

QUEL RÔLE JOUENT LES PRINCIPES VISUELS ET LES CARACTÉRISTIQUES DE L'UTILISATEUR DANS LA VISUALISATION DYNAMIQUE D'INFORMATION ? ⁱ

par Sara Maggi ^{*}, Sara Irina Fabrikant ^{*}, Jean-Paul Imbert [†], Christophe Hurter [†]

^{*} Université de Zurich, Département de Géographie, Winterthurerstr. 190, 8057 Zurich, Suisse
Courriel : {sara.maggi, sara.fabrikant}@geo.uzh.ch

[†] Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC), 7 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse, France
Courriel : {jean-paul.imbert, christophe.hurter}@enac.fr

Résumé

Nous présentons en détail une expérimentation évaluant des tâches utilisateurs dans un contexte de visualisation dynamique représentant des mouvements d'avions sur une interface de contrôle aérien. Nous cherchons à évaluer l'influence des principes d'affichage et du niveau d'expertise sur les aptitudes spatiales des participants à prendre des décisions. L'évaluation est basée sur l'exactitude des réponses données, le temps de réponse et l'analyse descriptive des mouvements oculaires (eye tracking). Nous constatons des différences significatives dans la détection visuelle et spatiale d'objets en mouvement, selon le type d'animation et le niveau d'expertise des utilisateurs. À l'aide de cette expérimentation, nous espérons mieux comprendre comment les utilisateurs examinent, interprètent et extraient des connaissances à partir d'affichages dynamiques. À partir de ces résultats, nous souhaitons dégager des principes directeurs qui nous permettront d'améliorer la conception d'animation, nous cherchons ainsi à accroître l'efficacité dans les prises de décisions des utilisateurs considérant la visualisation d'objets en mouvement.

Introduction

Au cours des dix dernières années, il y a eu une augmentation croissante des données de mouvement à haute résolution spatio-temporelle (Holyoak et al. 2008). Cette tendance nécessite de mettre en place de nouvelles méthodes pour visualiser et extraire d'information spatio-temporelle de ces données (Andrienko et Andrienko, 2008). La visualisation dynamique est considérée comme un outil facilitant l'exploration et l'interprétation des phénomènes spatio-temporels complexes, comme en témoigne le large consensus acquis dans la communauté GIScience

(Andrienko et al. 2010). Les visualisations dynamiques sont couramment utilisées aussi dans le domaine de la surveillance en temps réel pour leurs capacités visuo-analytiques. C'est notamment le cas du contrôle aérien, où des écrans radar animés affichent des données de mouvement en temps réel, pour aider les contrôleurs à prendre une décision en situation d'urgence.

Comme Andrienko et al. (2010) le soulignent, un outil analytique visuel efficace doit mettre en synergie les capacités perceptuelles et cognitives de l'utilisateur. De manière intuitive, les visualisations dynamiques semblent satisfaisantes pour visualiser et reconnaître des motifs spatio-temporels spécifiques

(Moellering 1976). Les changements de mouvement du monde réel sont retranscrits sur l'écran de manière régulière par des changements spatio-temporels continus. Cela concorde avec le "Principe de Congruence", qui souligne que pour être efficaces les principes d'affichage graphique doivent être conformes et cohérents aux modèles mentaux des utilisateurs (Iversky, Morrison et Betrancourt 2002).

Toutefois, la recherche en visualisation dynamique des données du mouvement se concentre plus généralement sur l'aspect informatique et technique permettant l'extraction d'informations pertinentes à partir de jeux de données volumineux (Klein, Van der Zwan et Maati 2014). Peu de recherches se sont consacrées à la compréhension des caractéristiques des utilisateurs et des principes d'affichages dynamiques en jeu dans la prise de décision. Actuellement, on note un manque d'études empiriques permettant de comprendre et de valider les paramètres en jeu dans le raisonnement des utilisateurs et la reconnaissance des informations pertinentes à partir de données animées (Fabrikant et Lobben 2009 ; Shipley, Fabrikant et Lautenschütz 2013). Faire des déductions basées sur les principes d'affichage dynamique peut être difficile, car d'une part les informations spatio-temporelles sont souvent complexes et d'autre part elles sont présentées à l'utilisateur de façon trop rapide pour pouvoir les traiter simultanément (Iversky, Morrison et Betrancourt 2002). Par conséquent, l'élaboration d'animations impose de prendre en compte les exigences perceptuelles et cognitives élevées de la mémoire de travail (Lowe 1999) afin de ne pas entraver l'attention des utilisateurs pour détecter et reconnaître efficacement les mouvements permettant d'accomplir la tâche.

L'efficacité et l'efficience du traitement de l'information visuo-spatiale avec des animations peuvent être influencées par différents facteurs, tels que des stimuli visuels externes (p. ex., le type d'affichage et la saillance perceptive/thématique de repères visuels) et les caractéristiques de l'utilisateur (p. ex., le niveau d'expertise et l'aptitude spatiale). Une question nous paraît particulièrement intéressante à traiter, comment des utilisateurs avec différents niveaux d'expertise identifient des mouvements en temps réel anormaux ou imprévus dans une animation et prennent des décisions en conséquence ? Des études précédentes ont montré que les principes d'affichage, ainsi que le contexte et l'entraînement de l'utilisateur, peuvent avoir un effet significatif sur l'accomplissement d'une tâche (Bartram, Ware et Calvert 2001 ; Fabrikant et Goldsberry 2005 ; Kriz et Hegarty 2007). En outre, les aptitudes spatiales de l'utilisateur peuvent avoir une influence considérable sur la façon de traiter des informations représentées au sein d'affichages

graphiques (Wai, Lubinski et Benbow 2009 ; Wright et al. 2008).

Nous souhaitons mieux comprendre (1) comment les utilisateurs perçoivent et traitent les phénomènes spatio-temporels sur des affichages graphiques dynamiques et (2) proposer des règles de conception aux cartographes pour concevoir des animations en considérant certains principes perceptifs et cognitifs. Dans ce papier, nous proposons un cadre de recherche permettant de proposer et d'évaluer les principes d'affichage animé afin de dégager des paramètres pour améliorer la visualisation des données de mouvement. Notre approche holistique allie l'oculométrie avec l'analyse de l'activité électrodermale, l'électroencéphalographie et des questionnaires traditionnels (Maggi et Fabrikant 2014 b).

Dans cet article, nous présentons des résultats complémentaires d'un précédent test utilisateur dans le contexte du contrôle aérien (Maggi et Fabrikant 2014 a). Plus particulièrement, notre objectif est d'étudier comment les principes d'affichage (les variables visuelles et dynamiques de l'affichage), les caractéristiques des objets représentés (la dynamique et la complexité du phénomène étudié) et les propriétés des utilisateurs (les différences individuelles et les caractéristiques d'un groupe d'utilisateurs) influencent la reconnaissance de l'information visuo-spatiale avec des animations. Nous exposons les résultats statistiques d'analyses comportementales des participants obtenus à partir d'affichages animés (exactitude de réponse des participants, temps de réponse et mouvements oculaires) à travers différents types d'animation, les capacités visuo-spatiales et le niveau d'expertise du domaine des participants. Dans la partie suivante, nous dressons un bref état de l'art sur les principes cartographiques des animations dynamiques, ainsi que les principes cognitifs et perceptifs de l'attention visuelle humaine.

État de l'art

Depuis les années 1930, les phénomènes dynamiques spatio-temporels sont de plus en plus visualisés avec des affichages cartographiques dynamiques, tels que les films cartographiques, y compris les animations en 2D et 3D interactives (Fabrikant 2005). Ces dernières années, les sciences de l'information géographique ont un intérêt croissant pour le développement de méthodes analytiques visuelles efficaces permettant d'étudier les phénomènes spatio-temporels (Andrienko et al. 2008, 2010). Toutefois, les principes d'affichage, les caractéristiques des données affichées et les propriétés des utilisateurs peuvent affecter la manière avec laquelle les processus perceptifs et cognitifs des utilisateurs sont déployés pour

considérer des informations visuo-spatiales complexes. On ne sait pas exactement comment les utilisateurs conceptualisent des changements de mouvement représentés avec des animations. On suppose que les principes d’affichage pourraient être améliorés, pour permettre aux utilisateurs de percevoir et interpréter plus efficacement les phénomènes spatio-temporels (Battersby et Goldsberry 2010). Cependant, peu d’études empiriques sur les animations ont été menées à ce jour (Fabrikant et Goldsberry 2005 ; Harrower 2003).

Le raisonnement humain avec des affichages graphiques est influencé par les représentations extérieures et par des processus internes (Hegarty, Kriz et Cate 2003). La capacité mentale humaine, telle que l’apprentissage et le raisonnement, impliquée dans la mise en œuvre d’informations visuelles sur des phénomènes spatio-temporels complexes, peuvent être influencées par les capacités individuelles et personnelles, et renforcées par des types d’affichage cartographiques appropriés (Fabrikant et Goldsberry 2005). En outre, les processus mentaux visuo-spatiaux peuvent être améliorés grâce à l’entraînement et à la pratique (Wright et al. 2008).

La recherche proposée repose sur les théories cognitives et perceptives intégrées dans le domaine de la cartographie et de la vision. Pour notre étude sur la création d’animations efficaces, trois aspects de la conception cartographique et les caractéristiques des utilisateurs semblent être particulièrement pertinents à considérer :

- Les principes de conception cartographique pour l’animation (c.-à-d., la représentation de la dynamique de l’événement ou phénomène) et les variables visuelles et dynamiques de l’affichage.
- Les aspects perceptifs et cognitifs en jeu dans l’attention visuelle sollicités par des affichages dynamiques (c.-à-d., la saillance visuelle versus l’importance thématique des repères visuels, ainsi que la complexité de la tâche et de données).
- Les caractéristiques de l’utilisateur, telles que le niveau d’expertise et les aptitudes spatiales.

