nécessairement qu'un changement critique est survenu. L'identification du changement comme critique ou non critique ne s'effectue que par la liste des paramètres une fois que le signal de transition a été capté par le système visuel. L'analyse de la liste des paramètres mène à la re-catégorisation et à la planification de la réponse si l'objet sélectionné a subi un changement critique. L'absence de différences dans la saillance statique (propriétés visuelles des objets) et la saillance dynamique (signal de transition différent) entre les deux types de changements rend les changements critiques difficiles à détecter. Les deux types de changements ont autant de chances de capter l'attention de l'individu. Il est alors possible qu'un changement important pour les tâches de l'opérateur soit manqué au moment où il prête son attention à un changement non critique (Boot et coll., 2006; Vachon et coll., 2012).

Les aspects attente, valeur et effort contribuent aussi à la caractérisation du déploiement attentionnel des opérateurs qui favorise l'occurrence de la CaC. Dans un contexte multitâche dynamique comme le C2 maritime simulé dans la présente thèse, il est possible que les participants attribuent davantage de valeur à l'espace opérationnel situé immédiatement autour de son navire lorsqu'ils surveillent leur radar. Bien qu'ils doivent catégoriser tous les objets présents sur le radar, il se peut qu'ils priorisent la classification

des aéronefs qui circulent tout près de leur navire pour assurer sa protection contre les attaques des menaces. Ils peuvent considérer que de déployer leur attention au-delà de cette zone « à risque » pourrait les empêcher de réagir à temps aux menaces, car ils s'attendent à ce que ces aéronefs foncent vers le navire afin d'y causer des dommages. Cela pourrait également témoigner d'une certaine « tunnelisation » de l'attention. Il a été démontré que, dans des conditions multitâches et de risque élevé, certaines parties de l'information visuelle peuvent devenir prioritaires ou certaines tâches peuvent être mises de côté afin de récupérer des ressources cognitives pour effectuer les tâches plus pressantes (MacDonald & Lavie, 2011; Scannella, 2011). D'ailleurs, plus la charge de travail augmente, plus le champ visuel fonctionnel de l'individu tend à rétrécir (Steelman et coll., 2011). En somme, il est possible que l'attention de l'opérateur soit surfocalisée sur l'information contenue au centre du radar, et ce dernier ignorerait l'information qui se retrouve en dehors de ce focus (voir Dehais et al., 2011). Les participants déplaceraient leur attention du centre du radar vers la liste des paramètres pour vérifier le niveau de risque des aéronefs, et de la liste vers les boutons d'action pour enclencher les mesures défensives contre les hostiles. En adoptant cette stratégie de surveillance conservatrice, les changements critiques survenant dans les zones extrafovéales et périphériques de la vision des opérateurs seraient sous une trop faible acuité pour permettre de capter les signaux de transition qu'ils produisent. Les opérateurs seraient donc parfois incapables de détecter ces changements (Boot et coll., 2006; Steelman et coll., 2011; Zelinsky et coll., 2001).

En ce qui concerne la source attentionnelle de la CaC, l'apport du suivi des mouvements oculaires permet de dévoiler qu'une certaine quantité des changements non détectés sont fixés par les opérateurs. Ce résultat est une preuve empirique supplémentaire de l'existence d'une seconde source de CaC qui s'ajoute à celle de l'étude de Caplovitz et ses collègues (2008) en statique et à celle de l'étude Vachon et ses collaborateurs (2012) en contexte multitâche dynamique. La détection des changements n'est pas seulement tributaire du déploiement de l'attention sélective vers les objets les ayant subi. Elle dépend aussi de l'investissement d'une certaine quantité de ressources attentionnelles pour traiter de manière approfondie ces objets et effectuer l'ensemble des étapes nécessaires pour prendre conscience de ces changements. Dans ces cas de changements critiques manqués,

les signaux de transition de ces changements sont captés par le système visuel, mais le regard de l'individu est dirigé vers les objets en question à un moment où l'individu n'est pas disposé mentalement pour les détecter. L'individu ne déploie pas suffisamment de ressources attentionnelles pour effectuer les comparaisons pré-post changements dans l'état de la situation, pour comprendre ces changements, et ces derniers n'atteignent pas sa conscience. Il prend donc des décisions erronées selon lesquelles des changements ne se sont pas produits (Durlach, 2004).

Selon le modèle NSEEV, le manque de saillance des changements critiques peut aussi expliquer la prévalence de la source attentionnelle de la CaC. L'effort cognitif nécessaire pour distinguer les changements importants parmi les changements non pertinents dans la scène visuelle peut parfois surpasser la quantité de ressources attentionnelles disponibles (Steelman et coll., 2011). Dans un contexte multitâche dynamique, l'individu doit répartir ses ressources attentionnelles entre plusieurs tâches. En plus de faire circuler son regard d'une région de l'interface à une autre pour effectuer ses tâches, la réalisation de chacune d'entre elles exige l'investissement de temps et des ressources attentionnelles pour traiter l'information nécessaire à la prise de décision (Parasuraman et coll., 2009). Il se peut donc que, dans certains cas, l'opérateur regarde un changement important à détecter lorsque ses ressources attentionnelles sont sollicitées par une autre sous-tâche. Dans le contexte de C2 maritime de la présente thèse, la charge de travail de l'opérateur comprend quatre tâches à effectuer de façon concurrente. Il est possible que l'opérateur regarde un changement critique à un moment où ses ressources attentionnelles sont majoritairement investies dans la catégorisation d'un autre aéronef ou dans la planification des mesures défensives contre les menaces. La quantité restante de ressources attentionnelles est insuffisante pour distinguer ce changement d'un changement non critique, ce dernier passe inaperçu. Le phénomène de la tunnelisation de l'attention (qui est associé aux composantes valeur, attentes et effort du modèle NSEEV) pourrait aussi expliquer cette source de CaC. Il est possible que, durant les moments de charge de travail élevée, les opérateurs investissent leurs ressources attentionnelles dans la réalisation des tâches qui leur apparaissent prioritaires (p.ex., la planification des mesures défensives contre les hostiles pour protéger à tout prix leur navire). Ils privilégieraient le traitement des

menaces déjà existantes en laissant de côté la surveillance de l'occurrence de nouvelles menaces sur le radar. Bien que, parfois, leur regard se pose sur un changement critique, ils ne le détectent pas, car ils effectuent mentalement une autre sous-tâche qui est prioritaire en temps de charge de travail élevée (Dehais et coll., 2011; MacDonald & Lavie, 2011; Scannella, 2011).

La présente thèse démontre que les individus ayant à surveiller et à gérer une situation complexe et dynamique sont vulnérables à deux sources de la CaC. Bien qu'ils doivent traiter l'information fournie par les objets qui subissent les changements pour effectuer leurs autres tâches, ils sont aveugles à une certaine quantité de ces changements. La suppression saccadique, phénomène identifié dans les études en contexte unitâche statique, causée par la consultation des différentes zones de l'interface visuelle serait en partie la cause de la source perceptive de la CaC en contexte multitâche dynamique (Simons & Ambinder, 2005). À l'aide du modèle NSEEV, la thèse établit que d'autres facteurs relatifs au traitement dirigé par les données et au traitement dirigé par les concepts peuvent aussi provoquer la source perceptive et la source attentionnelle de la CaC en contexte multitâche dynamique. Effectivement, la source perceptive de la CaC serait également causée par le manque de saillance des changements importants à détecter (Steelman et coll., 2011) et par une stratégie de recherche visuelle qui privilégierait les zones plus importantes pour les tâches principales de l'individu. Cette stratégie serait associée aux attentes de l'individu, à la valeur des régions privilégiées et à l'effort nécessaire pour déployer son regard à l'extérieur de ces régions. La source attentionnelle de la CaC (cf. les regards aveugles de l'attention; Caplovitz et coll., 2008 ou regarder sans voir; Boot et coll., 2006) est quant à elle associée à la charge de travail imposée par l'ensemble des tâches principales de l'individu. Ces tâches sollicitent une grande quantité de ressources attentionnelles. Il arrive que la quantité de ressources disponibles pour effectuer la détection des changements soit insuffisante pour que l'individu puisse prendre conscience des changements qu'il a regardés (Caplovitz et coll., 2008; Vachon et coll., 2012). Les outils d'aide à la détection des changements recensés dans le Chapitre 1 sont principalement conçus pour prévenir la source perceptive de la CaC. Ils visent, soit à attirer l'attention de l'individu vers les changements importants (p.ex., système de notification

visuelle) ou à offrir un répertoire externe des événements qui sont survenus dans la situation pour soutenir la détection des changements pertinents (p.ex., le CHEX; St. John et coll., 2005). Étant donné la prévalence de la source attentionnelle de la CaC et des conséquences potentiellement graves qu'elle peut provoquer dans un environnement de travail à haut risque, il est important de déterminer si ces outils sont aussi efficaces pour la prévenir.

### ***Implications pratiques***

La présente thèse propose une évaluation systématique de l'efficacité de solutions technologiques d'aide à la détection des changements à réduire la CaC dans un contexte multitâche dynamique. Elle vise à répondre à une question qui demeurait sans réponse dans la littérature : est-ce que les bénéfices des outils démontrés dans les études en contexte unitâche dynamique se transposent dans un contexte multitâche dynamique? Demeurent-ils efficaces lorsque la détection est sous-jacente à une tâche plus complexe? Le principal outil choisi est le CHEX. St. John et ses collègues (2005) ont démontré que le CHEX pouvait prévenir la CaC lorsque l'unique tâche des participants était de surveiller un espace aérien et d'identifier les changements pertinents. L'aide du tableau du CHEX qui répertoriait tous les changements survenus dans la situation était nettement supérieur aux autres solutions technologiques qui notifiaient les changements directement sur l'interface géospatiale qui représentait l'espace aérien à surveiller.

Contrairement aux résultats de St. John et ses collègues (2005) obtenus en contexte unitâche dynamique, le CHEX n'améliore ni ne nuit à la performance globale de détection des changements. Par contre, le suivi des mouvements oculaires suggère que le soutien du CHEX semble provoquer l'augmentation de la source attentionnelle de la CaC. Selon le modèle NSEEV, le tableau du CHEX ne permettrait pas de rendre les changements critiques répertoriés plus saillants parmi les changements non critiques. Étant donné que les ressources attentionnelles de l'utilisateur sont déjà sollicitées par les demandes des autres tâches à effectuer, le CHEX demanderait un investissement trop élevé de temps et d'effort cognitif pour discerner les changements pertinents aux tâches de catégorisation et de

planification parmi les fausses alarmes répertoriées dans l'archive permanente (Privitera et coll., 2010; Wickens et coll., 2009). En présence du CHEX, l'individu serait plus à risque de regarder une entrée de l'archive associée à un aéronef qui a subi un changement critique lorsqu'il ne dispose pas suffisamment de ressources attentionnelles pour prendre conscience du changement (Caplovitz et coll., 2008; Vachon et coll., 2012). Ce risque s'ajoute la difficulté à distinguer les changements critiques parmi les changements non critiques sur le radar qui est observée dans la condition contrôle de l'Expérience 1. Les propriétés visuelles (couleur, contraste, contour, etc.) d'une entrée du tableau du CHEX qui est associée à un changement critique ne sont pas différentes de celles associées à un changement non critique.

Le CHEX semble non seulement avoir un effet délétère sur la CaC, mais impose une charge de travail supplémentaire aux tâches déjà exigeantes, et nuit à l'efficacité de la catégorisation des aéronefs et de la planification des mesures défensives. Le CHEX ne pallie pas les capacités limitées de traitement de l'information de l'opérateur qui sont mises à l'épreuve par le contexte de travail multitâche dynamique de C2 maritime simulé par le micromonde (MacMillan et coll., 2002). L'inefficacité du CHEX suggère une absence de cohésion cognitive entre l'outil et l'opérateur, ce qui les empêche d'assurer un suivi adéquat de la situation et une planification efficace des activités de C2 maritime. Les interactions improductives entre le CHEX et l'agent humain sont associées à un manque d'observabilité et de directabilité; deux conditions de base que l'alliance cognitive entre un outil et un agent humain doit atteindre pour effectuer efficacement les tâches et performer adéquatement dans un contexte de travail multitâche dynamique (Potter et coll., 2006). Le CHEX ne permet pas à l'opérateur de comprendre l'information sur les changements critiques et de rediriger efficacement ses ressources cognitives vers les activités nécessaires pour réagir à ces changements.

