

**HEC MONTRÉAL**

**L'évaluation cognitive rapide pour la recherche UX : une validation empirique de  
l'outil Axon**  
par  
**Tanguy Depauw**

Sous la direction de  
**Pierre-Majorique Léger, Ph.D. et Sylvain Sénécal, Ph.D.**

**Sciences de la gestion  
(Spécialisation Expérience Utilisateur dans un contexte d'affaires)**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention  
du grade de maîtrise ès sciences en gestion  
(M. Sc.)*

Avril 2023  
© Tanguy Depauw, 2023



# HEC MONTRÉAL

Comité d'éthique de la recherche

## CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

La présente atteste que le projet de recherche décrit ci-dessous a fait l'objet d'une évaluation en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains et qu'il satisfait aux exigences de notre politique en cette matière.

---

**Projet # :** 2021-4108

**Titre du projet de recherche :** Validation of a digital cognitive function test

**Chercheur principal :**

Pierre-Majorique Léger  
Professeur titulaire, Technologies de l'information, HEC Montréal

**Cochercheurs :**

Jared Boasen; Emma Rucco; Salima Tazi; Shang-Lin Chen; David Brieugne; Sylvain Sénécal; Marc Fredette

**Date d'approbation du projet :** 21 août 2020

**Date d'entrée en vigueur du certificat :** 21 août 2020

**Date d'échéance du certificat :** 01 août 2021

---



Maurice Lemelin  
Président  
CER de HEC Montréal



**Comité d'éthique de la recherche**

Le 13 novembre 2020

À l'attention de :

Pierre-Majorique Léger  
Technologies de l'information, HEC Montréal

Cochercheurs :

Jared Boasen; Emma Rucco; Salima Tazi; Shang-Lin Chen; David Brieugne; Sylvain Sénécal; Marc Fredette;  
Tanguy Depauw

**Projet # :** 2021-4108

**Titre du projet :**

Validation of a digital cognitive function test

---

Pour donner suite à l'évaluation de votre formulaire F8 - Modification de projet, le CER de HEC Montréal vous informe de sa décision :

Les modifications à l'équipe ont été approuvées et notées au dossier. Le certificat actuel demeure valide jusqu'au prochain renouvellement.

En vous remerciant cordialement,

**Le CER de HEC Montréal**

# HEC MONTRÉAL

Comité d'éthique de la recherche

## RENOUVELLEMENT DE L'APPROBATION ÉTHIQUE

La présente atteste que le projet de recherche décrit ci-dessous a fait l'objet d'une évaluation en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains et qu'il satisfait aux exigences de notre politique en cette matière.

---

**Projet # :** 2021-4108

**Titre du projet de recherche :** Validation of a digital cognitive function test

**Chercheur principal :**

Pierre-Majorique Léger  
Professeur titulaire, Technologies de l'information, HEC Montréal

**Cochercheurs :**

Jared Boasen; Emma Rucco; Salima Tazi; Shang-Lin Chen; David Brieugne; Sylvain Senecal; Marc Fredette; Tanguy Depauw

**Date d'approbation du projet :** 21 août 2020

**Date d'entrée en vigueur du certificat :** 01 août 2021

**Date d'échéance du certificat :** 01 août 2022

---



Maurice Lemelin  
Président  
CER de HEC Montréal

# HEC MONTRÉAL

Comité d'éthique de la recherche

## ATTESTATION D'APPROBATION ÉTHIQUE COMPLÉTÉE

La présente atteste que le projet de recherche décrit ci-dessous a fait l'objet des approbations en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains nécessaires selon les exigences de HEC Montréal.

**La période de validité du certificat d'approbation éthique émis pour ce projet est maintenant terminée. Si vous devez reprendre contact avec les participants ou reprendre une collecte de données pour ce projet, la certification éthique doit être réactivée préalablement. Vous devez alors prendre contact avec le secrétariat du CER de HEC Montréal.**

---

**Projet # :** 2021-4108 - 233 - Axon - R2659-Mitacs-JBoasen

**Titre du projet de recherche :** Validation of a digital cognitive function test

**Source de financement :** R2659 - MITACS (Stagiaire: Jared Boasen)

**Titre de la subvention :** Validation of a novel digitized trail making test

**Chercheur principal :**

Pierre-Majorique Léger  
Professeur titulaire, Département de technologies de l'information, HEC Montréal

**Cochercheurs :**

Jared Boasen; Emma Rucco; Salima Tazi; Shang Lin Chen; David Brieugne; Sylvain Sénécal; Marc Fredette; Tanguy Depauw

**Directeur/codirecteurs :**

Pierre-Majorique Léger; Sylvain Sénécal

**Date d'approbation initiale du projet :** 21 août 2020

**Date de fermeture de l'approbation éthique :** 13 avril 2023

---



Maurice Lemelin  
Président  
CER de HEC Montréal

## Résumé

La recherche en expérience utilisateur (UX) reconnaît depuis longtemps l'importance de prendre en compte les capacités cognitives des utilisateurs afin de mieux comprendre les comportements des utilisateurs et de concevoir des interfaces adaptées aux utilisateurs ayant des besoins particuliers, comme les utilisateurs neuro-atypiques. Malgré cette reconnaissance, les solutions pratiques pour l'évaluation cognitive en évaluation UX restent limitées. Les batteries de tests cognitifs ou les tests cliniques traditionnels sont souvent trop longs, trop complexes et ne sont pas validées pour une utilisation dans le domaine de l'expérience utilisateur. Les chercheurs UX ne disposent donc pas d'un moyen rapide et pratique d'évaluer les capacités cognitives de leurs utilisateurs.

Pour répondre à ce besoin, un nouvel outil appelé "Axon" a été développé par une entreprise canadienne nommée *Language Research Development Group* (LRDG). Il est basé sur le *Trail Making Test*, un test cognitif classique utilisé en neuropsychologie pour détecter les troubles cognitifs. L'objectif de ce mémoire était d'étudier la relation entre l'évaluation cognitive à l'aide du logiciel Axon et la performance sur des tâches générales d'interaction humain-machine, afin notamment de proposer un outil pour mieux comprendre les besoins des utilisateurs en fonction de leur profil cognitif.

Une étude empirique a été menée pour collecter des données en vue de proposer l'utilisation d'Axon dans la recherche UX. Les résultats ont montré que la validité prédictive d'Axon était plus élevée pour les tâches nécessitant des capacités cognitives similaires à celles mesurées par le test. Cela suggère qu'Axon pourrait être un outil utile pour les chercheurs UX afin d'évaluer rapidement les capacités cognitives de leurs participants, leur permettant de relier les différences de performance dans les tâches aux capacités cognitives individuelles.

Dans l'ensemble, ce mémoire présente une solution nouvelle et pratique pour l'évaluation cognitive rapide dans le contexte de la recherche UX, fournissant un outil utile aux chercheurs pour prendre en compte les capacités cognitives de leurs utilisateurs et concevoir des interfaces plus efficaces et plus accessibles.

**Mots clés :** expérience utilisateur; capacités cognitives; évaluation cognitive; utilisateurs neuro-atypiques; interaction humain-machine; Axon; Trail Making Test; technologies de l'information; accessibilité.

## **Abstract**

User experience (UX) research has long recognised the importance of considering the cognitive abilities of users in order to better understand users' behaviors and design appropriate interfaces for users with special needs, such as neuro-atypical users. Despite this recognition, practical solutions for cognitive assessment in the context of user experience evaluation remain limited. Traditional cognitive test batteries are often too long, too complex and are not validated for use in user experience. As a result, UX researchers lack a quick and convenient way to assess the cognitive abilities of their users.

To address this need, a new tool called "Axon" has been developed by a Canadian company named Language Research Development Group (LRDG). It is based on the Trail Making Test, a classical paper-pencil cognitive test used in neuropsychology to detect cognitive disorders. The aim of this thesis was to study the relationship between cognitive assessment using the Axon software and performance on general human-computer interaction tasks, in order to propose a tool to better understand the needs of users according to their cognitive profile.

An empirical study was conducted to collect data to propose the use of Axon in UX research. The results showed that the predictive validity of Axon was higher for tasks requiring similar cognitive abilities to those measured by the test. This suggests that Axon could be a useful tool for UX researchers to quickly assess the cognitive abilities of their participants, allowing them to relate differences in task performance to individual cognitive abilities.

Overall, this thesis presents a novel and practical solution for rapid cognitive assessment in the context of UX research, providing a useful tool for researchers to better assess and account for the cognitive abilities of their users and design more effective and accessible interfaces.

**Keywords:** user experience; cognitive abilities; cognitive assessment; neuro-atypical users; human-computer interaction; Axon; trail making test; information technology; accessibility.

## Table des matières

<b>Résumé .....</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>viii</b>
<b>Table des matières.....</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des tableaux et des figures.....</b>	<b>xiii</b>
<b>Liste des abréviations.....</b>	<b>xv</b>
<b>Avant-propos .....</b>	<b>xvii</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Introduction .....</b>	<b>1</b>
Contexte .....	1
Problématique .....	2
Objectifs de recherche.....	4
Méthodologie .....	5
Organisation du mémoire.....	6
Contribution personnelle.....	6
<b>Chapitre 2 : Revue de littérature.....</b>	<b>11</b>
1.1    Introduction : Comprendre l'évaluation cognitive .....	11
1.2    Liens entre les capacités cognitives et la performance.....	13
Exemples de liens établis dans la littérature entre fonctions cognitives et performance .....	13
Mesurer les capacités cognitives pour prédire la performance .....	15
1.3    Liens entre les capacités cognitives et les performances TI/HCI.....	17
Les capacités cognitives importantes intervenant lors des tâches en TI .....	18
Le rôle des modèles d'architecture cognitive.....	20

1.4	Outils de mesure de l'évaluation cognitive pour prédire la performance.....	21
1.5	L'évaluation cognitive en contexte d'évaluation UX (potentiel et limites).....	28
	L'oculométrie pour expliquer les performances TI en UX.....	29
	Connaître les capacités cognitives des utilisateurs en contexte UX .....	29
	Conclusion .....	32
	Références.....	33
<b>Chapter 3: Empirical Article .....</b>	<b>57</b>	
<b>Digital Trail Making Test Time Predicts Information Technology Task Performance</b>		
.....	57	
Abstract.....	57	
Background: .....	57	
Objective: .....	57	
Methods: .....	57	
Results:.....	57	
Conclusion: .....	58	
3.1 Introduction.....	58	
3.2 Methods.....	60	
3.2.1 Sample.....	60	
3.2.2 IT tasks.....	60	
3.2.2 Procedures.....	64	
3.2.4 Statistical Analysis.....	66	
3.3 Results .....	66	
3.3.1 Axon TMT cross-validation.....	66	
3.3.2 Axon TMT predicts overall IT performance .....	67	
3.3.3 Axon TMT better predicts performance on IT tasks with similar involved cognitive abilities .....	68	

3.4	Discussion .....	69
3.5	Conclusion.....	71
Appendix.....		72
Evaluation of involved cognitive functions in IT Tasks .....	72	
References .....	74	
<b>Conclusion.....</b>	<b>80</b>	
Résumé des résultats clés .....	80	
Contribution à la connaissance.....	81	
Futures recherches.....	83	
Conclusion générale .....	83	
<b>Bibliographie .....</b>	<b>i</b>	



## **Liste des tableaux et des figures**

### **Liste des tableaux**

#### **Chapitre 2 :**

Tableau 1 – Liste de dix tests cognitifs ou batteries de tests cognitifs les plus utilisés en neuropsychologie ou en HCl.

#### **Chapitre 3 :**

Table 2 – Convergence ranks of IT tasks with the TMT.

#### **Appendix:**

Table 3 – Convergence ranks of IT tasks with the TMT and evaluation intra-class coefficients.

### **Liste des figures**

#### **Chapitre 3 :**

Figure 1 – Screenshots of Axon-A and Axon-B.

Figure 2 – Representation of the five IT tasks as presented to the test subjects.

Figure 3 – Cross-validation tasks representing the Hidden Path Learning 10x10 and the Visual Search Task.

Figure 4 – Experimental setup diagram.

Figure 5 – Distribution of Axon B completion times in relation with the completion times of the five IT tasks.



## **Liste des abréviations**

- HCI : Human-Computer Interaction / Interaction humain-machine
- UX : User experience / Expérience utilisateur
- TI/IT : Technologies de l'information / Information technologies
- TMT : Trail Making Test
- CAPTCHA : Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Humans Apart
- CANS-MCI: Computer-Administered Neuropsychological Screen for mild cognitive impairments
- CANTAB : Cambridge Neuropsychological Test Automated Battery
- STIM : Sciences, technologies, ingénierie, mathématiques
- QI : Quotient intellectuel
- RV : Réalité virtuelle
- RA : Réalité augmentée
- EPIC : Executive Process-Interactive Control
- WAIS : Wechsler Adult Intelligence Scale
- WMS : Wechsler Memory Scale
- MoCA : Montreal Cognitive Assessment
- MMSE : Mini-Mental State Examination
- SCWT : Stroop Color and Word Test
- WCST: Wisconsin Card Sorting Test
- SDMT : Symbol Digit Modalities Test
- GMLT : Groton Maze Learning Test
- RPM : Raven's Progressive Matrices
- HPL : Hidden Path Learning
- RM MANCOVA : Repeated measures multivariate analysis of covariance



## **Avant-propos**

L'autorisation de rédiger ce mémoire sous la forme de deux articles a été donnée par la direction administrative du programme de la maîtrise ès sciences en gestion de HEC Montréal.

L'étude présentée dans le second article a été permise grâce à l'approbation du comité d'éthique en recherche (CER) de HEC Montréal en juillet 2021 (certificat #2021-4108).

L'accord des coauteurs a été obtenu pour que les deux articles puissent être inclus dans ce mémoire.

Le premier article est une revue de littérature faisant état des connaissances existantes sur l'évaluation cognitive en général puis en contexte d'interaction humain-machine. Elle présente enfin les enjeux de l'évaluation cognitive dans le domaine de la recherche en expérience utilisateur.

Le deuxième article présente les résultats d'une étude réalisée au sein du laboratoire du Tech3lab de HEC Montréal en octobre 2021 évaluant la validité prédictive de l'outil Axon basé sur un test cognitif clinique, en contexte de recherche en expérience utilisateur.



## **Remerciements**

Quel parcours ! Une véritable odyssée qui m'a permis d'en apprendre plus sur moi-même, mais aussi sur l'organisation et la détermination nécessaire pour atteindre un objectif qui, aux premiers abords, semble hors de portée. Je n'aurais jamais pu développer les capacités que j'ai maintenant sans un entourage formidable qui n'a cessé de m'inspirer et de m'encourager à atteindre mes objectifs.

Je tiens donc à exprimer mon immense gratitude à tous ceux qui m'ont soutenu dans cette aventure riche en apprentissages, à commencer par mon mentor, celui qui m'a accompagné et fourni une aide précieuse tout au long de mon mémoire : Dr. Jared Boasen. Jared a été et restera une vaste source d'inspiration ainsi qu'un modèle de sagesse et d'expérience. Je tiens aussi à remercier infiniment mes superviseurs, les professeurs Pierre-Majorique Léger et Sylvain Sénécal, pour leur investissement tout au long de mon processus d'apprentissage qui entoure la rédaction de ce mémoire. Je me sens extrêmement chanceux d'avoir été si bien encadré, surtout dans les circonstances particulières qui résultait du COVID-19. La confiance et la patience que vous m'avez accordées m'ont permis de rester motivé et d'achever ce projet de recherche dans les meilleures conditions.

Aussi, j'aimerais remercier mes parents et mes amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé à persévérer dans les moments les plus difficiles de ce parcours. Merci à mon ami et colocataire Félix, qui me supporte depuis bien longtemps et sans qui l'aventure aurait été bien moins plaisante.

Et enfin, j'aimerais remercier la ligne de front du Tech3lab : l'équipe d'assistants de recherche. Des collègues devenus des amis, qui m'ont tant appris et sans qui mon expérience au laboratoire aurait été incomplète : des remerciements spéciaux à Emma, pour son soutien et ses encouragements impromptus, souvent arrivés à des moments opportuns.



# **Chapitre 1 : Introduction**

## **Contexte**

Avec l'omniprésence des technologies numériques, des appareils mobiles aux maisons connectées, les individus dépendent de plus en plus de ces technologies pour effectuer un grand nombre de tâches (Barnes et al., 2019; Nguyen et al., 2021). L'interaction humain-machine ("HCI") est alors un domaine pour lequel la recherche porte un intérêt croissant, afin de vivre le mieux possible avec ces technologies. Par conséquent, les chercheurs ont de plus en plus besoin de mieux comprendre de quelle manière les individus interagissent avec ces technologies et comment concevoir des interfaces intuitives, efficaces et agréables à utiliser.

L'un des moyens d'améliorer la conception des interfaces numériques est de comprendre les performances des utilisateurs dans des tâches spécifiques, l'un des fers de lance de la recherche en expérience utilisateur (Lallemand, 2015). La recherche en expérience utilisateur (UX) est le domaine qui cherche à comprendre comment les individus interagissent avec la technologie et comment concevoir des interfaces efficaces et satisfaisantes pour les utilisateurs (Hartson et Pyla, 2012). Du fait de son impact sur la croissance des entreprises et de l'importance grandissante de l'approche de conception des systèmes numériques centrée sur l'utilisateur, la recherche UX est un domaine qui ne cesse de croître (Balboni et al., 2022). Répondre aux besoins des utilisateurs d'interfaces numériques de manière efficace et satisfaisante devient un enjeu indispensable pour que les organisations atteignent leurs objectifs de croissance.

L'un des aspects essentiels de la recherche UX est la compréhension des capacités cognitives des utilisateurs, qui peuvent avoir un impact significatif sur leur capacité à utiliser la technologie et à en tirer profit (Wagner et al., 2014 ; Karahoca et al., 2008 ; Martins et al., 2022). Les capacités cognitives, telles que l'attention, les capacités visuelles, la mémoire, la vitesse de traitement, les fonctions motrices et exécutives peuvent affecter la capacité d'un utilisateur à percevoir, comprendre et interagir avec une interface utilisateur (Slegers et al., 2009; Czaja et al., 1998; Miyake et al., 2000).

Or, tous les individus n'ont pas les mêmes capacités cognitives. Certains utilisateurs sont même catégorisés comme neuro-atypiques (ou neurodivergents), ayant un profil de fonctionnement neurologique différent de ce qui est considéré comme la norme (Chamak et Bonniau, 2014). La littérature en accessibilité des technologies de l'information (TI) s'est beaucoup intéressée à rendre les technologies accessibles pour des personnes souffrant de handicaps physiques tels que des déficiences visuelles ou motrices (Sears et Hanson, 2011; Fichten et al., 2009; Lazar, 2002). Seulement, il est important de considérer aussi les profils d'utilisateurs neuro-atypiques dans la conception d'interfaces numériques. En effet, ces individus peuvent avoir une perception et un comportement différent lors d'une interaction avec une interface numérique, ce qui peut altérer leur expérience utilisateur (Lukava et al., 2022). Il est estimé que 15 à 20 % de la population mondiale présente une forme de neurodivergence (Doyle, 2020). Afin de rendre les interfaces plus accessibles pour le plus grand nombre d'individus, il est donc nécessaire de pouvoir comprendre les besoins particuliers de ce type d'utilisateur dotés d'un fonctionnement cognitif différent.

## **Problématique**

Bien que les chercheurs UX reconnaissent depuis longtemps l'importance de comprendre les capacités cognitives des utilisateurs, ceux-ci se basaient traditionnellement sur des différences cognitives perçues plutôt que mesurées par des tests cognitifs validés (Dumont et al., 2015), des caractéristiques telles que l'âge, l'éducation ou d'autres facteurs (Aykin et Aykin, 1991 ; Lewis, 2012). Toutefois, cette approche exclut intrinsèquement la possibilité de contrôler ou d'évaluer l'impact de la capacité fonctionnelle cognitive sur la facilité d'utilisation des technologies de l'information chez les utilisateurs individuels, limitant ainsi l'étendue des connaissances que l'on peut acquérir au sein d'un groupe démographique ou d'un individu. Les solutions actuelles pour mesurer les capacités cognitives individuelles en HCI reposaient sur des batteries de tests cognitifs comme la *NIH Toolbox* (Dumont et al., 2015) ou le *Kit of Factor-Referenced Cognitive Tests* (Wagner et al., 2014; Allen, 1994) ou des tests cliniques comme le *Montreal Cognitive Assessment* (MoCA) ou le *Mini-Mental State Examination* (MMSE; Oliveira et al., 2018; Martins et al., 2022; Czaja et al., 2006; Khalili-Mahani et al., 2020), traditionnellement

utilisés en milieu médical pour évaluer les déficiences cognitives de patients atteints de troubles neurologiques (Nasreddine et al., 2005; Folstein et McHugh, 1975). Seulement, bien que les batteries de tests traditionnelles utilisées pour l'évaluation cognitive soient détaillées et précises, elles sont souvent trop longues pour une étude UX traditionnelle d'une durée de 60 à 90 minutes (Lallemand, 2015) : 30 minutes pour le *NIH Toolbox*, 144 minutes pour le *Kit of Factor-Referenced Cognitive Tests* (Weintraub et al., 2013; Wothke et al., 1991). En outre, si les tests administrés cliniquement comme le MoCA ou le MMSE peuvent être des outils précieux pour évaluer le niveau cognitif des utilisateurs dans un court laps de temps, ils nécessitent un administrateur formé pour faire passer et noter le test (Martins et al., 2022). Ce niveau d'expertise n'est pas toujours disponible, en particulier dans le cadre de la recherche UX, où le personnel de recherche qui est chargé de mener les expériences n'a souvent pas de formation clinique. De plus, ces tests ne correspondent pas toujours précisément aux capacités cognitives spécifiques requises pour une interaction efficace avec des TI, mesurant parfois des capacités cognitives non essentielles ou au contraire en manquant une fonction nécessaire à l'interaction. Les chercheurs UX ne disposent pas de moyens rapides et pratiques pour évaluer les capacités cognitives de leurs utilisateurs : ils le font donc très rarement.

Cette lacune a d'importantes implications pour la recherche UX. Si les chercheurs ne sont pas en mesure d'évaluer avec précision les capacités cognitives des utilisateurs, ils risquent de ne pas prendre en compte un facteur important de différenciation des performances sur leur utilisation des interfaces, ce qui peut laisser des résultats sans explication valable. De plus, ne pas prendre en compte les différences cognitives des utilisateurs pourrait entraîner une conception d'interfaces moins accessibles pour des personnes n'ayant pas forcément les mêmes capacités cognitives, telles que les utilisateurs neuro-atypiques (Zolyomi et Snyder, 2021 ; Demmans Epp et al., 2016). Enfin, cette lacune rend également difficile l'évaluation de l'impact des capacités cognitives sur les tâches générales en HCI et l'identification des facteurs qui influencent la performance dans ces tâches.

Un test potentiel pour mesurer les capacités cognitives reliées à l'utilisation des TI serait le Trail Making Test (TMT). Le TMT est l'un des instruments les plus utilisés dans

l'évaluation neuropsychologique en tant qu'indicateur de la vitesse de traitement cognitif et du fonctionnement exécutif (Lezak et al., 1995 ; Mitrushina et al., 2005 ; Reitan, 1992 ; Strauss et al., 2006). Il a été démontré que ce test mesurait les capacités visuoperceptuelles, la mémoire de travail, la flexibilité cognitive (Sanchez-Cubillo et al., 2009), mais aussi la capacité psychomotrice (Groff et Hubble, 1981; Schear et Sato, 1989; Gaudino et al., 1995; Crowe, 1998), des capacités cognitives nécessaires pendant l'interaction avec les TI (Slegers et al., 2009; Czaja et al., 1998; Miyake et al., 2000; Kiesel et al., 2010 ; Gade et al., 2014).

## Objectifs de recherche

Pour répondre à ce besoin, un nouvel outil appelé "Axon" a été développé sur la base du *Trail Making Test*, un test cognitif classique utilisé en neuropsychologie pour détecter les troubles cognitifs. Cet outil a été développé à partir de 2020 par une entreprise québécoise du nom de *Language Research Development Group* (LRDG). Axon se veut être un outil rapide, pratique et facile à utiliser pour évaluer les capacités cognitives dans le contexte de la recherche UX. En explorant le potentiel d'Axon en tant qu'outil d'évaluation cognitive dans le contexte de la recherche UX, ce mémoire pourrait apporter une contribution utile au domaine de la recherche en HCI et en UX.

L'objectif de ce mémoire est d'explorer le potentiel d'un nouveau test cognitif pouvant être utilisé dans un contexte de tests utilisateurs. Le but était alors de démontrer dans un premier temps la validité prédictive de l'outil Axon pour prédire les performances sur des tâches en HCI, notamment dans un contexte d'évaluation UX. Ainsi, ce travail visait à répondre à la question de recherche suivante :

**Question de recherche 1 :** *Dans quelle mesure l'évaluation cognitive basée sur l'outil Axon peut-elle prédire les performances sur des tâches générales en HCI en contexte UX ?*

Plus spécifiquement, l'article empirique de ce mémoire étudie la validité discriminante des résultats de l'évaluation cognitive basée sur Axon, à savoir si le test Axon prédit les performances sur des tâches nécessitant des capacités cognitives similaires à celles

mesurées par le test cognitif. Pour étudier cette problématique, l'étude empirique s'est déroulée dans l'optique de répondre à la sous-question de recherche suivante :

**Question de recherche 2 :** *Dans quelle mesure la validité prédictive de l'évaluation cognitive basée sur l'outil Axon est-elle plus élevée sur des tâches générales en HCI nécessitant des capacités cognitives similaires à celles mesurées par le test que pour des tâches nécessitant d'autres capacités cognitives ?*

## Méthodologie

Tout d'abord, nous avons fait une revue de la littérature systématique sur l'évaluation cognitive en contexte d'interaction humain-machine, en utilisant les bases de données *Google Scholar* et *PubMed*. Nous avons ainsi dressé l'état des connaissances sur ce sujet et sur l'intérêt pour les chercheurs UX de considérer les capacités cognitives de leurs utilisateurs.