Principes cartographiques de l’affichage dynamique

Afin de représenter correctement des événements et des phénomènes spatio-temporels avec des affichages dynamiques, un ensemble de règles de conception cartographique, comprenant les variables visuelles dynamiques, a été mis au point (DiBiase et al. 1992 ; MacEachren 1995). L’information spatio-temporelle est représentée selon le moment de l’événement, la durée de la scène, la fréquence de la scène,

le taux de variation entre les scènes et la synchronisation des phénomènes spatio-temporels. La fréquence des scènes correspond à la fréquence d’image par seconde, et le taux de variation décrit la quantité de changement de l’information visuelle entre les scènes. Par exemple, la position d’une entité graphique représentée avec un affichage animé peut être rafraîchie abruptement toutes les 4 secondes ou graduellement avec une animation continue. Selon Fabrikant et Goldsberry (2005), des transitions graduelles et continues entre les scènes permettent d’identifier plus efficacement les changements de l’information visuelle d’une image à une l’autre, car ils réduisent l’effet de cécité au changement. Toutefois, les transitions graduelles et continues peuvent être également désavantageuses pour les utilisateurs notamment lorsque ces derniers doivent identifier un changement léger de l’information visuelle, qui est dissimulé par les autres éléments graphiques de la scène.

Aspects perceptifs et cognitifs de l’affichage dynamique

La recherche en perception visuelle et en cartographie des représentations (Fabrikant et Goldsberry 2005) met en évidence comment l’attention visuelle humaine est guidée par des mécanismes attentionnels ascendants et descendants. Des repères visuels présents dans les visualisations attirent l’attention des utilisateurs selon des mécanismes ascendants. Compte tenu des principes en perception visuelle et de la théorie de la Gestalt (Koffka 1935), y compris la loi de destin commun, les utilisateurs perçoivent et examinent une scène visuelle composée de divers objets en mouvement, en regroupant les mouvements qui ont des caractéristiques visuelles similaires (p. ex., les objets avec la même vitesse). À l’inverse, les objets se déplaçant avec des mouvements anormaux ou dissemblables par rapport aux autres, se démarquent et sont perçus d’une manière saillante, par exemple, un objet qui se déplace plus rapidement ou avec une direction différente par rapport aux autres éléments représentés sur la scène. La reconnaissance de mouvements spécifiques est guidée par des mécanismes attentionnels descendants, considérant les processus cognitifs de l’utilisateur, tels que les connaissances existantes de l’utilisateur, ses attentes et ses capacités cognitives.

Afin d’étudier les processus visuo-spatiales ascendants et descendants simultanément, le modèle du comportement attentionnel « *Noticing-Saliency, Expectancy, Effort and Value* » (NSEEV) a été développé à partir de l’étude des processus attentionnels dans un contexte de visualisations de surveillance (Steelman, McCarley et Wickens 2011). Ce modèle a pour objectif de prédire la répartition de l’attention visuelle

sélective sur une scène dynamique en tenant compte de l'interaction entre les processus ascendants (la saillance visuelle des événements et l'effort) et les processus descendants (l'expectation qu'un événement apparaît et la valeur/l'importance d'une tâche/un événement) de l'utilisateur. Le modèle NSEEV souligne l'importance de la saillance dynamique, c'est-à-dire l'animation, pour capter l'attention visuelle. Imbert et al. (2014) utilise cette approche pour évaluer les propriétés de plusieurs affichages d'écrans radar dynamiques utilisés dans le domaine du contrôle aérien.

La complexité de l'affichage dynamique (p. ex., le nombre d'objets à traiter en même temps) et le niveau d'expertise des utilisateurs sont des facteurs qui peuvent influencer les processus attentionnels ascendants et descendants des utilisateurs. Boucheix et Lowe (2010) soulignent que les utilisateurs inexpérimentés (sans aucun entraînement avec un type spécifique de visualisation ou de tâche) traitent l'affichage animé à partir de la saillance perceptive, plutôt que sur l'importance thématique, comme la complexité visuo-spatiales et temporelle de l'animation augmente. L'homme utilise cette approche comme stratégie afin de minimiser les efforts que suscite le traitement de l'information visuelle.

Actuellement, l'influence du niveau d'expertise et d'entraînement de l'utilisateur sur la perceptibilité et la reconnaissance des informations contenues dans une animation pour réaliser une tâche définie n'est pas suffisamment claire (Fabrikant 2005). Dans le domaine du contrôle aérien, les contrôleurs bien entraînés peuvent devoir traiter simultanément plus de 20 avions, en fonction de la taille du secteur de trafic aérien qui leur est attribué. Toutefois, de précédentes études d'animations ont révélé que les utilisateurs étaient capables de traiter un maximum de quatre objets en mouvement simultanément (Ware 2013). Cavanagh et Alvarez (2005) remarquent qu'il est possible de suivre plus de quatre objets simultanément, en les groupant selon des propriétés semblables telles que la vitesse ou la direction. En outre, les contrôleurs aériens peuvent gérer un plus grand nombre d'avions simultanément en priorisant les tâches à réaliser en fonction de leurs degrés d'urgence (Niessen, Eyferth et Bierwagen 1999).

Caractéristiques de l'utilisateur

Des recherches antérieures sur les visualisations dynamiques supportent l'idée que non seulement la conception cartographique, mais aussi les capacités visuo-spatiales et le niveau d'expertise de l'utilisateur peuvent avoir un effet considérable sur le traitement des informations spatio-temporelles. Pour cette raison, les propriétés d'une tâche ou du domaine et le

niveau d'expertise de l'utilisateur devraient être également considérées dans la conception des animations (Kriz et Hegarty 2007).

La réflexion et l'aptitude spatiale des utilisateurs ont longtemps été un sujet important au sein de la psychologie et les sciences cognitives. De la même façon, le traitement d'information avec des affichages animés devrait avoir un rôle important. En effet, la façon avec laquelle les utilisateurs traitent l'information peut être différente selon leurs aptitudes spatiales. Wai, Lubinski et Benbow (2009) suggèrent que la capacité visuo-spatiale pourrait être un facteur pertinent dans la prédiction des futures réalisations académiques et professionnelles en science, technologie, ingénierie et domaines mathématiques (STIM). Toutefois, l'intelligence spatiale humaine n'est pas une caractéristique cognitive biologiquement déterminée, mais elle pourrait être développée et améliorée par un entraînement approprié et de la pratique (Wright et al. 2008).

Méthodes

Cas d'utilisation et plan d'expérimentation

Pour tester l'influence des différents facteurs, à savoir la conception cartographique, les données et le profil utilisateur, sur le traitement des informations avec des affichages animés, nous avons mené une étude empirique avec des participants issus du domaine du contrôle du trafic aérien (ATC). Les écrans radar utilisés dans le domaine de l'ATC sont un cas d'utilisation bien adaptée à notre expérience puisqu'il s'agit d'animations permettant de surveiller les mouvements des avions.

Les tâches principales des contrôleurs du trafic aérien sont les suivantes : surveiller le trafic de l'espace aérien, afin que les avions maintiennent une distance minimale de sécurité entre eux, optimiser le flux du trafic aérien afin de réduire les retards, et détecter rapidement des mouvements anormaux ou imprévus des avions. Les contrôleurs sont exposés à des situations stressantes quotidiennement, ce qui impose un traitement continu de l'information visuo-spatiale et une charge cognitive importante. Cette profession exige des compétences spatiales solides. En effet, pour entrer dans l'école de formation ATC, les candidats doivent passer des tests spécifiques évaluant leurs aptitudes spatiales (p. ex., les tests sur la rotation mentale et sur la rapidité de la perception visuelle).

En raison de l'évolution des techniques à travers le temps, les écrans radar standard de l'ATC affichent généralement le déplacement des avions à l'aide

d'animations semi-statiques, dans lesquelles les positions des avions sont mises à jour toutes les 4 secondes (Hurter et Conversy 2008). Il est possible de visualiser les déplacements d'avions de manière continue grâce aux données GPS (p. ex., Flightradar24¹), cependant ces données ne sont pas actuellement utilisées de manière opérationnelle. Lee et Klippel (2005) suggèrent que les changements de vitesse des avions soient visualisés à l'aide d'affichages animés continus, en effet ce mode de représentation semble être avantageux pour les contrôleurs aériens délivrant des informations pertinentes pour la réalisation des tâches. L'affichage est notamment actualisé plus fréquemment que les affichages semi-statiques, en favorisant la création d'une image mentale de meilleure qualité pour interpréter les dynamiques du trafic aérien.

En considérant les principes de Congruence de Tversky et al. (2002), nous aimerions mieux comprendre comment les utilisateurs détectent des changements de mouvement avec des animations, afin de répondre aux questions de recherche suivantes : Quels types d'animation, entre les animations semi-statiques et les animations continues, sont les plus efficaces pour réaliser une tâche donnée ? Quels critères impactent l'efficacité à réaliser la tâche : la saillance perceptive des objets représentés, la dynamique du mouvement ou la complexité des données ? Quel est l'impact des propriétés de l'utilisateur (des différences individuelles et d'un groupe d'utilisateurs) sur la réalisation de la tâche ?