Ce manque de cohésion est aussi appuyé par l'utilisation sporadique du CHEX. Suite à l'ajout de son soutien à l'interface, l'opérateur a la possibilité de détecter des changements, soit en surveillant le radar ou en consultant le tableau du CHEX. Selon le modèle NSEEV, les participants préféreraient utiliser le radar pour détecter les

changements, car l'information spatio-temporelle qu'il transmet est pertinente à l'ensemble de ses tâches (valeur) et respecte ses attentes quant à ce qui peut être utile pour soutenir cette fonction cognitive (réalisme naïf; Smallman & St. John, 2005). De plus, le tableau du CHEX se retrouve à la droite de l'écran radar et à l'extrémité opposée de la liste des paramètres qui sont utilisés pour l'ensemble des tâches de l'opérateur. Les participants peuvent juger le déplacement de leur attention d'une extrémité à une autre de l'interface comme exigeant trop d'effort, ce qui expliquerait qu'ils ne regardent son tableau que sporadiquement.

Sous un point de vue des sciences analytiques de la vision (traduction libre de *visual analytics*), l'ajout d'une aide externe à la partie de l'interface reliée aux tâches principales de l'opérateur (p.ex., en périphérie de l'écran radar) plutôt que d'intégrer une fonctionnalité de détection des changements à cette dernière peut compromettre l'unification des composantes de l'interface en un tout significatif (compromettre l'écologie de l'interface; Huang, Mynatt, & Trimble, 2006). Effectivement, il est possible que le CHEX soit perçu par les participants comme étant détaché du reste des composantes de l'interface S-CCS, ce qui pourrait, à son tour, jeter des doutes quant au rôle exact de cet outil dans la surveillance et la gestion d'une situation de C2 (Hegarty, 2011; Huang et coll., 2006; Potter & Rousseau, 2010; Smallman & St. John, 2005). Par conséquent, les participants considéreraient le CHEX comme une perte de temps ou une source de distraction, ce qui les empêcherait de voir la vraie valeur de son soutien cognitif et d'en faire plus grand usage.

La stratégie méthodologique employée et la démarche empirique de la thèse permettent la formulation de trois lignes directrices qui doivent être considérées lors de la conception et de la validation de solutions technologiques de soutien à la détection des changements. Premièrement, le suivi des mouvements oculaires permet de démontrer qu'un outil peut aggraver l'une des deux sources de la CaC, alors que le niveau global de CaC qui lui est associé est similaire à celui obtenu en l'absence d'un système de soutien à la détection des changements. Il est crucial d'évaluer l'efficacité d'un tel support à prévenir les deux sources de la CaC. Deuxièmement, il est important d'adapter un système de

soutien cognitif aux ressources attentionnelles disponibles de l'opérateur. Un outil peut être efficace lorsque l'individu n'a qu'à détecter et à identifier les changements dans une situation dynamique (Expérience 2 de la thèse et St. John et coll., 2005), mais être inefficace lorsque le contexte de travail exige le partage de ressources attentionnelles entre plusieurs tâches (contexte multitâche dynamique de l'Expérience 1). En situation multitâche dynamique, la quantité de ressources attentionnelles pour consulter l'archive du CHEX excéderait parfois la quantité de ressources qui demeurent disponibles. L'individu semble d'ailleurs plus vulnérable à la source attentionnelle de la CaC lorsqu'il a accès au répertoire du CHEX. Troisièmement, la validation d'un outil doit inclure le diagnostic des effets contre-productifs et des conséquences inattendues qu'une solution technologique peut avoir sur les activités de l'opérateur. Grâce à l'approche holistique adoptée dans l'analyse des résultats, la thèse démontre que le CHEX, en plus de provoquer une certaine augmentation de la prévalence de la source attentionnelle de la CaC, nuit à la charge de travail, à la catégorisation et à la planification (voir aussi Trafton & Ratwani, 2014). En contexte multitâche dynamique, un outil d'aide à la détection des changements peut non seulement être inefficace à prévenir la CaC, mais être une nuisance pour d'autres aspects du travail cognitif de l'utilisateur.

Le design du CHEX, tel qu'il a été conçu par St. John et ses collègues (2005), n'est pas adapté à la charge de travail élevée d'un contexte multitâche dynamique. Le format de du tableau de l'outil ne semble pas aussi bien soutenir la détection des changements lorsqu'il est utilisé dans ce contexte par comparaison à lorsqu'il est utilisé dans un contexte unitâche. La contribution théorique et les implications pratiques de la présente thèse suggèrent des modifications au design du CHEX qui pourraient améliorer son soutien à la cognition dans des conditions de travail où les ressources attentionnelles de son utilisateur sont grandement mobilisées par les demandes des tâches à effectuer. Elles permettent aussi de proposer d'autres types d'aide à la détection des changements tout en anticipant leurs effets possibles sur le déploiement attentionnel nécessaire à la détection des changements, les deux sources de CaC, ainsi que sur la charge de travail supplémentaire qu'ils pourraient imposer à l'individu qui se retrouve dans un environnement de travail multitâche dynamique (voir section travaux futurs).

## RÉDUCTION DE LA CHARGE VISUELLE DU CHEX

Une modification du design du tableau du CHEX serait d'augmenter la saillance de l'information reliée aux changements critiques. Étant donné que le CHEX répertorie l'information concernant tous les types de changements dans l'état de la situation dynamique, son tableau peut rapidement devenir encombré de données. Son utilisateur doit investir beaucoup de ressources cognitives et de temps pour localiser l'information pertinente à sa sous-tâche de détection des changements parmi l'information sur les changements non pertinents à l'ensemble de ses tâches. La démarche empirique de cette thèse teste une première tentative pour augmenter la saillance des changements critiques et limiter son effet négatif sur la source attentionnelle de la CaC : le HCR, la version simplifiée du CHEX. Le tableau du HCR répertorie un nombre maximal de quatre changements (pertinents et non pertinents), ce qui rend l'information pertinente à ses tâches plus saillante et réduit la charge cognitive nécessaire pour le consulter. Malgré les modifications apportées pour simplifier le tableau du CHEX, le HCR n'améliore pas la détection des changements comparativement à la performance de détection du groupe n'ayant pas accès au soutien d'un outil. Pourtant, il semble offrir un meilleur soutien que le CHEX, puisque plus le HCR est utilisé par les opérateurs, plus la CaC a tendance à diminuer. Cette version simplifiée est donc un pas dans la bonne direction dans la modification du design du CHEX. Il semble plus adapté à la charge de travail élevée d'un contexte multitâche dynamique et semble davantage capable d'aider le filtre attentionnel des indices contextuels présents sur l'interface visuelle qui est nécessaire à la détection des changements (Durlach, 2004; Rensink, 2002). Par contre, contrairement au CHEX, le HCR ne décrit pas complètement les changements et, donc ne permet pas d'identifier directement si un changement donné est pertinent à ses tâches ou non. L'une des raisons de l'efficacité du CHEX émise par St. John et ses collaborateurs (2005) est qu'il permettait de soutenir à la fois la composante « détection » et la composante « identification » de la détection des changements. Il est possible que l'efficacité du HCR soit limitée par l'absence de descriptions légèrement plus détaillées des changements dans le tableau de l'outil.

## TYPES ET NIVEAUX D'AUTOMATISATION

Outre une simplification et une réduction de la charge visuelle, le tableau du CHEX pourrait bénéficier de l'intégration d'un algorithme classant l'information reliée aux changements en ordre de priorité (voir St. John, Smallman, Manes, Feher, & Morrison, 2005). L'automatisation du CHEX ne ferait pas seulement acquérir les détails sur les changements qui sont survenus dans la situation, mais interpréterait ces éléments d'information afin de leur attribuer un niveau d'importance. En effet, en plus de conserver ses fonctions de détection automatique et de description des changements qui l'ont rendues très efficace dans un contexte unitâche dynamique, l'algorithme de priorisation du CHEX augmenterait la saillance de l'information associée aux changements importants. Au lieu du classement des entrées en ordre chronologique, l'algorithme pourrait traiter les objets visuels de manière à ce que les changements les plus importants (plus susceptibles d'être critiques ou pertinents aux tâches de l'utilisateur) apparaissent au haut du tableau et ceux qui sont moins importants (plus susceptibles d'être non-pertinents à ses tâches et des fausses alarmes) apparaissent au bas de ce dernier (voir Yeh & Wickens, 2001). Une fausse alarme provoque de la distraction visuelle, c'est-à-dire qu'elle détourne l'attention de l'individu des changements pertinents. Les fausses alarmes répertoriées dans l'archive pourraient expliquer pourquoi le CHEX n'est pas efficace à réduire la source perceptive de la CaC. En intégrant un algorithme de priorisation au design du CHEX, l'effet distracteur des fausses alarmes serait limité, car elles se retrouveraient au bas du tableau et auraient moins de chances d'attirer le regard de l'individu.

Ce type d'algorithme pourrait aussi amplifier l'intensité de la couleur et du contraste des entrées du tableau selon leur niveau d'importance (voir St. John, Smallman, Manes, et coll., 2005) afin d'augmenter davantage la saillance statique de l'information concernant les changements critiques (Porubanová-Norquist & Sikl, 2013; Steelman et coll., 2011). L'apparition d'une entrée très saillante dans le tableau du CHEX aurait plus de chances de capter l'attention et d'informer efficacement l'utilisateur qu'un changement critique est survenu dans la scène visuelle (Boot et coll., 2006; Durlach et coll., 2008). Le déploiement attentionnel dans le tableau du CHEX serait facilité par la manipulation de ce

facteur relié au traitement dirigé par les données (Beck et coll., 2007; Boot et coll., 2006; Hewlett & Oezbek, 2012; Steelman et coll., 2011; Zelinsky, 2001). Un algorithme de priorisation pourrait réduire l'impact d'un tableau encombré sur la détection des changements en permettant à l'utilisateur du CHEX de discriminer plus facilement l'information critique de l'information non critique (voir Carver & Turoff, 2007; Hegarty, 2011) en diminuant la saillance des entrées qui sont moins susceptibles d'être associées à des changements critiques (voir Wickens, Ambinder, & Alexander, 2004). Un algorithme de priorisation aurait donc le potentiel d'augmenter la vitesse de détection des changements et de réduire la prévalence de la seconde source de CaC en diminuant le temps et la quantité de ressources attentionnelles nécessaires pour trouver un changement critique dans le tableau de l'outil. Ces manipulations amélioreraient la capacité du CHEX à soutenir la comparaison pré-post changement nécessaire à la détection des changements (Durlach et coll., 2008; Vachon et coll., 2012).

L'ajout de cette fonctionnalité pourrait aussi augmenter les attentes de l'utilisateur quant à reconnaître le CHEX comme un outil réellement utile pour soutenir la détection des changements (St. John, Smallman, Manes et coll., 2005; Steelman et coll., 2011). Le fait que les changements non critiques auraient plus de chances de se retrouver au bas du tableau diminuerait le risque que l'utilisateur consulte une fausse alarme ou de l'information non pertinente à ses tâches (empêcherait l'occurrence potentielle de l'effet crier-au-loup; Brenitz, 1983; Wickens, Rice, Keller et coll., 2009). La crédibilité de l'outil demeurerait intacte et l'opérateur serait plus enclin à l'utiliser pour maintenir une bonne conscience de la situation et accomplir ses activités. Cependant, toute forme de priorisation automatique des données d'un tableau pourrait générer des erreurs. La technologie actuelle d'automatisation ne permet pas d'atteindre un taux parfait de réussite (c.-à-d. tous les changements sont détectés et correctement ordonnés dans le tableau) et d'éviter complètement l'incidence de fausses alarmes et d'omissions (Thomas & Rantanen, 2006; Dixon & Wickens, 2006). Les systèmes de priorisation automatique, optimale ou non, sont aussi vulnérables aux risques connus de l'automatisation tels que la méfiance de l'utilisateur et la dépendance (voir Parasuraman, Sheridan, & Wickens, 2008; Parasuraman & Riley, 1997). Alors, une question demeure : est-ce que l'individu qui doit surveiller et

gérer une situation complexe et dynamique a besoin d'une aide à la détection des changements qui est disponible en tout temps?