Ensuite, une étude empirique a été menée afin d'évaluer l'outil Axon comme prédicteur des performances en contexte d'utilisation des TI. Une expérience en laboratoire a été conçue pour répondre aux questions de recherche citée précédemment. Vingt-sept individus ont participé à l'étude en réalisant des tâches en HCI après avoir complété le test Axon. Bien qu'Axon se base sur un test clinique validé, il s'agissait d'une version numérisée et légèrement différente du TMT de base, donc les participants ont complété d'autres tests cognitifs existants et validés dans la littérature, afin d'évaluer la validité d'Axon: le TMT original, un test de recherche visuelle et un test de mémoire et d'apprentissage. Les résultats de ces tests cognitifs déjà validés ont été croisés en analyse corrélationnelle avec ceux d'Axon afin de s'assurer de la validité du test. Les participants ont ensuite réalisé des CAPTCHAs, des tâches sélectionnées pour représenter une utilisation typique des technologies de l'information<sup>1</sup> et choisies pour leur qualité à refléter un certain type de capacités cognitives. Nous avons choisi des tâches qui nécessitaient des capacités cognitives alignées avec celles que mesurent Axon et d'autres

---

<sup>1</sup> Ces tâches seront évoquées dans ce manuscrit sous la dénomination de « tâches générales en HCI » ou « tâche TI ».

spécifiquement moins alignées. Les performances sur ces tâches ont ensuite été comparées aux résultats d'Axon en analyse de covariance multivariée à mesures répétées. L'objectif était alors d'évaluer la validité prédictive d'Axon sur les performances sur des tâches générales en HCI (première question de recherche), et si la validité prédictive était plus élevée sur les tâches nécessitant des capacités cognitives alignées avec celles mesurées par Axon (deuxième question de recherche).

## **Organisation du mémoire**

Ce mémoire est construit autour de deux parties majeures.

La première partie qui constitue le second chapitre fournit une revue approfondie de la littérature pertinente sur l'évaluation cognitive en général puis en contexte d'interaction humain-machine. L'objectif de ce chapitre était de présenter les connaissances actuelles en évaluation cognitive, sa relation avec la performance dans différents domaines, ainsi que de la nécessité d'une solution plus pratique pour l'évaluation cognitive en contexte de recherche UX. Entre autres, il présente les connaissances actuelles présentes dans la littérature sur l'oculométrie en tant que méthode permettant d'expliquer les performances en recherche UX.

Le troisième chapitre présente une étude empirique portant sur la relation entre l'évaluation cognitive à l'aide d'Axon et la performance dans les tâches générales en HCI. L'étude évalue également Axon en tant qu'alternative à l'oculométrie pour expliquer les performances en matière d'interface humain-machine. L'article est structuré selon le format d'un article empirique évalué par des pairs et comprend l'introduction, les méthodes, les résultats et la discussion.

## **Contribution personnelle**

Ce mémoire et cette étude ont été réalisés au sein du Tech3lab de HEC Montréal. Afin de mieux comprendre ma contribution à ce projet de recherche, le tableau ci-dessous présente les détails de chaque étape du processus de la recherche ainsi que les pourcentages correspondant à mes contributions personnelles :

<b>Étapes du processus</b>	<b>Contribution</b>
Définition des objectifs et questions de recherche	<p>Définition des objectifs de recherche et identification des lacunes dans la littérature – 95%.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les questions et objectifs de recherche ont été développés et reformulés à l'aide des co-directeurs et de Dr. Jared Boasen.</li> </ul>
Revue de littérature	<p>Rédaction de la revue de littérature pour faire l'état des connaissances sur l'évaluation cognitive, sa relation avec la performance en interaction humain-machine et son rôle potentiel dans la recherche UX – 100%.</p>
Certificat d'éthique	<p>Soumission du formulaire d'éthique et modifications ultérieures – 75%.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'étude s'est inscrite dans la continuité d'un certificat d'éthique déjà développé par l'équipe du Tech3lab.</li> <li>• L'équipe du Tech3lab s'est assuré que les demandes et modifications ultérieures envoyées au CER étaient conformes.</li> </ul>
Conception du design expérimental	<p>Conception du design expérimental et rédaction du protocole expérimental – 100%.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La conception de l'expérience s'est basée sur l'expérience acquise en tant qu'assistant de recherche et à la suite de trois études d'utilisabilité précédant celle du mémoire pour développer le principal stimulus (Application Axon sur iPad).</li> </ul>

Conception et développement des stimuli expérimentaux	<p>Création des stimuli expérimentaux – 100%.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Définition et fabrication des CAPTCHAs au sein de l'outil Qualtrics.</li> <li>• Création d'une plateforme factice d'évaluation d'interfaces web au sein d'un questionnaire Qualtrics.</li> <li>• Paramétrage et mise en place des stimuli sur la plateforme CognitionLab.</li> <li>• Évaluation des CAPTCHAs : collecte auprès de 11 participants pour déterminer les capacités cognitives intervenant dans la réalisation des CAPTCHAs choisis.</li> <li>• Extraction des données et analyse de corrélation intraclass pour valider la fiabilité des résultats d'évaluation.</li> <li>• Mise en place de la salle de collecte, des outils physiologiques et de l'oculomètre.</li> </ul>
Recrutement des participants	<p>Recrutement et gestion des participants – 85%.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rédaction du formulaire de sollicitation (100%).</li> <li>• Recrutement et planification des participants assisté par l'équipe de recherche via la plateforme de recrutement utilisée par le Tech3lab (70%).</li> <li>• Gestion des compensations de participation (100%).</li> </ul>
Prétests et collecte de données	<p>Mise en place et gestion des prétests – 100%.</p> <p>Collecte de données – 100%.</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La collecte et la gestion des outils utilisés s'est fait grâce à l'expérience acquise en tant qu'assistant de recherche au Tech3lab.</li> </ul>
Extraction et transformation des données	<p>Extraction et transformation des données – 100%.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Export des données physiologiques, oculométriques, des questionnaires et des stimuli externes (CognitionLab).</li> <li>• Transformation, nettoyage et formatage des données à des fins d'analyse.</li> </ul>
Analyse des données	<p>Analyses statistiques des données – 90%.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dr. Jared Boasen a aidé en proposant une méthode d'analyse statistique adéquate en rapport avec les données recueillies et les objectifs de recherche.</li> </ul>
Rédaction de l'article	<p>Rédaction de l'article – 100%.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'article a été rédigé et amélioré avec les commentaires et suggestions de ses co-auteurs.</li> </ul>



## Chapitre 2 : Revue de littérature

Cette revue de littérature a pour objectif d'étudier le concept d'évaluation cognitive, les outils de mesure actuels, ainsi que son utilisation dans un contexte d'interaction humain-machine et d'évaluation UX. Pour ce faire, nous avons d'abord défini l'évaluation cognitive et son utilité, puis nous avons mis en évidence les liens entre l'évaluation cognitive et les performances, notamment dans un contexte d'utilisation des technologies de l'information (TI). Enfin, après une revue approfondie des différents outils utilisés actuellement pour évaluer les capacités cognitives dans différents domaines, nous avons exposé l'intérêt de l'évaluation cognitive en contexte d'évaluation UX pour expliquer les différences individuelles et les limites liées aux méthodes actuelles.

Une approche systématique a été utilisée pour effectuer la revue de littérature, en utilisant *Google Scholar* comme base de données, ainsi que *PubMed* dans une moindre mesure, pour approfondir la recherche. Les mots-clés suivants ont été utilisés et combinés pour trouver des articles pertinents : « *cognitive assessment* », « *cognitive abilities* », « *performance* », « *task performance* », « *human-computer interaction* », « *information technology accessibility* », « *neuroatypical* », « *neurodivergent* », « *user experience* ». Les tests cognitifs cités dans la revue de littérature ont tous été cherchés dans les bases de données en utilisant l'intitulé du test cognitif comme mot-clé pour obtenir des informations sur leur fonctionnement, leurs auteurs, leur date de création, et leurs utilisations dans différents domaines, notamment en HCI en combinant la recherche de l'intitulé du test avec « *human-computer interaction* ».

### 1.1 Introduction : Comprendre l'évaluation cognitive

L'évaluation cognitive correspond au processus d'évaluation des capacités cognitives d'un individu, c'est-à-dire les processus mentaux qui lui permettent de percevoir, penser et raisonner. Ces capacités comprennent notamment l'attention, la mémoire, les fonctions exécutives et les fonctions visuospatiales (Lezak et al., 2004; Miyake et Friedman, 2012; Baddeley, 2012).

L'intérêt pour la cognition humaine prend ses racines chez les philosophes de la Grèce antique (Ando, 1971; Beare, 1906), mais les instruments de mesure standardisés n'ont émergé qu'au début des années 1900, avec les prémisses d'échelles de mesure pour évaluer l'intelligence humaine, telles que l'échelle de Binet-Simon en 1905 et 1908 (Binet et Simon, 1948) ou l'échelle d'intelligence de Stanford-Binet en 1916 (Terman, 1916; Scales, 2003). Vers la moitié du XXe siècle, des tests comme le *Wechsler Adult Intelligence Scale* (WAIS) permettent aux cliniciens d'évaluer un éventail de capacités cognitives plus large chez un individu, ce qui permet d'avoir un aperçu plus complet de ses capacités cognitives (Wechsler, 1955). Dans les années 1970, des batteries de tests ont été développées, comme la *Halstead-Reitan Neuropsychological Battery* (Filskov et Goldstein, 1974), pour évaluer l'état du fonctionnement du cerveau et détecter des lésions cérébrales.

L'évaluation cognitive est aujourd'hui beaucoup utilisée en environnement clinique pour diagnostiquer et surveiller les troubles cognitifs associés à des maladies neurologiques telles que la maladie d'Alzheimer, les accidents vasculaires cérébraux ou les lésions cérébrales traumatiques (Petersen et al., 2001; Mikadze et al., 2019; Ardila et al., 2000). Elle est aussi utilisée dans le domaine académique et professionnel, afin d'évaluer les fonctions cognitives des individus, notamment par rapport à leur performance (Kuncel et al., 2004; Rohde et Thompson, 2007; Pulakos et al., 2002; Robertson et Smith, 2001).

Récemment, de nouvelles méthodes d'évaluation cognitives informatisées permettent d'obtenir des évaluations standardisées, précises et objectives des capacités cognitives (Wild et al., 2008; Doniger et al., 2006; Zygouris et Tsolaki, 2015). Par exemple, le *Computer-Administered Neuropsychological Screen for mild cognitive impairments* (CANS-MCI; Tornatore et al., 2005), le MicroCog (Elwood, 2001) ou le *Cambridge Neuropsychological Test Automated Battery* (CANTAB; Sahakian et Owen, 1992) permettent d'évaluer relativement rapidement les capacités cognitives d'un individu afin de détecter de potentielles déficiences cognitives de manière précoce.

Aujourd'hui, l'évaluation cognitive tend à s'élargir à de plus en plus de domaines, pas nécessairement cliniques. Outre l'éducation et le monde du travail, l'impact des capacités

cognitives sur le comportement et la performance intéresse d'autres domaines, comme le sport, ou encore l'interaction humain-machine (HCI). En effet, de plus en plus d'aspects de la vie quotidienne impliquent l'utilisation des technologies de l'information (TI), et de nombreux travaux ont démontré l'importance des capacités cognitives dans des tâches liées à cette utilisation (Helander, 2014). Dès lors, la question de l'expérience utilisateur (UX) se pose, dans le rôle que joue les capacités cognitives des utilisateurs dans leur compréhension des interfaces, de leurs comportements et de leur performance avec les TI, notamment dans des domaines comme l'accessibilité des technologies de l'information, en prenant en compte des utilisateurs pourvus de fonctionnements neurologiques particuliers, tels que les utilisateurs neuro-atypiques (ou neurodivergents). En prenant en compte les différences cognitives individuelles des utilisateurs, des études ont déjà été faites pour relier certaines fonctions cognitives à l'utilisabilité de certaines interfaces (Allen, 1994; Karahoca et al., 2008) et d'autres ont exploré l'utilisation d'interfaces par des utilisateurs neuro-atypiques pour comprendre les besoins particuliers de cette communauté (Zolyomi et Snyder, 2021; Demmans Epp et al., 2016).

Dans cette revue de littérature, nous avons exploré ces sujets de manière plus approfondie, en commençant par les liens entre les capacités cognitives et la performance de manière générale. Nous nous sommes ensuite intéressés spécifiquement aux impacts que les capacités cognitives ont sur la performance en contexte de HCI. Ensuite, nous avons passé en revue certains outils d'évaluations cognitives existants. Enfin, nous avons examiné l'intérêt de l'évaluation cognitive dans un contexte d'évaluation en expérience utilisateur (UX), en le mettant en parallèle d'autres méthodes pour expliquer les performances telles que l'oculométrie. Nous avons enfin présenté les limites actuelles associées aux méthodes actuelles d'évaluation cognitives et des opportunités de recherche pour développer des méthodes plus pratiques et polyvalentes. Dans les sections suivantes, nous avons approfondi chacun de ces sujets, en nous appuyant sur les recherches existantes pour fournir un aperçu complet de l'état actuel des connaissances dans ce domaine.

## 1.2 Liens entre les capacités cognitives et la performance

*Exemples de liens établis dans la littérature entre fonctions cognitives et performance*

De nombreuses recherches ont été menées sur les liens entre les différentes capacités cognitives et les divers aspects de la performance. En effet, ce sujet a fait l'objet d'études approfondies dans plusieurs domaines, notamment en psychologie cognitive, en neuropsychologie et en psychologie de l'éducation. Des chercheurs ont par exemple établi que la mémoire de travail, le contrôle de l'attention et les fonctions exécutives comme le contrôle inhibiteur étaient toutes des fonctions cognitives importantes pour le succès académique chez les enfants et les adultes, particulièrement dans des tâches qui exigent une attention soutenue, une bonne mémoire de travail et de la flexibilité cognitive (Blair et Razza, 2007; Gathercole et Alloway, 2008; Diamond, 2013). Pour expliquer ces liens, nous prendrons quelques exemples de fonctions cognitives qui ont été liées à la performance dans la littérature, à savoir la mémoire de travail, l'attention, la vitesse de traitement et les capacités visuospatiales.

Tout d'abord, la recherche a montré que les individus ayant une plus grande capacité de mémoire de travail, qui correspond à la capacité à retenir temporairement et à manipuler l'information dans l'esprit afin d'accomplir une tâche (Baddeley et Hitch, 1974), performent mieux sur des tâches qui demandent de la rétention et de la manipulation d'information, comme l'arithmétique et la compréhension écrite (Conway et al., 2002; Engle et al., 1992; Daneman et Carpenter, 1980).

Ensuite, des études ont montré que le contrôle de l'attention visuelle, qui correspond à la capacité à se concentrer de manière sélective sur une information en ignorant les distractions (Egeth et Yantis, 1997), est relié aux performances sur des tâches qui nécessitent une concentration soutenue et des changements rapides de l'attention, comme lors de la conduite ou la pratique d'un sport (Mackworth, 1948; Williams et Leffingwell., 2002).

Aussi, il a été établi que les personnes qui ont une vitesse de traitement élevée, qui correspond à la capacité à traiter rapidement et avec précision des informations (Wickens et Carswell, 2021), ont plus tendance à réussir des tâches qui nécessitent un traitement rapide et efficace de l'information, comme dans des examens chronométrés ou des

professions qui demandent des réactions rapides (Salthouse, 1996; Schmiedek et al., 2007).

Enfin, il a été démontré que les capacités visuospatiales, qui correspondent aux capacités cognitives de comprendre et de manipuler mentalement les relations spatiales entre les objets et les formes d'un environnement (Lohman, 2013), jouaient un rôle majeur dans la réussite professionnelle dans les domaines où la capacité de visualisation spatiale est nécessaire, comme en ingénierie, en architecture et en design, et plus globalement dans les disciplines STIM (science, technologie, ingénierie et mathématiques); (Sorby, 2009; Wai et al., 2009).

### ***Mesurer les capacités cognitives pour prédire la performance***

Afin d'étudier les liens entre les capacités cognitives et la performance, les chercheurs ont utilisé différents outils d'évaluation cognitive. Il existe différents moyens de mesurer les capacités cognitives, des tests standardisés aux tests destinés à mesurer des fonctions beaucoup plus spécifiques.

Les tests standardisés comme les tests de quotient intellectuel (QI) du WAIS (Wechsler, 1955) donnent un aperçu global des capacités cognitives d'un individu et sont souvent utilisés en contexte académique ou professionnel pour prédire les performances. En effet, des études sur le concept encore évasif de l'intelligence ont démontré que les scores de QI avaient une corrélation positive significative avec le succès scolaire, la performance professionnelle et le revenu (Gottfredson, 1997; Strenze, 2007). Les tests neuropsychologiques sont quant à eux utilisés d'une autre manière, car leur objectif est de détecter les troubles associés aux lésions cérébrales ou aux dysfonctionnements du cerveau. Ces tests proposent alors une mesure des capacités cognitives pour identifier de potentielles déficiences à des fins de diagnostic et pour suivre leur évolution dans le temps. Par exemple, des batteries de tests neuropsychologiques comme le *Halstead-Reitan Neuropsychological Battery* (Filskov et Goldstein, 1974), le *Luria-Nebraska Neuropsychological Battery* (Golden et al., 1981), ou des tests plus courts comme le *Mini-Mental State Examination* (Folstein et al., 1983), ou le *Cognitive ability screening instrument* (Teng et al., 1994) ont été utilisés pour mesurer les capacités cognitives des

individus ayant eu des accidents vasculaires cérébraux, des lésions cérébrales traumatiques ou souffrant de la maladie d’Alzheimer (Petersen et al., 2001; Mikadze et al., 2019; Ardila et al., 2000).

Outre les batteries de tests standardisées, les capacités cognitives ont aussi été évaluées pour prédire la performance dans des contextes qui demandaient spécifiquement un type de capacité cognitive. Par exemple, dans le sport, il a été démontré que des tests d’attention visuelle, de capacités visuospatiales et de temps de réaction étaient prédictifs de la performance dans divers sports (Vickers, 2007; Williams et al., 2011). Il a aussi été établi que certaines capacités cognitives étaient bénéfiques à la performance dans des domaines créatifs : des études ont démontré que la capacité de mémoire de travail était positivement corrélée à la fluidité créative. De plus, il a été démontré que pendant l’improvisation musicale, les individus hautement créatifs bénéficiaient de leurs capacités d’attention soutenue et de contrôle exécutif (De Dreu et al., 2012).

Cependant, il est important de mentionner que la relation entre les capacités cognitives et le comportement humain peut aussi être bidirectionnelle. En effet, si les capacités cognitives ont été reconnues comme des facteurs d’influence sur la performance, il a également été démontré que certaines activités peuvent aussi influencer les capacités cognitives et donc la performance cognitive d’un individu. Par exemple, les travaux de Schellenberg ont permis de constater que la pratique d’un instrument de musique améliore les capacités cognitives (Schellenberg, 2004, 2005, 2006, 2012; Schellenberg et Weiss, 2013). Spécifiquement, il a été constaté que des enfants ayant écouté une sonate de Mozart (K.448) ont vu leurs capacités visuospatiales et leurs résultats à des tests de vitesse de traitement améliorés (Schellenberg, 2012), en se basant sur ce qui a été défini comme « l’effet Mozart » par Rauscher et al. (1993), qui affirmait que les individus ayant écouté cette sonate voyaient leurs capacités de raisonnement spatial améliorées. Ces résultats suggèrent que certaines activités peuvent être utilisées pour améliorer les capacités cognitives. Un exemple très parlant de cette relation bidirectionnelle entre les capacités cognitives et la performance est le jeu d'échecs. En effet, le jeu d'échecs est un jeu complexe qui requiert des capacités cognitives et en 2016, Burgoyne a démontré que les compétences au jeu d'échecs avaient une corrélation positive avec le raisonnement fluide,

la compréhension-connaissance, la mémoire à court terme et la vitesse de traitement. D'autres études ont démontré que jouer aux échecs permettait d'améliorer les capacités cognitives, notamment sur de la résolution de problèmes mathématiques (Kazemi et Yektayar, 2012).

Dans l'ensemble, les études réalisées dans différents domaines suggèrent que l'évaluation cognitive peut être un outil utile pour prédire la performance. En effet, en évaluant les capacités cognitives d'un individu, il peut être possible d'identifier les domaines où il est susceptible d'exceller et les domaines où il pourrait avoir besoin de plus de soutien. Cependant, il est important de rappeler que les capacités cognitives ne sont qu'un facteur qui contribue à la performance et que d'autres facteurs tels que la motivation, la personnalité et les facteurs environnementaux jouent également un rôle (Chamorro-Premuzic et Furnham, 2003; Duckworth et Seligman, 2005; McClelland, 1987; Bandura, 1986).

### **1.3 Liens entre les capacités cognitives et les performances TI/HCI**

Comme nous venons de le voir, les capacités cognitives ont été mises en relation avec la performance à de nombreuses reprises dans une variété de domaines. Dans cette partie, nous allons nous intéresser principalement aux liens qui ont été faits entre les capacités cognitives et les performances sur des tâches dans le domaine des technologies de l'information (TI). En effet, l'adoption généralisée des TI dans de plus en plus de contextes de la vie quotidienne a suscité un intérêt croissant dans la recherche pour comprendre les relations entre les capacités cognitives et la performance sur des tâches réalisées lors d'une interaction humain-machine (HCI). Les recherches sur ce sujet ont notamment été stimulées par la constatation qu'une utilisation efficace et efficiente des technologies de l'information était devenue une nécessité pour réussir dans de nombreux domaines, comme l'éducation, le monde du travail ou les services de santé (Kay et Lauricella, 2011; Avlonitis et Karayanni, 2000; Patel et Kushniruk, 1998; Topol, 2015, 2019). La recherche s'est donc d'abord concentrée sur l'identification des différentes fonctions cognitives qui interviennent et sont particulièrement importantes lors d'une interaction avec les TI. Cette nécessité évoque notamment les inégalités éprouvées par

des utilisateurs neuro-atypiques, qui n'ont pas forcément le même fonctionnement cognitif et qui sont souvent peu considérés dans la conception d'interfaces utilisateurs (Zolyomi et Snyder, 2021; Demmans Epp et al., 2016). En effet, le domaine de l'accessibilité des technologies de l'information s'est beaucoup concentré sur les handicaps physiques comme les déficiences visuelles ou motrices (Sears et Hanson, 2011; Fichten et al., 2009; Lazar, 2002), laissant les différences cognitives d'une certaine partie des utilisateurs peu considérés.

### ***Les capacités cognitives importantes intervenant lors des tâches en TI***

Dès leur apparition, les TI se sont mises à transposer des tâches de la vie quotidienne sur des écrans d'ordinateur. Par exemple, la lecture, en tant que l'une des compétences de langage les plus basiques, fait partie intégrante d'une interaction avec des TI. Johann et al. (2020) ont exploré le rôle individuel de différentes capacités cognitives dans la compréhension et la vitesse de lecture chez les enfants. Ils ont démontré que les fonctions exécutives telles que la mémoire de travail et l'inhibition étaient liées à la vitesse de lecture. Ils ont aussi démontré que la flexibilité cognitive (capacité de changer de tâche) jouait un rôle dans la compréhension de lecture. Les auteurs ayant utilisé des tests de lecture informatisés, nous pouvons confirmer la validité de ces résultats pour démontrer l'impact de ces capacités cognitives sur les compétences de lecture sur un écran d'ordinateur. D'autres études ont établi un lien entre les capacités de mémoire de travail et des tâches TI, notamment en comprenant les erreurs que font les utilisateurs (Anderson et Jeffries, 1985; Byrne, 1996).

La recherche d'informations en ligne est une tâche basique lors de l'utilisation d'un ordinateur. Il a été démontré que la recherche d'informations en ligne nécessite des capacités cognitives comme la vitesse de traitement, la capacité de raisonnement et les fonctions exécutives (Sharit et al., 2015; Rahman et al., 2021; Kordovski et al., 2021).

En outre, la capacité cognitive de recherche visuelle joue un rôle majeur dans beaucoup de tâches en HCI (Halverson et Hornof, 2011). En effet, que ce soit pour chercher dans les résultats d'un moteur de recherche (Tseng et Howes, 2008), chercher une icône (Kieras et Hornof, 2014; Fleetwood et Byrne, 2006), ou chercher une information sur un site web

(Nakarada-Kordic et Lobb, 2005), la recherche visuelle est commune à beaucoup d'activités basiques dans un contexte dHCI. Des études ont exploré les capacités cognitives qui rentrent en jeu lors de la recherche visuelle : il a été établi que la recherche visuelle était liée à la capacité de contrôle de l'attention (Eimer, 2014; Theeuwes et Burger, 1998; Hwang et al., 2009) et différents types de mémoire de travail, comme la mémoire de travail spatiale, ou la mémoire de fixation (Halverson et Hornof, 2011; Kieras, 2011).