Notre étude utilise une analyse factorielle à deux niveaux pour répondre aux questions mentionnées ci-dessus. Nous avons examiné comment les variables indépendantes suivantes influencent l'efficacité et l'efficacité (l'exactitude et le temps de réponse) dans la détection des mouvements des avions et dans le traitement des informations dynamiques : la conception de l'animation (animations semi-statiques versus animations continues), les caractéristiques des objets représentés (le nombre et les vitesses relatives des objets représentés) et les propriétés des participants (le niveau d'expertise ATC et les aptitudes spatiales).

Participants

Au total, 37 participants de profil différent ont pris part à l'expérience : 18 contrôleurs aériens de l'Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) à Toulouse (c.-à-d., les experts ATC) et 19 étudiants en psychologie de l'Université Temple à Philadelphie (c.-à-d., les novices ATC). Les experts sont tous des contrôleurs du trafic aérien bien entraînés avec plus de 10 ans d'expérience dans le contexte de l'ATC. Ils ont en moyenne 38 ans ; seize experts sont des hommes

et deux des femmes. Les novices sont des étudiants qui n'ont aucune connaissance spécifique dans le domaine de l'ATC et sont en moyenne de 22 ans. Les novices sont répartis également en genre.

Matériel

Nous avons développé 16 stimuli dont la conception est comparable à ce qui est affiché sur les visualisations opérationnelles en France. Les animations ont été créées à l'aide du logiciel Processing² basé sur Java. La dynamique des avions est basée sur des paramètres réels de mouvement d'avion (la taille, la vitesse et l'accélération) que l'on peut observer sur du trafic réel et selon la conception de la comète de l'« *Operational Display System* » (ODS) (fig. 1) utilisé en France. La comète radar ODS montre la position courante d'un avion, y compris ses positions passées, avec cinq carrés de taille différente. Le carré le plus grand correspond à la position courante de l'avion. Les positions passées sont affichées avec des carrés dont la taille devient progressivement plus petite avec l'éloignement de la position courante. En outre, un vecteur vitesse est représenté comme une ligne qui part de la position courante de l'avion jusqu'à sa position future, prédite dans un intervalle de 3 minutes. Situées à proximité de l'avion, des étiquettes de texte fournissent des informations supplémentaires pour les contrôleurs aériens, par exemple, la vitesse courante et la hauteur de l'avion, ainsi que le type d'avion.

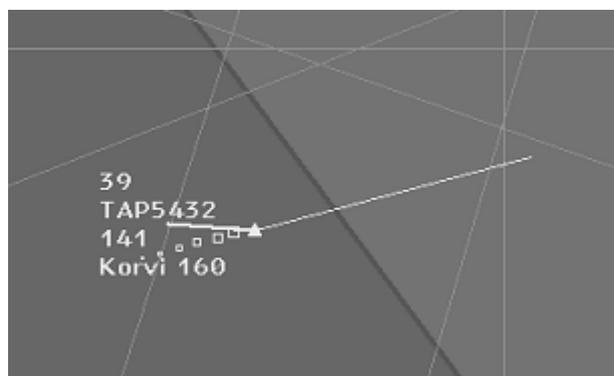


Figure 1. Un avion représenté sur l'écran radar ATC français (ODS).

Comme mentionné précédemment, nous avons testé deux variables indépendantes dans notre étude empirique : le type d'animation et les caractéristiques des objets représentés. En ce qui concerne la variable indépendante « type d'animation », nous avons manipulé la variable dynamique « fréquence d'image » des animations. Selon un design inter-sujet, nous avons développé 16 animations semi-statiques, dans lesquelles les positions des avions rafraîchissent brus-

¹ Flightradar24 : <http://www.flightradar24.com/>

² Processing : <https://www.processing.org/>

quement toutes les 4 secondes (1 image chaque 4 secondes) et 16 animations continues, dans lesquelles les positions des avions rafraîchissent en continu (60 images par seconde). Dans le cas de la variable indépendante « caractéristiques des objets représentés », nous avons manipulé deux facteurs : le nombre des avions visualisé et leurs vitesses relatives. Huit des seize stimuli montrent le mouvement de quatre avions, et huit animations représentent respectivement le mouvement de huit avions (fig. 2).

Nous avons codé quatre vitesses typiques de décollages, c'est-à-dire 160 kts³, 200 kts, 250 kt et 290 kts, dans l'animation. Dans quatre animations, tous les avions se déplacent à la même vitesse (stimulus de contrôle), et dans douze animations les avions se déplacent à des vitesses différentes. Pour tous les stimuli, les avions se déplacent à une vitesse constante tout au long de l'animation, sauf un avion, qui accélère pendant le déroulement du stimulus. Dans les affichages où les avions se déplacent à des vitesses différentes, l'avion qui accélère n'est jamais l'avion le plus rapide. Nous avons fait cela pour examiner les différences potentielles de détection entre les informations importantes au niveau thématique et les informations perceptuellement plus saillantes.

L'avion qui accélère change sa vitesse de façon réaliste par rapport à la performance moyenne des avions (p. ex., A320), notamment une accélération de 0,4 kts/s. Avec des animations semi-statiques, les accélérations et les vitesses des avions peuvent être déduites visuellement de la longueur totale de la comète radar ODS et des espaces entre ses positions courantes et passées, comme illustré à la figure 3. Les avions les plus rapides ont un grand espacement entre les cinq carrés (voir la relation entre d1 et d2 à la figure 3) et ainsi une plus grande longueur totale de la comète (D à la figure 3) par rapport aux avions qui se déplacent d'une manière plus lente. De la même façon, les accélérations se distinguent par des espacements croissants entre les cinq carrés de position de l'avion (la position d1 augmente plus rapidement que la position d2 à la figure 3) et, par conséquent, la longueur totale de la comète (D à la figure 3) augmente aussi constamment (Hurter et Conversy 2008).

Avec des animations continues, les accélérations et les vitesses de l'avion sont perçues directement par le mouvement des objets, tandis que sont également codés graphiquement et de manière redondante avec l'espacement des carrés de position de l'avion et la longueur totale de la comète radar ODS. Les accélérations ont été codées comme des changements de

vitesse qui augmentent constamment pendant l'animation. Les changements de vitesse sont interpolés à partir de la position initiale et finale des avions.

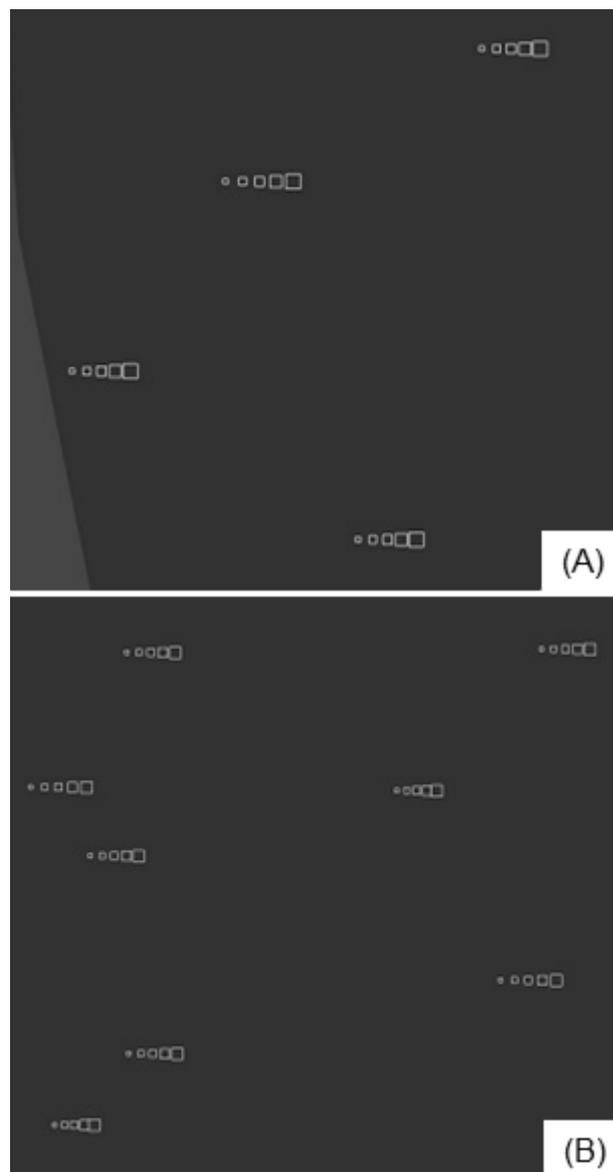


Figure 2. Représentation statique de deux stimuli avec quatre (A) et huit (B) avions se déplaçant à différentes vitesses de la gauche vers la droite sur l'écran.

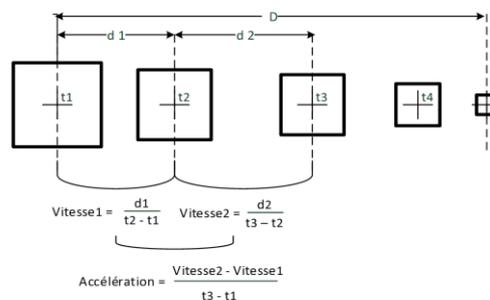


Figure 3. Vitesse et accélération d'un avion tel que représenté sur l'écran radar ATC français (ODS) (Hurter, Conversy et Kapp 2008).

³ Kts = nœuds (mille marin par heure)

Afin de n'évaluer que l'effet des variables indépendantes mentionnées ci-dessus, nous avons gardé toutes les autres variables potentiellement confondantes de manière constante, c'est-à-dire, tous les avions se déplacent dans le même sens, et ils sont représentés avec les mêmes teinte et valeur de couleur (avions blancs sur fond gris foncé homogènes). Nous avons également omis les étiquettes de texte ainsi que les vecteurs vitesse pour ne pas détourner l'attention des participants par le mouvement des étiquettes radar des avions.