Contrairement à certaines études qui concluent qu'une automatisation imparfaite est mieux que ne pas avoir accès à un système d'aide à la décision (p.ex., Dixon et Wickens, 2006), la présente thèse démontre que l'automatisation du CHEX mène à une performance plus faible comparativement à ce qui est obtenu en l'absence d'une aide automatique de détection des changements. Pourtant, la conception d'un algorithme d'un outil de soutien à la décision qui signale et répertorie parfaitement tous les événements critiques (sans fausses alarmes, un taux de succès de 100 %) est inatteignable et, voire déconseillée. Les utilisateurs d'un système dont l'automatisation est parfaite ont tendance à adopter des comportements de dépendance abusive et de confiance aveugle envers le système, ce qui peut nuire à leur conscience de la situation. Selon leur réflexion, il n'est pas grave de manquer des événements critiques ou de ne pas disposer de toute l'information pour prendre une décision, le système est en mesure de gérer la situation de façon autonome (Parasurman & Riley, 1997; Endsley & Kiris, 1995). Par exemple, Bliss et Acton (2003) ont observé que les participants assignés au groupe ayant accès au système de notification auditive de collisions imminentes 100 % fiable (*Collision Avoidance Warning System*) étaient impliqués dans davantage d'accidents lors d'une simulation de stationnement en voiture que les participants assignés au groupe dont le système de notification était fiable à 50 %. Les participants du premier groupe étaient moins conscients de la situation et faisaient des actions inappropriées, alors que la non fiabilité du système assigné au deuxième groupe poussait les conducteurs à vérifier l'existence de toute menace près du véhicule avant de faire leurs manœuvres.

Bien qu'il soit essentiel d'améliorer l'algorithme qui sous-tend le soutien cognitif du CHEX (p.ex., augmenter la saillance des entrées reliées aux changements critiques), son type d'automatisation pourrait aussi expliquer pourquoi son soutien n'est pas adapté à la charge de travail élevée qui caractérise les environnements de travail multitâche dynamique. L'automatisation du CHEX est statique, c'est-à-dire qu'elle est toujours en action et agit de la même façon, peu importe la situation rencontrée. Les fonctionnalités de

cet outil ne peuvent pas être désactivées par l'utilisateur et le tableau ne peut être minimisé (il est toujours apparent à l'écran; Parasuraman, Sheridan, & Wickens, 2000). Cependant, l'opérateur n'a pas nécessairement toujours besoin de l'information offerte par le CHEX. Dans la condition sans-outil de l'Expérience 1, les participants sont en mesure de détecter par eux-mêmes environ 85 % des changements critiques et ce pourcentage n'est pas statistiquement différent à celui observé dans la condition avec-CHEX. Logiquement, pour les participants de la condition contrôle, l'information que fournirait le CHEX sur ces changements détectés serait redondante et ne servirait seulement qu'à augmenter la charge visuelle de l'interface et la charge de travail perçue (Perry et coll., 2013). Les participants n'auraient besoin du CHEX que pour prendre conscience du 15 % des changements qu'ils ne sont pas en mesure de détecter par eux-mêmes. Le CHEX pourrait bénéficier d'une automatisation flexible (Chen, Loft, Visser, & Braithewaite, 2013; De Greef, Arciszewski, & Neerinx, 2010; Parasuraman et al. (2009). Cette automatisation flexible permettrait de limiter l'effet néfaste (distraction visuelle et perte de crédibilité de l'outil) d'un trop grand nombre de fausses alarmes. Un système flexible de soutien à la détection des changements pourrait donc être plus approprié pour réduire la prévalence des sources de CaC.

Il y a deux grandes catégories d'automatisation flexible : l'automatisation adaptative (déclenchée par la machine) et l'automatisation déclenchée par l'opérateur (De Greef et al., 2010). L'automatisation adaptative repose sur l'idée que l'opérateur ne doit recevoir le soutien cognitif d'un outil d'aide à la décision que lorsqu'il est surchargé par la quantité d'information et d'événements à surveiller et à gérer, et cette surcharge l'empêche d'effectuer efficacement ses tâches et a le potentiel de nuire à sa performance (Hancock, Jagacinski, Parasuraman et coll., 2013). La capacité limitée de traitement de l'information de l'humain est plus vulnérable durant les périodes de charge de travail élevée (Parasuraman et coll., 2009). Le système adaptatif qui a la capacité de prendre des décisions de façon autonome pourrait intervenir et prendre en charge une partie de l'information et des événements à gérer. Cela diminuerait la charge de travail de l'opérateur humain. Étant donné qu'une partie de son travail est transférée à l'automatisation, l'opérateur dispose d'une plus grande quantité de ressources cognitives pour effectuer efficacement la partie des tâches dont il demeure responsable et de reprendre le contrôle de

la situation (De Greef et coll., 2010). L'automatisation du système n'est pas enclenchée lorsque la charge de travail est moins élevée et l'opérateur humain a la capacité d'effectuer l'ensemble de ses tâches par lui-même (Chen et coll., 2013). Autrement dit, l'automatisation adaptative permet à l'opérateur de concentrer son attention sur les tâches à haute priorité (les plus importantes) lorsque sa charge de travail est très élevée en lui permettant d'ignorer (de mettre de côté) les tâches moins prioritaires qui sont prises en charge par le système. Lorsque la charge de travail de l'opérateur est moins grande, l'opérateur a la responsabilité de traiter toute l'information et d'effectuer toutes les tâches par lui-même (Hancock et coll., 2013).

La conception d'un système d'automatisation adaptative comporte deux défis : établir la répartition optimale des tâches entre l'humain et la machine, et déterminer quand l'automatisation doit être enclenchée. De Greef et ses collègues (2010) suggère une répartition dynamique (à temps réel) des objets ou des éléments d'information présents dans l'environnement de travail et qui doivent être traités pour effectuer les tâches (approche orientée sur les objets). Au lieu de transférer complètement la responsabilité d'effectuer une tâche à la machine tel que l'a été suggéré par d'autres chercheurs (p.ex., Parasuraman et coll., 2000), le nombre d'objets ou d'éléments d'information que le système doit traiter augmente selon le niveau de charge de travail de l'opérateur humain. L'humain et la machine se répartissent le travail et les responsabilités d'une tâche. Par exemple, les fonctions du CHEX pourraient s'enclencher en périodes de charge de travail élevée, et l'outil pourrait détecter et répertorier les changements qui n'ont pas été traités par l'opérateur dans un délai raisonnable, au lieu de faire la liste de tous les changements étant survenus dans la situation. Aussi, le CHEX pourrait répertorier seulement les changements qui surviennent de manière simultanée (Durlach et coll., 2008) ou, à l'aide du suivi des mouvements oculaires, le CHEX pourrait seulement faire la liste des changements non fixés ou qui surviennent loin du point de regard actuel de l'opérateur.

Le deuxième défi de la conception d'un système d'aide à la décision adaptatif est de déterminer quand l'automatisation se déclenchera : un système qui surveille les fluctuations de la charge cognitive de l'opérateur et enclenche l'automatisation lorsque ce dernier est

jugé surchargé par ses tâches. Wilson et Russell (2007) identifient cinq types de déclencheurs de l'automatisation. 1) L'automatisation peut s'enclencher sur la base d'événements critiques qui peuvent nuire à la mission. Dans le contexte de C2 maritime de la présente thèse, l'aide du CHEX pourrait s'enclencher lorsque le navire-mère est frappé par un aéronef hostile pour la première fois. 2) La diminution de la performance de l'opérateur peut être considérée comme un déclencheur de l'automatisation. Par exemple, un soutien à la détection des changements pourrait s'enclencher lorsque la qualité de classification ou l'efficacité de la défense de l'opérateur diminue. 3) La charge cognitive peut être mesurée en temps réel par des mesures psychophysiologiques (p.ex., le rythme cardiaque, la réponse galvanique de la peau, la dilation de la pupille). Une aide à la détection des changements pourrait s'enclencher lorsque ces mesures suggèrent une surcharge cognitive chez l'opérateur. 4) L'automatisation peut se déclencher sur la base d'un modèle des fluctuations de la charge de travail durant l'accomplissement de ses tâches. Par exemple, dans un contexte de C2 maritime, un tel modèle prédirait les moments de charge de travail élevée durant lesquels l'opérateur est plus susceptible d'avoir besoin d'un outil de soutien à la détection des changements. 5) Finalement, l'enclenchement de l'automatisation peut être déterminé selon un hybride des quatre types de déclencheurs mentionnés ci-dessus.

Certaines études, dans le domaine de l'aviation, du contrôle du trafic aérien et du C2 maritime ont démontré que l'automatisation adaptative est efficace pour réguler la charge de travail de l'opérateur, et pour améliorer sa performance et sa conscience de la situation (automatisation basée sur un modèle cognitif : De Greef et coll., 2010; automatisation basée sur la performance à une tâche secondaire : Parasuraman et coll., 2009; automatisation basée sur les mesures psychophysiologiques : Wilson & Russell, 2007). Une aide à la détection des changements qui ne serait disponible dans l'interface que lorsque l'opérateur est moins disposé à détecter les changements importants par lui-même pourrait être plus efficace pour réduire la prévalence des deux sources de la CaC comparativement à une aide qui est disponible en tout temps. En effet, un soutien externe (comme le CHEX) n'apparaîtrait dans l'interface visuelle que lorsque le système juge que l'opérateur est surchargé par les demandes de ses tâches. Le déploiement attentionnel de

l'opérateur n'aurait pas toujours à couvrir une partie additionnelle de l'interface qui ne sert qu'à la détection des changements. L'opérateur n'aurait pas à effectuer de saccades oculaires vers un tableau qu'il n'a pas besoin en période de charge de travail normale, ce qui réduirait l'incidence de la suppression saccadique et la prévalence de source perceptive de la CaC. La charge en information visuelle de l'interface serait aussi réduite en période de charge de travail normale. L'opérateur n'aurait pas à attribuer de ses ressources attentionnelles pour consulter de l'information additionnelle sur les changements, alors qu'il est déjà en mesure de les détecter par lui-même. Cette automatisation qui s'adapte à la charge de travail de l'opérateur réduirait l'effet négatif du CHEX sur la source attentionnelle de la CaC observé lorsque cet outil est toujours disponible sur l'interface. En temps de charge de travail normale, l'attention de l'opérateur ne serait pas inutilement captée par les fausses alarmes répertoriées dans le tableau et ce dernier n'aurait pas à investir de ressources attentionnelles pour vérifier le bien-fondé de ces événements non pertinents aux tâches de l'opérateur. Cela réduirait leur effet négatif sur les sources perceptive et attentionnelle de la CaC. Par contre, les inconvénients de l'automatisation déclenchée par la machine sont aussi bien documentés. Il arrive que l'opérateur perçoive les actions de l'automatisation comme imprévisibles et difficiles à comprendre. Parfois, l'automatisation peut être fautive. Les actions surprises et inattendues de l'automatisation peuvent mener à une baisse de la performance de l'opérateur qui doit investir des ressources cognitives pour corriger les erreurs commises par le système adaptatif (Chen et coll., 2013).

Une solution pour limiter les surprises et les potentielles erreurs liées à l'automatisation est de remettre à l'opérateur la liberté d'enclencher l'automatisation ou non. Par exemple, dans le contexte de C2 simulé de la présente thèse, l'aide externe du CHEX serait par défaut en mode silencieux, c'est-à-dire le CHEX détecte et répertorie les changements, mais le tableau de l'outil n'apparaît pas dans l'interface de l'opérateur. L'opérateur peut décider d'invoquer l'aide d'un outil de soutien à la détection des changements lorsqu'il le désire (p.ex., lorsque il se perçoit surchargé de travail, lorsqu'il a l'impression de manquer des changements importants dans la situation). Un tel type d'automatisation réduirait la charge visuelle de l'interface, puisque le système d'aide à la

décision ne serait disponible que lorsque l'opérateur l'invoque. Dans le cas du CHEX, l'opérateur n'aurait à consulter l'information supplémentaire du tableau que quand il décide de le faire. La charge de travail additionnelle imposée par la présence du CHEX sur l'interface ne serait que temporaire. Tout comme l'automatisation adaptative, l'automatisation déclenchée par l'opérateur aurait le potentiel d'augmenter l'efficacité d'outils d'aide à la détection à prévenir les deux sources de CaC. Par contre, certaines études ont démontré que le fait de remettre la décision de l'enclenchement de l'automatisation à l'opérateur peut être associé à des coûts cognitifs. En effet, selon Chen et ses collègues (2013), la décision d'invoquer ou non l'automatisation d'un système d'aide à la décision deviendrait une tâche en soi et s'ajouterait à la charge de travail déjà élevée d'un environnement multitâche dynamique. Cette décision peut donc représenter un fardeau attentionnel.