Les jeux vidéo sont constitutifs d'une plateforme adéquate pour observer l'impact des capacités cognitives sur des tâches TI. En effet, les jeux vidéos n'ont jamais été aussi présents, bien que leur utilisation et leur impact sur la vie quotidienne soient beaucoup critiqués (Anderson et Bushman, 2001; Ferguson, 2007). Il a cependant été démontré que les jeux vidéos ont un nombre importants d'effets sur le bien-être et d'autres avantages psychosociaux (Granic et al., 2014; Halbrook et al., 2019). La littérature s'est donc intéressée à la relation qu'ont les jeux vidéos avec notre cerveau. Il existe différentes catégories et genres de jeux vidéos, les rendant très hétérogènes. Nous ne pouvons donc pas associer des capacités cognitives spécifiques pour le concept général des jeux vidéos. Cependant, il a été démontré que certaines capacités comme la flexibilité cognitive étaient liées aux performances dans des jeux de tir à la première personne (Colzato et al., 2010), et que la mémoire de travail et l'intelligence fluide jouaient un rôle dans la performance sur des jeux occasionnels (Baniqued et al., 2013). Ajoutant de la compétition aux jeux vidéos, la performance dans le sport électronique a aussi été mise en relation avec les capacités cognitives, certaines études soulignant l'importance des capacités d'attention, de changement de tâche, de traitement de l'information et de mémoire dans la performance sur des jeux vidéos d'action (Toth et al., 2020). Cependant, le lien entre les capacités cognitives et la pratique du jeu vidéo reste pour l'instant un débat dans la littérature, des études ayant démontré au contraire que les capacités cognitives n'avaient aucun impact sur la performance dans des jeux vidéo variés (Unsworth et al., 2015). De nombreuses études ont aussi été réalisées pour explorer le potentiel d'augmentation des capacités cognitives avec la pratique de jeux vidéo (Green et Bavelier, 2015; Dobrowolski et al., 2015), certaines études ayant démontré des résultats améliorés à des tests d'attention soutenue et de mémoire de travail après avoir joué aux jeux vidéos (Mishra et al., 2012;

Anguera et Gazzaley, 2015), mais d'autres n'ayant au contraire démontré que des effets mixtes ou aucune amélioration des capacités cognitives après la pratique de jeux vidéos (Baniqued et al., 2014; Unsworth et al., 2015). Ces débats semblent être dus au manque de recul sur la recherche et au manque d'homogénéité des jeux vidéos qui rend difficile l'étiquetage de certaines capacités cognitives sur la pratique des jeux vidéos (Sobczyk et al., 2015).

Une autre activité en essor en contexte dHCI est linteraction avec un environnement en réalité virtuelle (RV) ou augmentée (RA). Cette interaction constitue une tâche HCI qui devient de plus en plus importante à maîtriser avec les avancées dans la recherche sur ces sujets et son utilisation croissante dans les technologies de tous les jours (Farshid et al., 2018). Plusieurs études ont montré que les capacités visuospatiales étaient liées à linteraction en RV ou en RA, et qu'il était possible pour un individu d'améliorer ses capacités à travers de l entraînement en RV (Bogomolova et al., 2020; Dünser et al., 2006; Rafi et al., 2005; González et al., 2005).

### ***Le rôle des modèles d'architecture cognitive***

Le développement des modèles d'architecture cognitive a été d'une précieuse aide pour cibler les capacités cognitives intervenant en HCI. En effet, la volonté d'améliorer la qualité et l'utilisabilité des interfaces s'est faite dès les années 1970, en appliquant les connaissances de la psychologie directement dans leur conception, via la création et l'utilisation de modèles d'architecture cognitive (Wherry, 1976; Card et al., 1983; Card, 2018; Olson et Olson, 1995; Kieras et al., 1995, Kieras et Meyer, 1995). Ces modèles étaient utilisés comme des alternatives aux traditionnels tests utilisateur : ils étaient alors conçus pour tester l'interface en simulant les processus cognitifs humains via un ensemble de composants copiant la cognition humaine (Ritter and Young, 2001). Le développement de ces modèles s'inscrit dans une vision technique de la conception d'interfaces, en utilisant un modèle cognitif en utilisateur de substitution (Ritter et Young, 2001). Bien que beaucoup de modèles d'architecture cognitive aient été développés, nous avons décidé de présenter de manière plus approfondie le modèle EPIC (*Executive Process-Interactive Control*). Ce modèle a été développé par Kieras et Meyer (1997) et a été conçu pour correspondre à un contexte HCI, grâce à sa nature particulièrement adaptée dans la

modélisation de performances humaines multimodales et multitâches (Kieras et Meyer, 1997). D'après Kieras et Meyer (1997), ce modèle constitue un cadre théorique pour comprendre les processus cognitifs impliqués dans le comportement et la performance sur des tâches interactives. Le modèle EPIC propose que le système cognitif puisse être représenté comme un ensemble de modules responsables de différents aspects du traitement de l'information, comme les capacités de perception, la mémoire de travail et les processus moteurs, mais aussi un ensemble de processus de contrôle exécutif qui permet au modèle de coordonner les activités des différents modules pour atteindre un objectif. Ce modèle permet entre autres de simuler les traitements visuels, oculomoteurs et cognitifs nécessaires à une tâche, pour ensuite prédire la performance d'un humain. Dans l'ensemble, le modèle EPIC offre un cadre permettant de comprendre comment les capacités cognitives sont structurées et contrôlées lors de la performance sur des tâches interactives. Il a notamment été utilisé pour orienter la conception de systèmes d'information et pour comprendre quelles capacités cognitives étaient exigées de diverses tâches, y compris celles dans un contexte HCI (Kieras et Meyer, 1997; Byrne, 2001, 2007). Dans le contexte de notre recherche, les modèles d'architecture cognitive restent limités, notamment à cause de leur capacité à tenir compte des différences individuelles dans un contexte réel. Cependant, leur développement a permis de fournir un cadre théorique pour comprendre la relation entre la cognition humaine et les performances en contexte HCI. C'est pourquoi nous pouvons tirer grandement parti des avancements dans la recherche sur les modèles d'architecture cognitive, ce qui aidera parallèlement les avancées en recherche UX.

## **1.4 Outils de mesure de l'évaluation cognitive pour prédire la performance**

Nous avons pu voir que les capacités cognitives avaient un impact significatif sur les performances dans le comportement humain dans de multiples domaines, mais aussi lors des interactions avec les technologies de l'information. Afin d'obtenir des informations sur cette relation, les chercheurs ont mis au point un certain nombre d'outils afin de mesurer les capacités cognitives des individus.

La recherche en psychologie cognitive et en neuropsychologie a permis le développement de nombreux tests cognitifs. Un grand nombre de revues de littérature et de méta-analyses ont déjà été réalisées pour aider les cliniciens, en listant les différents tests cognitifs disponibles pour détecter des troubles, des dysfonctionnements cognitifs ou de la démence (Velayudhan et al., 2014; Cullen et al., 2007; Tsoi et al., 2015; Wild et al., 2008). Ainsi, après la revue approfondie de la littérature sur l'évaluation cognitive, son intérêt et son utilisation, nous dressons ici une sélection des dix tests cognitifs les plus pertinents pour prédire la performance dans divers domaines (principalement TI) ou les plus communément utilisés en neuropsychologie et psychologie cognitive. Cette liste non exhaustive est présentée dans le tableau 1, avec les fonctions cognitives testées correspondantes.

Nom du test	Capacités cognitives mesurées	Auteur(s)
<i>Wechsler Adult Intelligence Scale (WAIS-IV)</i>	Intelligence générale, flexibilité cognitive, mémoire de travail, vitesse de traitement, capacités visuospatiales et fonctions exécutives	Wechsler, 1955
<i>Wechsler Memory Scale (WMS)</i>	Mémoire verbale et visuelle, mémoire de travail	Wechsler, 1945
<i>Mini-Mental State Examination (MMSE)</i>	Orientation, attention, mémoire, langage et capacités visuospatiales	Folstein et al., 1975
<i>Montreal Cognitive Assessment (MoCA)</i>	Attention, mémoire, langage, capacités visuospatiales et fonctions exécutives	Nasreddine et al., 1996
<i>Stroop Color and Word Test (SCWT)</i>	Inhibition, attention, vitesse de traitement, flexibilité cognitive et mémoire de travail	Stroop, 1935
<i>Trail Making Test (TMT)</i>	Capacités visuospatiales, vitesse de traitement, mémoire de travail, flexibilité cognitive et fonctions exécutives	Reitan, 1955
<i>Wisconsin Card Sorting Test (WCST)</i>	Flexibilité cognitive, mémoire de travail et fonctions exécutives	Berg, 1948
<i>Symbol Digit Modalities Test (SDMT)</i>	Vitesse psychomotrice, vitesse de traitement, attention, mémoire de travail et capacités visuospatiales	Smith, 1973
<i>Groton Maze Learning Test (GMLT)</i>	Mémoire visuospatiale et fonctions exécutives	Snyder et al., 2005
<i>N-back task</i>	Mémoire de travail	Kirchner, 1958

Tableau 1 – Liste de dix tests cognitifs ou batteries de tests cognitifs les plus utilisés en neuropsychologie ou en HCI

Le *Wechsler Adult Intelligence Test* (WAIS) est un outil d'évaluation cognitive conçu pour mesurer l'intelligence générale et les capacités cognitives d'un adulte de plus de 16 ans (Wechsler, 1955). Ce test mesure le fonctionnement intellectuel, ce qui comprend le raisonnement verbal, analogique, séquentiel et quantitatif, ainsi que la mémoire de travail et la vitesse de traitement psychomotrice (Climie et Rostad, 2011). Le test doit être administré de manière individuelle par un professionnel qualifié et consiste en une série de tâches qui évaluent différents aspects du fonctionnement cognitif (Wechsler, 2008). Le WAIS-IV correspond à la quatrième édition du test (Wechsler, 2008), et est actuellement la version la plus couramment utilisée. Cette version a été mise à jour pour inclure des normes plus récentes et pour améliorer les procédures utilisées pour administrer le test. Elle inclut aussi deux nouvelles mesures de traitement visuel et de raisonnement fluide (Weiss et al., 2010). Il s'agit d'un test largement utilisé dans des contextes cliniques et éducationnels pour mesurer les forces et faiblesses cognitives des individus (Wechsler, 1955). Les résultats du WAIS peuvent fournir des informations importantes sur la performance intellectuelle, pour des objectifs à des fins diverses, telles que le diagnostic de la déficience intellectuelle, l'évaluation du déclin cognitif et l'identification de la douance. Le WAIS évalue notamment l'intelligence générale à travers un score composite appelé le quotient intellectuel (QI), une mesure qui fait l'objet d'un débat sur sa relation avec la performance, notamment à l'école ou au travail, certains facteurs ayant été démontrés comme plus prédictifs que le QI (Duckworth et Seligman, 2005; Zax et Rees, 2002; Heaven et Ciarrochi, 2012).

Le *Wechsler Memory Scale* (WMS) est une batterie de tests neuropsychologiques conçue pour mesurer divers aspects de la mémoire, à savoir la mémoire de travail, la mémoire visuelle et auditive (Wechsler, 1945; Prigatano, 1978). Elle est utilisée en contexte clinique et en recherche pour évaluer les différents aspects de la mémoire chez des personnes souffrant de troubles neurologiques ou psychiatriques. Elle a également été utilisée pour prédire les performances dans diverses tâches cognitives, y compris celles impliquant une interaction humain-machine (Frangou, 2016; Dagum, 2018).

Le *Mini-Mental State Examination* (MMSE) est un test cognitif couramment utilisé pour mesurer rapidement certaines capacités cognitives chez les individus, notamment pour

dépister les troubles cognitifs comme la démence dans les contextes cliniques et de recherche (Nasreddine et al., 2005). D'abord développé par Folstein et al. en 1975, il a été utilisé depuis pour mesurer différentes capacités cognitives comme l'orientation, l'attention, la mémoire, le langage et les capacités visuospatiales (Tombaugh et McIntyre, 1992). Il a aussi utilisé dans la recherche en HCI, par exemple dans une étude sur les dispositifs de saisie à l'ordinateur avec des personnes âgées, où les sujets devaient réaliser le MMSE puis réaliser des tâches courantes en HCI. L'étude a démontré que les résultats du MMSE (en plus de deux autres tests psychométriques) étaient de bons prédicteurs de performance sur les tâches (Mahmud et Kurniawan, 2005).

Le *Montreal Cognitive Assessment* (MoCA) consiste en une série de tâches et de questions conçues pour évaluer différents aspects des fonctions cognitives, notamment l'attention, la mémoire, le langage, les capacités visuospatiales et les fonctions exécutives (Nasreddine et al., 2005). Ce test a été développé sur la base du MMSE. Il est de plus en plus populaire pour mesurer les capacités cognitives, car il est rapide et représente selon certains auteurs une alternative plus complète au MMSE, car il inclut entre autres des tâches qui mesurent les fonctions exécutives et des problèmes visuospatiaux plus complexes, ce qui en fait un meilleur outil que le MMSE pour la détection des troubles cognitifs légers (Ciesielska et al., 2016; Aggarwal et Kean, 2010; Dong et al., 2010). Le MoCA est souvent utilisé dans des études pour distinguer les participants selon leur niveau cognitif (Lahav et Katz, 2020), ce qui peut lui permettre d'être inclus dans une grande variété de champs d'études. Il a aussi été utilisé en HCI, par exemple pour étudier la performance dans des tâches en réalité virtuelle en fonction des capacités cognitives, mesurées par le MoCA (Oliveira et al., 2018), mais aussi dans une étude explorant l'association entre les capacités cognitives des utilisateurs avec l'utilisabilité d'une interface, où les capacités cognitives étaient mesurées par le MoCA (Martins et al., 2022).

Le *Stroop Color and Word Test* (SCWT) est utilisé pour mesurer la capacité à inhiber les interférences cognitives (Scarpina et Tagini, 2017). Ce test consiste à nommer la couleur de mots concordants (par exemple, le mot "bleu" écrit à l'encre bleue) ou non concordants (par exemple, le mot "bleu" écrit à l'encre rouge) aussi rapidement et précisément que possible. La condition de non-concordance exige un effort cognitif supplémentaire pour

inhiber la réponse automatique de la lecture du mot, ce qui en fait une mesure de la flexibilité cognitive et du contrôle inhibiteur (Scarpina et Tagini, 2017). De plus, la littérature a montré sa capacité à mesurer d'autres fonctions cognitives telles que l'attention, la vitesse de traitement, la flexibilité cognitive (Jensen et Rohwer, 1966) et la mémoire de travail (Kane et Engle, 2003). Il est donc possible d'utiliser le SCWT pour mesurer plusieurs fonctions cognitives. Outre son utilité diagnostique pour détecter des dysfonctionnements du cerveau, il a été démontré qu'il pouvait aussi évaluer le stress (Golden et Freshwater, 1978). Il a été utilisé dans la recherche HCI pour mesurer le stress de façon non invasive en contexte d'utilisation des TI (Zhai et al., 2005; Zhai et Barreto, 2006; Barreto et al., 2007), par exemple dans des environnements en réalité virtuelle particulièrement stressants (Poguntke et al., 2019).

Le *Trail Making Test* (TMT) est l'un des instruments les plus fréquemment utilisés dans l'évaluation neuropsychologique en tant qu'indicateur de la vitesse de traitement cognitif et du fonctionnement exécutif (Lezak et al., 1995 ; Mitrushina et al., 2005 ; Reitan et Wolfson, 2004; Strauss et al., 2006; Sanchez-Cubillo et al., 2009). C'est un test cognitif en deux étapes : dans la partie A, le sujet doit relier des points numérotés dans l'ordre croissant le plus rapidement possible, ce qui permet de mesurer les capacités visuoperceptuelles (Sanchez-Cubillo et al., 2009). Dans la partie B, le sujet doit relier des points dans l'ordre croissant en alternant les chiffres et les lettres, ce qui permet de mesurer la mémoire de travail et la flexibilité cognitive (Sanchez-Cubillo et al., 2009; Crowe, 1998). Il a aussi été de nombreuses fois relié aux capacités psychomotrices (Groff et Hubble, 1981; Schear et Sato, 1989; Gaudino et al., 1995; Crowe, 1998). Ce test est généralement utilisé pour évaluer les fonctions cognitives des personnes souffrant de troubles cognitifs légers ou de troubles neurologiques liés à des lésions cérébrales traumatiques, à la sclérose en plaques ou à la démence (Periáñez, 2007; Papathanasiou et al., 2014; Ashendorf, 2008). Il a également été utilisé pour évaluer les fonctions cognitives chez des personnes en bonne santé et pour suivre l'évolution des fonctions cognitives au fil du temps (Hamdan et Hamdan, 2009).

Le *Wisconsin Card Sorting Test* (WCST) est un des tests les plus couramment utilisés pour mesurer la flexibilité cognitive (Hommel et al., 2022; Grant et Berg, 1993). Il est

établi que ce test permet de mesurer les fonctions exécutives liées au cortex préfrontal (Anderson et al., 1991; Nyhus et Barceló, 2009; Konishi et al., 1999). Pendant le WCST, les sujets doivent déplacer leur attention d'un critère de tri à l'autre, en fonction de la rétroaction qu'ils reçoivent après chaque tentative de tri des cartes. Cela exige que le sujet engage sa capacité à résoudre des problèmes, son contrôle inhibiteur, sa mémoire de travail et transfère son attention, ce qui rejoint les fonctions cognitives importantes liées à la flexibilité cognitive (Konishi et al., 1999; Monchi et al., 2001; Miyake et al., 2000). Ce test est notamment célèbre pour sa capacité à mesurer la persévérance et la rigidité mentale (Jevremovic et al., 2018). Il a été utilisé dans une étude explorant le potentiel de l'évaluation neuropsychologique en tant que prédicteur de la réhabilitation cognitive par ordinateur (Arsić et al., 2020).

Le *Symbol Digit Modalities Test* (SDMT) est un test cognitif fréquemment utilisé pour mesurer la vitesse psychomotrice et la vitesse de traitement (Ebaid et al., 2017). Il s'agit d'un test papier-crayon qui demande à l'individu de substituer des chiffres à des symboles abstraits à l'aide d'une clé de référence (Ryan et al., 2020; Smith, 1968). Il est également établi que les performances sont influencées par l'attention, le balayage et le suivi visuels (les capacités visuospatiales), et la mémoire de travail (Lezak et al., 2004; Schear et Sato, 1989). C'est un test souvent utilisé dans des batteries neuropsychologiques pour sa capacité à détecter des troubles neuropsychiatriques et neurologiques (Langdon et al., 2012; Sheridan et al., 2006), mais il a aussi été utilisé pour étudier la performance en HCI, comme Wong et al. (2004), qui l'ont utilisé parmi d'autres tests neuropsychologiques pour étudier la relation entre des capacités cognitives (le balayage visuel spécifiquement) et les performances sur des tâches en TI avec des individus souffrant d'un retard mental.

Le *Groton Maze Learning Test* (GMLT) est un test cognitif qui permet de mesurer la vitesse de traitement visuomotrice, la mémoire de travail spatiale et la capacité de contrôle des erreurs (Pietrzak et al., 2008; Papp et al., 2011). Il consiste en une grille de 10x10 cases présentées sur un écran tactile. Le sujet doit compléter un labyrinthe en suivant un chemin caché à travers la grille depuis un point de départ jusqu'à un point d'arrivée. Le sujet a cinq essais totaux et pour chaque essai, il doit explorer en réalisant des erreurs pour trouver le chemin jusqu'à l'arrivée (Pietrzak et al., 2007). Ce test a été utilisé pour étudier

la relation entre les fonctions exécutives et la vitesse de traitement d'enfants ayant un trouble de déficit de l'attention (Snyder et al., 2008).

La tâche *n-back* est devenue une tâche standard pour mesurer la mémoire de travail en neuroscience cognitive (Kane et al., 2007). Cette tâche demande aux sujets de décider si chaque stimulus d'une séquence correspond à celui qui est apparu « n » fois auparavant, ce qui nécessite de faire appel à la mémoire de travail et au contrôle de l'attention (Kane et al., 2007). Cette tâche est fréquemment utilisée pour mesurer la mémoire de travail en HCI, notamment lorsque les chercheurs s'intéressent à la charge de travail cognitive lors d'interactions avec des systèmes d'information (Gevins et Smith, 2003; Wang et al., 2015, Herff et al., 2014; Brouwer et al., 2012).

## **1.5 L'évaluation cognitive en contexte d'évaluation UX (potentiel et limites)**

Comme nous avons pu le voir précédemment, la littérature a permis de démontrer que les capacités cognitives ont une importance dans une grande variété de domaines en HCI. Les récentes avancées dans la littérature TI évoluent de plus en plus vers l'amélioration des technologies en suivant une philosophie centrée sur l'utilisateur et son expérience pendant l'interaction avec les TI. La recherche UX consiste à comprendre comment les utilisateurs interagissent avec les produits ou services numériques : le comportement des utilisateurs joue donc un rôle crucial dans cette interaction. Comprendre ce comportement est donc une nécessité pour concevoir des interfaces qui répondent aux besoins et préférences des utilisateurs. La recherche utilisateur permet alors de trouver les points de friction et d'améliorer l'expérience des utilisateurs (Hassenzahl et Tractinsky, 2006). De nombreuses méthodes sont utilisées pour atteindre ce but : l'évaluation UX via les tests utilisateurs fait partie des principales utilisées. Dans cette dernière partie, nous avons d'abord exploré l'une des méthodes les plus utilisées pour comprendre le comportement des utilisateurs et expliquer leurs performances, à savoir l'oculométrie. Enfin, nous avons présenté les intérêts qu'auraient les chercheurs UX à connaître les capacités cognitives de leurs utilisateurs, associés aux limites des méthodes actuelles pour mesurer les capacités

cognitives en recherche UX, avec ce besoin de développer des outils d'évaluation cognitive plus pratiques et rapides.

### ***L'oculométrie pour expliquer les performances TI en UX***

Un corps encore marginal de la recherche en systèmes d'information s'est intéressé au potentiel et à l'utilisation de l'oculométrie en HCI, notamment dans un contexte d'utilisabilité (Vasseur et al., 2019; Poole et Ball, 2006; Majaranta et Bulling, 2014). L'oculométrie est une alternative très utilisée en HCI et en expérimentation UX pour comprendre les processus cognitifs des utilisateurs à travers leur comportement visuel. Cette technologie permet au chercheur de connaître l'information qui est traitée visuellement par l'utilisateur à n'importe quel moment dans le temps (Riedl et Léger, 2016). Cela permet ainsi d'expliquer des différences de performance sur des tâches données. En effet, la durée des fixations individuelles et la vitesse des saccades sont deux indicateurs oculométriques largement utilisés pour refléter le traitement cognitif sous-jacent qui sous-tend les interactions technologiques. La durée des fixations individuelles peut refléter l'efficacité de la capacité de traitement de l'information visuelle (Just et Carpenter, 1976; Irwin, 2004) et la vitesse de saccade peut refléter la fonction visuomotrice (Edelman et Keller, 1996). Ensemble, ces mesures permettent donc d'expliquer la rapidité avec laquelle un utilisateur est capable de parcourir et de comprendre une interface. Toutefois, le comportement visuel n'est pas nécessairement le reflet direct des processus cognitifs sous-jacents qui interviennent au cours d'une tâche TI. En effet, le comportement visuel peut également être influencé par les expériences passées, les émotions ou la personnalité (Treisman et Gelade, 1980; Kaspar et König, 2012; Wolfe et Horowitz, 2017). Ainsi, la relation entre les mesures oculométriques et les capacités fonctionnelles cognitives spécifiques est difficile à démêler. De plus, l'oculométrie est une technologie généralement limitée à un usage en laboratoire, complexe à analyser, demandant des coûts et une expertise importante (Chennamma et Yuan, 2013; Lai et al., 2013).

### ***Connaître les capacités cognitives des utilisateurs en contexte UX***

Les chercheurs UX ont tout intérêt à connaître les capacités cognitives de leurs utilisateurs. En effet, les capacités cognitives ayant été établies comme des facteurs importants des différences individuelles (Ackerman, 1988; Gevins et Smith, 2000; Carroll et Maxwell, 1979), nous pensons qu'elles pourraient être cruciales dans l'explication de la variance des résultats entre les performances sur des tâches TI de participants en apparence de profils similaires. En effet, les capacités cognitives ayant été largement liées à l'âge dans la littérature, les chercheurs se basent souvent sur le simple fait que deux utilisateurs d'âge similaires ont des capacités cognitives similaires. Or, deux individus ont souvent des différences de capacités cognitives individuelles, quel que soit leur âge, leur sexe ou leur éducation (Carroll et Maxwell, 1979; Gustafsson et Undheim, 1996). Aujourd'hui, les chercheurs UX ne prennent pas en compte cette disparité de capacités cognitives, car l'intérêt d'avoir cette information n'est pas assez connu, et les moyens actuels de mesurer les capacités cognitives des utilisateurs ne sont pas assez pratiques, car souvent trop longs, complexes et coûteux (Halverson, 2020; Halverson et al., 2021). Par exemple, en 2015, des chercheurs ont mesuré les capacités cognitives de leurs sujets en utilisant le *NIH-EXAMINER*, une batterie de tests cognitifs longue de 60 minutes (Kramer et al., 2014), pour les comparer aux capacités cognitives requises dans une tâche en SI (Dumont et al., 2015). De plus, dans une étude de 2022 qui explorait l'impact des capacités cognitives sur la perception de l'utilisabilité d'une interface, Martins et al. ont mesuré les capacités cognitives de leurs sujets avec le MoCA, un test court, mais qui nécessite une personne qualifiée pour modérer le test, ce qui apporte un degré de complexité en contexte d'expérimentation (Martins et al., 2022).

En outre, les chercheurs UX auraient un intérêt à connaître les capacités cognitives de leurs utilisateurs pour donner aux concepteurs des recommandations plus ciblées, ce qui permettrait de rendre les interfaces plus accessibles et plus utilisables par un large éventail d'utilisateurs, quelles que soient leurs différences de fonctionnement cognitif. Comme nous l'avons évoqué, les utilisateurs neuro-atypiques sont pour l'instant peu considérés dans la conception d'interfaces en TI, ce qui nuit à notre capacité à prendre en compte leurs besoins particuliers. D'un point de vue plus général, l'analyse des différences cognitives entre les utilisateurs pourrait aider les chercheurs à mieux comprendre les obstacles et les défis qui pourraient nuire à l'utilisabilité des TI, notamment à propos des

dimensions d'efficacité, d'efficience et de satisfaction, de capacité d'apprentissage et de gestion des erreurs, qui correspondent aux cinq dimensions principales de l'utilisabilité selon Nielsen (1994).

Un appel a été lancé en 2014 par Bertel afin de joindre les connaissances entre les sciences cognitives et la conception d'interfaces. En effet, l'auteur explique la nécessité de déterminer les mécanismes cognitifs qui sont importants pour chaque type de tâche sur une interface, l'objectif étant à terme de pouvoir adapter une interface en fonction du profil cognitif de l'individu, par exemple dans des contextes d'apprentissage en ligne, où les individus ont des méthodes d'apprentissage différentes (Beckmann, 2014; Felder et Brent, 2005).