Données collectées et paramétrage du test

Durant l'expérimentation, comme variables dépendantes, nous avons enregistré l'exactitude de réponse (si l'avion qui accélère a été identifié correctement ou pas) et le temps de réponse des participants. Nous avons également enregistré le nombre de participants qui ont identifié l'avion qui accélère et à quel moment de l'animation. Par ailleurs, nous avons mesuré les capacités visuo-spatiales des participants en utilisant le « *Hidden Patterns Test* », qui mesure la vitesse visuo-perceptive des utilisateurs (Ekstrom et al. 1976). Ce test est particulièrement approprié pour évaluer la vitesse et l'exactitude d'une recherche d'objets cachés par d'autres dans une scène visuelle. Nous avons enregistré l'activité électrodermale des participants avec un capteur de conductivité de la peau⁴ et l'activité cérébrale des participants avec un électroencéphalogramme mobile⁵. Nous avons aussi recueilli les mouvements oculaires des participants avec un traqueur de mouvements oculaires (eye tracker) Tobii TX300⁶. Les données des mouvements oculaires peuvent nous aider à évaluer les processus cognitifs et perceptifs engagés par les participants durant l'expérimentation. Les résultats statistiques de l'activité électrodermale et cérébrale des participants ne sont pas traités dans le présent article, ils seront présentés dans une prochaine publication.

Procédure

Avant d'être recrutés pour l'expérimentation, les participants ont été invités à effectuer un test d'aptitude spatiale (« *Hidden Patterns Test* »). Dans un temps limite de six minutes, ils devaient identifier une figure bien spécifique cachée parmi d'autres éléments. En tout, ils devaient traiter 200 figures différentes et spécifier si la figure donnée était visible ou pas. Ensuite, après un bref entraînement et selon le plan inter-sujet à deux facteurs (« *between – subjects design* ») mentionné auparavant, les participants ont été invités à observer seize animations semi-statiques et, respectivement, seize animations continues, chacune illustrant des

avions en mouvement. On a demandé aux participants de détecter l'avion qui accélère et cliquer dessus dès que possible. Les animations ont été présentées aux participants sous forme digitale et dans un ordre aléatoire sur un moniteur de résolution 1920 x 1200 (pixels). Une fois que l'avion en accélération est identifié et que le participant a confirmé son choix, l'animation s'arrête. Après chaque animation, une série de cinq questions a été présentée aux participants afin de recueillir leur ressenti et leur assurance dans les réponses qu'ils ont données.

Les participants ont mis en moyenne 16 minutes pour traiter l'ensemble des animations. Avant et après avoir montré les animations, chaque participant a été invité à remplir un questionnaire sur le niveau du stress (« *Short Stress State Questionnaire* ») qu'ils ont ressenti pendant l'expérimentation (Helton 2004). Enfin, après l'expérimentation, les participants ont été invités à remplir un questionnaire pour recueillir des informations générales sur leur personne (âge, genre, niveau d'expertise, etc.) et leur jugement subjectif concernant la difficulté à résoudre la tâche. Les résultats obtenus sur l'efficacité (exactitude) et l'efficience (temps) de réponse, ainsi que les différences d'aptitude spatiale des participants et les mouvements oculaires entre les niveaux d'expertise et les types d'animation, sont présentés dans la partie suivante « Résultats ».

Résultats

Cette section décrit nos résultats concernant l'exactitude des réponses données, le temps de réponse, l'analyse des capacités visuo-spatiales des participants, y compris l'analyse des mouvements oculaires, entre les deux types de conception d'animations (c.-à-d., les animations semi-statiques et les animations continues), et les deux niveaux d'expertise ATC (c.-à-d., les experts ATC et les novices).

Exactitude de réponse

Dans Maggi et Fabrikant (2014 a), nous avons constaté en moyenne qu'environ 80% des experts ATC ont répondu correctement à la tâche requise ($M=81.44\%$, $SD=15.51$), et que cela ne diffère pas significativement entre les deux types d'animation. Inversement, les novices ATC ont moins bien accompli la tâche que les experts avec les deux types d'animation. Toutefois, cette différence n'est significative que pour les animations continues ($F(1,17)=22.19$, $p<.000$), avec lesquelles seulement 27.78% ($SD=29.55$) des novices ATC ont accompli correctement la tâche. L'exactitude de réponse des

⁴ Smartband : <http://www.bodymonitor.de/>

⁵ Emotiv EPOC : <http://emotiv.com/>

⁶ Tobii TX300 eye tracker : <http://www.tobii.com/>

novices ATC avec les animations continues diffère sensiblement de l'exactitude des novices avec les animations semi-statiques ($F(1,17)=6.38, p<.022$), où 63.13% (SD=31.35) d'entre eux ont identifié correctement les avions qui accélèrent.

Nous avons successivement analysé si les différences de vitesse relative entre les avions pourraient avoir une influence sur l'exactitude de réponse des participants entre les deux niveaux d'expertise ATC et les deux types d'animation. Nous avons comparé l'exactitude de réponse des quatre stimuli représentant des avions qui se déplacent à la même vitesse (stimuli de contrôle), avec l'exactitude de réponse des douze stimuli représentant des avions qui se déplacent à des vitesses différentes. Comme prévu, les participants effectuent mieux la tâche avec les stimuli affichant des avions à la même vitesse (stimuli de contrôle) (Mdn=100%) par rapport à ceux représentant des avions à des vitesses différentes (Mdn=67%) ($Z=4.79, p=.000$). Toutefois, cette différence n'est pas significative entre les deux niveaux d'expertise ATC en condition d'animation semi-statique, comme illustré à la figure 4. Par contre, l'exactitude de réponse des participants est significativement différente entre les experts ATC et les novices en condition d'animation continue. Comme on peut le voir dans la figure 5, les experts ATC ont accompli la tâche avec une exactitude de réponse supérieure aux novices avec les stimuli de contrôle ($Z=-2.65, p=.008$), ainsi qu'avec les animations représentant des avions à des vitesses différentes ($Z=-2.97, p=.003$).

En outre, dans la condition d'animation continue avec des avions de vitesses différentes, l'exactitude de réponse moyenne des novices ATC a été de 18.44% (SD=30.46, Mdn=8%), et cette valeur est à peine au-dessous du niveau aléatoire (18.75%). Cela diffère considérablement de leur exactitude de réponse avec les animations semi-statiques (Mdn=75%, $Z=-2.27, p<.023$). Cependant, nous n'avons trouvé aucune différence significative entre les réponses des novices ATC avec les stimuli de contrôle dans les deux types d'animation.

En général, nous avons constaté que 66.92% (SD=22.23) des novices ATC et 21.67% (SD=15.86) des experts ATC en condition d'animation continue ($F(1,22)=32.95, p<.000$) ont sélectionné l'objet plus saillant, c'est-à-dire l'objet qui se déplace plus rapidement que les autres, plutôt que l'objet qui accélère. Nous avons examiné cette différence dans l'accomplissement de la tâche entre les groupes d'expertise ATC pour la condition d'animation continue par l'analyse des mouvements oculaires. Les résultats de cette analyse sont présentés ci-dessous dans la section « Analyse de mouvements oculaires ».

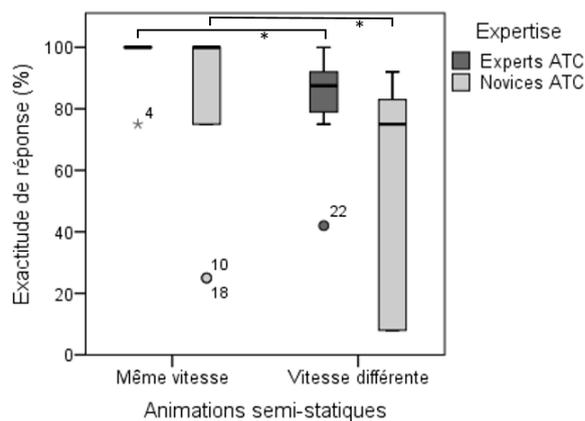


Figure 4. Exactitude de réponse des experts ATC et des novices en condition d'animation semi-statique (même vs. différentes vitesses des avions, les barres d'erreur affichent l'erreur standard).

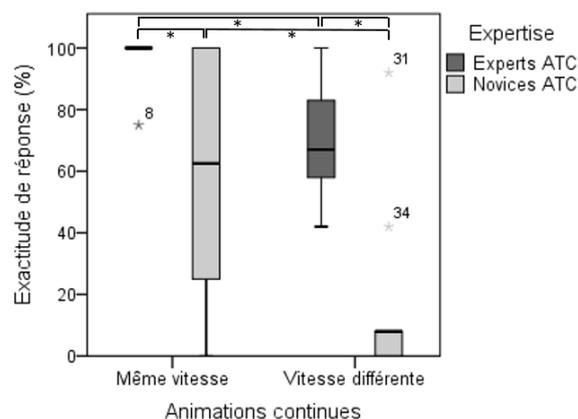


Figure 5. Exactitude de réponse des experts ATC et des novices en condition d'animation continue (même vs. différentes vitesses des avions, les barres d'erreur affichent l'erreur standard).

Temps de réponse

Nous avons analysé l'efficacité des participants dans l'accomplissement de la tâche en tenant compte uniquement des réponses correctes. Nous avons trouvé une différence significative entre les experts ATC pour les deux types d'animation ($F(1,16)=9.65, p<.007$). Les experts ATC ont accompli la tâche plus rapidement avec les animations semi-statiques ($M=46.50s, SD=9.73$) qu'avec les animations continues ($M=61.00s, SD=9.93$). Par contre, le temps de réponse des novices ATC avec les animations semi-statiques ($M=46.27s, SD=16.69$) ne diffère pas de façon significative du temps de réponse des novices avec les animations continues ($M=49.22s, SD=20.51$).