### ***Limites méthodologiques***

Certaines limites sont associées à la stratégie méthodologique de la présente thèse. La première limite est associée à l'utilisation de la sélection d'un objet dans un intervalle de 15 secondes comme critère de détection. Un changement critique est considéré détecté si le participant sélectionne l'objet ayant subi le changement dans les 15 secondes qui le suivent. Il est assumé qu'une telle sélection durant cet intervalle témoigne de la détection consciente du changement, puisque cette étape est préalable à la reclassification de l'aéronef comme hostile et à la planification des mesures défensives contre ce dernier. Il est possible que, dans certains cas, cette sélection soit fortuite ou soit effectuée en raison des exigences des autres sous-tâches à effectuer et non pas, parce qu'il a réellement remarqué le changement. Par contre, ce critère de détection est choisi afin de représenter une condition de travail d'un contexte multitâche dynamique : la détection d'un changement est rarement rapportée explicitement. L'inconvénient du critère de détection utilisé est l'avantage de produire une simulation plus représentative d'une véritable situation de C2 maritime. Bien que ce critère soit différent, il est associé à un niveau de CaC semblable à ceux obtenus par les autres études sur la détection des changements en contexte multitâche dynamique (voir DiVita et coll., 2004; Durlach et coll., 2008).

La seconde limite de la méthodologie est aussi reliée au critère de détection utilisé dans l'Expérience 1. Étant donné que les participants ne rapportent pas explicitement la détection des changements, il n'est pas possible de déterminer s'ils font des faux positifs (signalent un changement critique alors qu'il est non critique) ou font des rejets corrects (ne rapportent pas un changement non critique). Les participants ont plusieurs raisons pour sélectionner un contact radar qui a subi un changement non critique, puisqu'ils doivent effectuer plusieurs tâches simultanément. Autrement dit, il n'est pas possible de départir si le participant sélectionne un aéronef pour le classer ou s'il le sélectionne pour rapporter un changement critique alors que ce dernier est non critique. Quoiqu'il ait pour but de respecter une condition de travail d'un contexte multitâche dynamique, ce choix méthodologique ne permet pas l'application de la théorie de la détection du signal (voir Dixon & Wickens, 2006; St. John et coll., 2005). La présente thèse ne permet pas de déterminer si l'aspect multitâche du contexte de travail exerce une influence sur la sensibilité ( $d'$ ) de l'opérateur aux changements critiques parmi les changements non critiques et sur la stratégie que l'opérateur adopte pour prendre une décision (biais;  $\beta$ ), comparativement à un contexte uni-tâche dynamique. La méthodologie ne permet seulement de distinguer les omissions (c.-à-d. la CaC) et les détections correctes. L'application de cette théorie aurait pu permettre une évaluation plus approfondie de l'efficacité des outils de détection de changements : déterminer s'ils améliorent la sensibilité de l'opérateur et s'ils mènent à un critère de réponse différent (prudence vs risque; Wickens, 2002). Cette limite ne s'applique pas à l'Expérience 2, car les participants rapportent explicitement la détection des changements critiques en appuyant sur le bouton détection. La sensibilité et le biais décisionnel des participants pourraient être calculés dans le cadre de cette expérience. Par contre, ces indices ne sont pas inclus dans la section résultat de l'Expérience 2 en contexte unitâche dynamique, puisque ces résultats n'ont pas de contrepartie dans la section résultat de l'Expérience 1 en contexte multitâche dynamique.

Une troisième limite de la méthodologie concerne l'interprétation du suivi des mouvements oculaires. L'hypothèse de la correspondance de Just et Carpenter (1980) affirme qu'il y a une forte association temporelle entre le lieu de la fixation et la position du

focus attentionnel. Bien qu'elle soit supportée par plusieurs études (p.ex., McCarley, & Kramer, 2008; Rayner, 2009), il demeure que cette correspondance n'est pas absolue. Hoffman (1998) distingue deux types d'attention visuelle. L'attention manifeste (*overt attention*) se définit par l'action de déplacer les yeux vers un stimulus, tandis que l'attention implicite (*covert attention*) consiste à déplacer mentalement son focus attentionnel vers un stimulus. Le suivi des mouvements oculaires ne capte que le statut manifeste de l'attention visuelle. Certaines théories de l'attention suggèrent que parfois le lieu de fixation peut être dissocié du lieu de l'attention. En effet, la théorie pré-motrice de l'attention indique que l'attention peut être allouée à plusieurs cibles de saccades avant l'exécution de ces dernières. Le trajet des fixations (l'attention manifeste) serait devancé par le trajet de l'attention implicite (Godijn & Theeuwes, 2003). Il est donc possible que, parfois, l'attention du participant soit portée sur une portion de l'interface donnée alors que son regard se retrouve sur une région différente. L'explication de la seconde source attentionnelle dépend de la correspondance regard-attention de l'hypothèse de Just et Carpenter (1980). Par conséquent, un certain nombre de changements fixés non détectés pourrait être relié à la source perceptive de la CaC plutôt qu'à sa source attentionnelle. Il se peut, dans ces cas particuliers, que l'attention du participant se retrouve ailleurs sur l'interface visuelle que sur les objets ayant subi ces changements.

### ***Travaux futurs***

Dans le contexte des limites liées à la présente thèse, et plus particulièrement la limite associée au critère de sélection, il serait pertinent de réaliser une expérience dans laquelle les participants auraient à rapporter explicitement la détection des changements en plus d'effectuer les autres tâches comprises dans la surveillance et la gestion d'une situation complexe et dynamique. Par exemple, une zone de l'interface S-CCS pourrait être dédiée à la détection. Cette zone comporterait deux boutons : un bouton « critique » pour signaler que l'objet sélectionné a subi un changement critique et un bouton « non-critique » pour rapporter un changement non critique. Le participant recevrait comme instruction d'appuyer sur l'un de ces boutons avant de classifier l'aéronef sélectionné s'il croit que l'objet a subi un changement critique ou changement non-critique. Le tutoriel de

l'expérience indiquerait au participant de ne pas appuyer sur les boutons de détection s'il croit que l'aéronef sélectionné n'a pas subi de changement. Cela correspondrait à un rejet correct; le participant sélectionne l'aéronef simplement pour le classifier. Il serait possible par la suite de calculer l'ensemble des réponses possibles reliées à la détection des changements (détectations correctes, faux positifs, omissions et rejets corrects). Une étude pourrait évaluer la sensibilité et la stratégie de décision de l'opérateur lorsqu'il a accès à différents outils d'aide à la détection des changements.

De plus, le micromonde employé simule les caractéristiques essentielles d'un environnement de travail multitâche dynamique en C2 maritime. Il serait intéressant d'augmenter encore plus le réalisme de la simulation en y représentant un nombre plus élevé de conditions de travail. Par exemple, il pourrait être pertinent de vérifier l'effet des interruptions de tâches, de la distraction auditive (sons ambiants), du travail en équipe, des communications, et de l'utilisation de plusieurs écrans (et différentes interfaces) sur la détection des changements et la prévalence des deux sources de CaC. Finalement, dans la présente thèse, le modèle NSEEV est utilisé comme un cadre théorique servant à expliquer et à interpréter les résultats sur la détection des changements et l'utilisation des outils en fonction de la saillance, de la valeur d'une région d'intérêt, des attentes de l'individu et de l'effort nécessaire pour déplacer son regard vers une région d'intérêt. Ce modèle comporte aussi une fonction computationnelle permettant de prédire le déploiement attentionnel et la capacité à détecter des événements dans une scène visuelle dynamique à l'aide des mouvements oculaires de l'individu. Il serait pertinent d'appliquer cette fonction computationnelle aux données oculaires de la thèse afin de mieux comprendre le déploiement attentionnel des opérateurs qui mène à la détection des changements ou à la CaC.

## **MODIFICATIONS DU DESIGN DU CHEX**

En ce qui concerne les modifications du design du CHEX suggérées dans la présente thèse, il serait intéressant de réaliser une nouvelle expérience qui testerait l'effet d'un algorithme de priorisation des changements selon leur importance dans le tableau du CHEX sur la capacité de l'outil à soutenir la détection des changements et à réduire la

charge de travail. Dans cette expérience, le type d'automatisation du CHEX demeurerait statique, c'est-à-dire qu'elle agirait de la même façon peu importe la situation rencontrée. L'efficacité de ce nouveau design à réduire la prévalence des sources de CaC pourrait être comparée à celle associée à un algorithme qui augmente la saillance statique des changements critiques (sans priorisation) dans le tableau du CHEX. Il serait aussi pertinent de comparer le niveau de prévention de la CaC d'une version du CHEX dont l'automatisation serait adaptative ou déclenchée par l'opérateur au niveau associé à l'automatisation statique du CHEX utilisée dans l'Expérience 1 de la présente thèse. Par exemple, dans une condition « automatisation adaptative », le tableau ne pourrait s'activer que lorsque la charge de travail (indiquée, par exemple, par des mesures psychophysiologiques) du participant dépasse un certain seuil. Une fois ce seuil dépassé, le CHEX apparaîtrait sur l'interface du micromonde S-CCS et répertorierait tous les changements qui surviennent dans la situation lors de cette période de charge de travail élevée. Lorsque la charge de travail du participant revient à la normale, l'aide du CHEX se désactiverait et le tableau de l'outil se minimiserait. Dans une autre condition, l'automatisation du CHEX pourrait être invoquée par l'opérateur. L'opérateur aurait à décider s'il veut utiliser ou non le CHEX à en appuyant sur un bouton pour accéder au tableau qui répertorie (en mode silencieux) tous les changements qui surviennent dans la situation. Le participant fermerait l'aide du CHEX en appuyant de nouveau sur ce même bouton. Cette expérience permettrait de déterminer quel type d'automatisation rend le CHEX efficace pour réduire la prévalence des sources de CaC en contexte multitâche dynamique.

## **AIDE INTÉGRÉE À LA VUE PRINCIPALE DE L'UTILISATEUR**

Le modèle NSEEV prédit la détection d'un événement selon l'effort nécessaire pour déployer son attention vers ce dernier. Dans le cadre de la présente thèse, les participants regardent principalement l'écran radar (au centre de l'interface) et la liste des paramètres (à la gauche) pour effectuer la tâche ERGR. En fait, ces zones de l'interface sont directement utiles à toutes les sous-tâches des activités de l'opérateur. Bien qu'il soit indirectement utile à l'ensemble des sous-tâches (montre les aéronefs qui doivent être reclassifiés et

neutralisés), le rôle du CHEX est principalement de soutenir une sous-tâche, soit la détection des changements. Il se peut que les opérateurs aient considéré le déplacement de leur attention de l'autre côté de l'écran pour consulter le tableau du CHEX comme exigeant trop d'effort (Steelman et coll., 2011). Une solution serait d'intégrer une fonctionnalité de suivi en temps réel des changements à même la partie de l'interface qui est principalement utilisée par l'opérateur pour réaliser ses tâches, plutôt que d'ajouter un outil de plus qui peut paraître détaché du reste de l'interface (Hegarty, 2011). Par exemple, dans le domaine du contrôle du trafic aérien, les notifications visuelles des aéronefs qui nécessitent une réponse immédiate de la part du contrôleur peuvent émerger directement de l'écran radar (voir Imbert et al., 2014; St. John et coll., 2005). Cela permettrait de réduire le nombre de mouvements oculaires nécessaires pour couvrir une grande étendue d'information et pour déplacer son focus attentionnel d'une zone d'information à une autre (Athènes, Chatty, & Bustico, 2000). L'opérateur pourrait concentrer son attention sur les parties de son interface qui lui sont nécessaires pour accomplir sa tâche principale tout en recevant des alertes lui indiquant les objets radar qui requièrent son attention dans l'immédiat. L'opérateur ne serait pas forcé à partager ses ressources attentionnelles (dont la quantité est limitée et déjà pleinement utilisée) pour consulter une partie de l'interface consacrée à un soutien technologique visant à aider qu'une fonction cognitive parmi les nombreuses qui sont mobilisées par un contexte multitâche dynamique (Parasuraman et coll., 2009). De surcroît, le fait de limiter le nombre de saccades oculaires aiderait à réduire la suppression saccadique et à réduire la prévalence de la source perceptive de la CaC (Simons & Ambinder, 2005).