Des chercheurs ont développé des méthodes pour identifier les fonctions cognitives associées à des tâches TI spécifiques. Dumont et al. (2015) ont exploré ce sujet en développant une grille d'analyse cognitive permettant de définir les fonctions cognitives requises pour une tâche en systèmes d'information (SI), en se basant sur la théorie originale de la cognition de Baddeley et Hitch (1994) et sur le modèle sur les fonctions exécutives de Miyake et al. (2000). Cependant, pour être utilisée, cette grille doit être mise en comparaison avec le profil cognitif des participants mesuré grâce au *NIH EXAMINER*, une batterie de tests cognitifs de 60 minutes. Dans un contexte d'évaluation UX, la durée d'un test dure entre 30 et 90 minutes, mais ne doit pas dépasser 90 minutes, de l'accueil du participant jusqu'à la fin de l'étude (Lallemand, 2015). En effet, il a aussi été démontré que la durée d'un test utilisateur a un impact sur la qualité et la fiabilité des données et qu'il est recommandable de garder une limite de 90 minutes pour la durée totale du test (Schatz et al., 2012). Une batterie de tests d'une durée de 60 minutes serait donc beaucoup trop longue et peu pratique pour être intégrée à une expérimentation UX. Par conséquent, la plupart des évaluations UX ne prennent pas le temps de mesurer les capacités cognitives de leurs participants, soit par manque de temps, soit par ignorance des bénéfices associés à cette information.

Enfin, des études d'évaluation UX ont cherché à connaître les capacités cognitives de leurs participants, notamment dans la recherche sur les technologies adaptatives et neuro-

adaptatives, pour que la conception des systèmes d'information se nourrisse de l'intelligence artificielle et que ces derniers s'adaptent automatiquement en fonction du profil cognitif de l'utilisateur, afin d'améliorer son expérience (Ji et al., 2018; Andreessen, 2021, Gajos et al., 2010).

## **Conclusion**

En conclusion, nous avons exploré le concept d'évaluation cognitive, les outils de mesure actuels ainsi que les liens entre les capacités cognitives et la performance dans une multitude de domaines. Nous avons fait l'emphase sur le domaine de l'interaction humain-machine : nous avons en effet identifié des lacunes dans les méthodes d'évaluation cognitive actuellement utilisées dans ce domaine. Souvent longues et complexes, les évaluations cognitives se font donc rares dans ce domaine. Il a pourtant été constaté que différencier les capacités cognitives peut être crucial pour prédire la performance sur des tâches en TI et mieux comprendre les besoins particuliers de certains utilisateurs au profil neuro-atypique. Les outils de mesure de l'évaluation cognitive ont donc un rôle important à jouer dans l'accessibilité des interfaces en HCI et les outils actuels sont limités dans leur utilisation en contexte d'évaluation de l'expérience utilisateur. Il existe donc un réel besoin de développer un outil d'évaluation cognitive complet plus rapide et pratique dans un contexte d'évaluation UX.

## Références

- Ackerman, P. L. (1988). Determinants of individual differences during skill acquisition: Cognitive abilities and information processing. *Journal of experimental psychology: General, 117*(3), 288.
- Aggarwal, A., & Kean, E. (2010). Comparison of the Folstein Mini Mental State Examination (MMSE) to the Montreal Cognitive Assessment (MoCA) as a cognitive screening tool in an inpatient rehabilitation setting. *Neuroscience and Medicine, 1*(2), 39.
- Allen, B. (1994). Cognitive abilities and information system usability. *Information processing & management, 30*(2), 177-191.
- Anderson, C. A., & Bushman, B. J. (2001). Effects of violent video games on aggressive behavior, aggressive cognition, aggressive affect, physiological arousal, and prosocial behavior: A meta-analytic review of the scientific literature. *Psychological Science, 12*(5), 353-359.
- Anderson, J. R., & Jeffries, R. (1985). Novice LISP errors: Undetected losses of information from working memory. *Human–Computer Interaction, 1*(2), 107-131.
- Anderson, S. W., Damasio, H., Jones, R. D., & Tranel, D. (1991). Wisconsin Card Sorting Test performance as a measure of frontal lobe damage. *Journal of clinical and experimental neuropsychology, 13*(6), 909-922.
- Ando, T. (1971). *Aristotle's theory of practical cognition*. Springer.
- Andreessen, L. M., Gerjets, P., Meurers, D., & Zander, T. O. (2021). Toward neuroadaptive support technologies for improving digital reading: a passive BCI-based assessment of mental workload imposed by text difficulty and presentation speed during reading. *User Modeling and User-Adapted Interaction, 31*, 75-104.
- Anguera, J. A., & Gazzaley, A. (2015). Video games, cognitive exercises, and the enhancement of cognitive abilities. *Current Opinion in Behavioral Sciences, 4*, 160-165.

Ardila, A., Ostrosky-Solis, F., Rosselli, M., & Gómez, C. (2000). Age-related cognitive decline during normal aging: the complex effect of education. *Archives of clinical neuropsychology*, 15(6), 495-513.

Arsić, S., Jevremović, A., & Antonijević, M. (2020). Modern approach to neuropsychological assessment as a predictor of computerized cognitive rehabilitation. *Approaches and Models in Special Education and Rehabilitation—Thematic Collection of International Importance*, 25-35.

Ashendorf, L., Jefferson, A. L., O'Connor, M. K., Chaisson, C., Green, R. C., & Stern, R. A. (2008). Trail Making Test errors in normal aging, mild cognitive impairment, and dementia. *Archives of clinical neuropsychology*, 23(2), 129-137.

Avlonitis, G. J., & Karayanni, D. A. (2000). The impact of internet use on business-to-business marketing: examples from American and European companies. *Industrial marketing management*, 29(5), 441-459.

Baddeley, A. (2012). Working memory: Theories, models, and controversies. *Annual review of psychology*, 63, 1-29.

Bandura, A. (1986). The explanatory and predictive scope of self-efficacy theory. *Journal of social and clinical psychology*, 4(3), 359-373.

Baniqued, P. L., Kranz, M. B., Voss, M. W., Lee, H., Cosman, J. D., Severson, J., & Kramer, A. F. (2014). Cognitive training with casual video games: points to consider. *Frontiers in psychology*, 4, 1010.

Baniqued, P. L., Lee, H., Voss, M. W., Basak, C., Cosman, J. D., DeSouza, S., Severson, J., Salthouse, T. A., & Kramer, A. F. (2013). Selling points: What cognitive abilities are tapped by casual video games? *Acta psychologica*, 142(1), 74-86.

Barreto, A., Zhai, J., & Adjouadi, M. (2007, 2007//). Non-intrusive Physiological Monitoring for Automated Stress Detection in Human-Computer Interaction. *Human–Computer Interaction*, Berlin, Heidelberg.

Beare, J. I. (1906). *Greek theories of elementary cognition from Alcmaeon to Aristotle*. Clarendon Press.

Beckmann, J., Bertel, S., & Zander, S. (2014). Adaptive eLearning based on individual learning styles—Performance and emotional factors. *Mensch & Computer 2014-Tagungsband*.

Berg, E. A. (1948). A Simple Objective Technique for Measuring Flexibility in Thinking. *The Journal of General Psychology*, 39(1), 15-22. <https://doi.org/10.1080/00221309.1948.9918159>

Bertel, S. (2014, June). Individual Cognitive Abilities and Styles in HCI: Three Main Challenges and a Tiered Adaptation Model. In *Proceedings of HCI Engineering 2014, Workshop at the ACM SIGCHI EICS Conference* (pp. 12-16).

Binet, A., & Simon, T. (1948). The development of the Binet-Simon Scale, 1905-1908.

Blair, C., & Razza, R. P. (2007). Relating effortful control, executive function, and false belief understanding to emerging math and literacy ability in kindergarten. *Child development*, 78(2), 647-663.

Bogomolova, K., van der Ham, I. J., Dankbaar, M. E., van den Broek, W. W., Hovius, S. E., van der Hage, J. A., & Hierck, B. P. (2020). The effect of stereoscopic augmented reality visualization on learning anatomy and the modifying effect of visual-spatial abilities: A double-center randomized controlled trial. *Anatomical sciences education*, 13(5), 558-567.

Brouwer, A.-M., Hogervorst, M. A., Van Erp, J. B., Heffelaar, T., Zimmerman, P. H., & Oostenveld, R. (2012). Estimating workload using EEG spectral power and ERPs in the n-back task. *Journal of neural engineering*, 9(4), 045008.

Burgoyne, A. P., Sala, G., Gobet, F., Macnamara, B. N., Campitelli, G., & Hambrick, D. Z. (2016). The relationship between cognitive ability and chess skill: A comprehensive meta-analysis. *Intelligence*, 59, 72-83.

Byrne, M. D. (1996). A computational theory of working memory. In *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems* (pp. 31-32).

Byrne, M. D. (2001). ACT-R/PM and menu selection: Applying a cognitive architecture to HCI. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(1), 41-84.

Byrne, M. D. (2007). Cognitive architecture. In *The human-computer interaction handbook* (pp. 119-140). CRC Press.

Card, S. K. (2018). *The psychology of human-computer interaction*. Crc Press.

Carroll, J. B., & Maxwell, S. E. (1979). Individual differences in cognitive abilities. *Annual review of psychology*, 30(1), 603-640.

Chamorro-Premuzic, T., & Furnham, A. (2003). Personality predicts academic performance: Evidence from two longitudinal university samples. *Journal of research in personality*, 37(4), 319-338.

Chennamma, H., & Yuan, X. (2013). A survey on eye-gaze tracking techniques. *arXiv preprint arXiv:1312.6410*.

Ciesielska, N., Sokołowski, R., Mazur, E., Podhorecka, M., Polak-Szabela, A., & Kędziora-Kornatowska, K. (2016). Is the Montreal Cognitive Assessment (MoCA) test better suited than the Mini-Mental State Examination (MMSE) in mild cognitive impairment (MCI) detection among people aged over 60? Meta-analysis. *Psychiatr Pol*, 50(5), 1039-1052.

Climie, E. A., & Rostad, K. (2011). Test review: Wechsler adult intelligence scale. In: SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.

Colzato, L. S., Van Leeuwen, P. J., Van Den Wildenberg, W., & Hommel, B. (2010). DOOM'd to switch: superior cognitive flexibility in players of first person shooter games. *Frontiers in psychology*, 8.

- Conway, A. R., Cowan, N., Bunting, M. F., Therriault, D. J., & Minkoff, S. R. (2002). A latent variable analysis of working memory capacity, short-term memory capacity, processing speed, and general fluid intelligence. *Intelligence*, 30(2), 163-183.
- Crowe, S. F. (1998). The differential contribution of mental tracking, cognitive flexibility, visual search, and motor speed to performance on parts A and B of the Trail Making Test. *Journal of clinical psychology*, 54(5), 585-591.
- Cullen, B., O'Neill, B., Evans, J. J., Coen, R. F., & Lawlor, B. A. (2007). A review of screening tests for cognitive impairment. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 78(8), 790-799.
- Dagum, P. (2018). Digital biomarkers of cognitive function. *NPJ digital medicine*, 1(1), 10.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, 19(4), 450-466.
- De Dreu, C. K., Nijstad, B. A., Baas, M., Wolsink, I., & Roskes, M. (2012). Working memory benefits creative insight, musical improvisation, and original ideation through maintained task-focused attention. *Personality and social psychology bulletin*, 38(5), 656-669.
- Demmans Epp, C., McEwen, R., Campigotto, R., & Moffatt, K. (2016). Information practices and user interfaces: Student use of an iOS application in special education. *Education and Information Technologies*, 21, 1433-1456.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual review of psychology*, 64, 135-168.
- Dobrowolski, P., Hanusz, K., Sobczyk, B., Skorko, M., & Wiatrow, A. (2015). Cognitive enhancement in video game players: The role of video game genre. *Computers in Human Behavior*, 44, 59-63.
- Dong, Y., Sharma, V. K., Chan, B. P.-L., Venketasubramanian, N., Teoh, H. L., Seet, R. C. S., Tanicala, S., Chan, Y. H., & Chen, C. (2010). The Montreal Cognitive Assessment

(MoCA) is superior to the Mini-Mental State Examination (MMSE) for the detection of vascular cognitive impairment after acute stroke. *Journal of the Neurological Sciences*, 299(1), 15-18. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jns.2010.08.051](https://doi.org/10.1016/j.jns.2010.08.051)

Doniger, G. M., Dwolatzky, T., Zucker, D. M., Chertkow, H., Crystal, H., Schweiger, A., & Simon, E. S. (2006). Computerized cognitive testing battery identifies mild cognitive impairment and mild dementia even in the presence of depressive symptoms. *American Journal of Alzheimer's Disease & Other Dementias®*, 21(1), 28-36.

Duckworth, A. L., & Seligman, M. E. (2005). Self-discipline outdoes IQ in predicting academic performance of adolescents. *Psychological Science*, 16(12), 939-944.

Dumont, L., Chénier-Leduc, G., de Guise, É., de Guinea, A. O., Sénécal, S., & Léger, P.-M. (2015). Using a cognitive analysis grid to inform information systems design. In *Information Systems and Neuroscience: Gmunden Retreat on NeuroIS 2015* (pp. 193-199). Springer International Publishing.

Dünser, A., Steinbügl, K., Kaufmann, H., & Glück, J. (2006). Virtual and augmented reality as spatial ability training tools. In *Proceedings of the 7th ACM SIGCHI New Zealand chapter's international conference on Computer-human interaction: design centered HCI* (pp. 125-132).

Ebaid, D., Crewther, S. G., MacCalman, K., Brown, A., & Crewther, D. P. (2017). Cognitive processing speed across the lifespan: beyond the influence of motor speed. *Frontiers in aging neuroscience*, 9, 62.

Edelman, J. A., & Keller, E. L. (1996). Activity of visuomotor burst neurons in the superior colliculus accompanying express saccades. *Journal of neurophysiology*, 76(2), 908-926.

Egeland, H. E., & Yantis, S. (1997). Visual attention: Control, representation, and time course. *Annual review of psychology*, 48(1), 269-297.

Eimer, M. (2014). The neural basis of attentional control in visual search. *Trends in cognitive sciences*, 18(10), 526-535.

- Elwood, R. W. (2001). MicroCog: assessment of cognitive functioning. *Neuropsychology review*, 11, 89-100.
- Engle, R. W., Cantor, J., & Carullo, J. J. (1992). Individual differences in working memory and comprehension: a test of four hypotheses. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(5), 972.
- Farshid, M., Paschen, J., Eriksson, T., & Kietzmann, J. (2018). Go boldly!: Explore augmented reality (AR), virtual reality (VR), and mixed reality (MR) for business. *Business Horizons*, 61(5), 657-663.
- Felder, R. M., & Brent, R. (2005). Understanding student differences. *Journal of engineering education*, 94(1), 57-72.
- Ferguson, C. J. (2007). The good, the bad and the ugly: A meta-analytic review of positive and negative effects of violent video games. *Psychiatric quarterly*, 78, 309-316.
- Fichten, C. S., Asuncion, J. V., Barile, M., Ferraro, V., & Wolforth, J. (2009). Accessibility of e-learning and computer and information technologies for students with visual impairments in postsecondary education. *Journal of visual impairment & blindness*, 103(9), 543-557.
- Filskov, S. B., & Goldstein, S. G. (1974). Diagnostic validity of the Halstead-Reitan neuropsychological battery. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 42(3), 382.
- Fleetwood, M. D., & Byrne, M. D. (2006). Modeling the visual search of displays: a revised ACT-R model of icon search based on eye-tracking data. *Human-Computer Interaction*, 21(2), 153-197.
- Folstein, M. F., Folstein, S. E., & McHugh, P. R. (1975). "Mini-mental state": a practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of psychiatric research*, 12(3), 189-198.
- Folstein, M. F., Robins, L. N., & Helzer, J. E. (1983). The mini-mental state examination. *Archives of general psychiatry*, 40(7), 812-812.

Frangou, S.-M. (2016). *The power of writing hands: logical memory performance after handwriting and typing tasks with Wechsler Memory Scale revised edition* fi= Lapin yliopisto| en= University of Lapland].

Gathercole, S., & Alloway, T. P. (2008). *Working memory and learning: A practical guide for teachers*. Sage.

Gaudino, E. A., Geisler, M. W., & Squires, N. K. (1995). Construct validity in the Trail Making Test: what makes Part B harder? *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 17(4), 529-535.

Gevins, A., & Smith, M. E. (2000). Neurophysiological measures of working memory and individual differences in cognitive ability and cognitive style. *Cerebral Cortex*, 10(9), 829-839.

Gevins, A., & Smith, M. E. (2003). Neurophysiological measures of cognitive workload during human-computer interaction. *Theoretical issues in ergonomics science*, 4(1-2), 113-131.

Golden, C. J., & Freshwater, S. M. (1978). Stroop color and word test.

Golden, C. J., & Freshwater, S. M. (2001). Luria-Nebraska neuropsychological battery. *Understanding psychological assessment*, 59-75.

Gonzalez, D., Carnahan, H., Praamsma, M., Macrae, H., & Dubrowski, A. (2005). Control of laparoscopic instrument motion in an inanimate bench model: implications for the training and evaluation of technical skills. *Studies in Health Technology and Informatics*, 111, 149-152.

Gottfredson, L. S. (1997). Why g matters: The complexity of everyday life. *Intelligence*, 24(1), 79-132.

Granic, I., Lobel, A., & Engels, R. C. (2014). The benefits of playing video games. *American psychologist*, 69(1), 66.

- Grant, D. A., & Berg, E. A. (1993). Wisconsin card sorting test. *Journal of Experimental Psychology*.
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2015). Action video game training for cognitive enhancement. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 4, 103-108.
- Groff, M. G., & Hubble, L. (1981). A factor analytic investigation of the Trail Making Test. *Clinical neuropsychology*.
- Gustafsson, J.-E., & Undheim, J. O. (1996). Individual differences in cognitive functions.
- Halbrook, Y. J., O'Donnell, A. T., & Msetfi, R. M. (2019). When and how video games can be good: A review of the positive effects of video games on well-being. *Perspectives on Psychological Science*, 14(6), 1096-1104.
- Halverson, K. K. (2020). *Executive Functioning in Struggling Readers: The NIH Examiner* University of Houston].
- Halverson, K. K., Derrick, J. L., Medina, L. D., & Cirino, P. T. (2021). Executive functioning with the NIH EXAMINER and inference making in struggling readers. *Developmental neuropsychology*, 46(3), 213-231.
- Halverson, T., & Hornof, A. J. (2011). A computational model of “active vision” for visual search in human–computer interaction. *Human–Computer Interaction*, 26(4), 285-314.
- Hamdan, A. C., & Hamdan, E. M. L. (2009). Effects of age and education level on the Trail Making Test in a healthy Brazilian sample. *Psychology & Neuroscience*, 2, 199-203.
- Heaven, P. C., & Ciarrochi, J. (2012). When IQ is not everything: Intelligence, personality and academic performance at school. *Personality and Individual Differences*, 53(4), 518-522.
- Helander, M. G. (2014). *Handbook of human-computer interaction*. Elsevier.

Herff, C., Heger, D., Fortmann, O., Hennrich, J., Putze, F., & Schultz, T. (2014). Mental workload during n-back task—quantified in the prefrontal cortex using fNIRS. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 935.

Hommel, B. E., Ruppel, R., & Zacher, H. (2022). Assessment of cognitive flexibility in personnel selection: Validity and acceptance of a gamified version of the Wisconsin Card Sorting Test. *International Journal of Selection and Assessment*, 30(1), 126-144.

Hwang, A. D., Higgins, E. C., & Pomplun, M. (2009). A model of top-down attentional control during visual search in complex scenes. *Journal of Vision*, 9(5), 25-25.

Irwin, D. E. (2004). Fixation location and fixation duration as indices of cognitive processing. *The interface of language, vision, and action: Eye movements and the visual world*, 217, 105-133.

Jensen, A. R., & Rohwer Jr, W. D. (1966). The Stroop color-word test: a review. *Acta psychologica*, 25, 36-93.

Jevremovic, A., Arsic, S., Antonijevic, M., Ioannou, A., & Garcia, N. (2018). Human-computer interaction monitoring and analytics platform-Wisconsin card sorting test application. In *International Conference on IoT Technologies HealthCare (EAI), HealthyIoT*.

Ji, H., Yun, Y., Lee, S., Kim, K., & Lim, H. (2018). An adaptable UI/UX considering user's cognitive and behavior information in distributed environment. *Cluster Computing*, 21, 1045-1058.

Jing, Z., Barreto, A. B., Chin, C., & Chao, L. (2005, 8-10 April 2005). Realization of stress detection using psychophysiological signals for improvement of human-computer interactions. In *Proceedings. IEEE SoutheastCon, 2005*. (pp. 415-420). IEEE.

Johann, V., Könen, T., & Karbach, J. (2020). The unique contribution of working memory, inhibition, cognitive flexibility, and intelligence to reading comprehension and reading speed. *Child Neuropsychology*, 26(3), 324-344.

Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1976). Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive psychology*, 8(4), 441-480.

Kane, M. J., Conway, A. R., Miura, T. K., & Colflesh, G. J. (2007). Working memory, attention control, and the N-back task: a question of construct validity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 33(3), 615.

Kane, M. J., & Engle, R. W. (2003). Working-memory capacity and the control of attention: the contributions of goal neglect, response competition, and task set to Stroop interference. *Journal of experimental psychology: General*, 132(1), 47.

Karahoca, D., Karahoca, A., & Güngör, A. (2008). Assessing effectiveness of the cognitive abilities and individual differences on e-learning portal usability evaluation. In *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Systems and Technologies and Workshop for PhD Students in Computing* (pp. IV-8).

Kaspar, K., & König, P. (2012). Emotions and personality traits as high-level factors in visual attention: a review. *Frontiers in human neuroscience*, 6, 321.

Kay, R., & Lauricella, S. (2011). Exploring the benefits and challenges of using laptop computers in higher education classrooms: A formative analysis. *Canadian Journal of Learning and Technology/La revue canadienne de l'apprentissage et de la technologie*, 37(1).

Kazemi, F., Yektayar, M., & Abad, A. M. B. (2012). Investigation the impact of chess play on developing meta-cognitive ability and math problem-solving power of students at different levels of education. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 32, 372-379.

Kieras, D. E. (2011). The persistent visual store as the locus of fixation memory in visual search tasks. *Cognitive Systems Research*, 12(2), 102-112.

Kieras, D. E., & Hornof, A. J. (2014). Towards accurate and practical predictive models of active-vision-based visual search. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 3875-3884).

Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (1995). Predicting human performance in dual-task tracking and decision making with computational models using the EPIC architecture. In *Proceedings of the First International Symposium on Command and Control Research and Technology, National Defense University, June. Washington, DC: National Defense University*.

Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (1997). An overview of the EPIC architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction. *Human–Computer Interaction, 12*(4), 391-438.

Kieras, D. E., Wood, S. D., & Meyer, D. E. (1995). Predictive engineering models using the EPIC architecture for a high-performance task. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 11-18).

Kirchner, W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of Experimental Psychology, 55*(4), 352.

Konishi, S., Kawazu, M., Uchida, I., Kikyo, H., Asakura, I., & Miyashita, Y. (1999). Contribution of working memory to transient activation in human inferior prefrontal cortex during performance of the Wisconsin Card Sorting Test. *Cerebral Cortex, 9*(7), 745-753.

Kordovski, V. M., Tierney, S. M., Rahman, S., Medina, L. D., Babicz, M. A., Yoshida, H., Holcomb, E. M., Cushman, C., & Woods, S. P. (2021). Older age and online health information search behaviors: The mediating influence of executive functions. *Journal of clinical and experimental neuropsychology, 43*(7), 689-703.

Kramer, J. H., Mungas, D., Possin, K. L., Rankin, K. P., Boxer, A. L., Rosen, H. J., Bostrom, A., Sinha, L., Berhel, A., & Widmeyer, M. (2014). NIH EXAMINER: conceptualization and development of an executive function battery. *Journal of the International Neuropsychological Society, 20*(1), 11-19.

Kuncel, N. R., Hezlett, S. A., & Ones, D. S. (2004). Academic performance, career potential, creativity, and job performance: Can one construct predict them all? *Journal of personality and social psychology*, 86(1), 148.

Lahav, O., & Katz, N. (2020). Independent Older Adult's IADL and Executive Function According to Cognitive Performance. *OTJR: Occupational Therapy Journal of Research*, 40(3), 183-189. <https://doi.org/10.1177/1539449220905813>

Lai, M.-L., Tsai, M.-J., Yang, F.-Y., Hsu, C.-Y., Liu, T.-C., Lee, S. W.-Y., Lee, M.-H., Chiou, G.-L., Liang, J.-C., & Tsai, C.-C. (2013). A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012. *Educational research review*, 10, 90-115.

Lallemand, C., & Gronier, G. (2015). *Méthodes de design UX: 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs*. Editions Eyrolles.

Langdon, D., Amato, M., Boringa, J., Brochet, B., Foley, F., Fredrikson, S., Hämäläinen, P., Hartung, H., Krupp, L., & Penner, I. (2012). Recommendations for a brief international cognitive assessment for multiple sclerosis (BICAMS). *Multiple Sclerosis Journal*, 18(6), 891-898.

Lezak, M. (1995). Executive functions and motor performance. *Neuropsychological assessment*, 650-685.

Lezak, M. D., Howieson, D. B., Loring, D. W., & Fischer, J. S. (2004). *Neuropsychological assessment*. Oxford University Press, USA.

Lezak, M. D., Howieson, D. B., Loring, D. W., & Fischer, J. S. (2004). *Neuropsychological assessment*. Oxford University Press, USA.

Lohman, D. F. (2013). Spatial ability and g. In *Human abilities* (pp. 97-116). Psychology Press.

Mackworth, N. H. (1948). The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly journal of experimental psychology*, 1(1), 6-21.

Mahmud, M., & Kurniawan, H. (2005). Involving psychometric tests for input device evaluation with older people. In *Proceedings of the 17th Australia Conference on Computer-Human interaction: Citizens online: Considerations For Today and the Future* (pp. 1-10).