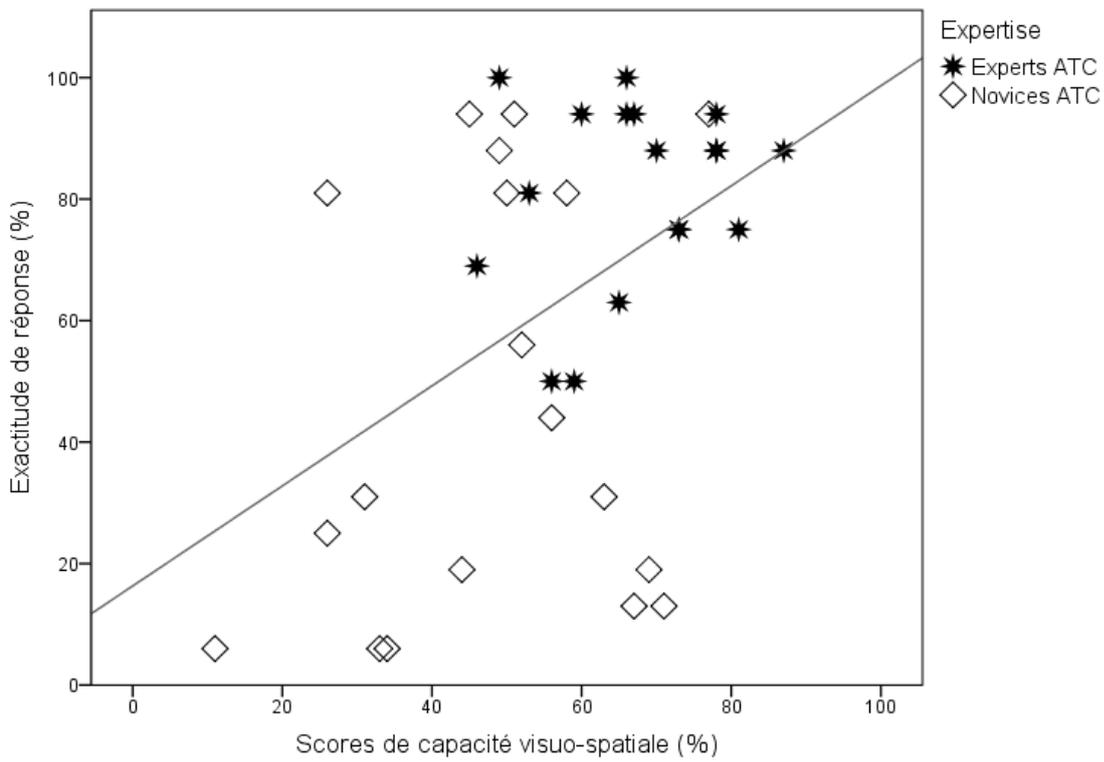


Figure 6. Corrélation entre l'exactitude de réponse et les scores de capacité visuo-spatiale des experts et des novices avec les deux types d'animation (des étoiles pour les experts et des diamants pour les novices).

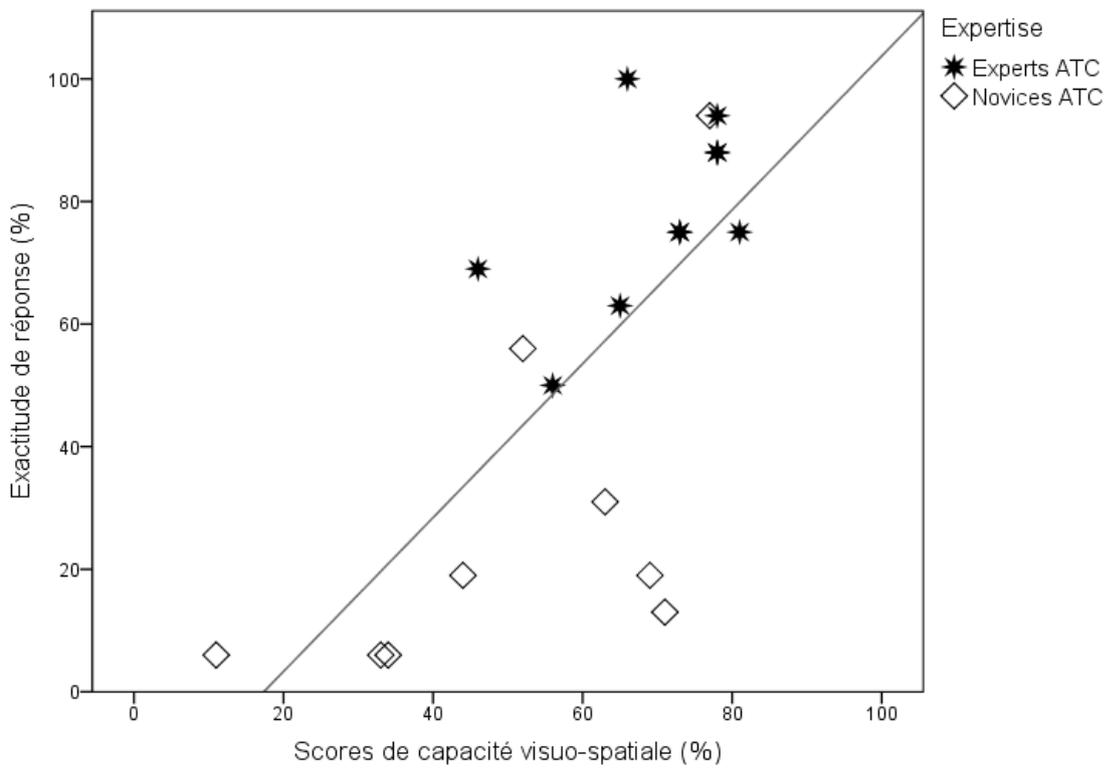


Figure 7. Corrélation entre l'exactitude de réponse et les scores de capacité visuo-spatiale des experts et des novices en condition d'animation continue (des étoiles pour les experts et des diamants pour les novices).

Capacités visuo-spatiales

Sur la base des résultats du « *Hidden Patters Test* », nous avons trouvé une différence significative des capacités visuo-spatiales entre les experts ATC et les novices ($F(1,35)=14.61$, $p<.001$). 66.94% (SD=11.48) des experts ATC ont identifié correctement les figures du test, alors que les novices ont accompli le test avec 48.05% (SD=17.74) de figures exactes. Cependant, il n'y a pas de différences significatives de capacité visuo-spatiale des participants entre les deux types d'animation. En outre, nous avons examiné si l'exactitude de réponse des participants pourrait être mise en relation avec leur capacité visuo-spatiale.

En général, comme illustré à la figure 6, nous avons trouvé une corrélation positive modérée entre ces deux variables ($r=0.452$, $N=37$, $p<.005$). En regardant de plus près ces données entre les deux types d'animation, comme on peut le voir dans la figure 7, nous avons trouvé une corrélation plus importante entre la capacité visuo-spatiale et l'exactitude de réponse des participants en condition d'animation continue ($r=0.71$, $N=19$, $p<.001$). La corrélation de ces deux facteurs en condition d'animation semi-statique ne présente aucune dépendance significative.

Analyse de mouvements oculaires

Nous avons systématiquement analysé les mouvements oculaires des participants pour identifier les processus perceptifs et cognitifs qui sont impliqués dans la prise de décision visuo-spatiale des participants. En particulier, pour déterminer sur quel avion les participants ont concentré majoritairement leur attention (c.-à-d., les zones d'intérêt (AOI)), pour combien de temps (c.-à-d., la durée de fixations oculaires) et à quelle fréquence (c.-à-d., le nombre de fixations oculaires par seconde) en fonction des niveaux d'expertise ATC et des types d'animations. Pour cela, nous avons adopté des métriques standard communément utilisées pour l'analyse des mouvements oculaires (Fabrikant et al. 2008).

Nous avons choisi un algorithme de classification I-VT pour filtrer les fixations oculaires avec une durée de fixation minimale de 60 ms. Nous avons défini pour chaque avion de chaque stimulus une zone d'intérêt (AOI) individuelle et systématiquement évalué la durée et la fréquence des fixations oculaires par AOI entre l'avion le plus saillant (c.-à-d., l'avion le plus rapide) et l'avion thématiquement plus important pour la tâche spécifique de l'expérimentation (c.-à-d., l'avion qui accélère). Puisque l'exactitude de réponse entre les experts ATC et les novices a montré une différence significative en condition d'animation continue, nous avons analysé la durée des fixations

des participants uniquement pour ce type d'animation. Cinq des dix-sept participants n'ont pas été considérés dans l'analyse, en raison de la qualité insuffisante de données de mouvements oculaires.