Contrairement à une aide externe comme le CHEX qui répertorie tous les changements (importants et moins importants), un système intégré de notifications visuelles ne signale que les changements critiques en produisant un événement excentrique et distinct par rapport aux mouvements des autres objets présents sur l'interface géospatiale de son utilisateur et au reste de l'information affichée à l'écran. Ces notifications visent à attirer l'attention vers les objets nécessitant une réponse immédiate de la part de l'opérateur en augmentant temporairement leur saillance (Steelman et coll., 2011). L'efficacité de ces fonctionnalités d'aide à la détection des changements intégrées à l'interface que l'opérateur

utilise pour effectuer ses tâches demeure à être testée et validée dans un contexte de contrôle du trafic aérien, de même dans d'autres contextes multitâches dynamiques tels que la surveillance par caméra. Par exemple, lors de la simulation de C2 maritime simulée dans la présente thèse, au lieu d'ajouter une aide externe au radar (comme le CHEX), les changements effectués par les aéronefs passant d'un statut non menaçant à un statut menaçant pourraient être signalés directement sur l'écran radar de l'opérateur. L'opérateur pourrait concentrer son déploiement attentionnel sur le radar et la liste des paramètres, les zones principalement regardées par l'opérateur pour effectuer la tâche ERGR, tout en recevant l'aide des notifications visuelles des changements critiques.

Par contre, les systèmes intégrés de notification ne supportent que la détection des changements et non leur identification. L'utilisateur doit inférer la signification de l'alarme visuelle à partir d'indices contextuels présents dans l'interface surveillée (St. John et coll., 2005). Une notification visuelle ne soutient pas la comparaison pré-post changement nécessaire à la détection des changements. L'opérateur doit lui-même maintenir une représentation mentale de l'état pré-changement et la comparer à l'état actuelle signalée par l'alerte visuelle (Rensink, 2002). Alors, l'alarme visuelle pourrait être présentée conjointement à l'ajout d'une description temporaire du changement près de l'objet sur l'interface qui requiert une réponse immédiate de la part de l'utilisateur (Imbert et coll., 2014). Cependant, cette description augmenterait momentanément la quantité d'information visuelle présentée dans une interface qui est généralement déjà chargée. Cette charge visuelle pourrait même être exacerbée par l'occurrence simultanée de plusieurs changements critiques ou événements urgents, donc par le déclenchement de plusieurs alertes (DiVita et coll., 2004; Durlach et coll., 2008; Perry et coll., 2013). La potentielle surcharge visuelle que causeraient les descriptions des changements et l'apparition de fausses alarmes pourraient aussi favoriser l'incidence de la source attentionnelle de la CaC (une quantité insuffisante de ressources attentionnelles est déployée sur l'objet ayant subi le changement; Caplovitz et coll., 2008; Vachon et coll., 2012). Il serait alors pertinent de tester l'efficacité de différents systèmes de contremesures cognitives qui, contrairement aux notifications visuelles et aux aides externes augmentant la charge visuelle, retirent temporairement de l'information de l'interface visuelle utilisée

par l'opérateur (réduit la quantité d'information) pour ne conserver visible que l'objet ayant subi un changement critique ou que l'événement urgent (Dehais et al., 2011). Un système de contremesures cognitives semble un moyen efficace pour réduire la tunnélisation attentionnelle chez des pilotes de drones, mais doit être utilisé avec parcimonie et dans des cas d'extrêmes urgences. Effectivement, cette méthode de notification de changement critique ou d'événement urgent peut paraître invasive et intrusive puisqu'elle interrompt temporairement les tâches de l'opérateur pour le forcer à réorienter son attention vers l'objet ponctuellement important. L'interface ne peut être utilisée par l'opérateur pendant le signalement du changement ou de l'urgence par le système de contremesure. Il est donc crucial de limiter le nombre de fausses alarmes d'un tel système pour éviter d'interrompre inutilement les tâches de l'opérateur et ainsi nuire à sa performance (Dehais et al., 2011; Imbert et al., 2014). Tout comme pour le CHEX, le développement d'un système automatique d'alertes visuelles et de contremesures cognitives est associé au défi de trouver le meilleur compromis entre la notification des vraies alarmes, et la réduction des fausses alarmes et des omissions (Parasuraman & Riley, 1997; Parasuraman & Manzey, 2010).

## **SYSTÈMES DE NOTIFICATIONS AUDITIVES**

Les solutions technologiques testées et suggérées dans la présente thèse sollicitent la modalité visuelle. Étant donné que la charge en information visuelle d'un environnement multitâche dynamique est généralement très élevée, il serait pertinent d'évaluer l'efficacité à prévenir la CaC de solutions technologiques qui sollicitent d'autres modalités sensorielles. Les alarmes auditives sont connues pour être une composante essentielle du signalement des situations urgentes survenant dans plusieurs lieux de travail à haut risque comme l'aviation et les soins médicaux intensifs (Edworthy & Hellier, 2006). Deux raisons peuvent expliquer pourquoi l'audition pourrait être préférable pour signaler l'occurrence de changements visuels et pour prévenir les sources de CaC, même si cette modalité sensorielle ne peut pas transmettre directement autant d'information que la vision pour un même événement (Sanderson, Liu, & Jenkins, 2009). En aviation, par exemple, les pilotes ont à traiter une charge élevée d'information visuelle. C'est pourquoi que la plupart des dispositifs du cockpit d'un avion sont équipés de systèmes d'alarmes qui transmettent

auditivement l'information concernant une urgence afin d'éviter une surcharge d'information visuelle (Peryer, Noyes, Pleydell-Pearce, & Lieven, 2005). De plus, une alarme sonore a plus de chances d'être détectée et de provoquer des temps de réaction plus rapides comparativement à son homologue visuelle en raison de l'omnidirectionnalité d'un son (Ljungberg, Parmentier, Hughes, Macken, & Jones, 2012; Morris et Montano, 1996). Un son peut être enregistré et traité par le système cognitif, quelle que soit la direction du regard de l'opérateur, ce qui lui évite de détourner son regard ou sa tête de sa tâche principale (Dehais, Causse, Régis et coll., 2012). Étant donné qu'entendre semble obligatoire (p.ex., un pilote ne peut pas fermer ses oreilles tel qu'il pourrait le faire avec ses yeux), l'audition pourrait être une meilleure sentinelle pour signaler des événements urgents et des changements critiques qui se retrouvent en périphérie de la vision. Effectivement, une alarme auditive pourrait être très utile lorsque l'opérateur consulte une partie de l'interface différente à celle où se retrouve le changement ou l'événement nécessitant une réponse immédiate de sa part (Hughes & Jones, 2003; Ljunberg et coll., 2012).

Cependant, dans plusieurs environnements de travail, le canal auditif est occupé par les communications entre les membres d'une équipe ayant à surveiller et à gérer une situation complexe et dynamique (Dehais et coll., 2012; Vachon, Tremblay, Nicholls, & Jones, 2011). Il est important de concevoir des alarmes auditives qui peuvent être entendues parmi les informations transmises dans les communications sans toutefois nuire à ces dernières. Aussi, certaines études ont démontré que la modalité auditive n'est pas exempte de phénomènes de défaillance de la conscience. Effectivement, l'individu serait aussi vulnérable à la surdité aux changements (un changement auditif attendu est manqué, p.ex., Vachon et coll., 2011; Vitevich, 2003) et à la surdité inattentionnelle (une alarme auditive inattendue n'est pas entendue, p.ex., Dehais et coll., 2012).

## **ENTRAÎNEMENT À LA DÉTECTION DES CHANGEMENTS**

L'entraînement pourrait aussi être un moyen utile pour réduire la CaC. Comme suggéré par Durlach (2004), en plus de suivre une formation approfondie sur le fonctionnement de leur système de gestion de l'information (p.ex., écran radar) et sur la

façon d'effectuer leurs tâches, l'entraînement des individus qui doivent surveiller et gérer une situation complexe et dynamique pourrait offrir de l'information sur les changements les plus importants et les plus susceptibles de survenir. Cet entraînement viserait à augmenter leur vigilance et à gérer leurs attentes quant à ces changements. Aussi, il s'est révélé que les experts ont une plus grande capacité en mémoire de l'information associée à leur domaine d'expertise comparativement aux novices (p.ex., Ericsson & Kintsch, 1995). Il serait pertinent de vérifier si un entraînement visant à améliorer la capacité à détecter des changements des opérateurs pourrait aider à prévenir la CaC dans des conditions de charge de travail et de pression temporelle élevées. Est-ce que les opérateurs peuvent devenir des experts en détection des changements? Cet entraînement cognitif pourrait également viser à améliorer les processus cognitifs qui sont sous-jacents à la détection des changements : la perception visuelle, l'attention et de la mémoire (voir Clark, Fleck, & Mitroff, 2011; Durlach, Kring, & Bowens, 2009; Richards et coll. (2012).



## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

La détection des changements dans l'environnement visuel est essentielle dans la surveillance et la gestion de plusieurs situations complexes et dynamiques telles que le contrôle du trafic aérien et la surveillance par caméra. Dans ces environnements de travail à haut risque, les individus doivent transiger avec un grand volume d'information visuelle et une charge de travail élevée. Le partage des ressources attentionnelles entre les multiples tâches à effectuer rend les individus vulnérables à une défaillance de la conscience visuelle soit la CaC. Il y a deux raisons pouvant expliquer ce phénomène : un changement est manqué, car l'individu ne lui a pas porté attention (source perceptive) ou l'individu ne lui a pas attribué suffisamment de ressources attentionnelles pour en prendre conscience (source attentionnelle). Des outils d'aide à la détection des changements ont donc été conçus pour prévenir la CaC et les conséquences graves qu'elle peut causer dans un environnement de travail à haut risque. Ces solutions technologiques n'ont été validées et testées que dans un contexte unitâche dynamique. La présente thèse fait la démonstration que les bénéfices d'un outil, s'étant révélé efficace lorsque la détection des changements est l'unique tâche à effectuer par l'individu, ne sont pas répliqués dans un contexte où la détection des changements est sous-jacente à une tâche de prise décision plus complexe. Le CHEX nuit à la source attentionnelle de la CaC et à d'autres aspects des activités cognitives de l'individu. Son design et son type d'automatisation ne semblent pas adaptés à la charge de travail élevée d'un contexte multitâche dynamique et représentent plutôt un fardeau attentionnel supplémentaire pour son utilisateur.

La conception d'un outil d'aide à la détection efficace dans un contexte multitâche dynamique représente un réel défi. À l'heure actuelle et jusqu'à la preuve du contraire, nous avons à composer avec les limites de la technologie actuelle et les problèmes liés à l'automatisation imparfaite. Un accent est mis sur l'importance de prévenir les conséquences inattendues et les effets contre-productifs que certains outils peuvent avoir sur le travail cognitif d'un individu. Avant leur implémentation dans de véritables systèmes de gestion de l'information, il est primordial de tester la résilience des systèmes d'aide à la décision à diverses conditions de travail associées aux situations complexes et dynamiques et, surtout, d'adapter leurs fonctionnalités aux capacités attentionnelles limitées de l'individu en contexte multitâche.

## RÉFÉRENCES

- Alberts, D. S., Garstka, J. J., Hayes, R. E., & Signori, D. A. (2001). *Understanding information age warfare*. Technical Report. C3I/Command Control Research Program: Washington, DC.
- Athènes, S., Chatty, S., & Bustico, A. (2000). Human factors in ATC alarms and notifications design: An experimental evaluation. *Proceeding of the 3<sup>rd</sup> Air Traffic Management Seminar*. Napoli, Italy: ATM Seminar. Retrieved from [http://www.atmseminar.org/seminar.cfm?seminar\\_id=3](http://www.atmseminar.org/seminar.cfm?seminar_id=3)
- Awh, E., Armstrong, K. M., & Moore, T. (2006). Visual and oculomotor selection: Links, causes and implications for spatial attention. *Trends in Cognitive Science*, *10*, 124-130. doi:10.1016/j.tics.2006.01.001
- Baddeley, A. D. (1993). Working memory or working attention? In A. Baddeley & L. Weiskrantz (Eds.), *Attention: Selection, awareness, and control: A tribute to Donald Broadbent* (pp. 152-170). Oxford, England: Clarendon Press
- Ballard, D. H., Hayhoe, M. M., & Pelz, J. B. (1995). Memory representations in natural tasks. *Cognitive Neuroscience*, *7*, 66–80. doi:10.1162/jocn.1995.7.1.66
- Bar-Yam, Y. (2003). When systems engineering fails toward complex systems engineering. *Proceedings the 2nd Systems, Man and Cybernetics International Conference* (pp. 2021-2028). Cambridge, MA: IEEE. doi:10.1109/ICSMC.2003.1244709
- Beck, M. R., & Levin, D. T. (2003). The role of representational volatility in recognizing pre- and postchange objects. *Memory & Psychophysics*, *65*, 458-468. doi:10.3758/BF03194575
- Beck, M. R., Angelone, B., & Levin, D. T. (2004). Knowledge about the probability of change affects change detection performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *30*, 778–791. doi:10.1037/0096-1523.30.4.778
- Beck, M. R., Levin, D. T., & Angelone, B. (2007). Change blindness blindness: Beliefs about the roles of intention and scene complexity in change detection. *Consciousness and Cognition*, *16*, 31-51. doi:10.1016/j.concog.2006.01.003
- Beck, M. R., Petterson, M. S., & Angelone, B. L. (2007). The roles of encoding, retrieval, and awareness in change detection. *Memory & Cognition*, *35*, 610-620. doi:10.3758/BF03193299