Majaranta, P., & Bulling, A. (2014). Eye tracking and eye-based human-computer interaction. *Advances in physiological computing*, 39-65.

Martins, A. I., Silva, A. G., Pais, J., Cruz, V. T., & Rocha, N. P. (2022). The impact of users' cognitive function on evaluator perceptions of usability. *Scientific Reports*, 12(1), 13753. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17441-3>

McClelland, D. C. (1987). *Human motivation*. Cup Archive.

Mikadze, Y. V., Ardila, A., & Akhutina, T. V. (2019). AR Luria's approach to neuropsychological assessment and rehabilitation. *Archives of clinical neuropsychology*, 34(6), 795-802.

Mishra, J., Bavelier, D., & Gazzaley, A. (2012). How to assess gaming-induced benefits on attention and working memory. *Games for Health: Research, Development, and Clinical Applications*, 1(3), 192-198.

Mitrushina, M., Boone, K. B., Razani, J., & D'Elia, L. F. (2005). *Handbook of normative data for neuropsychological assessment*. Oxford University Press.

Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current directions in psychological science*, 21(1), 8-14.

Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive psychology*, 41(1), 49-100.

Monchi, O., Petrides, M., Petre, V., Worsley, K., & Dagher, A. (2001). Wisconsin Card Sorting revisited: distinct neural circuits participating in different stages of the task identified by event-related functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, 21(19), 7733-7741.

Nakarada-Kordic, I., & Lobb, B. (2005). Effect of perceived attractiveness of web interface design on visual search of web sites. In *Proceedings of the 6th ACM SIGCHI New Zealand chapter's international conference on Computer-human interaction: making CHI natural* (pp. 25-27).

Nasreddine, Z. S., Phillips, N. A., Bédirian, V., Charbonneau, S., Whitehead, V., Collin, I., Cummings, J. L., & Chertkow, H. (2005). The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: A Brief Screening Tool For Mild Cognitive Impairment. *Journal of the American Geriatrics Society*, 53(4), 695-699. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x>

Nielsen, J. (1994). *Usability engineering*. Morgan Kaufmann.

Nyhus, E., & Barceló, F. (2009). The Wisconsin Card Sorting Test and the cognitive assessment of prefrontal executive functions: a critical update. *Brain and cognition*, 71(3), 437-451.

Oliveira, J., Gamito, P., Alghazzawi, D. M., Fardoun, H. M., Rosa, P. J., Sousa, T., Picareli, L. F., Morais, D., & Lopes, P. (2018). Performance on naturalistic virtual reality tasks depends on global cognitive functioning as assessed via traditional neurocognitive tests. *Applied Neuropsychology: Adult*, 25(6), 555-561. <https://doi.org/10.1080/23279095.2017.1349661>

Olson, J. R., & Olson, G. M. (1995). The growth of cognitive modeling in human-computer interaction since GOMS. In *Readings in Human–Computer Interaction* (pp. 603-625). Elsevier.

Papathanasiou, A., Messinis, L., Georgiou, V. L., & Papathanasopoulos, P. (2014). Cognitive impairment in relapsing remitting and secondary progressive multiple sclerosis

patients: efficacy of a computerized cognitive screening battery. *International Scholarly Research Notices*, 2014.

Papp, K. V., Snyder, P. J., Maruff, P., Bartkowiak, J., & Pietrzak, R. H. (2011). Detecting subtle changes in visuospatial executive function and learning in the amnestic variant of mild cognitive impairment. *PLoS One*, 6(7), e21688.

Patel, V. L., & Kushniruk, A. W. (1998). Interface design for health care environments: the role of cognitive science. In *Proceedings of the AMIA Symposium* (p. 29). American Medical Informatics Association.

Periáñez, J., Ríos-Lago, M., Rodríguez-Sánchez, J., Adrover-Roig, D., Sánchez-Cubillo, I., Crespo-Facorro, B., Quemada, J., & Barceló, F. (2007). Trail Making Test in traumatic brain injury, schizophrenia, and normal ageing: Sample comparisons and normative data. *Archives of clinical neuropsychology*, 22(4), 433-447.

Petersen, R. C., Doody, R., Kurz, A., Mohs, R. C., Morris, J. C., Rabins, P. V., Ritchie, K., Rossor, M., Thal, L., & Winblad, B. (2001). Current concepts in mild cognitive impairment. *Archives of neurology*, 58(12), 1985-1992.

Pietrzak, R. H., Cohen, H., & Snyder, P. J. (2007). Spatial learning efficiency and error monitoring in normal aging: An investigation using a novel hidden maze learning test. *Archives of clinical neuropsychology*, 22(2), 235-245.

Pietrzak, R. H., Maruff, P., Mayes, L. C., Roman, S. A., Sosa, J. A., & Snyder, P. J. (2008). An examination of the construct validity and factor structure of the Groton Maze Learning Test, a new measure of spatial working memory, learning efficiency, and error monitoring. *Archives of clinical neuropsychology*, 23(4), 433-445.

Poguntke, R., Wirth, M., & Gradl, S. (2019, 2019//). Same Same but Different: Exploring the Effects of the Stroop Color Word Test in Virtual Reality. Human-Computer Interaction – INTERACT 2019, Cham.

Poole, A., & Ball, L. J. (2006). Eye tracking in HCI and usability research. In *Encyclopedia of human computer interaction* (pp. 211-219). IGI global.

- Prigatano, G. P. (1978). Wechsler memory scale: A selective review of the literature. *Journal of clinical psychology*, 34(4), 816-832.
- Pulakos, E. D., Schmitt, N., Dorsey, D. W., Arad, S., Borman, W. C., & Hedge, J. W. (2002). Predicting adaptive performance: Further tests of a model of adaptability. *Human performance*, 15(4), 299-323.
- Rafi, A., Anuar, K., Samad, A., Hayati, M., & Mahadzir, M. (2005). Improving spatial ability using a Web-based Virtual Environment (WbVE). *Automation in construction*, 14(6), 707-715.
- Rahman, S., Kordova, V. M., Tierney, S. M., & Woods, S. P. (2021). Internet navigation skills for financial management: Associations with age, neurocognitive performance, and functional capacity. *Neuropsychology*, 35(6), 630.
- Rauscher, F. H., Shaw, G. L., & Ky, C. N. (1993). Music and spatial task performance. *Nature*, 365(6447), 611-611.
- Reitan, R. M. (1955). The relation of the Trail Making Test to organic brain damage. *Journal of consulting psychology*, 19, 393-394. <https://doi.org/10.1037/h0044509>
- Reitan, R. M., & Wolfson, D. (2004). The Trail Making Test as an initial screening procedure for neuropsychological impairment in older children. *Archives of clinical neuropsychology*, 19(2), 281-288.
- Riedl, R., & Léger, P.-M. (2016). Fundamentals of neuroIS. *Studies in neuroscience, psychology and behavioral economics*, 127.
- Ritter, F. E., & Young, R. M. (2001). Embodied models as simulated users: Introduction to this special issue on using cognitive models to improve interface design. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(1), 1-14.
- Robertson, I. T., & Smith, M. (2001). Personnel selection. *Journal of occupational and Organizational psychology*, 74(4), 441-472.

Rohde, T. E., & Thompson, L. A. (2007). Predicting academic achievement with cognitive ability. *Intelligence*, 35(1), 83-92.

Ryan, J., Woods, R. L., Britt, C. J., Murray, A. M., Shah, R. C., Reid, C. M., Wolfe, R., Nelson, M. R., Orchard, S. G., & Lockery, J. E. (2020). Normative data for the symbol digit modalities test in Older White Australians and Americans, African-Americans, and Hispanic/Latinos. *Journal of Alzheimer's disease reports*, 4(1), 313-323.

Sahakian, B. J., & Owen, A. (1992). Computerized assessment in neuropsychiatry using CANTAB: discussion paper. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 85(7), 399.

Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological review*, 103(3), 403.

Sánchez-Cubillo, I., Periáñez, J. A., Adrover-Roig, D., Rodríguez-Sánchez, J. M., Ríos-Lago, M., Tirapu, J., & Barceló, F. (2009). Construct validity of the Trail Making Test: role of task-switching, working memory, inhibition/interference control, and visuomotor abilities. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 15(3), 438-450.

Scales, S.-B. I., & Edition, F. (2003). History of the Stanford-Binet Intelligence Scales: Content and Psychometrics.

Scarpina, F., & Tagini, S. (2017). The stroop color and word test. *Frontiers in psychology*, 8, 557.

Schatz, R., Egger, S., & Masuch, K. (2012). The impact of test duration on user fatigue and reliability of subjective quality ratings. *Journal of the Audio Engineering Society*, 60(1/2), 63-73.

Schear, J. M., & Sato, S. D. (1989). Effects of visual acuity and visual motor speed and dexterity on cognitive test performance. *Archives of clinical neuropsychology*, 4(1), 25-32.

Schellenberg, E. G. (2004). Music lessons enhance IQ. *Psychological Science*, 15(8), 511-514.

- Schellenberg, E. G. (2005). Music and cognitive abilities. *Current directions in psychological science*, 14(6), 317-320.
- Schellenberg, E. G. (2006). Long-term positive associations between music lessons and IQ. *Journal of educational Psychology*, 98(2), 457.
- Schellenberg, E. G. (2012). Cognitive performance after listening to music: A review of the Mozart effect. *Music, health, and wellbeing*, 324-338.
- Schellenberg, E. G., & Weiss, M. W. (2013). Music and cognitive abilities.
- Schmiedek, F., Oberauer, K., Wilhelm, O., Süß, H.-M., & Wittmann, W. W. (2007). Individual differences in components of reaction time distributions and their relations to working memory and intelligence. *Journal of experimental psychology: General*, 136(3), 414.
- Sears, A., & Hanson, V. (2011, May). Representing users in accessibility research. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 2235-2238).
- Sharit, J., Taha, J., Berkowsky, R. W., Profità, H., & Czaja, S. J. (2015). Online information search performance and search strategies in a health problem-solving scenario. *Journal of cognitive engineering and decision making*, 9(3), 211-228.
- Sheridan, L. K., Fitzgerald, H. E., Adams, K. M., Nigg, J. T., Martel, M. M., Puttler, L. I., Wong, M. M., & Zucker, R. A. (2006). Normative Symbol Digit Modalities Test performance in a community-based sample. *Archives of clinical neuropsychology*, 21(1), 23-28.
- Smith, A. (1973). *Symbol digit modalities test*. Western psychological services Los Angeles.
- Smith, A. (1973). *Symbol digit modalities test*. Western psychological services Los Angeles.

Snyder, P. J., Jackson, C. E., Piskulic, D., Olver, J., Norman, T., & Maruff, P. (2008). Spatial working memory and problem solving in schizophrenia: the effect of symptom stabilization with atypical antipsychotic medication. *Psychiatry Research*, 160(3), 316-326.

Snyder, P. J., Werth, J., Giordani, B., Caveney, A. F., Feltner, D., & Maruff, P. (2005). A method for determining the magnitude of change across different cognitive functions in clinical trials: the effects of acute administration of two different doses alprazolam. *Human Psychopharmacology: Clinical and Experimental*, 20(4), 263-273.

Sobczyk, B., Dobrowolski, P., Skorko, M., Michalak, J., & Brzezicka, A. (2015). Issues and advances in research methods on video games and cognitive abilities. *Frontiers in psychology*, 6, 1451.

Sorby, S. A. (2009). Educational research in developing 3-D spatial skills for engineering students. *International Journal of Science Education*, 31(3), 459-480.

Strauss, E., Sherman, E. M., & Spreen, O. (2006). *A compendium of neuropsychological tests: Administration, norms, and commentary*. American chemical society.

Strenze, T. (2007). Intelligence and socioeconomic success: A meta-analytic review of longitudinal research. *Intelligence*, 35(5), 401-426.

Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>

Teng, E. L., Hasegawa, K., Homma, A., Imai, Y., Larson, E., Graves, A., Sugimoto, K., Yamaguchi, T., Sasaki, H., & Chiu, D. (1994). The Cognitive Abilities Screening Instrument (CASI): a practical test for cross-cultural epidemiological studies of dementia. *International psychogeriatrics*, 6(1), 45-58.

Terman, L. M. (1916). *The measurement of intelligence: An explanation of and a complete guide for the use of the Stanford revision and extension of the Binet-Simon intelligence scale*. Houghton Mifflin.

Theeuwes, J., & Burger, R. (1998). Attentional control during visual search: the effect of irrelevant singletons. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(5), 1342.

Tombaugh, T. N., & McIntyre, N. J. (1992). The Mini-Mental State Examination: A Comprehensive Review. *Journal of the American Geriatrics Society*, 40(9), 922-935. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1992.tb01992.x>

Topol, E. (2015). *The patient will see you now: the future of medicine is in your hands*. Basic Books.

Topol, E. J. (2019). High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature medicine*, 25(1), 44-56.

Tornatore, J. B., Hill, E., Laboff, J. A., & McGann, M. E. (2005). Self-administered screening for mild cognitive impairment: initial validation of a computerized test battery. *The Journal of neuropsychiatry and clinical neurosciences*, 17(1), 98-105.

Toth, A. J., Ramsbottom, N., Kowal, M., & Campbell, M. J. (2020). Converging evidence supporting the cognitive link between exercise and esport performance: a dual systematic review. *Brain Sciences*, 10(11), 859.

Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive psychology*, 12(1), 97-136.

Tseng, Y. C., & Howes, A. (2008, April). The adaptation of visual search strategy to expected information gain. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 1075-1084).

Tsoi, K. K., Chan, J. Y., Hirai, H. W., Wong, S. Y., & Kwok, T. C. (2015). Cognitive tests to detect dementia: a systematic review and meta-analysis. *JAMA internal medicine*, 175(9), 1450-1458.

Unsworth, N., Redick, T. S., McMillan, B. D., Hambrick, D. Z., Kane, M. J., & Engle, R. W. (2015). Is playing video games related to cognitive abilities? *Psychological Science*, 26(6), 759-774.

Vasseur, A., Léger, P.-M., & Sénécal, S. (2019). Eyetracking for IS research: A literature review. *Proceedings of SIGHCI*.

Velayudhan, L., Ryu, S.-H., Raczek, M., Philpot, M., Lindesay, J., Critchfield, M., & Livingston, G. (2014). Review of brief cognitive tests for patients with suspected dementia. *International psychogeriatrics*, 26(8), 1247-1262.

Vickers, J. N. (2007). *Perception, cognition, and decision training: The quiet eye in action*. Human Kinetics.

Wai, J., Lubinski, D., & Benbow, C. P. (2009). Spatial ability for STEM domains: Aligning over 50 years of cumulative psychological knowledge solidifies its importance. *Journal of educational Psychology*, 101(4), 817.

Wang, S., Gwizdka, J., & Chaovalltwongse, W. A. (2015). Using wireless EEG signals to assess memory workload in the \$ n \$-back task. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 46(3), 424-435.

Wechsler, D. (1945). A standardized memory scale for clinical use. *The Journal of Psychology*, 19(1), 87-95.

Wechsler, D. (1955). Wechsler adult intelligence scale. *Archives of clinical neuropsychology*.

Wechsler, D. (2008). Wechsler adult intelligence scale–fourth edition (WAIS-IV). *APA PsyTests*.

Weiss, L. G., Saklofske, D. H., Coalson, D., & Raiford, S. E. (2010). *WAIS-IV clinical use and interpretation: Scientist-practitioner perspectives*. Academic Press.

Wherry Jr, R. J. (1976). The human operator simulator—HOS. In *Monitoring behavior and supervisory control* (pp. 283-293). Springer.

Wickens, C. D., & Carswell, C. M. (2021). Information processing. *Handbook of human factors and ergonomics*, 114-158.

Wild, K., Howieson, D., Webbe, F., Seelye, A., & Kaye, J. (2008). Status of computerized cognitive testing in aging: a systematic review. *Alzheimer's & Dementia*, 4(6), 428-437.

Wild, K., Howieson, D., Webbe, F., Seelye, A., & Kaye, J. (2008). Status of computerized cognitive testing in aging: a systematic review. *Alzheimers Dement*, 4(6), 428-437. <https://doi.org/10.1016/j.jalz.2008.07.003>

Williams, A. M., Ford, P. R., Eccles, D. W., & Ward, P. (2011). Perceptual-cognitive expertise in sport and its acquisition: Implications for applied cognitive psychology. *Applied Cognitive Psychology*, 25(3), 432-442.

Williams, J. M., & Leffingwell, T. R. (2002). Cognitive strategies in sport and exercise psychology.

Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2017). Five factors that guide attention in visual search. *Nature Human Behaviour*, 1(3), 0058.

Wong, A. W., Chan, C. C., Li-Tsang, C. W., & Lam, C. S. (2004). Neuropsychological function for accessibility of computer program for people with mental retardation. In *Computers Helping People with Special Needs: 9th International Conference, ICCHP 2004, Paris, France, July 7-9, 2004. Proceedings* 9 (pp. 1062-1068). Springer Berlin Heidelberg.

Zax, J. S., & Rees, D. I. (2002). IQ, academic performance, environment, and earnings. *Review of Economics and Statistics*, 84(4), 600-616.

Zhai, J., & Barreto, A. (2006). Stress detection in computer users based on digital signal processing of noninvasive physiological variables. In *2006 international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society* (pp. 1355-1358). IEEE.

Zolyomi, A., & Snyder, J. (2021). Social-emotional-sensory design map for affective computing informed by neurodivergent experiences. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 5(CSCW1), 1-37.

Zygouris, S., & Tsolaki, M. (2015). Computerized cognitive testing for older adults: a review. *American Journal of Alzheimer's Disease & Other Dementias®*, 30(1), 13-28.

# **Chapter 3: Empirical Article**

## **Digital Trail Making Test Time Predicts Information Technology Task Performance<sup>2</sup>**

Tanguy Depauw, Jared Boasen, Pierre-Majorique Léger, Sylvain Sénécal  
HEC Montreal Tech3lab, Montréal, Canada

### **Abstract**

#### ***Background:***

Cognitive functional ability affects the accessibility of information technology (IT) and is thus something that should be controlled for in user experience (UX) research. However, many cognitive function assessment batteries are long and complex, making them impractical for use in conventional experimental time frames. Therefore, there is a need for a short and reliable cognitive assessment which has discriminant validity for cognitive functions needed for general IT tasks. One potential candidate is the Trail Making Test (TMT).

#### ***Objective:***

The present study investigated the usefulness of a digital TMT as a cognitive profiling tool in IT-related UX research by assessing its predictive validity on general IT task performance, and exploring its discriminant validity according to discrete cognitive functions required to perform the IT task.

#### ***Methods:***

A digital TMT (Parts A and B) named Axon was administered to 27 healthy participants, followed by administration of five IT tasks in the form of CAPTCHAs. The discrete cognitive functions required to perform each CAPTCHA were rated by trained evaluators. To further explain and cross-validate our results, the original TMT and two psychological assessments of visuomotor and short-term memory function were administered.

#### ***Results:***

Axon A and B were administrable in under five minutes and overall performance was significantly predictive of general IT task performance ( $F_{(5, 19)} = 6.352$ ,  $p = 0.001$ , Wilks' Lambda = 0.374). This result was driven by performance on Axon B ( $F_{(5, 19)} = 3.382$ ,  $p =$

---

<sup>2</sup> This article has been submitted for publication to the Journal of Medical Internet Research in June 2023.

0.024, Wilks' Lambda = 0.529), particularly for IT tasks involving the combination of executive and visual function. Axon was furthermore cross validated with the original TMT ( $p_{corr} = 0.001$  and  $p_{corr} = 0.017$  for A and B, respectively) and visuomotor and short-term memory tasks.

### ***Conclusion:***

The results demonstrate that variance in IT task performance among an age-homogenous neurotypical population can be related to inter-subject variance in cognitive function as assessed by Axon. Although Axon's predictive validity seemed stronger for tasks involving the combination of executive and visual function, these cognitive functions are arguably relevant to the majority of IT interfaces. In conclusion, and considering its short administration time and remote implementability, the Axon digital TMT has potential to be a useful cognitive profiling tool for IT-based UX research.

## **3.1 Introduction**

Cognitive functional ability is a fundamental factor widely recognized to influence IT usability (Wagner et al., 2014; Karahoca et al., 2008; Martins et al., 2022). The classical approach to control for cognitive functional ability is to target subjects according to general demographics based on age, education, or other factors (Aykin and Aykin, 1991; Lewis, 2012). However, this approach intrinsically precludes the ability to control for or assess how cognitive functional ability impacts IT usability in individual users, thereby limiting the extent which insight can be gained within a demographic or individual. Moreover, this approach is incongruent with the rapid advancement of IT towards products which adapt to individual user characteristics, thus necessitating a more granular understanding of individual cognitive abilities (Ji et al., 2018; Andreessen, 2021, Gajos et al., 2010).

To obtain granular characterization of individual cognitive function, hitherto research has typically employed cognitive assessment batteries (Folstein et al., 1975; Ekstrom et al., 1976; Nasreddine, 2005). Dumont et al. (2015) used the NIH Toolbox, which is a battery of cognitive tests that can be completed in 40 minutes (Weintraub et al., 2013) to develop a cognitive analysis grid to be able to draw statistical parallels between the cognitive demands of an IS interface and the performance of a user. Other batteries of tests were also used, such as the Kit of Factor-Referenced Cognitive Tests (Ekstrom et al., 1976), which was used by Wagner et al. (2014) to study the impact of age on website usability and by Allen (1994) in his research to study the combination of users' cognitive abilities and specific information system functionalities that can be implemented to create system usability. This battery is typically administered in 144 minutes (Wothke et al., 1991). Another approach for assessing individual cognitive ability is to use clinically administered tests like the Montreal Cognitive Assessment (MoCA) or the Mini-Mental State Examination (MMSE). Although typically used in medical settings to evaluate

cognitive impairment in patients with neurological disorders (Nasreddine et al., 2005; Folstein and McHugh, 1975), MoCA and MMSE have been reportedly used to measure the cognitive abilities of subjects in human-computer interaction experiments (Oliveira et al., 2018; Martins et al., 2022; Czaja et al., 2006; Khalili-Mahani et al., 2020). However, while detailed and accurate, these cognitive assessment batteries are too lengthly to practically administer during typical UX testing time frames (Schatz et al., 2012; Lallemand, 2015). Furthermore, while clinically administered tests like MoCA or MMSE are comparatively shorter than other assessment batteries, they require a trained administrator to administer and score the test (Martins et al., 2022). This level of expertise may not always be available, particularly in UX research settings where mostly non-clinically trained research personnel are conducting the experiments.

Correspondingly, there have been calls from across health, user experience (UX), and IT domains for a more practical yet accurate means of assessing cognitive function (Dumont et al., 2015; Isaacs and Oates, 2008; Robbins and Sahakian, 2002). One solution would be to identify a short test with reduced scope, but which nevertheless targets cognitive functions important for using IT. Based on research conducted to understand the impact of cognitive functions on the use of technology by older people (Slegers et al., 2009; Chan et al., 2016), and on existing models of cognitive architecture in human-computer interaction (Kieras & Meyer, 1997), we identified five key cognitive functions important for IT use: visual perception, motor function, executive function, inhibitory control and working memory. First, visual perception is important for finding relevant information cues on a Web page (Slegers et al., 2009). Motor functions are involved in tasks such as data entry using the keyboard, navigation using the mouse, or other tool to perform a digital task (Czaja et al., 1998). Executive functions come into play in order to make decisions and prioritize action (Slegers et al., 2009). Inhibitory control, also called response inhibition (Miyake et al., 2000), is the functional ability to inhibit or override motor commands or other executive processing, such as when an external stimulus interferes with goal-driven behavior as in a task switching situation (Kiesel et al., 2010; Gade et al., 2014). Finally, short-term or working memory capacity may be important in IT task performance, e.g., for remembering options or system output at a later stage (Slegers et al., 2009).

One potential pre-existing cognitive function assessment candidate which targets these cognitive functions related to IT use is the Trail Making Test (TMT). First developed for the Army Individual Test Battery (1944), the TMT is one of the most widely used instruments in neuropsychological assessment as an indicator of cognitive processing speed and executive functioning (Lezak et al., 1995; Mitrushina et al., 2005; Reitan, 1992; Strauss et al., 2006). Many studies have been conducted to determine which cognitive abilities are engaged during completion of this two-parts test (TMT-A and TMT-B). After a comprehensive review of the literature on the topic, Sanchez-Cubillo et al. (2009) explored the contributions of certain cognitive functions and found that part A of the TMT (TMT-A) mainly requires visual-perceptual abilities, and that part B (TMT-B) reflects primarily working memory, executive function, and task-switching ability. Finally, although its contribution in the TMT has been questioned by the study of Sanchez-Cubillo et al. (2009), it is interesting to note that psychomotor ability has been mentioned numerous times as one of the abilities required for both parts of the TMT (Groff and

Hubble (1981) in both parts, Schear and Sato (1989), Gaudino et al. (1995), and Crowe (1998) in Part B).

The primary objective of this study was to test the validity of using the TMT as a cognitive profiling tool to predict/explain the variance in IT task performance. With an interest in a practical tool for cognitive profile assessments in UX testing of digital artifacts, we chose to use a digital version of the TMT. We additionally cross validated the digital TMT with the original TMT, a visual search task assessing visuomotor processing (Meegan and Tipper, 1999; Treisman and Gelade, 1980), and a hidden path learning task assessing visuomotor processing speed, spatial working memory, and error monitoring ability (Pietrzak et al., 2008). We had two hypotheses: 1) TMT times would be predictive of general IT task performance and 2) that the predictive power of the TMT would be stronger for tasks requiring use of cognitive functions which are congruent with those assessed by the TMT.