On peut observer une différence significative entre les deux groupes d'expertise ATC dans les fixations des objets perceptuellement plus saillants et les fixations des objets thématiquement plus importantes. En moyenne, les participants ont fixé tous les avions représentés sur les animations continues pour une durée de 484.82 ms (SD=119.90). Comme illustré à la Figure 8, les experts ATC ont fixé les avions thématiquement plus importants et les avions perceptuellement plus saillants significativement plus longtemps que les novices ($F(1,11)=6.60$, $p<.026$). Spécifiquement, les experts ATC ont fixé les avions thématiquement plus importants avec une moyenne de 573.47 ms (SD=78.69) et les avions perceptuellement plus saillants avec une moyenne de 497.15 ms (SD=57.82). Inversement, les novices ATC ont fixé les avions thématiquement plus importants avec une moyenne de 400.95 ms (SD=128.71) et les avions perceptuellement plus saillants avec une moyenne de 471.55 ms (SD=184.73). Les experts ATC ont fixé les objets importants thématiquement beaucoup plus longtemps par rapport à la durée de fixation moyenne ($t(12)=4.07$, $p<.002$). Au contraire, les novices ATC ont significativement des fixations plus courtes sur l'avion qui accélère par rapport à la durée moyenne de fixation ($t(12)=-2.46$, $p<.032$).

Le nombre moyen de fixations oculaires par seconde de chaque participant pour chaque avion est de 0.28 s-1 (SD=0.04). En général, les experts ATC ($M=0.29$ s-1, $SD=0.02$) ont fixé chaque avion de chaque animation légèrement plus souvent comparé aux novices ($M=0.27$ s-1, $SD=0.05$). Cependant, comme illustré à la Figure 9, les experts ATC ont observé l'avion qui accélère ($M=0.37$ s-1, $SD=0.028$) significativement plus fréquemment que l'avion le plus rapide ($M=0.32$ s-1, $SD=0.04$) ($F(1,5)=8.57$, $p<.033$). À l'inverse, les novices ATC ont fixé l'avion le plus rapide ($M=0.38$ s-1, $SD=0.08$) significativement plus souvent que l'avion qui accélère ($M=0.26$ s-1, $SD=0.11$) ($F(1,4)=24.17$, $p<.008$). Les experts ATC ont fixé l'avion thématiquement plus important de manière plus fréquente que les novices ($F(1,10)=6.28$, $p<.031$).

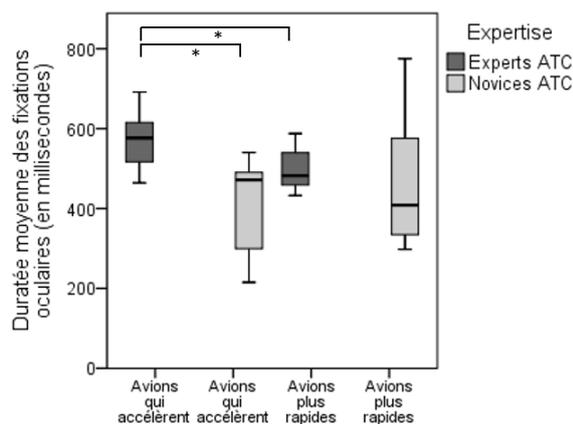


Figure 8. Durée moyenne des fixations oculaires des experts ATC et des novices en condition d'animation continue sur les zones d'intérêt (AOI) suivantes : les avions qui accélèrent (les deux diagrammes en boîtes à gauche) et les avions les plus rapides (les deux diagrammes en boîtes à droite).

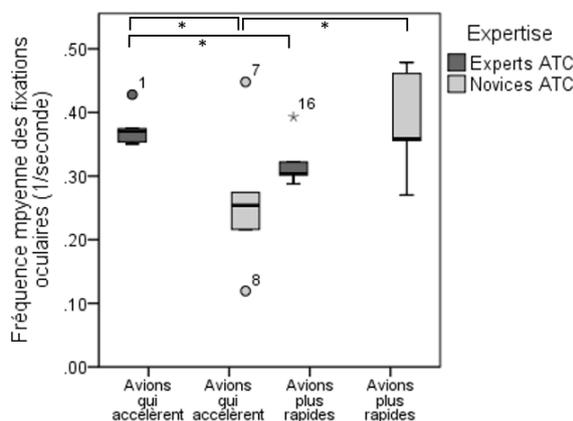


Figure 9. Fréquence moyenne des fixations oculaires des experts ATC et des novices en condition d'animation continue sur les zones d'intérêt (AOI) suivantes : les avions qui accélèrent (les deux diagrammes en boîtes à gauche) et les avions les plus rapides (les deux diagrammes en boîtes à droite) entre les niveaux d'expertise ATC.

Discussion

Dans cette étude empirique, nous avons examiné comment le paramétrage de l'animation (c.-à-d., la fréquence d'images), les caractéristiques des objets représentés (c.-à-d., la dynamique du mouvement et la complexité des objets représentés) et les facteurs liés à l'utilisateur (c.-à-d., le niveau d'expertise ATC et les capacités visuo-spatiales) pourraient influencer la détection correcte de l'information visuo-spatiale avec des visualisations dynamiques de données. Nos résultats suggèrent que, le type d'animation, la dynamique des objets en mouvement, le niveau d'expertise

de l'utilisateur ainsi que ses capacités visuo-spatiales influencent la prise de décisions visuo-spatiales avec des animations.

En général, les utilisateurs novices ATC ont moins bien accompli la tâche que les experts. Cette différence est plus marquée pour les animations continues que pour les animations semi-statiques. Avec les animations continues, l'exactitude des réponses et les mouvements oculaires révèlent que les novices ont concentré leur attention plus fréquemment sur l'avion le plus rapide plutôt que sur l'avion qui accélère. Cela confirme les résultats d'études antérieures avec des animations continues (Boucheix et Lowe 2010 ; Fabrikant 2005), dans lesquelles les participants ont traité des informations visuo-spatiales complexes représentées sur les écrans selon des caractéristiques de saillance perceptive, plutôt que selon l'importance thématique des informations. En condition d'animation continue, nos résultats pourraient être expliqués par le principe de la théorie de destin commun proposée dans la Gestalt (Koffka 1935). Ce principe met en évidence l'importance de la perceptibilité d'un objet en mouvement (c.-à-d., son niveau de saillance perceptive) selon l'intensité du contraste dynamique avec les informations représentées sur l'écran (Boucheix et Lowe 2010). Les éléments qui sont en contraste les uns avec les autres dans une scène visuelle (p. ex., les objets qui se déplacent plus rapidement par rapport aux autres objets) sont plus facilement distinguables. Comme le suggèrent Boucheix et Lowe (2010), les novices en condition d'animation continue ont exploré les informations selon leur saillance perceptive, car les informations thématiquement plus importantes pour la tâche étaient probablement trop difficiles pour être correctement perçues. L'effort perceptif et cognitif était sans doute trop important pour le traitement correct de l'information. Ce résultat trouve aussi une corrélation avec les résultats de l'analyse des mouvements oculaires des participants lors des animations continues. Contrairement aux experts ATC, les novices ont fixé plus fréquemment l'avion plus rapide plutôt que l'avion qui accélère. Selon des études antérieures (Holmqvist, Nyström et Andersson 2011), une fréquence plus élevée de fixations oculaires sur une zone spécifique de l'écran est révélatrice du degré de visibilité de cette zone pour un utilisateur. En outre, la durée des fixations oculaires des experts ATC est généralement plus longue que celle des novices. Une explication possible est que les experts ATC traitent l'information plus efficacement que les novices en utilisant un empan visuel plus grand lié à un niveau d'expertise plus élevé. Inversement, des fixations plus courtes conduisent à réduire le rendement et peuvent être un indicateur de stress et charge de travail cognitif élevé (Henderson, Weeks et Hol-

lingworth 1999 ; Jacob et Karn 2003). Cette différence entre les deux niveaux d'expertise peut être expliquée aussi avec une motivation différente dans l'accomplissement de la tâche. Les réponses des participants au questionnaire après-test ont révélé que les novices ATC, contrairement aux experts, ont jugé la tâche non seulement comme difficile, mais aussi ennuyeuse. Pour cette raison, nous pensons qu'il serait important et pertinent, comme étape ultérieure dans les analyses, d'apparier ces données avec des indicateurs psycho-physiologiques afin d'obtenir une compréhension plus détaillée de l'état émotif et cognitif des participants (c.-à-d., la charge cognitive et la motivation) de façon à les comparer à nos résultats empiriques.

Les experts ATC ont mieux accompli la tâche que les novices (au moins 80% de réponses correctes), indépendamment du type d'animation. Leur familiarité, en raison de leur formation, avec les animations semi-statiques et avec la tâche, leur a permis de détecter efficacement les avions en accélération malgré la saillance perceptive des autres avions. La seule différence significative que nous avons trouvée entre experts avec les deux différents types d'animation est le temps qu'ils ont mis à répondre. Sans surprise, les experts ont pris plus de temps pour réagir avec les animations continues par rapport aux animations semi-statiques. C'est probablement en raison de leur insuffisante familiarité avec les animations continues qu'ils ont eu besoin de plus de temps pour traiter l'information. Avec des animations continues, les changements de vitesse des avions peuvent être ardu à identifier à cause des transitions douces les rafraîchissements d'image. Par conséquent, les experts, comme les novices, pourraient avoir eu des difficultés à résoudre cette tâche et cela se reflète dans leur temps de réponse.