- Beck, M. R., & van Lamsweerde, A. E. (2011). Accessing long-term memory representations during visual change detection. *Memory & Cognition*, *39*, 433-446. doi:10.3758/s13421-010-0033-4
- Benaskeur, A., Irandoust, H., Baker, K., & Banbury, S. (2009). *Naval Force-Level Tactical Command & Control: Goal Hierarchy and Analysis* (Technical report 2009-197). Québec, Canada: Defence R&D Canada – Valcartier
- Benaskeur, A., & Kabanza, F. (2009). *Combat power management for INCOMMANDS TDP: Characterization of the problem and review of applicable technologies* (Technical report 2008-265). Québec, Canada: Defence R&D Canada – Valcartier
- Blackmore SJ, Brelstaff G, Nelson K, Troscianko T. 1995. Is the richness of our visual world an illusion? Transsaccadic memory for complex scenes. *Perception*, *24*, 1075–81. doi:10.1068/p241075
- Bliss, J. P., & Acton, S. A. (2003). Alarm mistrust in automobiles: How collision alarm reliability affects driving. *Applied ergonomics*, *34*, 499–509. doi:10.1016/j.apergo.2003.07.003
- Boot, W. R., Kramer, A. F., Becic, E., Wiegmann, D. A., & Kubose, T. (2006). Detecting transient changes in dynamic displays: The more you look, the less you see. *Human Factors*, *48*, 759–773. doi:10.1518/001872006779166424
- Brehmer, B. (2007). Understanding the functions of C2 is the key to progress. *The International C2 Journal*, *1*, 211–232. Retrieved from [http://www.dodccrp.org/files/IC2J\\_v1n1\\_07\\_Brehmer.pdf](http://www.dodccrp.org/files/IC2J_v1n1_07_Brehmer.pdf)
- Brehmer, B. (2005). The dynamic OODA loop: Amalgamating Boyd’s OODA loop and the cybernetic approach to command and control. *Proceeding of the 10th International Command and Control Research and Technology Symposium: The Future of C2*.
- Brehmer, B. (2004). Some reflections on microworld research. In S. G. Schifflet, L. R. Elliott, E. Salas & M. D. Coovert (Eds.), *Scaled worlds: Development, validation and applications*. Aldershot, England: Ashgate Cornwall.
- Brehmer, B. (1992). Dynamic decision making: Human control of complex systems. *Acta Psychologica*, *81*, 211–41. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1462786>
- Brehmer, B., & Dörner, D. (1993). Experiments with computer-simulated microworlds: Escaping both the narrow straits of the laboratory and the deep blue sea of the field study. *Computers in Human Behavior*, *9*, 171–184. doi:10.1016/0747-5632(93)90005-DBreznitz, S. (1983). *Cry-wolf: The psychology of false alarms*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

- Brenitz, S. (1983). *Cry-Wolf: The Psychology of False Alarms*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum.
- Breton, R., Rousseau, R. (2005). The C-OODA: A cognitive version of the OODA loop to represent C2 activities. *Proceedings of the 10th International Command and Control Research Technology Symposium*. Command and Control Process Modeling Group.
- Brewer, M. (2000). Research design and issues of validity. In H. Reis & C. Judd (eds.), *Handbook of research methods in social and personality psychology*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Bryant, D. (2007). Classifying simulated air threats with fast and frugal heuristics. *Journal of Behavioural Decision Making*, 20, 37-64. doi:10.1002/bdm.540
- Busch, N. A. (2013) The fate of object memory traces under change detection and change blindness. *Brain Research*, 1520, 107-115. doi:10.1016/j.brainres.2013.05.014
- Caplovitz, G. P., Fendrich, R., & Hughes, H.C. (2008). Failures to see: attentive blank stares revealed by change blindness. *Consciousness and cognition*, 17, 877–86. doi:10.1016/j.concog.2007.08.006
- Carver, L, & Turoff, M. (2007). Human-computer interaction: The human and computer as a team in emergency management information systems. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 50, 33-38. doi:10.1145/1226736.1226761
- Chen, S., Loft, S., Visser, T., & Braithewaite, J. (2013). Flexible automation: A comparison of operator-triggered and static automation. *Proceedings of the 49th Australian Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Perth, AU: Human Factors and Ergonomics Society
- Christoffersen, K., Christopher, H. N., & Vicente, K. J. (1998). A longitudinal study of the effects of ecological interface design on deep knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies*, 48, 729–762. doi:10.1006/ijhc.1998.0190
- Clark, K., Fleck, M. S., & Mitroff, S. R. (2011). Enhanced change detection performance reveals improved strategy use in avid action video game players. *Acta Psychologica*, 136, 67-72. doi:10.1016/j.actpsy.2010.10.003
- Cole, G. G., Kentridge, R. W., Heywood, C. A. (2004). Visual salience in the change detection paradigm: The special role of object onset. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30, 464-477. doi:10.1037/0096-1523.30.3.464
- De Greef, T. E., Arciszewski, H. F. R., & Neerinx, M. A. (2010). Adaptive automation based on an object-oriented task model: Implementation and evaluation in a realistic

- C2 environment. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 4, 152-182. doi:10.1518/155534310X522851
- Dehais, F., Causse, M., & Tremblay, S. (2011). Mitigation of conflicts with automation: Use of cognitive countermeasures. *Human Factors*, 53, 448-460. doi:10.1177/0018720811418635
- Dehais, F., Causse, M., Régis, N., Menant, E., Labedan, P., Vachon, F., & Tremblay, S. (2012). Missing critical auditory alarms in aeronautics : Evidence for inattentional deafness ? *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics 56th Annual Meeting* (pp. 1639–1643). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society. doi:10.1177/1071181312561328
- Dehais, F., Tessier, C., Christophe, L., & Reuzeau, F. (2010). The perseveration syndrome in the pilot's activity: Guidelines and cognitive countermeasures. *Human Error, Safety and Systems Development*, 5962, 68-80. doi:10.1007/978-3-642-11750-3\_6
- DiVita, J., Obermayer, R., Nugent, W., & Linville, J.M. (2004). Verification of the change blindness phenomenon while managing critical events on a combat information display. *Human Factors*, 46, 205–218. doi:10.1518/hfes.46.2.205.37340
- Dixon, S.R., & Wickens, C.D. (2006). Automation reliability in unmanned aerial vehicle flight control: A reliance-compliance model of automation dependence in high workload. *Human Factors*, 48, 474–486. doi:10.1518/001872006778606822
- Dreier, A. S. (2012). *Strategy, planning & litigating to win: Orchestrating trial outcomes with systems theory, psychology, military science and utility theory*. Candor, NY: Telos Press Publishing
- Drew, T., Vö, M.L.-H., & Wolfe, J. M. (2013). The invisible gorilla strikes again: Sustained inattentional blindness in expert observers. *Psychological Science*, 24, 1848-1853. doi:10.1177/0956797613479386
- Drieghe, D., Rayner, K., & Pollatsek, A. (2007). Mislocated fixations can account for parafoveal-on-foveal effects in eye movements during reading. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61, 1239-1249. doi:10.1080/17470210701467953
- Durlach, P. J. (2004). Change blindness and its implications for complex monitoring and control systems design and operator training. *Human-Computer Interaction*, 19, 423–451. doi:10.1207/s15327051hci1904\_10.
- Durlach, P.J., & Chen, J.Y.C. (2003). Visual change detection in digital military displays. *Proceedings of the Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference*. Orlando, FL: IITSEC.

- Durlach, P. J., Kring, J., & Bowens, L. D. (2008). Detection of icon appearance and disappearance on a digital situation awareness display. *Military Psychology, 20*, 81–94. doi:10.1080/08995600701869502
- Durlach, P. J., Kring, J., & Bowens, L. D. (2009). Effects of action video game experience on change detection. *Military Psychology, 21*, 24-39. doi:10.1080/08995600802565694.
- Durso, F. T., Truitt, T. R., Hackworth, C. A., Crutchfield, J. M., & Manning, C. A. (1998). En route operational errors and situational awareness. *The International Journal of Aviation Psychology, 8*, 177-194. doi:10.1207/s15327108ijap0802\_6
- Dwyer, D., Hall, J., Volpe, C., Cannon-Bowers, J. A., & Salas, E. (1992). *A performance assessment task for examining tactical decision-making under stress* (Report No. 92-002). Orlando, FL: Naval Training Systems Center.
- Edwards, W. (1962). Dynamic decision theory and probabilistic information processing. *Human Factors, 4*, 59–74. doi:10.1177/001872086200400201
- Edworthy, J., & Hellier, E. (2006). Alarms and human behaviour: implications for medical alarms. *British journal of anaesthesia, 97*, 12–7. doi:10.1093/bja/ael114
- Elliott, L.R., Dalrymple, M.A., Schiflett, S.G., & Miller, J.C. (2004). Scaling Scenarios: Development and application to C4ISR sustained operations research. In S.G. Schiflett, L.R. Elliott, E. Salas, & M.D. Covert (Eds.), *Scaled Worlds: Development, Validation, and Applications* (pp.119-134). Hampshire: Ashgate
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors, 37*, 32-64. doi: 10.1518/001872095779049543.
- Endsley, M. R. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors, 37*, 381-394. doi:10.1518/001872095779064555
- Kane, M. J., Bleckley, K. M., Conway, A. R. A., & Engle, R. W. (2001). A controlled-attention view of working-memory capacity. *Journal of Experimental Psychology: General, 130*, 169-183. doi:10.1037//0096-3445.130.2.169
- Ericsson, A. K., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review, 102*, 211-245. doi:10.1037/0033-295X.102.2.211
- Franconeri, S. L., Simons, D. J., & Junge, J. A. (2004). Searching for stimulus-driven shifts of attention. *Psychonomic Bulletin & Review, 11*, 876-881. doi:10.3758/BF03196715

- Funke, U. (1995). Using complex problem solving tasks in personnel selection and training. In P. A. Frensch & J. Funke (eds), *Complex problem solving: The European Perspective* (pp. 219-240). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Gagnon, J-F., Couderc, F., Rivest, M., & Tremblay, S. (2011). Capturing the task model of experts in emergency response using SYnRGY. *Proceeding of the 9th International ISCRAM conference*. Vancouver, CA.
- Garstka, J., & Alberts, D. 2004. Network Centric Operations Conceptual Framework Version 2.0. Vienna, Virginia: Evidence-Based Research, Incorporated
- Gigerenzer, G., & Todd, P. M. (1999). Fast and frugals heuristics: The adaptive toolbox. In G. Gigerenzer & P. M. Todd (Eds.), *Simple Heuristics That Make Us Smart* (pp. 3–34). New York: Oxford University Press, Inc
- Giraudet, L., Berenger, M., Imbert, J-P., Tremblay, S. (2014). Inattentional Deafness in Simulated Air Traffic Control Tasks: A Behavioral and P300 Analysis. *HAL-00991359, version 1*. Retrieved from <http://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-00991359>
- Godjin, R., & Theeuwes, J. (2003). Parallel allocation of attention prior to the execution of saccade sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 882-896. doi:10.1037/0096-1523.29.5.882
- Gonzalez, C. (2005). Decision support for real-time, dynamic decision-making tasks. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 96, 142–154. doi:10.1016/j.obhdp.2004.11.002
- Gonzalez, C., Vanyukov, P., & Martin, M. (2005). The use of microworlds to study dynamic decision making. *Computers in Human Behavior*, 21(2), 273–286. doi:10.1016/j.chb.2004.02.014
- Granlund, R., Johansson, B., & Persson, M. (2001). C3Fire: A microworld for collaboration training in the ROLF environment. *Proceedings to the 42nd Conference on Simulation and Modeling, Simulation in Theory and Practice*. Retrieved from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-61999>
- Gray, W. D. (2002). Simulated task environments : The role of high-fidelity simulations, scaled worlds, synthetic environments, and laboratory tasks in basic and applied. *Cognitive Science Quarterly*, 2, 205–227. Retrieved from <http://homepages.rpi.edu/~grayw/pubs/papers/2002/STE.html>
- Hancock, P. R., Jagacinski, R. J., Parasuraman, R., Wickens, C. D., Wilson, G. F., & Kaber, D. B. (2013). Human-automation interaction research: Past, present, and future. *Ergonomics in Design*, 21, 9-14. doi:10.1177/1064804613477099

- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (task load index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*, *52*, 139-183. doi:10.1016/S0166-4115(08)62386-9
- Hauland, G. (2003). Measuring team situation awareness by means of eye movement data. In D. Harris, V. Duffy, M. Smith, and C. Stephanidis (Eds.), *Proceedings of the Human-Computer Interaction International Conference* (pp. 230-234). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Hegarty, M. (2011). The cognitive science of visual-spatial displays: Implications for design. *Topics in Cognitive Science*, *3*, 446–474. doi:10.1111/j.1756-8765.2011.01150.x
- Henderson, J., & Hollingworth, A. (2003). Global transsaccadic change blindness during scene perception. *Psychological Science*, *14*, 493–497. doi:10.1111/1467-9280.02459
- Hewlett, P., & Oezbek, C. (2012). How Stimulus Variables Combine to Effect Change Blindness. *Current Psychology*, *31*, 337–348. doi:10.1007/s12144-012-9151-4
- Hoeks, B., & Levelt, W. J. M. (1993). Pupillary dilation as a measure of attention: A quantitative system analysis. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *25*, 16-26. doi:10.3758/BF03204445
- Hollnagel, E. (2001). Extended cognition and the future of ergonomics. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *2*, 309-315. doi:10.1080/14639220110104934
- Hollnagel, E. & Woods, D. D. (2005) *Joint cognitive systems: The foundations of cognitive systems engineering*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis group
- Hollingworth, A., Schrock, G., & Henderson, J. M. (2001). Change detection in the flicker paradigm: The role of fixation position within the scene. *Memory & Cognition*, *29*, 296-304. doi:10.3758/BF03194923
- Horswill, M. S., & McKenna, F. P. (2004). Drivers' hazard perception ability: Situation awareness on the road. In S.P. Banbury & S. Tremblay (Eds.), *A cognitive approach to situation awareness: Theory and application* (pp. 155–175). Aldershot, UK: Ashgate.
- Huang, E.M., Mynatt, E.D., & Trimble, J.P. (2006). Displays in the Wild : Understanding the Dynamics and Evolution of a Display Ecology. *Pervasive Computing, IEEE*, *3968*, 321–336. doi:http://dx.doi.org/10.1007/11748625\_20
- Hughes, R., & Jones, D. M. (2003). A negative order-repetition priming effect: Inhibition of order in unattended auditory sequences. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *29*, 199-218. doi:10.1037/0096-1523.29.1.199

- Ilachinski, A. (1996). Land warfare and complexity: Mathematical background and technical sourcebook. *Technical Report*. Center for Naval Analyses (Alexandria, VA).
- Imbert, J.-P., Hodgetts, H. M., Parise, R., Vachon, F., & Tremblay, S. (submitted). Attentional costs and failures in air traffic control notifications.
- Iqbal, S. T., Zheng, X. S., & Bailey, B. P. (2004). Task-evoked pupillary response to mental workload in human-computer interaction. *Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems CHI 04* (1477-1480). New York, NY: ACM press
- Itti, L., & Koch, C. (2000). A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. *Visual Research*, *40*, 1489–1506. doi:10.1016/S0042-6989(99)00163-7
- Jobidon, M.-E., Rousseau, R., & Breton, R. (2004). Time in the control of a dynamic environment. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 48, pp. 557–561). doi:10.1177/154193120404800360
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, *87*, 329-354. doi:10.1037/0033-295X.87.4.329
- Keane, M. (2005). Dictionary of modern strategy and tactics. Naval Institute Press.
- Klein, G. (2008). Naturalistic decision making. *Human Factors*, *50*, 456-460. doi:10.1518/001872008X288385
- Klein, G., Ross, K. G., Moon, B. M., Associates, K., Hoffman, E. R. R., Hayes, P. J., & Ford, K. M. (2003). Macrocognition. *Intelligent Systems, IEEE*, *18*, 81-85. doi:10.1109/MIS.2003.1200735
- Kramer, C., Dubé, G., Parush, A., Breton, E., Chiniara, G., Weiss, M., & Tremblay, S. (2012). Capturing Team Mental Models in Complex Healthcare Environments. In D. G. Duffy (Ed.), *Advances in Human Aspects of Healthcare* (p. 625-634). Boca Raton, FL: CRC Press
- Kuhn, G., & Findlay, J. M. (2009). Misdirection, attention and awareness: Inattention blindness reveals temporal relationship between eye movements and visual awareness. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63*, 136-146. doi:10.1080/17470210902846757
- Kveraga, K., & Hughes, H. C. (2005). Effects of stimulus-response uncertainty on saccades to near-threshold targets. *Experimental Brain Research*, *162*, 401–405. doi:10.1007/s00221-004-2155-z

- Lafond, D., Champagne, J., Hervet, G., Gagnon, J.-F., Tremblay, S., & Rousseau, R. (2009). Decision analysis using policy capturing and process tracing techniques in a simulated naval air-defense task. *Proceedings of the 53th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (pp. 1220–1224). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society. Retrieved from <http://www.co-dot.ulaval.ca/cms/index.php?menu=3&temps=1349895866>
- Lafond, D., Vachon, F., Rousseau, R., & Tremblay, S. (2010). A cognitive and holistic approach to developing metrics for decision support in command and control. In D.B. Kaber & G. Boy (Eds.), *Advances in Cognitive Ergonomics* (pp. 65–75). Danvers, MA: CRC Press.
- Lamme, V. A. F. (2003). Why visual attention and awareness are different. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 12-18.
- Lawson, J. S. (1981). Command and control as a process. *IEEE Control Systems Magazine*, March 1981, 5-12.
- Lebiere, C., & Best, B. J. (2009). From Microcognition to Macro-cognition: Architectural Support for Adversarial Behavior. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 3, 176-193. doi:10.1518/155534309X441844
- Levin, D. T., Drivdahl, S. B., Momen, N., & Beck, M. R. (2002). False predictions about the detectability of visual changes: The role of beliefs about attention, memory, and the continuity of attended objects in causing change blindness. *Consciousness and Cognition*, 11, 507-527. doi:10.1016/S1053-8100(02)00020-X
- Levin, D. T., Momen, N., Drivdahl, S. B., & Simons, D. J. (2000). Change blindness blindness: The metacognitive error of overestimating change-detection ability. *Visual Cognition*, 7, 397-412. doi:10.1080/135062800394865
- Liebhaber, M.J., & Feher, B.A. (2002). *Surface warfare threat assessment : Requirements definition*. Pacific Science. San Diego, CA. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA406337>
- Liebhaber, M. J., & Smith, P. (2000). Naval air defense threat assessment: Cognitive factors and model. *Command and Control Research and Technology Symposium*, Monterey, CA, June 26-28.
- Ljungberg, J. K., Parmentier, F. B. R., Hughes, R. W., Macken, W. J., & Jones, D. M. (2012). Listen out! Behavioural and subjective responses to verbal warnings. *Applied Cognitive Psychology*, 26, 451–461. doi:10.1002/acp.2818

- Macdonald, J. S. P., & Lavie, N. (2011). Visual perceptual load induces inattentional deafness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *73*, 1780-1789. doi:10.3758/s13414-011-0144-4
- Mack, A., & Rock, I. (1998). *Inattention blindness*. MIT Press.
- Martin, E., Lyon, D. R., & Schreiber, B. T. (1998). Designing synthetic tasks for human factors research: An application to uninhabited air vehicles. *Proceedings of the 42nd Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (pp. 123-127). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society. doi:10.1177/154193129804200128
- Masson, M. E., & Loftus, G. R. (2003). Using confidence intervals for graphically based data interpretation. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie*, *57*, 203-220. doi:10.1037/h0087426
- McCarley, J. S., & Kramer, A. F. (2008). Eye movements as a window on perception and cognition. In R. Parasuraman & M. Rizzo (Eds.), *Neuroergonomics: The brain at work* (pp. 95-112). New York, NY: Oxford University Press, Inc.
- McConkie, G. W., & Currie, C. B. (1996). Visual stability across saccades while viewing complex pictures. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *22*, 563-581. doi:10.1037/0096-1523.22.3.563
- McCrickard, D. S., Catrambone, R., Chewar, C. M., & Stasko, J. T. (2003). Establishing tradeoffs that leverage attention for utility: Empirically evaluating information display notification systems. *International Journal of Human-Computer Studies*, *58*, 547-582. doi:10.1016/S1071-5819(03)00022-3
- McGuirl, J. M., & Sarter, N. B. (2006). Supporting trust calibration and the effective use of decision aids by presenting dynamic system confidence information. *Human Factors*, *48*, 656-665.
- MacMillan, J., Paley, M.J., Levchuk, Y.N., Entin, E.E., Serfaty, D., and Freeman, J.T. (2002). Designing the Best Team for the Task: Optimal Organizational Structures for Military Missions. In M.McNeese, E. Salas, and M. Endsley (Eds), *New Trends in Cooperative Activities: System Dynamics in Complex Settings*. San Diego, CA: Human Factors and Ergonomics Society Press.
- Miller, D. L., Young, P., Kleinman, D., & Serfaty, D. (1998). *Distributed dynamic decision-making simulation phase I: Release notes and user's manual*. Woburn, MA: Aptima.
- Mitroff, S. R., Simons, D. J., & Levin, D. T. (2004). Nothing compares 2 views: Change blindness can occur despite preserved access to the changed information. *Perception & Psychophysics*, *66*, 1268-1281. doi:10.3758/BF03194997

- Morris, R. W., & Montano, S. R. (1996). Response time to visual and auditory alarms during anaesthesia. *Anaesthesia and Intensive Care*, *24*, 682-684. Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/MED/8971317>
- Morrison, J. G., Marshall, S. P., Kelly, R. T., & Moore, R. A. (1997). Eye tracking in tactical decision making environments : implications for decision support evaluation. *Proceedings of the 3th International Command and Control Research and Technology Symposium*. Fort McNair, DC.
- Nikolic, M. I., Orr, J. M., & Sarter, N. B. (2004). Why pilots miss the green box: How display context undermines attention capture. *The International Journal of Aviation Psychology*, *14*, 39-52. doi:10.1207/s15327108ijap1401\_3
- O'Regan, J. K., Deubel, H., Clark, J. J., & Rensink, R. A. (2000). Picture changes during blinks : Looking without seeing and seeing without looking. *Visual Cognition*, *7*, 191–211. doi:10.1080/135062800394766
- O'Regan, J. K., Rensink, R. A., & Clark, J. J. (1999). Change blindness as a result of “mudsplashes.” *Nature*, *398*, 34. doi:10.1038/17953
- Ozkan, B., Rowe, N. C., Calfee, S. H., Hiles, J. E. (2005). *Three simulation models of naval air defense*. Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- Parasuraman, R., Cosenzo, K. A., & De Visser, E. (2009). Adaptive automation for human supervision of multiple uninhabited vehicles: effects on change detection, situation awareness, and mental workload. *Military Psychology*, *21*, 270–297. doi:10.1080/08995600902768800
- Parasuraman, R., & Manzey, D. H. (2010). Complacency and bias in human use of automation: An attentional integration. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *52*, 381–410. doi:10.1177/0018720810376055
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors*, *39*, 230-253. doi:10.1518/001872097778543886
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2008). Situation awareness, mental workload, and trust in automation: Viable, empirically supported cognitive engineering constructs. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *2*, 140–160. doi:10.1518/155534308X284417
- Parker, R. E. (1978). Picture processing during recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *4*, 284-293. doi:10.1037/0096-1523.4.2.284