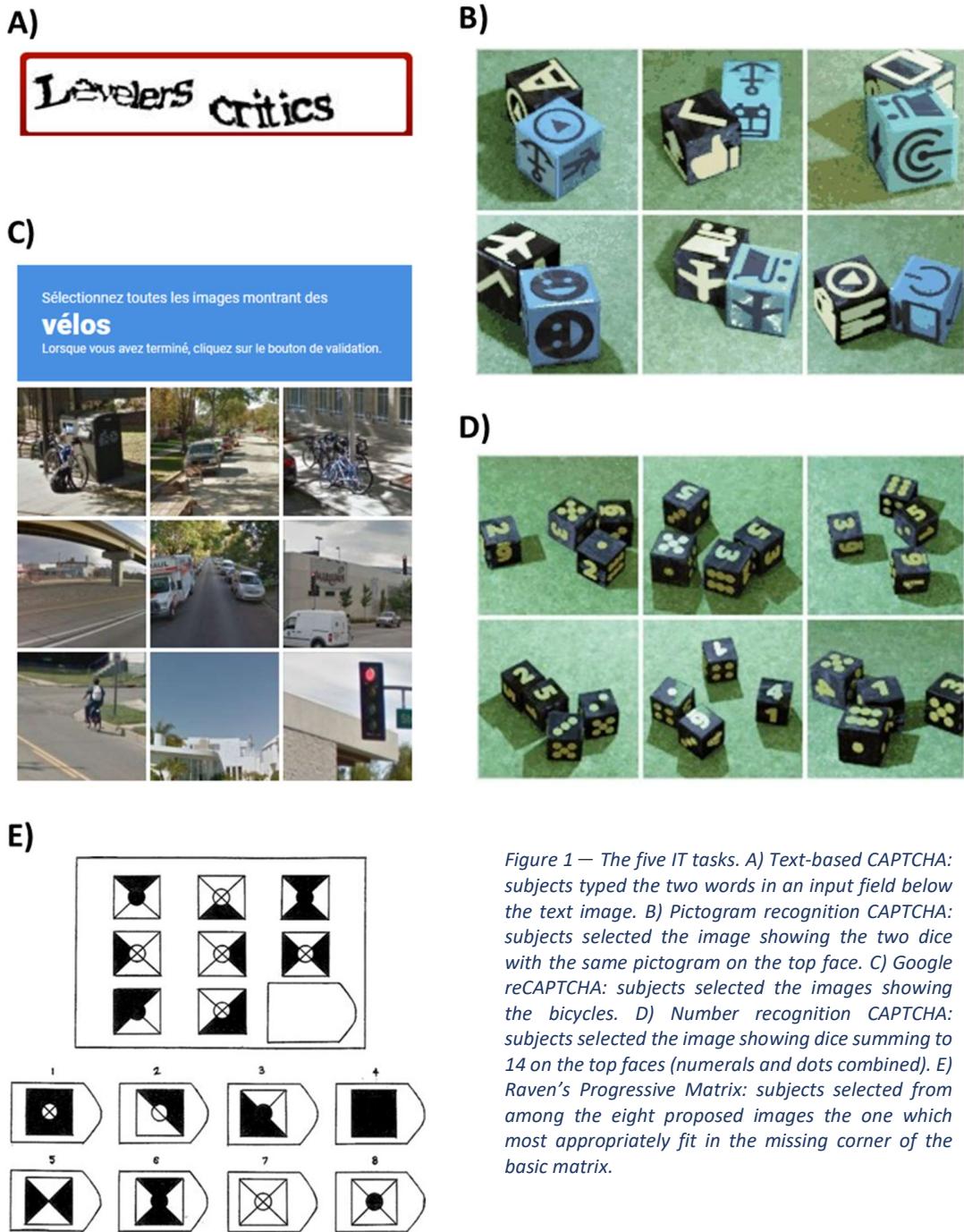
## 3.2 Methods

### 3.2.1 Sample

To test our hypothesis, we conducted a laboratory experiment with 27 healthy subjects (12 men and 15 women), between 18 and 36 years old (mean of 24, standard deviation of 4.22 years), mostly university students (85%). Written informed consent was obtained from all subjects via a signed form at the beginning of the experiment. This project was approved by our institution Ethics Research Committee (Certificate number 2021-4108). A monetary compensation of \$25 was provided to each subject upon completion of the experiment.

### 3.2.2 IT tasks

Two types of general IT tasks were used in the experiment. One type of IT task was based on Completely Automated Public Turing tests to tell Computers and Humans Apart (CAPTCHA). This type of Turing test is widely used in information technology to ensure the cybersecurity of many internet services, as they prevent a number of attacks from Automated programs (often referred as bots), by distinguishing legitimate users from computer bots while requiring minimal effort by the human user (Gossweiler et al., 2009). Four CAPTCHAs were based on typical existent CAPTCHAs and included: Google reCAPTCHA (Google), pictogram recognition (PicRec), numerical recognition (NumRec), and text recognition (Text). Another fifth task was taken from Raven's Progressive Matrices (RPM) and presented in a CAPTCHA format. RPM are a collection of widely used standardized intelligence tests consisting of analogy problems in which a matrix of geometric figures is presented with one entry missing, and the correct missing entry must be selected from a set of answer choices (Kunda et al., 2013). A 3x3 RPM was selected as it was considered that it offered the best trade-off between cognitive effort and the time required to complete it. The final five IT tasks, shown in Figure 1, were embedded on a Qualtrics (Provo, UT, USA) questionnaire. For the present study, we targeted IT tasks completion time, measured as the time from the display of each task to when subjects responded and pressed the “next” button, based on 30 fps screen recordings.



*Figure 1 — The five IT tasks. A) Text-based CAPTCHA: subjects typed the two words in an input field below the text image. B) Pictogram recognition CAPTCHA: subjects selected the image showing the two dice with the same pictogram on the top face. C) Google reCAPTCHA: subjects selected the images showing the bicycles. D) Number recognition CAPTCHA: subjects selected the image showing dice summing to 14 on the top faces (numerals and dots combined). E) Raven’s Progressive Matrix: subjects selected from among the eight proposed images the one which most appropriately fit in the missing corner of the basic matrix.*

The other type of IT task was a website design evaluation to assess perceived usability using Aladwani and Palvia's user-perceived web quality measurement scale (2002). Screenshots of the homepages of the following five websites were used: www.vigneronsdexception.com, www.renaud-bray.com, www.lespac.com, montreal.lufa.com and montreal.craigslist.org. One website was presented subsequent to each CAPTCHA. Participants were told that the website evaluation was the primary task of the experiment, and that the CAPTCHAs were present as a security measure to access our database housing the website screenshots. However, the website evaluations were actually dummy tasks, and participant responses were not analyzed. The IT tasks really targeted and analyzed in this study were the CAPTCHAs.

### *3.2.2.2 Cognitive Function Characterization of CAPTCHAs*

The principal reason CAPTCHAs were chosen as our general IT tasks is because they are ubiquitous in IT, and because they are often distinguishable from one another according to task specific demands such as math, 3D orientation, text recognition, and visual search, suggesting different underlying cognitive processing required them. However, because no studies have previously examined the specific cognitive functions of CAPTCHAs, we formed a panel of 11 trained, non-expert evaluators to rank the selected CAPTCHAs on a five-point agreement scale according to the five cognitive functions mentioned in the introduction which have been deemed relevant to IT tasks and the TMT: visuospatial perception, motor function, executive function, inhibitory control, and working memory. The evaluation scores permitted each CAPTCHA to be assigned a rank according to the extent the cognitive functions required to perform it overlapped with those of the TMT. In order of highest to lowest alignment, the rankings were as follows: 1) RPM, 2) NumRec, 3) PicRec, 4) Google, and 5) Text, as presented in Table 1. For details of how this evaluation was conducted and how the process was validated, see the Appendix.

Table 1: Convergence ranks of IT tasks with the TMT

IT Task	RPM (E)	NumRec (D)	PicRec (B)	Google (C)	Text (A)
Executive function	5	4.91	4.45	4.45	3.82
Visual object recognition	4.09	4.27	4.64	4.82	4.18
Visual pattern recognition	4.91	4.45	4.64	3.82	4.64
Working Memory	4.18	3.91	2.91	2.45	2.73
<b>Mean evaluation score for reliable convergent dimensions</b>	<b>4.55</b>	<b>4.39</b>	<b>4.16</b>	<b>3.89</b>	<b>3.84</b>
<b>Convergence rank with TMT following the evaluation<sup>a</sup></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>

a: Based on the average evaluation scores of IT tasks on the reliable cognitive dimensions considered convergent with the TMT. A, B, C, D, E refer to the labels of the IT tasks presented in Figure 1.

### 3.2.2.1 Trail Making Test

Because we are interested in cognitive assessment for UX testing of IT, and because it was convenient to present all the tasks on the same device, we chose to use a digital version of the TMT called Axon (Language Research Development Group, Montreal QC, Canada). This version emulates the original TMT as an iPad application, allowing the user to draw the trail on the touchscreen with one finger. The two parts (A and B) of the TMT were completed, each with 25 circles to connect. Axon TMT was designed with a canvas generation algorithm, meaning that the test canvas for each subject for each TMT A and B was different. As shown in Figure 2, both tests presented a fixed page with 25 circles of 1 cm diameter placed randomly on the canvas in a homogeneous way. The rules of Axon were identical to those of the original TMT, as outlined by Bowie and Harvey (2006). Subjects had to connect the circles in ascending order: from 1 to 25 for part A and from 1 to 13 for part B, alternating numbers and letters in ascending order (i.e., 1, A, 2, B, 3, C, etc.). Errors such as lifting the finger off the screen, crossing trails, or connecting a wrong circle, resulted in the line for the latest segment to be automatically erased and subjects had to return to the last successfully reached circle in order to continue. The measures chosen for this study were the completion time for each of the two parts of the test, from the moment the layout was displayed until the last circle was reached.



Figure 2 – Screenshots of Axon-A and Axon-B, where subjects drew with their finger to connect the circles in ascending order (from 1 to 25 for part A and from 1 to 13 and A to L for part B, alternating numbers and letters) on a single line, without crossing paths or lifting their finger from the screen.

### 3.2.2.3 Cross-validation of the digital TMT with other cognitive tests

To better support and explain our results, we cross-validated Axon with the original TMT and a visual search and short-term memory task.

#### Original TMT

The original TMT was administered as outlined by Bowie and Harvey (2006) at the end of the study. The practice step was skipped in the interest of time and with the knowledge that the subject had already performed the digital TMT earlier in the study.

### Hidden Path Learning task

In order to cross-validate Axon's ability to measure working memory and spatial ability, we administered a hidden maze learning test, based on the Groton Maze Learning Test (GMLT) developed by Pietrzak et al. (2007). Our task was called the hidden path learning (HPL) task and was based on a 10 x 10 grid. Five trials were administered on the iPad via the Cognition Lab platform (BeriSoft, Inc., Redwood City CA, USA), following similar guidelines as the GMLT (Pietrzak et al., 2007). The hidden path learning task is particularly targeted at working memory, as the user has to call on it to navigate between tiles and remember any errors they may have made before (Thomas et al., 2014; Gould and Perrin, 1916). Correspondingly, working memory ability is associated with the extent to which completion time decreases over trials, revealing a learning curve. Thus, the metrics used for the present analyses were the difference between the completion time of each consecutive trial on the task. A depiction of the Hidden Path Learning task is presented in Figure 3 (left). Measures were automatically collected on the Cognition Lab server.

### Visual Search task

In order to cross-validate Axon's ability to measure visuomotor function, we administered a visual search task on the Cognition Lab platform (BeriSoft, Inc., Redwood City CA, USA). This task was based on the work of Treisman and Gelade (1980) and involved finding a target among distractors. Subjects had to touch the right side of the screen when they saw the target, the left side otherwise, therefore involving visual and psychomotor response ability. Three stimuli configurations were used, with 3 distractor sets. Configurations were displayed with 24 trials for each stimulus, leading to a total of 72 trials. For each trial, the set was 3, 6, or 9 symbols displayed (letters or shapes), a distribution that was evenly and randomly distributed among each stimulus sequence. A depiction of this task is presented in Figure 3 (right). Again, measures were automatically collected on the Cognition Lab server. Reaction times were used for the present analyses.

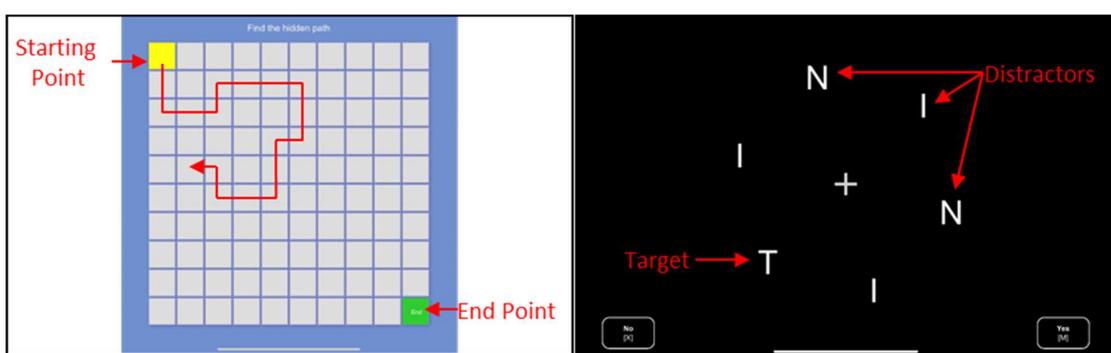
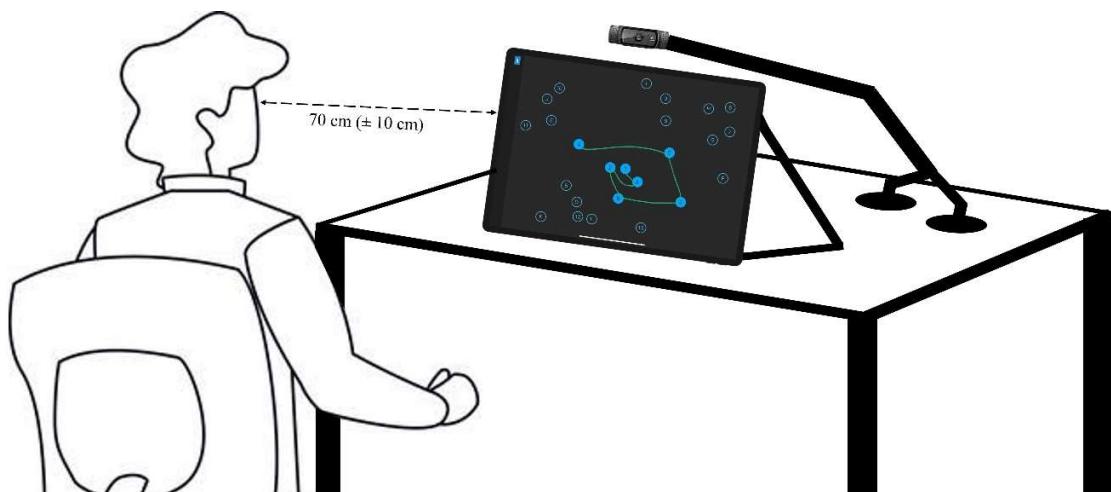


Figure 3 – Cross-validation tasks representing the Hidden Path Learning 10x10 matrix: subjects had to go from the yellow start point to the green end point one tile at a time and the Visual Search Task – 6 items with 5 distractors, I+N sequence: subjects had to touch 'Yes' at the bottom-right if they saw the target, 'No' at the bottom-left otherwise.

### 3.2.2 Procedures

Upon arrival and after signing the informed consent form, subjects were asked to sit on a chair facing the iPad Air (4<sup>th</sup> generation) running on iPadOS 15.3 (Apple Inc., Cupertino

CA, United States) placed on a desk and were asked to adjust the chair's height so that they were comfortable using the iPad, and they were within the camera recording frame. The experimental setup is presented in Figure 4. They were asked to move the chair closer or further away to maintain an approximate distance of 70 cm ( $\pm 10$ cm) between their eyes and the iPad screen to give enough space for hand movement during the tasks. The camera was fixed independently from the iPad, to avoid unwanted movements on the video when the subject presses the screen while doing the tasks. After a presentation of the study and the tools used, the subjects were asked to complete the two parts of the TMT (A, then B) on the Axon app. Task instructions were given in a protocol format to ensure that all subjects received the same instructions, and that the data would be comparable. Subjects were verbally and visually guided through the rules of the TMT using a tutorial embedded in the application.



*Figure 4 – Experimental setup diagram: the subject was seated at a chair in front of a desk where the iPad was placed. A Logitech C920 camera was independently fixed to the desk via a camera stand (with additional tape for more support).*

After completing parts A and B on the Axon application, subjects were administered the Hidden Path Learning and the Visual Search tasks. Then, subjects commenced the IT task portion of the experiment. As previously mentioned, subjects were told the primary objective was to evaluate five interfaces of more or less popular websites, each interface being on a secure server accessible only after the completion of a CAPTCHA. Thus, subjects completed a CAPTCHA, observed a web interface for a few minutes, and then completed the user-perceived web quality measurement scale (Aladwani and Palvia, 2002). This sequence was repeated five times, with the tasks presented in random order, each preceded by a distinct CAPTCHA. At the end of the study, for ethical reasons, subjects were told orally that they were in fact being evaluated on their performance on the CAPTCHAs.

After the IT tasks were completed, the original paper version of the TMT was administered. Unlike previous stages of the experiment where the moderator was in an observation room behind tinted glass, the moderator joined the subject in the experimental room to ensure TMT rule adherence, wearing a mask for sanitary reasons related to COVID-19. Upon completion, the recordings were stopped and stored on a secure cloud server. The subject was escorted out and informed about their 25\$ monetary compensation.

### **3.2.4 Statistical Analysis**

To test the ability of the Axon TMT to predict performance on the five CAPTCHA IT tasks, a repeated measures multivariate analysis of covariance (RM MANCOVA) was performed with Axon A completion time and Axon B completion time as independent predictors and the completion time for each of the five IT tasks as the dependent covariates.

To further interpret our results, we tested the relationship between Axon TMT completion times and visuomotor function by performing a RM MANCOVA with Axon A and Axon B times as independent predictors and the mean reaction time of each of the three visual search tasks (the shape of an arrow as a target among the triangle shapes as distractors, the letter T as a target among the letters I and N as distractors, and the letter T as a target among the letters I and Z as distractors) as the dependent covariates. Additionally, we tested the relationship between Axon TMT completion times and working memory function by performing a RM MANCOVA with Axon A and Axon B times as independent predictors and the difference between the completion time of each consecutive trials on the hidden path learning task as the dependant covariates. Finally, we cross validated the relationship between the Axon TMT and the original TMT using two Pearson's correlation tests, one each for tests A and B.

For all RM MANCOVA performed in the analysis, omnibus results and multivariate results for each independent predictor are reported. In the case of significant multivariate results, simple main effects based on parameter estimates are reported for dependant covariates which were significantly predicted by Axon.

All statistical analyses were conducted using the IBM SPSS Statistics software, version 28.0.1.1 (IBM Corp., Armonk, N.Y., USA) with a threshold for statistical significance set at  $p \leq 0.05$ , using the Bonferroni correction to adjust for multiple comparisons.

## **3.3 Results**

### **3.3.1 Axon TMT cross-validation**

#### *Axon TMT vs. the original TMT*

Axon A and B scores were (mean  $\pm$  SD)  $48.04 \pm 25.80$  s and  $56.88 \pm 25.53$  s, respectively. Scores on the original TMT A and B were  $29.22 \pm 12.26$  s and  $51.62 \pm 19.07$  s, respectively. Pearson's correlation tests revealed that Axon is highly correlated with TMT results, with a significant positive correlation between Axon A and TMT A ( $r = 0.688$ ,  $n$

= 26,  $p_{corr} = 0.001$ ), and a significant positive correlation between Axon B and TMT B ( $r = 0.505$ ,  $n = 26$ ,  $p_{corr} = 0.017$ ).

#### *Axon TMT vs. Visual Search Task*

Reaction times for the T among letters I and N, T among letters I and Z, and arrow among triangles was  $0.80 \pm 0.14$  ms,  $0.78 \pm 0.15$  ms, and  $0.68 \pm 0.14$  ms. The omnibus test of the RM MANCOVA revealed that Axon A and Axon B combined significantly explained the variance in visuomotor function assessed with reaction time to the three stimuli in the visual search task  $F_{(3, 21)} = 3.125$ ,  $p = 0.048$ , Wilks' Lambda = 0.691. Multivariate results revealed that this result was driven mainly by Axon A ( $F_{(3, 21)} = 3.220$ ,  $p = 0.043$ , Wilks' Lambda = 0.685), rather than Axon\_B ( $F_{(3, 21)} = 0.502$ ,  $p = 0.685$ , Wilks' Lambda = 0.933). Parameter estimates revealed that Axon A was marginally significantly predictive of reaction times to the letter T among letters I and N stimulus (Beta = 3.573,  $t = 2.767$ ,  $p_{corr} = 0.055$ ), and significant for letter T among letters I and Z (Beta = 4.353,  $t = 3.156$ ,  $p_{corr} = 0.022$ ) and arrow among triangles (Beta = 3.725,  $t = 3.158$ ,  $p_{corr} = 0.022$ ) stimuli.

#### *Axon TMT vs. Hidden Path Learning Task*

The difference in consecutive trial times was: 2-1)  $-29.87 \pm 17.70$ , 3-2)  $-5.48 \pm 6.01$  s, 4-3)  $-4.30 \pm 4.80$  s, and 5-4)  $-1.50 \pm 4.25$  s. The omnibus test of the RM MANCOVA revealed that Axon A and Axon B combined are significant to explain the variance in the decrease in completion times across consecutive trials:  $F_{(4, 20)} = 4.119$ ,  $p = 0.014$ , Wilks' Lambda = 0.548. However, multivariate results revealed that the decrease in completion times across trials was not predicted by Axon A ( $F_{(4, 20)} = 1.923$ ,  $p = 0.146$ , Wilks' Lambda = 0.722), nor Axon B ( $F_{(4, 20)} = 1.106$ ,  $p = 0.381$ , Wilks' Lambda = 0.819) alone. Thus, a predictive relationship appears to exist between Axon and working memory in the Hidden Path Learning task as a function of Axon A and B combined.

### **3.3.2 Axon TMT predicts overall IT performance**

The primary hypothesis assumed that there was a positive predictive relationship between TMT performance and IT task performance. The omnibus test of the RM MANCOVA revealed that Axon A and Axon B combined significantly explain the variance in IT tasks performance  $F_{(5, 19)} = 6.352$ ,  $p = 0.001$ , Wilks' Lambda = 0.374, therefore supporting the primary hypothesis. Multivariate results revealed that this effect was driven by performance on Axon B ( $F_{(5, 19)} = 3.382$ ,  $p = 0.024$ , Wilks' Lambda = 0.529). Figure 5 shows the distribution of Axon completion times in relation to IT task completion times.

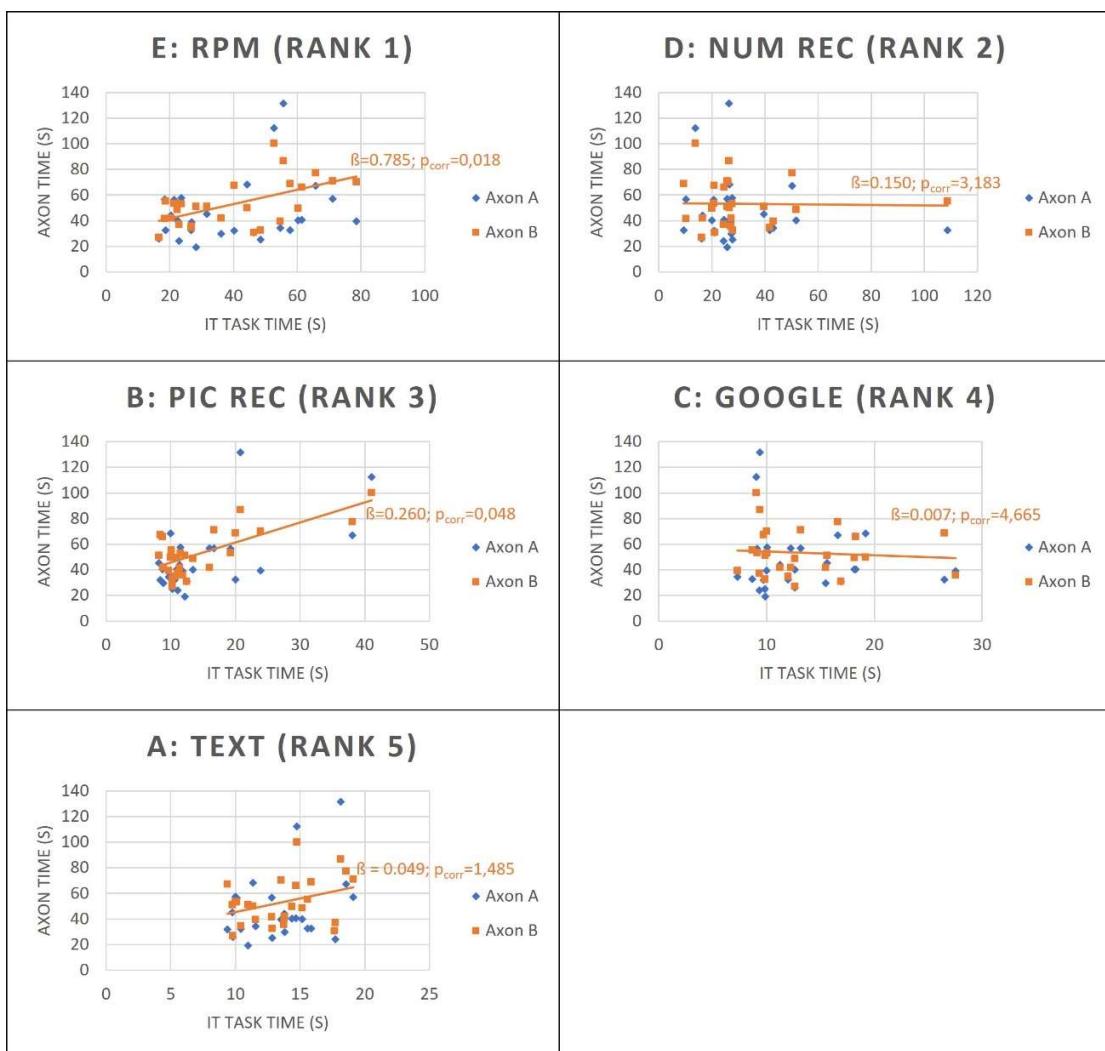


Figure 5 – Distribution of Axon B completion times in relation with the completion times of the five IT tasks. Axon B parameter estimates are presented ( $\beta$ ,  $p$ ) to demonstrate the effects of individual factors within Axon B on the variability in IT tasks performance.