Étonnamment, l'exactitude des réponses des novices ATC en condition d'animation semi-statique ne se différencie pas sensiblement de celle des experts. Cela pourrait être dû à une différente perceptibilité des déplacements relatifs entre les éléments graphiques des deux types d'animation. Les changements de vitesse dans les animations semi-statiques ne sont pas directement perçus comme dans le cas des animations continues. Les participants devaient déduire les différences de vitesse et les accélérations à partir de la forme de la comète des avions. Les participants peuvent identifier l'avion le plus rapide en raison de la forme de la comète plus allongée par rapport aux avions plus lents. Ceci pourrait avoir diminué le contraste dynamique parmi les éléments affichés et donc avoir empêché la détection erronée des objets perceptuellement plus saillants. De la même façon, la séquence discrète de la dynamique des avions et les transitions abruptes de ses positions

dans les animations semi-statiques pourraient avoir favorisé la détection des changements de vitesse par rapport aux animations continues. Cela concorde avec la théorie de perception des événements de Shipley et Zacks (2008). D'une part, les animations continues peuvent être mieux adaptées pour visualiser les données de mouvement, par rapport aux animations semi-statiques, car les éléments visuels sont représentés et perçus de manière réaliste et congruente. En revanche, avec des transitions graduelles et continues entre les scènes, comparée à des rafraîchissements brusques, les utilisateurs pourraient avoir des difficultés à identifier efficacement des micro-changements de vitesse de l'avion, car cela exige un effort perceptif et cognitif plus élevé sur leur mémoire de travail.

Enfin, comme l'indiquent Newcombe et Frick (2010), de bonnes capacités visuo-spatiales peuvent expliquer des performances élevées dans un environnement universitaire ou professionnel. Également, dans le domaine du contrôle aérien, les candidats aux postes de contrôleurs aériens doivent posséder de bonnes capacités visuo-spatiales afin d'intégrer la formation de gestion du trafic aérien. Ensuite, leurs capacités visuo-spatiales s'améliorèrent probablement au cours de leur formation et de leur travail quotidien. Cela pourrait expliquer la différence entre les capacités visuo-spatiales des deux groupes de participants dans notre expérience. Cependant, même si nous avons trouvé une corrélation positive et modérée des capacités visuo-spatiales des participants avec l'exactitude de réponse, cette dépendance concerne tout particulièrement l'affichage continu. En supposant que les animations continues nécessitent une charge cognitive plus élevée, comparées aux animations semi-statiques, des capacités visuo-spatiales supérieures pourraient avoir une influence positive sur l'accomplissement correct de la tâche. Cette constatation met l'accent sur l'importance des capacités visuo-spatiales des utilisateurs et les connaissances existantes relatives à la tâche et aux affichages utilisés. Des capacités visuo-spatiales élevées pourraient être avantageuses pour les utilisateurs lors du traitement d'informations avec des visualisations dynamiques peu familières et qui exigeraient un effort cognitif élevé (c.-à-d., les animations continues). Les connaissances existantes et la formation dans un domaine spécifique pourraient ultérieurement aider les utilisateurs à traiter les informations visuo-spatiales complexes et transférer ces connaissances sur des domaines nouveaux sans compromettre significativement l'efficacité à l'accomplissement d'une certaine tâche.

Résumé et perspective

Dans cet article, nous présentons en détail les résultats d'une expérimentation avec des visualisations dynamiques de données de mouvement dans le contexte du contrôle de trafic aérien. Nous avons examiné l'influence des trois facteurs suivantes sur la prise de décisions visuo-spatiales avec des animations : le paramétrage de l'animation (c.-à-d., les animations semi-statiques et continues), la dynamique et les caractéristiques contextuelles des objets en mouvement (c.-à-d., les objets avec des vitesses relatives identiques ou différentes) et les caractéristiques de l'utilisateur (c.-à-d., le niveau d'expertise et des capacités visuo-spatiales). Nous avons mesuré l'exactitude et le temps de réponse d'une tâche de détection, ainsi que les capacités visuo-spatiales et les mouvements oculaires des participants. Nos résultats montrent que l'accomplissement de la tâche avec des animations pourrait être considérablement influencé par les trois facteurs mentionnés ci-dessus, c'est-à-dire, par les principes d'affichage, les caractéristiques dynamiques des données et les caractéristiques de l'utilisateur. Comme le suggèrent des études antérieures sur des animations (Kriz et Hegarty 2007 ; Fabrikant 2005), les principes d'affichage dynamique, la saillance et l'importance thématique de l'information, ainsi que les connaissances existantes de l'utilisateur ainsi que ses capacités visuo-spatiales, influencent remarquablement l'efficacité de la prise de décision visuo-spatiale des utilisateurs. En outre, nous avons constaté que les objets en mouvement représentés avec des animations continues sont perçus différemment par rapport aux objets représentés avec des animations semi-statiques. Des objets qui se déplacent de manière continue sur une visualisation dynamique sont perçus d'une manière plus saillante par rapport à des objets qui se déplacent brusquement avec une fréquence de rafraîchissement d'image toutes les 4 secondes. Cependant, le type de conception d'affichage touche davantage les novices que les experts. Les différences dans la familiarité, la formation et les capacités visuo-spatiales des participants avec les deux types d'affichage semi-statique et continu influencent l'efficacité et l'efficacité de la détection d'objets en mouvement.

Dans une phase ultérieure de ces travaux, nous voudrions analyser plus en détail la relation entre la performance dans la tâche et les différences individuelles et interpersonnelles des utilisateurs (p. ex., la charge cognitive, la motivation et les signaux psychophysiologicals) avec les deux types de conception d'animations. En particulier, nous voudrions obtenir une validation croisée des séquences de mouvements oculaires enregistrés, avec les réactions électro-dermiques (c.-à-d., les réponses de la conductance gal-

vanique de la peau) et les signaux de l'activité cérébrale (c.-à-d., les signaux EEG) des participants. Par exemple, nous voudrions examiner si le faible niveau de performance des novices pourrait être une conséquence d'une charge de travail mentale élevée ou d'une faible motivation à la résolution de la tâche. Nous voulons également continuer l'analyse des séquences de mouvements oculaires afin d'identifier les stratégies des participants dans la tâche de détection. Les analyses standard de la séquence de mouvements oculaires ne sont pas adaptées pour nos données en raison de sa complexité (Krejtz et al. 2014). Une prochaine publication avec des analyses complémentaires est en cours de préparation.

De futures expérimentations devraient être conduites avec des experts afin d'examiner l'influence des mécanismes de l'attention visuelle humaine sur la prise de décision visuo-spatiale avec des animations. En outre, l'effet du type d'affichage dynamique dans des situations décisionnelles critiques (p. ex., la détection et la prévision de conflits de trafic entre les avions) serait intéressant. Nous supposons que des variables visuelles appropriées qui mettent en évidence les informations importantes pour la tâche, des transitions visuelles entre les événements et les changements de mouvements, ou l'inclusion d'informations contextuelles (p. ex., des points de repère ou des données météorologiques) dans des visualisations dynamiques pourraient améliorer la détection des informations pertinentes à la tâche (Lowe 2015). Une amélioration de la conception d'animation devrait non seulement aider les experts d'un domaine spécifique, mais aussi des utilisateurs novices avec des capacités visuo-spatiales réduites, pour guider efficacement leur attention sur les objets importants pour la tâche.

Avec cette étude empirique centrée sur l'utilisateur et les principes d'affichage dynamique, nous espérons mieux comprendre comment les processus émotionnels, cognitifs et perceptuels affectent l'efficacité de l'exploration de données spatio-temporelles représentées dans des animations. Nous avons l'intention d'élaborer des principes de conception cartographique empiriquement validés pour créer des visualisations dynamiques cognitivement inspirées et perpétuellement saillantes pour une exploration visuo-spatiale efficace des phénomènes spatio-temporels.

Remerciements

Cette recherche a été financée par le Fonds National Suisse (FNS) de la recherche scientifique (subside no 200020-134646). Les auteurs tiennent à remercier les participants de l'ENAC (France) et de la Temple University (USA) qui ont participé à notre expérimentation. Nous sommes également reconnaissants

à Maxime Cordeil ENAC, notamment Tim Shipley et Kelly Bower au Temple, pour leur précieuse collaboration dans la réalisation de l'expérimentation avec des visualisations dynamiques dans le contexte du contrôle aérien.

Information sur les auteurs

Sara Maggi, MSc, est une géographe et travaille comme doctorante dans le groupe de Visualisation et Analyse de l'Information Géographique (GIVA) du département de géographie à l'Université de Zurich, en Suisse. Ses intérêts de recherche portent sur le domaine de la cartographie dynamique, des sciences cognitives et de la perception, et des analyses de signaux psycho-physiologiques des utilisateurs.
Courriel : sara.maggi@geo.uzh.ch.

Dr. Sara Irina Fabrikant est professeur de géographie et actuellement la Vice-Présidente de l'Association de Cartographie Internationale (ACI). Ses intérêts de recherche couvrent la visualisation analytique géographique, la GIScience, les sciences cognitives et la cartographie dynamique. Elle est la chef du département de géographie de l'Université de Zurich (UZH), où elle dirige aussi le groupe de recherche de Visualisation et Analyse de l'Information Géographique au centre GIScience.
Courriel : sara.fabrikant@geo.uzh.ch.

Dr. Jean-Paul Imbert est ingénieur de recherche au Laboratoire d'Informatique Interactive (LII) de l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) à Toulouse. Ses intérêts de recherche couvrent l'interaction homme-machine, l'automatisation adaptative et la conscience de la situation dans le domaine du contrôle aérien. Courriel : jean-paul.imbert@enac.fr.

Dr. Christophe Hurter est professeur au Laboratoire d'Informatique Interactive (LII) de l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) à Toulouse. En 2014 il obtient son HDR (Habilitation à Diriger des Recherches) et en 2010 son doctorat en informatique à l'Université de Toulouse. Il est également chercheur associé au centre de recherche de la Force Aérienne Militaire Française (CReA), Salon de Provence, France. Ses intérêts de recherche couvrent la visualisation d'information (InfoVis) et l'interaction homme-machine (IHM), en particulier, la visualisation de données multidimensionnelles. Il a été impliqué dans plusieurs projets, dont des outils d'exploration de données volumineuses et de simplification graphique (« *edge bundling* »).
Courriel : christophe.hurter@enac.fr.