- Peryer, G., Noyes, J., Pleydell-Pearce, K., & Lieven, N. (2005). Auditory alert characteristics : A survey of pilot views. *The International Journal of Aviation Psychology, 15*, 233–250. doi:10.1207/s15327108ijap1503\_2
- Perry, N. C., Wiggins, M. W., Childs, M., & Fogarty, G. (2013). The application of reduced-processing decision support systems to facilitate the acquisition of decision-making skills. *Human Factors, 55*, 535-544. doi:10.1177/0018720812467367
- Pezzulo, G., Butz, M. V., Sigaud, O., & Gérard, P. (2007). *Anticipation behavior in adaptive learning systems*. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag
- Poole, A., & Ball, L. J. (2006). Eye tracking in human-computer interaction and usability research. In C. Ghaoui (Ed.), *Encyclopedia of human computer interaction* (pp. 211–219). Hershey, PA: Idea Group Reference.
- Porubanova-Norquist, M., & Sikl, R. (2013). Various categories of changes in the inducement of change blindness. *Studia Psychologica, 55*, 83-94. Retrieved from <http://cejsh.icm.edu.pl/cejsh/element/bwmeta1.element.cejsh-ca8543a8-036c-4094-81dc-cf5b4bad8ebc>
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 32*, 3-25. doi:10.1080/00335558008248231
- Potter, S.S., & Rousseau, R. (2010). Evaluating the resilience of a human-computer decision-making team: A methodology for decision-centered testing. In E.S. Patterson and J. Miller (Eds.), *Macrocognition metrics and scenarios: Design and evaluation for real-world teams*. Aldershot: Ashgate.
- Potter, S. S., Woods, D. D., Roth, E. M., Fowlkes, J., & Hoffman, R. R. (2006). Evaluating the effectiveness of a joint cognitive system: Metrics, techniques, and frameworks. *Proceedings of the 50th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (pp. 314-318), Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society. doi:10.1177/154193120605000322
- Privitera, C. M., Renninger, L. W., Carney, T., Klein, S., & Aguilar, M. (2010). Pupil dilation during visual target detection. *Journal of Vision, 10*, 1-14. doi:10.1167/10.10.3
- Rasmussen, J., Pejtersen, A. M., & Goostein, L. P. (1994). *Cognitive systems engineering*. New York, NY: Wiley, John & Sons, Incorporated.
- Rayner, K. (2009). Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. *Quarterly journal of experimental psychology, 62*, 1457–506. doi:10.1080/17470210902816461

- Regis, N., Dehais, F., Tessier, C., Gagnon, J-F. (2012). Ocular metrics for detecting attentional tunnelling. In D. de Waard et al. (Eds). *Human Factors: A view from an integrative perspective*.
- Rensink, R. A. (2002). Change detection. *Psychological Review*, 53, 245–277. doi:10.1146/annurev.psych.53.100901.135125
- Rensink, R. A., O'Regan, J. K., & Clark, J. J. (1997). To see or not to see: The need for attention to perceive changes in scenes. *Psychological Science*, 8, 1–6. Retrieved from <http://www.cs.ubc.ca/~rensink/publications/download/PsychSci97-RR.pdf>
- Richards, C. (2004). *Certain to win: The strategy of John Boyd, applied to business*. Xlibris Corp.
- Richards, A., Hannon, E. M., & Vitkovitch, M. (2012). Distracted by distractors: Eye movements in dynamic inattentive blindness task. *Consciousness and Cognition*, 21, 170-176. doi:10.1016/j.concog.2011.09.013
- Rousseau, R., Tremblay, S., Lafond, D., Vachon, F., & Breton, R. (2007). Assessing temporal support for dynamic decision making in C2. *Proceedings of the 51th Annual Meeting of Human Factors and Ergonomics Society* (pp. 1259-1262). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society. doi:10.1177/154193120705101844
- Sanderson, P. M., Liu, D., & Jenkins, S. A. (2009). Auditory displays in anesthesiology. *Current opinion in anaesthesiology*, 22, 788–95. doi:10.1097/ACO.0b013e3283326a2f
- Scannella, S. (2011). Bases cérébrales du conflit visuo-auditif spatial et sémantique : études en IRM fonctionnelle et EEG. *Doctoral Thesis*.
- Schoelles, M. J., & Gray, W. D. (2001). Argus: A suite of tools for research in complex cognition. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 33, 130-140. doi:10.3758/BF03195358
- Shah, A. K., & Oppenheimer, D. M. (2008). Heuristics made easy: an effort-reduction framework. *Psychological Bulletin*, 134, 207–22. doi:10.1037/0033-2909.134.2.207
- Shallice, T., & Burgess, P. W. (1993). Supervisory control of action and thought selection. In A. Baddeley & L. Weiskrantz (Eds.), *Attention: Selection, awareness, and control: A tribute to Donald Broadbent* (pp. 171-187). Oxford, England: Clarendon Press
- Simons, D. J., & Ambinder, M. S. (2005). Theory and consequences. *Psychological Science*, 14, 44–48. doi:10.1111/j.0963-7214.2005.00332.x

- Simons, D. J., & Chabris, C. F. (1999). Gorillas in our midst: Sustained inattention blindness for dynamic events, *Perception*, 28, 1059-1074. Retrieved from <http://www.drjoebio.com/>
- Simons, D.J., Franconeri, S.L., & Reimer, R.L. (2000). Change blindness in the absence of visual disruption. *Perception*, 29, 1143–1154. Retrieved from [https://internal.psychology.illinois.edu/reprints/index.php?site\\_id=1](https://internal.psychology.illinois.edu/reprints/index.php?site_id=1)
- Simons, D. J., & Levin, D. T. (1998). Failure to detect changes to people during a real-world interaction. *Psychonomic Bulletin & Review*, 5, 644-649. doi:10.3758/BF03208840
- Simons, D. J., & Rensink, R. a. (2005). Change blindness: past, present, and future. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 16–20. doi:10.1016/j.tics.2004.11.006
- Smallman, H. S., & St. John, M. (2003). CHEX (Change History EXplicit): New HCI concepts for change awareness. *Proceedings of the 47th Annual Meeting of Human Factors and Ergonomics Society* (pp. 528–532). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society
- Smallman, H. S., & St. John, M. (2005). Naive realism: Misplaced faith in realistic displays. *Ergonomics in Design: The Quarterly of Human Factors Applications*, 13, 6–13. doi:10.1177/106480460501300303
- St. John, M., & Smallman, H. S. (2008). Staying up to speed: Four design principles for maintaining and recovering situation awareness. *Human Factors*, 2, 118–139. doi:10.1518/155534308X284381.
- St. John, M., Smallman, H. S., & Manes, D. I. (2005). Recovery from interruptions to a dynamic monitoring task: The beguiling utility of instant replay. *Proceedings from the 49th Annual Meeting of Human Factors and Ergonomics Society* (pp. 473-477). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society. doi:10.1518/001872005774860014.
- St. John, M., Smallman, H. S., Manes, D. I., Feher, B. A., & Morrison, J. G. (2005). Heuristic automation for decluttering tactical displays. *Human Factors*, 47, 509-525. Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/28974304?accountid=12008>
- Steelman, K. S., McCarley, J. S., & Wickens, C. D. (2011). Modeling the control of attention in visual workspaces. *Human Factors*, 53, 142-153. doi:10.1177/0018720811404026
- Theeuwes, J. (2004). Top-down search strategies cannot override attentional capture. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11, 65-70. doi:10.3758/BF03206462

- Theeuwes, J., Belopolsky, A., & Olivers, C. N. L. (2009). Interactions between working memory, attention and eye movements. *Acta Psychologica*, *132*, 106-114. doi:10.1016/j.actpsy.2009.01.005
- Thomas, L. C., & Rantanen, E. M. (2006). Human factors issues in implementation of advanced aviation technologies: A case of false alerts and cockpit displays of traffic information. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *7*, 501-523. doi:10.1080/14639220500090083
- Trafton, G. J., & Ratwani, R. M. (2014). The law of unintended consequences: The case of external subgoal support. *Proceedings of the 32rd SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp., 1767-1776). New York, NY: ACM press.
- Tremblay, S., & Saint-Aubin, J. (2009). Evidence of anticipatory eye movements in the spatial Hebb repetition effect: Insights for modeling sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *35*, 1256-1265. doi:10.1037/a0016566
- Tremblay, S., Vachon, F., Lafond, D., & Kramer, C. (2011). Dealing with task interruptions in complex dynamic environments: Are two heads better than one? *Human Factors*, *54*, 70-83. doi:10.1177/0018720811424896
- Tremblay, S., Vachon, F., Rousseau, R., & Breton, R. (2012). Promoting temporal awareness for dynamic decision making in command and control. In K. Stanney & K. S. Hale (Eds.), *Advances in cognitive engineering and neuroergonomics* (pp. 3422-3431). Danvers, MA: CRC Press.
- Triesch, J., Ballard, D. H., Hayhoe, M. M., & Sullivan, B. T. (2003). What you see is what you need. *Journal of Vision*, *3*, 86-94. doi:10.1167/3.1.9
- Tse, P. U. (2004). The distribution of microsaccade directions need not reveal the location of attention: Reply to Rolfs, Engbert, and Kliegl. *Psychological Science*, *15*, 708-710. doi:10.1016/j.visres.2006.05.007
- Vachon, F., Lafond, D., Vallières, B. R., Rousseau, R., & Tremblay, S. (2011). Supporting situation awareness: A tradeoff between benefits and overhead. *Proceeding of the 1<sup>st</sup> IEEE International Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support* (pp. 282-289). Miami Beach, FL: IEEE. doi:10.1109/COGSIMA.2011.5753460
- Vachon, F., Tremblay, S., Nicholls, A. P., & Jones, D. M. (2011). Exploiting the auditory modality in decision support: Beneficial “warning” effects and unavoidable costs. *Proceedings of the 55th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (pp. 1402- 1406). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.

- Vachon, F., Vallières, B. R., Jones, D. M., & Tremblay, S. (2012). Nonexplicit change detection in complex dynamic settings: what eye movements reveal. *Human Factors*, *54*, 996-1007. doi:10.1177/0018720812443066
- Vallières, B. R., Hodgetts, H. M., Vachon, F., & Tremblay, S. (2012). Supporting change detection in complex dynamic situation: Does the CHEX serve its purpose. *Proceedings of the 56th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (1708-1712). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society. doi:10.1177/1071181312561342
- Varakin, D. A., Levin, D. T., & Fidler, R. (2004). Unseen and unaware : Implications of recent research on failures of visual awareness for human-computer interface design. *Human-Computer Interaction*, *19*, 389–422. doi:10.1207/s15327051hci1904\_9
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *3*, 158–177. doi:10.1080/14639220210123806
- Wickens, C.D., & Alexander, A. L. (2009). Attentional tunneling and task management in synthetic vision displays. *The International Journal of Aviation Psychology*, *19*, 182-199. doi:10.1080/10508410902766549
- Wickens, C. D., Ambinder, M. S., & Alexander, A. L. (2004). The role of highlighting in visual search through maps. *Proceedings of the 48<sup>th</sup> Human Factors and Ergonomics Society Meeting* (pp. 1895-1899). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society. doi: 10.1177/154193120404801622
- Wickens, C. D., McCarley, J. S., Alexander, A. L., Thomas, L. C., Ambinder, M., & Zheng, S. (2008). Attention-situation aware- ness (A-SA) model of pilot error. In D. C. Foyle & B. L. Hooey (Eds.), *Human performance modeling in aviation* (pp. 213–239). Boca Raton, FL: Taylor & Francis
- Wickens, C. D., Rice, S., Keller, D., Hutchins, S., Hughes, J., & Clayton, K. (2009). False alerts in air traffic control conflict alerting system: Is there a “cry wolf” effect? *Human Factors*, *51*, 446–462. doi:10.1177/0018720809344720
- Wilson, G. F., & Russell, C. A. (2007). Performance enhancement in an uninhabited air vehicle task using psychophysiologicaly determined adaptive training. *Human Factors*, *49*, 1005-1018. doi:10.1518/001872007X249875
- Wohl, J. G. (1981). Force management decision requirements for air force tactical command and control. *IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics*, *SMC-11*, 618-639.
- Woods, D. D. (1995). Towards a theoretical base for representation design in the computer medium: Ecological perception and aiding human cognition. In J. Flach, K. Vicente,

- P. Hancock, & J. Caird (Eds.), *Global perspectives on the ecology of human-machine systems* (pp. 157-188). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Xiao, Y., & Seagull, F. J. (1999). An analysis of problems with auditory alarms: Defining the roles of alarms in process monitoring tasks. *Proceedings of the 43th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (pp. 256–260). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society. doi:10.1177/154193129904300327
- Yantis, S., & Jonides, J. (1990). Abrupt visual onsets and selective attention: Voluntary versus automatic allocation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *16*, 121-134. doi:10.1037/0096-1523.16.1.121
- Yeh, M. Y., & Wickens, C. D. (2001). Attentional filtering in the design of electronic map displays: a comparison of color coding, intensity coding, and decluttering techniques. *Human Factors*, *43*, 543-562. doi:10.1518/001872001775870359
- Zelinsky, G. J. (2001). Eye movements during change detection: implications for search constraints, memory limitations, and scanning strategies. *Perception & Psychophysics*, *63*, 209–25. doi:10.3758/BF03194463