### 3.3.3 Axon TMT better predicts performance on IT tasks with similar involved cognitive abilities

The second hypothesis assumed that the predictive relationship between TMT performance and IT task performance would be stronger if the cognitive abilities involved in the performance were congruent. To test our hypothesis, we analyzed the parameter estimates for the multivariate results of Axon B. These revealed that Axon B was significantly predictive of IT task C (RPM task) (Beta = 0.785,  $t = 3.240$ ,  $p_{corr} = 0,018$ ) and IT task B (pictogram recognition task) (Beta = 0.260,  $t = 2.824$ ,  $p_{corr} = 0,048$ ). However, IT task D (number recognition task), which was rated the second most congruent task with Axon was not significantly predicted by Axon B (Beta = 0.150,  $t = 0.479$ ,  $p_{corr} = 3,183$ ). Our secondary hypothesis is therefore partially supported. These

results are shown in Figure 5, where the effects of individual factors of Axon B on performance on IT tasks are represented ( $\beta$ ;  $p$ ).

### 3.4 Discussion

Cognitive functional ability may well affect task performance in UX and other research experimentation, leading to variance in performance measures among the target population and confounding the effects of experimental factors. Although detailed cognitive assessment batteries exist and can be used to control inter-subject differences in cognitive abilities (Dumont et al., 2015, 2016) they are not time-efficient and thus impractical to implement within typical experimental time-frames. Here, the present study tested the validity of using the Axon TMT, which only takes a few minutes to administer, to predict/explain the variance in IT task performance in an age-homogenous subject population.

The mean age of the subject population of the present sample was 24 years with a standard deviation of 4.22 years. This is typical of many research studies, UX related or otherwise, relying on student recruitment through the parent institution (Cuvillier et al., 2021, Passalacqua et al., 2020; Bracken et al., 2018). Despite the relatively low standard deviation of age, the standard deviation in Axon TMT scores was broad, at 25.80 s (mean 48.04 s) and 25.53 s (mean: 56.9 s) respectively for Axon A and B, suggesting a large distribution of cognitive functional abilities among this age-homogeneous neurotypical population. Notably, the means and SDs for the Axon TMT, particularly for Axon A, were higher than what is typically reported in the literature for neurotypical subjects in this age bracket (Tombaugh 2004, Giovagnoli et al. 1996, Arango-Lasprilla et al., 2015). This may be due to the fact that, unlike in the implementation of the paper-based TMT, subjects did not practice a mini version of the test before performing Axon A or B. Thus, some portion of the time taken to complete the test must be attributable to familiarization with task demands. This would also explain why the mean scores for Axon B, whose task demands are similar to Axon A in many respects, are closer to typically reported TMT B means. Nevertheless, for the purposes of the present study, it is not absolute Axon TMT scores which are important. Rather, it is the relative distribution of the variance in Axon scores and their correlation to other metrics which is essential. To that end, both Axon A and B significantly correlated to their respective paper-based TMT counterparts, showed a combined predictive validity towards working memory via the Hidden Path Learning Task. Furthermore, it was Axon A, not B, which was the predominant driver of the significant correlation with visual search performance. This is logical, as the visual search task does not involve working memory related processing (Shiffrin and Schneider, 1977; Treisman and Gelade, 1980). Instead, it requires emphasis on target identification, cognitive control, and motor output, precisely the dominant cognitive functions involved in the TMT A (Sánchez-Cubillo et al., 2009; Crowe, 1998; Gaudino et al., 1995). Thus, far from being problematic, implementing Axon A and B without a preliminary mini test for practice was not only time efficient, but yielded a reliable distribution of scores which could be cross correlated with expected cognitive functions.

This cross-validation lends credibility to our observation that Axon A and B combined were significantly predictive of IT task performance, supporting our primary hypothesis.

Interestingly, for the IT tasks chosen, it was Axon B which appeared the stronger driver of predictive validity, suggesting that it may be more powerful in capturing the executive decision making involved in an ecologically valid IT task. Moreover, simple main effects tests revealed that Axon B significantly correlated with two out of the top three tasks ranked as requiring congruent cognitive functions as the TMT, thereby partially supporting our secondary hypothesis. Contrary to our expectations, the numerical recognition task, which had the second highest congruence rank, was not significantly correlated with Axon B. We speculate that the confound here relates to the underlying mathematical operations involved in solving that CAPTCHA. Although raters classified this as executive decision making, it certainly can be said that neither the TMT A nor B require arithmetic. Therefore, there must be cognitive processes involved which are simply not recruited during performance of the TMT which our ranking system was not granularized enough to capture, hence explaining the lack of correlation between the Numerical Recognition task and Axon B. Meanwhile, Axon B was most strongly correlated with the RPM and Pictrogram Recognition task, suggesting that it is well suited for tasks involving visual pattern and object recognition in combination with higher-order executive processing to orient this visual information. These kinds of processing are arguably crucial for interface navigation, virtual reality, gaming, or using simulators, which are extremely common IT tasks investigated in UX research (Karran et al., 2019; Guertin-Lahoud et al., 2023; Courtemanche et al., 2019). Thus, while Axon does appear to be better aligned with IT tasks involving convergent cognitive processing, such tasks may well comprise a major proportion of those studied in UX research.

Finally, there are a few points worth emphasizing. First, the complete administration of Axon took less than five minutes, far shorter than the strategy employed by Dumont et al. (2015, 2016) or any other cognitive assessment that we are aware of. Second, considering Axon's ability to differentiate from among an age-homogeneous neurotypical population, it would likely perform even better among populations where a larger variance in cognitive function would be expected such as older adults, children, stroke survivors, or other individuals with atypical cognitive function. This is important because understanding how to design appropriate and accessible IT for these populations has become a topic of increasing concern in UX research (Giroux et al., 2021; Giroux et al., 2022; Zolyomi and Snyder, 2021; Demmans Epp et al., 2016). Moreover, Axon is suitable for remotely moderated experimentation, a popular strategy since the COVID-19 pandemic (Vasseur et al., 2021) and one that mitigates subject recruitment challenges for all population types. Lastly, the current advancement in technology, particularly in the field of artificial intelligence, is trending towards a more personalized and user-centric approach, adapting technology to individual user characteristics such as preferences and interests (Gajos et al., 2010; Amershi et al., 2019; Hussain et al., 2018). Part of this personalization could be to tailor technology according to the cognitive abilities of users. Axon could potentially facilitate this advancement, serving as a quick and reliable metric to train the AI technology adaptation algorithm.

There are some limitations which should be acknowledged with the present study. First, because the Axon app is designed to produce TMT canvases according to an algorithm with every test instance, the Axon A and B canvas layouts were not constant across subjects. This means that some of the variance in Axon A and B times is intrinsically

attributable to factors such as differences in the straight-line drawing path length of the test or the extent of visual interference between each drawing segment. On the other hand, the fact that Axon A and B were significantly cross-validated with the original TMT and the Visual Search and Hidden Path Learning tasks in spite of canvas layout differences between subjects suggests that the variance these differences cause is small and does not detract from the utility of Axon as a cognitive profiling tool in UX testing. Second, the present study tested the predictive validity of Axon on simple and discrete IT tasks. This was necessary as a proof of concept for our hypotheses. However, readers should use caution when generalizing the present results. Further research is needed to investigate the extent to which Axon retains predictive validity for more complex IT tasks in different contexts and across various user demographics, including neuroatypical and cognitively impaired users.

### **3.5 Conclusion**

The present study tested the ability of the Axon digital TMT to predict performance on discrete IT tasks. The results demonstrate that general variance in IT task performance among an age-homogenous neurotypical population can be related to inter-subject variance in cognitive function as assessed by Axon. Although the findings suggest that Axon's predictive validity may be strongest for IT tasks involving the combination of decision making with visual object and pattern recognition, these types of cognitive processing would arguably be relevant to the majority of IT interfaces. In conclusion, and considering its short administration time and remote implementability, the Axon digital TMT has potential to be a useful cognitive profiling tool for IT-based UX research.

## Appendix

### *Evaluation of involved cognitive functions in IT Tasks*

An evaluation was conducted prior to the study to confirm our assumptions about the cognitive abilities involved in the performance on the five computer tasks we chose to present as CAPTCHAs. The evaluators were 11 graduate and postgraduate students from our user research lab (9 female and 2 male evaluators, mean of 25 years old, standard deviation of 2.21). The goal of this evaluation was to assess the extent to which different cognitive functions were needed to perform the CAPTCHAs used as IT tasks in the present study. Evaluators were trained by the authors, then performed the CAPTCHAs and rated them on a 5-point Likert scale according to the following cognitive functions the introduction highlighted as relevant for general IT tasks and the TMT: visual perception, motor function, executive function, inhibitory control and working memory. Visual perception was subdivided into two functions: visual object recognition and visual pattern recognition. Evaluators were provided detailed descriptions of each of the seven cognitive functions and reviewed each of them with the authors. The IT tasks and their evaluation grids were presented randomly, to limit the risk of bias. Assessments were recorded using the online survey tool Qualtrics.

An intraclass correlation analysis was conducted to investigate the reliability of the evaluators in each group. Intraclass correlation coefficients (ICC) for the means of each cognitive ability scores are presented in Supplemental Table 1. After the intraclass correlation reliability analysis, only reliable cognitive abilities were considered for further analysis. Each CAPTCHA was assigned a TMT convergence rank according to its mean evaluation score across all reliably evaluated cognitive functions.

**Supplemental Table 1:** Convergence ranks of IT tasks with the TMT

Evaluation category	RPM	NumRec	PicRec	Google	Text	Reliability (ICC; p)
Executive function	5	4.91	4.45	4.45	3.82	0,756; 0,001
Visual object recognition	4.09	4.27	4.64	4.82	4.18	0,557; 0,043
Visual pattern recognition	4.91	4.45	4.64	3.82	4.64	0,740; 0,002
Working Memory	4.18	3.91	2.91	2.45	2.73	0,911; 0,000
Motor function <sup>a</sup>	3.09	3.27	3.27	3.82	3.27	0,252; 0,254
Inhibitory control <sup>a</sup>	3.36	3.18	2.64	2.64	3.09	-0,95; 0,501
<b>Mean evaluation score for reliable convergent dimensions</b>	<b>4.55</b>	<b>4.39</b>	<b>4.16</b>	<b>3.89</b>	<b>3.84</b>	
<b>Convergence rank with TMT following the evaluation<sup>b</sup></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	

a: Not used for convergence ranking due to reliability. b: Based on the mean evaluation scores for reliable categories. ICC : Intra-class coefficients



## References

- Aladwani, A. M., & Palvia, P. C. (2002). Developing and validating an instrument for measuring user-perceived web quality. *Information & management*, 39(6), 467-476.
- Allen, B. (1994). Cognitive abilities and information system usability. *Information processing & management*, 30(2), 177-191.
- Amershi, S., Weld, D., Vorvoreanu, M., Journey, A., Nushi, B., Collisson, P., ... & Horvitz, E. (2019, May). Guidelines for human-AI interaction. In *Proceedings of the 2019 chi conference on human factors in computing systems* (pp. 1-13).
- Andreessen, L. M., Gerjets, P., Meurers, D., & Zander, T. O. (2021). Toward neuroadaptive support technologies for improving digital reading: a passive BCI-based assessment of mental workload imposed by text difficulty and presentation speed during reading. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 31, 75-104.
- Arango-Lasprilla, J. C., Rivera, D., Aguayo, A., Rodríguez, W., Garza, M. T., Saracho, C. P., ... & Perrin, P. B. (2015). Trail Making Test: normative data for the Latin American Spanish speaking adult population. *NeuroRehabilitation*, 37(4), 639-661.
- Armitage, S. G. (1946). An analysis of certain psychological tests used for the evaluation of brain injury. *Psychological monographs*, 60(1), i.
- Army, U. S. (1944). Manual of directions and scoring. *War Department, Adjutant General's office (Ed)*. Washington, DC.
- Aykin, N. M., & Aykin, T. (1991). Individual differences in human-computer interaction. *Computers & industrial engineering*, 20(3), 373-379.
- Bowie, C. R., & Harvey, P. D. (2006). Administration and interpretation of the Trail Making Test. *Nature protocols*, 1(5), 2277-2281.
- Bracken, M. R., Mazur-Mosiewicz, A., & Glazek, K. (2018). Trail Making Test: Comparison of paper-and-pencil and electronic versions. *Applied Neuropsychology: Adult*.
- Chan, M. Y., Haber, S., Drew, L. M., & Park, D. C. (2016). Training older adults to use tablet computers: Does it enhance cognitive function? *The Gerontologist*, 56(3), 475-484.
- Courtemanche, F., Labonté-LeMoine, E., Léger, P. M., Fredette, M., Senecal, S., Cameron, A. F., ... & Bellavance, F. (2019). Texting while walking: An expensive switch cost. *Accident Analysis & Prevention*, 127, 1-8.
- Crowe, S. F. (1998). The differential contribution of mental tracking, cognitive flexibility, visual search, and motor speed to performance on parts A and B of the Trail Making Test. *Journal of clinical psychology*, 54(5), 585-591.
- Cuvillier, M., Léger, P. M., & Sénecal, S. (2021). Quantity over quality: Do single-item scales reflect what users truly experienced?. *Computers in Human Behavior Reports*, 4, 100097.

- Czaja, S. J., Charness, N., Fisk, A. D., Hertzog, C., Nair, S. N., Rogers, W. A., & Sharit, J. (2006). Factors predicting the use of technology: findings from the Center for Research and Education on Aging and Technology Enhancement (CREATE). *Psychology and aging, 21*(2), 333.
- Czaja, S. J., Sharit, J., Nair, S., & Rubert, M. (1998). Understanding sources of user variability in computer-based data entry performance. *Behaviour & Information Technology, 17*(5), 282-293.
- Demmans Epp, C., McEwen, R., Campigotto, R., & Moffatt, K. (2016). Information practices and user interfaces: Student use of an iOS application in special education. *Education and Information Technologies, 21*, 1433-1456.
- Edelman, J. A., & Keller, E. L. (1996). Activity of visuomotor burst neurons in the superior colliculus accompanying express saccades. *Journal of neurophysiology, 76*(2), 908-926.
- Ekstrom, R. B., & Harman, H. H. (1976). *Manual for kit of factor-referenced cognitive tests, 1976*. Educational testing service.
- Folstein, M. F., Folstein, S. E., & McHugh, P. R. (1975). "Mini-mental state": a practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of psychiatric research, 12*(3), 189-198.
- Gade, M., Schuch, S., Druey, M. D., & Koch, I. (2014). Inhibitory control in task switching. *Task switching and cognitive control*, 137-159.
- Gajos, K. Z., Weld, D. S., & Wobbrock, J. O. (2010). Automatically generating personalized user interfaces with Supple. *Artificial intelligence, 174*(12-13), 910-950.
- Gaudino, E. A., Geisler, M. W., & Squires, N. K. (1995). Construct validity in the Trail Making Test: what makes Part B harder? *Journal of clinical and experimental neuropsychology, 17*(4), 529-535.
- Giovagnoli, A. R., Del Pesce, M., Mascheroni, S., Simoncelli, M., Laiacona, M., & Capitani, E. (1996). Trail making test: normative values from 287 normal adult controls. *The Italian journal of neurological sciences, 17*, 305-309.
- Giroux, F., Boasen, J., Stagg, C. J., Sénécal, S., Coursaris, C., & Léger, P. M. (2021). Motor dysfunction simulation in able-bodied participants for usability evaluation of assistive technology: a research proposal. In *Information Systems and Neuroscience: NeuroIS Retreat 2021* (pp. 30-37). Springer International Publishing.
- Giroux, F., Couture, L., Lasbareille, C., Boasen, J., Stagg, C. J., Fleming, M. K., ... & Léger, P. M. (2022). Usability evaluation of assistive technology for ICT accessibility: Lessons learned with stroke patients and able-bodied participants experiencing a motor dysfunction simulation. In *Information Systems and Neuroscience: NeuroIS Retreat 2022* (pp. 349-359). Cham: Springer International Publishing.
- Gossweiler, R., Kamvar, M., & Baluja, S. (2009). What's up CAPTCHA? A CAPTCHA based on image orientation. In *Proceedings of the 18th international conference on World wide web* (pp. 841-850).

- Gould, M. C., & Perrin, F. (1916). A comparison of the factors involved in the maze learning of human adults and children. *Journal of Experimental Psychology*, 1(2), 122.
- Groff, M. G., & Hubble, L. (1981). A factor analytic investigation of the Trail Making Test. *Clinical neuropsychology*.
- Guertin-Lahoud, S., Coursaris, C. K., Sénécal, S., & Léger, P. M. (2023). User Experience Evaluation in Shared Interactive Virtual Reality. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 26(4), 263-272.
- Hussain, J., Ul Hassan, A., Muhammad Bilal, H. S., Ali, R., Afzal, M., Hussain, S., ... & Lee, S. (2018). Model-based adaptive user interface based on context and user experience evaluation. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 12, 1-16.
- Isaacs, E., Oates, J., & be, I. E. a--p. i. (2008). Nutrition and cognition: assessing cognitive abilities in children and young people. *European journal of nutrition*, 47, 4-24.
- Ji, H., Yun, Y., Lee, S., Kim, K., & Lim, H. (2018). An adaptable UI/UX considering user's cognitive and behavior information in distributed environment. *Cluster Computing*, 21, 1045-1058.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1976). Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive psychology*, 8(4), 441-480.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: from eye fixations to comprehension. *Psychological review*, 87(4), 329.
- Karahoca, D., Karahoca, A., & Güngör, A. (2008). Assessing effectiveness of the cognitive abilities and individual differences on e-learning portal usability evaluation. In *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Systems and Technologies and Workshop for PhD Students in Computing* (pp. IV-8).
- Karran, A. J., Demazure, T., Leger, P. M., Labonte-LeMoine, E., Senecal, S., Fredette, M., & Babin, G. (2019). Toward a hybrid passive bci for the modulation of sustained attention using EEG and fNIRS. *Frontiers in human neuroscience*, 13, 393.
- Khalili-Mahani, N., Assadi, A., Li, K., Mirgholami, M., Rivard, M.-E., Benali, H., Sawchuk, K., & De Schutter, B. (2020). Reflective and reflexive stress responses of older adults to three gaming experiences in relation to their cognitive abilities: mixed methods crossover study. *JMIR mental health*, 7(3), e12388.
- Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (1997). An overview of the EPIC architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 12(4), 391-438.
- Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M., & Koch, I. (2010). Control and interference in task switching—A review. *Psychological bulletin*, 136(5), 849.

- Kunda, M., McGreggor, K., & Goel, A. K. (2013). A computational model for solving problems from the Raven's Progressive Matrices intelligence test using iconic visual representations. *Cognitive Systems Research*, 22, 47-66.
- Lallemand, C., & Gronier, G. (2015). *Méthodes de design UX: 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs*. Editions Eyrolles.
- Lewis, J. R. (2012). Usability testing. *Handbook of human factors and ergonomics*, 1267-1312.
- Lezak, M. D., Howieson, D. B., Loring, D. W., & Fischer, J. S. (2004). *Neuropsychological assessment*. Oxford University Press, USA.
- Martins, A. I., Silva, A. G., Pais, J., Cruz, V. T., & Rocha, N. P. (2022). The impact of users' cognitive function on evaluator perceptions of usability. *Scientific Reports*, 12(1), 13753.
- Meegan, D. V., & Tipper, S. P. (1999). Visual search and target-directed action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(5), 1347.
- Mitrushina, M., Boone, K. B., Razani, J., & D'Elia, L. F. (2005). *Handbook of normative data for neuropsychological assessment*. Oxford University Press.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive psychology*, 41(1), 49-100.
- Nasreddine, Z. S., Phillips, N. A., Bédirian, V., Charbonneau, S., Whitehead, V., Collin, I., Cummings, J. L., & Chertkow, H. (2005). The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment. *Journal of the American Geriatrics Society*, 53(4), 695-699.
- Passalacqua, M., Léger, P. M., Nacke, L. E., Fredette, M., Labonté-Lemoyne, É., Lin, X., Caprioli, T., & Sénechal, S. (2020). Playing in the backstore: interface gamification increases warehousing workforce engagement. *Industrial Management & Data Systems*, 120(7), 1309-1330.
- Periáñez, J., Ríos-Lago, M., Rodríguez-Sánchez, J., Adrover-Roig, D., Sánchez-Cubillo, I., Crespo-Facorro, B., Quemada, J., & Barceló, F. (2007). Trail Making Test in traumatic brain injury, schizophrenia, and normal ageing: Sample comparisons and normative data. *Archives of clinical neuropsychology*, 22(4), 433-447.
- Pietrzak, R. H. (2007). *The Groton Maze Learning Test: Construct validity, factor structure, and application to normal aging, pathological gambling, and attention deficit hyperactivity disorder*. University of Connecticut.
- Pietrzak, R. H., Maruff, P., Mayes, L. C., Roman, S. A., Sosa, J. A., & Snyder, P. J. (2008). An examination of the construct validity and factor structure of the Groton Maze Learning Test, a new measure of spatial working memory, learning efficiency, and error monitoring. *Archives of clinical neuropsychology*, 23(4), 433-445.

- Poole, A., & Ball, L. J. (2006). Eye tracking in HCI and usability research. In *Encyclopedia of human computer interaction* (pp. 211-219). IGI global.
- Reitan, R. M. (1955). The relation of the trail making test to organic brain damage. *Journal of consulting psychology*, 19(5), 393.
- Reitan, R. M., & Wolfson, D. (1992). Conventional intelligence measurements and neuropsychological concepts of adaptive abilities. *Journal of clinical psychology*, 48(4), 521-529.
- Riedl, R., Léger, P.-M., Riedl, R., & Léger, P.-M. (2016). Tools in NeuroIS research: an overview. *Fundamentals of NeuroIS: Information Systems and the Brain*, 47-72.
- Robbins, T., & Sahakian, B. J. (2002). Computer methods of assessment of cognitive function. *Principles and practice of geriatric psychiatry*, 147-151.
- Sánchez-Cubillo, I., Periáñez, J. A., Adrover-Roig, D., Rodríguez-Sánchez, J. M., Ríos-Lago, M., Tirapu, J., & Barceló, F. (2009). Construct validity of the Trail Making Test: role of task-switching, working memory, inhibition/interference control, and visuomotor abilities. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 15(3), 438-450.
- Schatz, R., Egger, S., & Masuch, K. (2012). The impact of test duration on user fatigue and reliability of subjective quality ratings. *Journal of the Audio Engineering Society*, 60(1/2), 63-73.
- Schear, J. M., & Sato, S. D. (1989). Effects of visual acuity and visual motor speed and dexterity on cognitive test performance. *Archives of clinical neuropsychology*, 4(1), 25-32.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological review*, 84(1), 1.
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological review*, 84(2), 127.
- Slegers, K., Van Boxtel, M. P., & Jolles, J. (2009). The efficiency of using everyday technological devices by older adults: the role of cognitive functions. *Ageing & Society*, 29(2), 309-325.
- Strauss, E., Sherman, E. M., & Spreen, O. (2006). *A compendium of neuropsychological tests: Administration, norms, and commentary*. American chemical society.
- Szulc, J. M., Davies, J., Tomczak, M. T., & McGregor, F.-L. (2021). AMO perspectives on the well-being of neurodivergent human capital. *Employee Relations: The International Journal*.
- Thomas, E., Snyder, P. J., Pietrzak, R. H., & Maruff, P. (2014). Behavior at the choice point: Decision making in hidden pathway maze learning. *Neuropsychology review*, 24(4), 514-536.

- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive psychology*, 12(1), 97-136.
- Ulrich, R. S. (1983). Aesthetic and affective response to natural environment. *Behavior and the natural environment*, 85-125.
- Vasseur, A., Léger, P. M., Courtemanche, F., Labonte-Lemoyne, E., Georges, V., Valiquette, A., ... & Sénelac, S. (2021). Distributed remote psychophysiological data collection for UX evaluation: a pilot project. In *Human-Computer Interaction. Theory, Methods and Tools: Thematic Area, HCI 2021, Held as Part of the 23rd HCI International Conference, HCII 2021, Virtual Event, July 24–29, 2021, Proceedings, Part I 23* (pp. 255-267). Springer International Publishing.
- Wagner, N., Hassanein, K., & Head, M. (2014). The impact of age on website usability. *Computers in Human Behavior*, 37, 270-282.
- Weintraub, S., Dikmen, S. S., Heaton, R. K., Tulsky, D. S., Zelazo, P. D., Bauer, P. J., Carlozzi, N. E., Slotkin, J., Blitz, D., & Wallner-Allen, K. (2013). Cognition assessment using the NIH Toolbox. *Neurology*, 80(11 Supplement 3), S54-S64.
- Zolyomi, A., & Snyder, J. (2021). Social-emotional-sensory design map for affective computing informed by neurodivergent experiences. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 5(CSCW1), 1-37.

## Conclusion

### Résumé des résultats clés

La revue de littérature de ce mémoire a permis d'exposer les liens entre les capacités cognitives et l'utilisation des technologies de l'information afin d'identifier le manque actuel de méthodes d'évaluation cognitive rapide en UX. L'étude empirique a permis de combler ce besoin en proposant une nouvelle méthode d'évaluation cognitive rapide en contexte d'évaluation UX, via l'application Axon. Les résultats de l'étude montrent qu'une corrélation positive a été observée entre les performances sur des tâches TI et l'évaluation cognitive réalisée avec le test Axon, ce qui permet de supporter la première hypothèse. De plus, les résultats ont permis de démontrer qu'en général, la validité prédictive d'Axon était plus forte pour les tâches nécessitant des capacités cognitives similaires à celles mesurées par le test, ce qui permet de supporter la seconde hypothèse. En outre, les résultats d'Axon ont démontré une corrélation positive avec les résultats de la version originale du TMT, en plus de présenter une relation statistiquement significative avec les tâches de capacité visuelle et les tâches de mémoire de travail, fournissant des preuves suffisantes pour corroborer la validité de cette version numérique.