Bibliographie

Andrienko, G., Andrienko, N., Demsar, U., Dransch, D., Dykes, J., Fabrikant, S.I., Jern, M., Kraak, M.-J., Schumann, H., and C. Tominski, 2010, « Space, Time, and Visual Analytics. » *International Journal of Geographical Information Science*, 24(10): 1577-1600.

Andrienko, N., and G. Andrienko, 2008, « Supporting visual exploration of massive movement data. » *In: Levialdi (ed.) AVI 2008. Proceedings of the working conference on Advanced Visual Interfaces*, Napoli, Italy: 474-475.

Bartram, L., Ware, C., and T. Calvert, 2003, « Moticons: Detection, Distraction and Task. » *International Journal of Human-Computer Studies*, 58: 515-545.

Bartram, L., Ware, C., and T. Calvert, 2001, « Moving Icons: Detection and Distraction. » *Proceedings of the IFIP TC.13 International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT 2001)*, Tokyo, Japan.

Battersby, S.E., and K.P. Goldsberry, 2010, « Consideration in Design of Transition Behaviors for Dynamic Thematic Maps. » *Cartographic Perspectives*, 65: 16–32, 67–69.

Boucheix, J.M., and R.K. Lowe, 2010, « An Eye Tracking Comparison of External Pointing Cues and Internal Continuous Cues in Learning with Complex Animations. » *Learning and Instruction*, 20(2): 123-135.

Cavanagh, P., and G.A. Alvarez, 2005, « Tracking Multiple Targets with Multifocal Attention. » *TRENDS in Cognitive Sciences*, 9(7): 349-354.

DiBiase, D., MacEachren, A.M., Krygier, J.B., and C. Reeves, 1992, « Animation and the Role of Map Design in Scientific Visualization. » *Cartography and Geographic Information Systems*, 19(4): 201-214, 265-266.

Ekstrom, R.B., French, J.W., Harman, H.H., and D. Dermen, 1976, « Manual for Kit of Factor – Referenced Cognitive Tests. » Princeton, NJ: Educational Testing Service.

Fabrikant, S.I., and A. Lobben, 2009, « Introduction: Cognitive Issues in Geographic Information Visualization. » *Special Issue on Cognitive Issues in Geovisualization. Cartographica*, 44(3): 139-143.

Fabrikant, S.I., Rebich-Hespañha, S., Andrienko, N., Andrienko, G., and D.R. Montello, 2008, « Novel Method to Measure Inference Affordance in Static Small Multiple Displays Representing Dynamic Processes. » *The Cartographic Journal*, 45(3): 201-215.

Fabrikant, S.I., and K.P. Goldsberry, 2005, « Thematic Relevance and Perceptual Salience of Dynamic Geovisualization Displays. » *Proceedings of ICA/ACI International Cartographic Conference 2005*, A Coruña, Spain.

Fabrikant, S.I., 2005, « Towards an Understanding of Geovisualization with Dynamic Displays. » *Proceedings of American Association for Artificial Intelligence (AAAI) 2005 Spring Symposium Series: Reasoning with Mental and External Diagrams: Computational Modeling and Spatial Assistance*, Stanford University, Stanford, CA, 6-11.

Harrower, M., 2003, « Designing Effective Animated Maps. » *Cartographic Perspectives*, 44: 63-65.

- Hegarty, M., S. Kriz, and C. Cate, 2003, « The Roles of Mental Animations and External Animations in Understanding Mechanical Systems. » *Cognition and Instruction*, 21(4): 209-249.
- Helton, W.S., 2004, « Validation of a Short Stress State Questionnaire. » *Proceedings of the 48th Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, 48(11): 1238-1242.
- Henderson, J.M., Weeks, P.A., and A. Hollingworth, 1999, « Effects of Semantic Consistency on Eye Movements During Scene Viewing. » *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25: 210-228.
- Holyoak, M., Casagrandi, R., Nathan, R., Revilla, E., and O. Spiegel, 2008, « Trends and Missing Parts in the Study of Movement Ecology. » *Proceedings National Academy of Sciences 2008, USA*, 105:19060-19065.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., J. van de Weijer, 2011, « Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures. » Oxford: Oxford University Press.
- Hurter, C., and S. Conversy, 2008, « Towards Characterizing Visualization. » In: *Graham, T.C., Palanque, P. (Eds.). Interactive Systems. Design, Specification, and Verification. Lecture Notes In Computer Science*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 5136: 287-293.
- Hurter, C., Conversy, S., and V. Kapp, 2008, « An Infovis Approach to Compare ATC Comets. » *3rd International Conference on Research in Air Transportation ICRAT 2008*. Fairfax Virginia USA.
- Imbert, J.P., Hodgetts, H.M., Parise, R., Vachon, F., Dehais, F., and S. Tremblay, 2014, « Attentional Costs and Failures in Air Traffic Control Notifications. » *Ergonomics*, 57(12), 1817-1832.
- Jacob, R.J.K., and K.S. Karn, 2003, « Eye Tracking in Human Computer Interaction and Usability Research: Ready to Deliver the Promises. » In: *J. Hyönä, J., Radach, R., Deubel, H. (Eds.). The Mind's Eye: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research: 573-605*, Amsterdam: Elsevier.
- Klein, T., Van der Zwan, M., and A. Telea, 2014, « Dynamic Multiscale Visualization of Flight Data. » *Proceedings of VISAPP 2014*.
- Koffka, K., 1935, « Principles of Gestalt Psychology. » New York: Harcourt, Brace, & World.
- Krejtz, K., Szmids, T., Duchowski, A.T., and I. Krejtz, 2014, « Entropy-Based Statistical Analysis of Eye Movement Transitions. » *Proceedings of Eye Tracking Research and Applications Symposium (ETRA). Association for Computing Machinery*, 2014: 159-166.
- Kriz, S., and M. Hegarty, 2007, « Top-down and Bottom-Up Influences on Learning From Animations. » *International Journal of Man-Machine Studies*, 65(11): 911-930.
- Lee, P.U., and A. Klippel, 2005, « Dynamic Aspects of Spatial Information in Air Traffic Controller Displays. » *AAAI Spring Symposium: Reasoning with Mental and External Diagrams: Computational Modelling and Spatial Assistance 2005*, 18-23.
- Lowe, R., 2015, « Perceptual Learning in the Comprehension of Animations and Animated Diagrams. » In: *Hoffman, R., Hancock, P., Scerbo, M., Parasuraman, R., Szalma, J. (Eds). Cambridge Handbook of Applied Perception Research*, New York: Cambridge University Press.
- Lowe, R.K., 1999, « Extracting Information from an Animation During Complex Visual Learning. » *European Journal of Psychology of Education*, 14(2): 225-244.
- Maggi, S., and S.I. Fabrikant, 2014 a, « Embodied Decision Making with Animations. » *Proceedings of International Conference on Geographic Information Science 2014*, Vienna, Austria.
- Maggi, S., and S.I. Fabrikant, 2014 b, « Triangulating Eye Movement Data of Animated Displays. » *Proceedings of International Workshop on Eye Tracking for Spatial Research 2014*, Vienna, Austria, 1241: 27-31.
- MacEachren, A.M., 1995, « How Maps Work. Representation, Visualization, and Design. » New York, NY: Guilford Press.
- Moellering, H.M., 1976, « The Potential Uses of a Computer Animated Film in the Analysis of Geographic Patterns of Traffic Crashes. » *Accident Analysis and Prevention*, 8(4): 215-227.
- Newcombe, N.S., and A. Frick, 2010, « Early Education for Spatial Intelligence: Why, What, and How. » *Mind, Brain, and Education* 4/3: 102-111.
- Niessen, C., Eyferth, K., and T. Bierwagen, 1999, « Modelling Cognitive Processes of Experienced Air Traffic Controllers. » *Ergonomics*, 42(11): 1507-1520.
- Shiple, T., Fabrikant, S.I., and A.-K. Lautenschütz, 2013, « Creating Perceptually Salient Animated Displays of Spatially Coordinated Events. » In: *Raubal, M., Mark, D.M., Frank, A.U. (Eds.). Cognitive and Linguistic Aspects of Geographic Space: New Perspectives on Geographic Information Research, Springer Lecture Notes of Geoinformation and Cartography*, Springer, Berlin, Germany: 259-270.
- Shiple, T.F., and J.M. Zacks, 2008, « Understanding Events: From Perception to Action. » New York: Oxford Press.
- Steelman, K.S., McCarley, J.S., and C.D. Wickens, 2011, « Modelling the Control of Attention in Visual Workspaces. » *Human Factors*, 53(2): 142-153.
- Tversky, B., J.B. Morrison, and M. Betrancourt, 2002, « Animation: Can It Facilitate? » *International Journal of Human Computer Studies*, 57(4): 247-262.
- Wai, J., D. Lubinski, and C.P. Benbow, 2009, « Spatial Ability for STEM Domains: Aligning Over 50 Years of Cumulative Psychological Knowledge Solidifies its Importance. » *Journal of Educational Psychology*, 101(4): 817-835.
- Ware, C., 2013, « Information Visualization: Perception for Design. » San Francisco: Morgan Kaufmann.
- Wright, R., Thompson, W.L., Ganis, G., Newcombe, N.S., and S.M. Kosslyn, 2008, « Training Generalized Spatial Skills. » *Psychonomic Bulletin and Review*, 15(4): 763-77.

ⁱ Cette publication étend de façon significative les résultats d'un précédent test utilisateur présenté dans Maggi and Fabrikant (2014 a).