Les sujets de cette étude constituaient un groupe homogène de jeunes adultes ne présentant aucun signe antérieur de dysfonctionnement neurologique, et avaient donc probablement des capacités cognitives similaires. Malgré cela, les scores du TMT ont montré une corrélation significative avec les performances dans les tâches TI, ce qui prouve le pouvoir de différenciation de ce test, même à un niveau granulaire. Cela suggère que l'utilisation de ce test serait encore plus prédictive des performances sur des tâches TI dans les études impliquant des populations diverses comme les individus neuro-atypiques, ou même des adultes plus âgés, des enfants, des individus ayant des accidents vasculaires cérébraux, et d'autres individus avec des déficiences cognitives.

## Contribution à la connaissance

Les résultats de l'étude suggèrent néanmoins qu'un nouvel outil d'évaluation cognitive, plus court, pourrait être utilisé pour prédire la performance des tâches TI dans un contexte de recherche en expérience utilisateur. Bien que ce test ne fournisse pas des résultats précis et détaillés, il a néanmoins le potentiel de fournir des informations utiles : nous pensons qu'il s'agit d'un premier pas vers un meilleur contrôle des capacités cognitives individuelles, une information statistique importante dans un domaine où cette différence n'est que rarement prise en compte dans l'analyse, en raison de la complexité des méthodes d'évaluation cognitive actuelles. L'inclusion de cette information faciliterait une plus grande différenciation entre les utilisateurs, ce qui permettrait une explication et une interprétation plus complètes de la variance des résultats observés dans les tests d'utilisateurs. Elle permettrait également de prendre en compte les utilisateurs neuro-atypiques dans la conception d'interfaces, rendues alors plus accessibles.

Cette étude complète les travaux de Dumont et al. (2015), qui ont conçu une grille d'analyse cognitive pour établir des parallèles statistiques entre la demande cognitive d'une interface et la performance d'un utilisateur en fonction de son profil cognitif (Dumont et al., 2015, 2016). L'utilisation d'Axon à la place d'une batterie de tests cognitifs réduirait considérablement le temps consacré à l'évaluation cognitive, ce qui permettrait d'établir des parallèles statistiques entre les capacités cognitives des utilisateurs et les capacités cognitives requises pour chaque tâche, et d'ainsi orienter les hypothèses et mieux expliquer les performances des utilisateurs pour de nombreuses études qui étaient auparavant limitées par des contraintes de temps. L'adoption d'une courte étape d'évaluation cognitive avant un test utilisateur dans un grand nombre d'études pourrait permettre de mieux comprendre le potentiel de ces informations dans l'interprétation des résultats sur les tâches TI dans un contexte UX.

L'un des moyens de différencier les états cognitifs des utilisateurs dans l'UX est l'utilisation de l'oculométrie, ou *eye-tracking* (Riedl et Léger, 2016). Des mesures oculométriques peuvent même refléter des capacités cognitives : la durée des fixations individuelles peut refléter l'efficacité de la capacité de traitement de l'information visuelle

(Just et Carpenter, 1976; Irwin, 2004) et la vitesse de saccade peut refléter la fonction visuomotrice (Edelman et Keller, 1996). Bien que cela nécessiterait une étude plus approfondie, nous pensons que l'utilisation du TMT pour mesurer les capacités cognitives pourrait être une alternative ou un complément à l'oculométrie pour expliquer les différences de performance à la tâche. En effet, un oculomètre est un outil relativement coûteux, complexe à utiliser et analyser (Chennamma et Yuan, 2013 ; Lai et al., 2013). L'oculométrie nécessite en effet un contrôle strict des conditions expérimentales, comme l'éclairage, le contenu affiché (image vs texte), l'angle de vue, la distance entre les yeux et l'écran, et d'autres (Carter et Luke, 2020). Un test rapide sur tablette pourrait s'avérer particulièrement utile pour les chercheurs UX voulant avoir un indice de l'état des capacités cognitives de leurs utilisateurs participant à un test sur application mobile, à un test à distance ou dans tout autre scénario où la mise en œuvre d'un oculomètre n'est pas pratique.

La validation de l'outil Axon présente des opportunités pour les chercheurs, qui peuvent maintenant disposer d'une version numérique du TMT pouvant être utilisée sur une tablette et ainsi évaluer les capacités cognitives d'individus de manière rapide et pratique. Les résultats peuvent être exportés directement à partir de l'application Axon, ce qui représente un gain de temps pour l'analyse des données. En outre, cette version numérique pourrait permettre aux chercheurs de surveiller les différences de capacités cognitives entre les utilisateurs dans des environnements moins contrôlés, tels que les expériences à distance, un phénomène qui a pris de l'ampleur depuis la pandémie de COVID-19 (Vasseur et al., 2021). Outre le domaine des systèmes d'information, cette étude a des implications pour la recherche en général, car elle fournit une méthode simple et efficace pour évaluer les capacités cognitives. Axon pourrait aussi se montrer utile au-delà du monde de la recherche, à un niveau individuel, comme surveiller ses propres capacités cognitives au fil du temps, mais aussi servir d'outil de diagnostic préliminaire lors des consultations de télémédecine, ou toute autre pratique pouvant bénéficier de sa portabilité et de sa facilité d'utilisation. Cette méthodologie pourrait notamment être utile là où l'évaluation cognitive peut avoir un impact : nos résultats offrent en effet la possibilité d'étendre la recherche à d'autres domaines non cliniques dans lesquels on souhaite mesurer

les capacités cognitives des individus, comme chez les étudiants, les employés, les candidats à des postes professionnels, etc.

Les progrès technologiques actuels, en particulier dans le domaine de l'intelligence artificielle, tendent vers une approche plus personnalisée et centrée sur l'utilisateur, en adaptant la technologie aux caractéristiques individuelles de l'utilisateur, telles que ses préférences et ses intérêts (Gajos et al., 2010). En outre, il peut être tout aussi important d'adapter la technologie aux capacités cognitives des utilisateurs afin de rendre son utilisation plus accessible et inclusive pour tous, quel que soit son niveau cognitif (Ji et al., 2018; Andreessen, 2021, Gajos et al., 2010). Un outil comme Axon pourrait alors être d'une grande aide pour établir le profil cognitif d'un utilisateur afin de concevoir des interfaces plus personnalisées pour ce dernier.

## **Futures recherches**

Des recherches ultérieures pourraient approfondir ce travail de validation d'Axon en augmentant la taille de l'échantillon. Par ailleurs, cette expérience a testé la validité d'Axon en contraste avec des tâches TI simples : il serait intéressant de comparer les résultats d'Axon avec des tâches TI plus complexes. Dans l'ensemble, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour continuer à étudier la validité prédictive d'Axon dans des tâches TI dans différents contextes d'utilisation et avec une démographie d'utilisateurs plus variée, notamment en comprenant des utilisateurs neuro-atypiques et des utilisateurs atteints de déficiences cognitives. De plus, il serait intéressant de comparer les résultats de l'évaluation cognitive d'Axon avec les fixations individuelles et saccades des utilisateurs sur des tâches TI. Cela pourrait permettre d'évaluer dans quelle mesure Axon pourrait être une alternative ou un complément à l'oculométrie pour expliquer les performances sur des tâches TI.

## **Conclusion générale**

Les résultats de ces travaux de recherche ont permis de démontrer que les résultats obtenus après une évaluation cognitive étaient prédictifs des performances sur des tâches effectuées sur des interfaces en TI. En outre, cette étude a permis de mettre en avant un

sujet encore marginal dans la littérature en HCI : la neurodiversité. Ayant un trouble de déficit de l'attention, ce travail de recherche est finalement devenu une affaire personnelle : mon objectif était entre autres de permettre à la recherche de prendre en compte la communauté d'utilisateurs neuro-atypiques dans les nouvelles avancées en intelligence artificielle qui amènent de plus en plus rapidement des technologies personnalisées et adaptées à chacun. Enfin, le développement de l'outil Axon permettra non seulement de prendre conscience de l'importance de considérer les différences de capacités cognitives individuelles en UX, mais aussi de permettre le développement de technologies accessibles à tous, en adaptant la conception des interfaces aux capacités cognitives intrinsèques à tous les utilisateurs.

## Bibliographie

- Ackerman, P. L. (1988). Determinants of individual differences during skill acquisition: Cognitive abilities and information processing. *Journal of experimental psychology: General*, 117(3), 288.
- Aggarwal, A., & Kean, E. (2010). Comparison of the Folstein Mini Mental State Examination (MMSE) to the Montreal Cognitive Assessment (MoCA) as a Cognitive Screening Tool in an Inpatient .... *Neuroscience & Medicine*, 1, 39-42. <https://doi.org/10.4236/nm.2010.12006>
- Aladwani, A. M., & Palvia, P. C. (2002). Developing and validating an instrument for measuring user-perceived web quality. *Information & management*, 39(6), 467-476.
- Allen, B. (1994). Cognitive abilities and information system usability. *Information processing & management*, 30(2), 177-191.
- Amershi, S., Weld, D., Vorvoreanu, M., Fourney, A., Nushi, B., Collisson, P., ... & Horvitz, E. (2019, May). Guidelines for human-AI interaction. In *Proceedings of the 2019 chi conference on human factors in computing systems* (pp. 1-13).
- Anderson, C. A., & Bushman, B. J. (2001). Effects of violent video games on aggressive behavior, aggressive cognition, aggressive affect, physiological arousal, and prosocial behavior: A meta-analytic review of the scientific literature. *Psychological Science*, 12(5), 353-359.
- Anderson, J. R., & Jeffries, R. (1985). Novice LISP errors: Undetected losses of information from working memory. *Human–Computer Interaction*, 1(2), 107-131.
- Anderson, S. W., Damasio, H., Jones, R. D., & Tranel, D. (1991). Wisconsin Card Sorting Test performance as a measure of frontal lobe damage. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 13(6), 909-922.
- Ando, T. (1971). *Aristotle's theory of practical cognition*. Springer.

Andreessen, L. M., Gerjets, P., Meurers, D., & Zander, T. O. (2021). Toward neuroadaptive support technologies for improving digital reading: a passive BCI-based assessment of mental workload imposed by text difficulty and presentation speed during reading. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 31, 75-104.

Anguera, J. A., & Gazzaley, A. (2015). Video games, cognitive exercises, and the enhancement of cognitive abilities. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 4, 160-165.

Arango-Lasprilla, J., Rivera, D., Aguayo, A., Rodríguez, W., Garza, M., Saracho, C., Rodríguez-Agudelo, Y., Aliaga, A., Weiler, G., & Luna, M. (2015). Trail Making Test: normative data for the Latin American Spanish speaking adult population. *NeuroRehabilitation*, 37(4), 639-661.

Ardila, A., Ostrosky-Solis, F., Rosselli, M., & Gómez, C. (2000). Age-related cognitive decline during normal aging: the complex effect of education. *Archives of clinical neuropsychology*, 15(6), 495-513.

Armitage, S. G. (1946). An analysis of certain psychological tests used for the evaluation of brain injury. *Psychological monographs*, 60(1), i.

Army, U. S. (1944). Army individual test battery. *Manual of directions and scoring*. War department, Adjutant General's office (Ed). Washington, DC.

Arsić, S., Jevremović, A., & Antonijević, M. (2020). Modern approach to neuropsychological assessment as a predictor of computerized cognitive rehabilitation. *Approaches and Models in Special Education and Rehabilitation—Thematic Collection of International Importance*, 25-35.

Ashendorf, L., Jefferson, A. L., O'Connor, M. K., Chaisson, C., Green, R. C., & Stern, R. A. (2008). Trail Making Test errors in normal aging, mild cognitive impairment, and dementia. *Archives of clinical neuropsychology*, 23(2), 129-137.

Avlonitis, G. J., & Karayanni, D. A. (2000). The impact of internet use on business-to-business marketing: examples from American and European companies. *Industrial marketing management*, 29(5), 441-459.

- Aykin, N. M., & Aykin, T. (1991). Individual differences in human-computer interaction. *Computers & industrial engineering*, 20(3), 373-379.
- Baddeley, A. (2012). Working memory: Theories, models, and controversies. *Annual review of psychology*, 63, 1-29.
- Bandura, A. (1986). The explanatory and predictive scope of self-efficacy theory. *Journal of social and clinical psychology*, 4(3), 359-373.
- Baniqued, P. L., Kranz, M. B., Voss, M. W., Lee, H., Cosman, J. D., Severson, J., & Kramer, A. F. (2014). Cognitive training with casual video games: points to consider. *Frontiers in psychology*, 4, 1010.
- Baniqued, P. L., Lee, H., Voss, M. W., Basak, C., Cosman, J. D., DeSouza, S., Severson, J., Salthouse, T. A., & Kramer, A. F. (2013). Selling points: What cognitive abilities are tapped by casual video games? *Acta psychologica*, 142(1), 74-86.
- Barnes, S. J., Pressey, A. D., & Scornavacca, E. (2019). Mobile ubiquity: Understanding the relationship between cognitive absorption, smartphone addiction and social network services. *Computers in Human Behavior*, 90, 246-258.
- Barreto, A., Zhai, J., & Adjouadi, M. (2007, 2007//). Non-intrusive Physiological Monitoring for Automated Stress Detection in Human-Computer Interaction. *Human–Computer Interaction*, Berlin, Heidelberg.
- Beare, J. I. (1906). *Greek theories of elementary cognition from Alcmaeon to Aristotle*. Clarendon Press.
- Beckmann, J., Bertel, S., & Zander, S. (2014). Adaptive eLearning based on individual learning styles—Performance and emotional factors. *Mensch & Computer 2014-Tagungsband*.
- Berg, E. A. (1948). A Simple Objective Technique for Measuring Flexibility in Thinking. *The Journal of General Psychology*, 39(1), 15-22.  
<https://doi.org/10.1080/00221309.1948.9918159>

Bertel, S. (2014, June). Individual Cognitive Abilities and Styles in HCI: Three Main Challenges and a Tiered Adaptation Model. In *Proceedings of HCI Engineering 2014, Workshop at the ACM SIGCHI EICS Conference* (pp. 12-16).

Binet, A., & Simon, T. (1948). The development of the Binet-Simon Scale, 1905-1908.

Blair, C., & Razza, R. P. (2007). Relating effortful control, executive function, and false belief understanding to emerging math and literacy ability in kindergarten. *Child development*, 78(2), 647-663.

Bogomolova, K., van der Ham, I. J., Dankbaar, M. E., van den Broek, W. W., Hovius, S. E., van der Hage, J. A., & Hierck, B. P. (2020). The effect of stereoscopic augmented reality visualization on learning anatomy and the modifying effect of visual-spatial abilities: A double-center randomized controlled trial. *Anatomical sciences education*, 13(5), 558-567.

Bowie, C. R., & Harvey, P. D. (2006). Administration and interpretation of the Trail Making Test. *Nature protocols*, 1(5), 2277-2281.

Bracken, M. R., Mazur-Mosiewicz, A., & Glazek, K. (2018). Trail Making Test: Comparison of paper-and-pencil and electronic versions. *Applied Neuropsychology: Adult*.

Brouwer, A.-M., Hogervorst, M. A., Van Erp, J. B., Heffelaar, T., Zimmerman, P. H., & Oostenveld, R. (2012). Estimating workload using EEG spectral power and ERPs in the n-back task. *Journal of neural engineering*, 9(4), 045008.

Burgoyne, A. P., Sala, G., Gobet, F., Macnamara, B. N., Campitelli, G., & Hambrick, D. Z. (2016). The relationship between cognitive ability and chess skill: A comprehensive meta-analysis. *Intelligence*, 59, 72-83.

Byrne, M. D. (1996). A computational theory of working memory. In *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems* (pp. 31-32).

- Byrne, M. D. (2001). ACT-R/PM and menu selection: Applying a cognitive architecture to HCI. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(1), 41-84.
- Byrne, M. D. (2007). Cognitive architecture. In *The human-computer interaction handbook* (pp. 119-140). CRC Press.
- Card, S. K. (2018). *The psychology of human-computer interaction*. Crc Press.
- Carroll, J. B., & Maxwell, S. E. (1979). Individual differences in cognitive abilities. *Annual review of psychology*, 30(1), 603-640.
- Carter, B. T., & Luke, S. G. (2020). Best practices in eye tracking research. *International Journal of Psychophysiology*, 155, 49-62.
- Chamak, B. & Bonniau B. (2014) Neurodiversité : une autre façon de penser. In Chamak B. & Moutaud B. (dir.) *Neurosciences et Société : enjeux des savoirs et pratiques sur le cerveau* (pp. 211-230). Armand Colin.
- Chamorro-Premuzic, T., & Furnham, A. (2003). Personality predicts academic performance: Evidence from two longitudinal university samples. *Journal of research in personality*, 37(4), 319-338.
- Chan, M. Y., Haber, S., Drew, L. M., & Park, D. C. (2016). Training older adults to use tablet computers: Does it enhance cognitive function? *The Gerontologist*, 56(3), 475-484.
- Chennamma, H., & Yuan, X. (2013). A survey on eye-gaze tracking techniques. *arXiv preprint arXiv:1312.6410*.
- Ciesielska, N., Sokołowski, R., Mazur, E., Podhorecka, M., Polak-Szabela, A., & Kędziora-Kornatowska, K. (2016). Is the Montreal Cognitive Assessment (MoCA) test better suited than the Mini-Mental State Examination (MMSE) in mild cognitive impairment (MCI) detection among people aged over 60? Meta-analysis. *Psychiatr Pol*, 50(5), 1039-1052.

Climie, E. A., & Rostad, K. (2011). Test review: Wechsler adult intelligence scale. In: SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.

Colzato, L. S., Van Leeuwen, P. J., Van Den Wildenberg, W., & Hommel, B. (2010). DOOM'd to switch: superior cognitive flexibility in players of first person shooter games. *Frontiers in psychology*, 8.

Conway, A. R., Cowan, N., Bunting, M. F., Therriault, D. J., & Minkoff, S. R. (2002). A latent variable analysis of working memory capacity, short-term memory capacity, processing speed, and general fluid intelligence. *Intelligence*, 30(2), 163-183.

Courtemanche, F., Labonté-LeMoine, E., Léger, P.-M., Fredette, M., Senecal, S., Cameron, A.-F., Faubert, J., & Bellavance, F. (2019). Texting while walking: An expensive switch cost. *Accident Analysis & Prevention*, 127, 1-8.

Crowe, S. F. (1998). The differential contribution of mental tracking, cognitive flexibility, visual search, and motor speed to performance on parts A and B of the Trail Making Test. *Journal of clinical psychology*, 54(5), 585-591.

Cullen, B., O'Neill, B., Evans, J. J., Coen, R. F., & Lawlor, B. A. (2007). A review of screening tests for cognitive impairment. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 78(8), 790-799.

Cuvillier, M., Léger, P. M., & Sénécal, S. (2021). *Études sur la fiabilité, la validité et la sensibilité des échelles de mesure à un item en expérience utilisateur* (Doctoral dissertation, HEC Montréal).

Czaja, S. J., Charness, N., Fisk, A. D., Hertzog, C., Nair, S. N., Rogers, W. A., & Sharit, J. (2006). Factors predicting the use of technology: findings from the Center for Research and Education on Aging and Technology Enhancement (CREATE). *Psychology and aging*, 21(2), 333.

Czaja, S. J., Sharit, J., Nair, S., & Rubert, M. (1998). Understanding sources of user variability in computer-based data entry performance. *Behaviour & Information Technology*, 17(5), 282-293.

Dagum, P. (2018). Digital biomarkers of cognitive function. *NPJ digital medicine*, 1(1), 10.

Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, 19(4), 450-466.

De Dreu, C. K., Nijstad, B. A., Baas, M., Wolsink, I., & Roskes, M. (2012). Working memory benefits creative insight, musical improvisation, and original ideation through maintained task-focused attention. *Personality and social psychology bulletin*, 38(5), 656-669.

Demmans Epp, C., McEwen, R., Campigotto, R., & Moffatt, K. (2016). Information practices and user interfaces: Student use of an iOS application in special education. *Education and Information Technologies*, 21, 1433-1456.

Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual review of psychology*, 64, 135-168.

Dobrowolski, P., Hanusz, K., Sobczyk, B., Skorko, M., & Wiatrow, A. (2015). Cognitive enhancement in video game players: The role of video game genre. *Computers in Human Behavior*, 44, 59-63.

Dong, Y., Sharma, V. K., Chan, B. P.-L., Venketasubramanian, N., Teoh, H. L., Seet, R. C. S., Tanicala, S., Chan, Y. H., & Chen, C. (2010). The Montreal Cognitive Assessment (MoCA) is superior to the Mini-Mental State Examination (MMSE) for the detection of vascular cognitive impairment after acute stroke. *Journal of the Neurological Sciences*, 299(1), 15-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jns.2010.08.051>

Doniger, G. M., Dwolatzky, T., Zucker, D. M., Chertkow, H., Crystal, H., Schweiger, A., & Simon, E. S. (2006). Computerized cognitive testing battery identifies mild cognitive impairment and mild dementia even in the presence of depressive symptoms. *American Journal of Alzheimer's Disease & Other Dementias®*, 21(1), 28-36.

Doyle, N. (2020). Neurodiversity at work: a biopsychosocial model and the impact on working adults. *British Medical Bulletin*, 135(1), 108. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7732033/pdf/ldaa021.pdf>

Duckworth, A. L., & Seligman, M. E. (2005). Self-discipline outdoes IQ in predicting academic performance of adolescents. *Psychological Science*, 16(12), 939-944.

Dumont, L., Chamard, É., Léger, P.-M., Ortiz de Guinea, A., & Senecal, S. (2014). Cognitive Analysis Grid for IS Research, In *Information Systems and Neuroscience: Gmunden Retreat on NeuroIS 2014*. Springer.

Dumont, L., Chénier-Leduc, G., de Guise, É., de Guinea, A. O., Sénécal, S., & Léger, P.-M. (2015). Using a cognitive analysis grid to inform information systems design. In *Information Systems and Neuroscience: Gmunden Retreat on NeuroIS 2015* (pp. 193-199). Springer International Publishing.

Dünser, A., Steinbügl, K., Kaufmann, H., & Glück, J. (2006). Virtual and augmented reality as spatial ability training tools. In *Proceedings of the 7th ACM SIGCHI New Zealand chapter's international conference on Computer-human interaction: design centered HCI* (pp. 125-132).

Ebaid, D., Crewther, S. G., MacCalman, K., Brown, A., & Crewther, D. P. (2017). Cognitive processing speed across the lifespan: beyond the influence of motor speed. *Frontiers in aging neuroscience*, 9, 62.

Edelman, J. A., & Keller, E. L. (1996). Activity of visuomotor burst neurons in the superior colliculus accompanying express saccades. *Journal of neurophysiology*, 76(2), 908-926.

Egeland, H. E., & Yantis, S. (1997). Visual attention: Control, representation, and time course. *Annual review of psychology*, 48(1), 269-297.

Eimer, M. (2014). The neural basis of attentional control in visual search. *Trends in cognitive sciences*, 18(10), 526-535.

Ekstrom, R. B., & Harman, H. H. (1976). *Manual for kit of factor-referenced cognitive tests, 1976*. Educational testing service.

- Elwood, R. W. (2001). MicroCog: assessment of cognitive functioning. *Neuropsychology review*, 11, 89-100.
- Engle, R. W., Cantor, J., & Carullo, J. J. (1992). Individual differences in working memory and comprehension: a test of four hypotheses. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(5), 972.
- Farshid, M., Paschen, J., Eriksson, T., & Kietzmann, J. (2018). Go boldly!: Explore augmented reality (AR), virtual reality (VR), and mixed reality (MR) for business. *Business Horizons*, 61(5), 657-663.
- Felder, R. M., & Brent, R. (2005). Understanding student differences. *Journal of engineering education*, 94(1), 57-72.
- Ferguson, C. J. (2007). The good, the bad and the ugly: A meta-analytic review of positive and negative effects of violent video games. *Psychiatric quarterly*, 78, 309-316.
- Fichten, C. S., Asuncion, J. V., Barile, M., Ferraro, V., & Wolforth, J. (2009). Accessibility of e-learning and computer and information technologies for students with visual impairments in postsecondary education. *Journal of visual impairment & blindness*, 103(9), 543-557.
- Fichten, C. S., Nguyen, M. N., Barile, M., & Asuncion, J. V. (2007). Scale of Adaptive Information Technology Accessibility for Postsecondary Students with Disabilities (SAITAPSD): A Preliminary Investigation. *Journal of postsecondary education and disability*, 20(1), 54-75.
- Filskov, S. B., & Goldstein, S. G. (1974). Diagnostic validity of the Halstead-Reitan neuropsychological battery. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 42(3), 382.
- Fleetwood, M. D., & Byrne, M. D. (2006). Modeling the visual search of displays: a revised ACT-R model of icon search based on eye-tracking data. *Human-Computer Interaction*, 21(2), 153-197.

Folstein, M. F., Folstein, S. E., & McHugh, P. R. (1975). "Mini-mental state": a practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of psychiatric research*, 12(3), 189-198.

Folstein, M. F., Robins, L. N., & Helzer, J. E. (1983). The mini-mental state examination. *Archives of general psychiatry*, 40(7), 812-812.

Frangou, S.-M. (2016). *The power of writing hands: logical memory performance after handwriting and typing tasks with Wechsler Memory Scale revised edition* fi= Lapin yliopisto| en= University of Lapland].

Gade, M., Schuch, S., Druey, M. D., & Koch, I. (2014). Inhibitory control in task switching. *Task switching and cognitive control*, 137-159.

Gajos, K. Z., Weld, D. S., & Wobbrock, J. O. (2010). Automatically generating personalized user interfaces with Supple. *Artificial intelligence*, 174(12-13), 910-950.

Gathercole, S., & Alloway, T. P. (2008). *Working memory and learning: A practical guide for teachers*. Sage.

Gaudino, E. A., Geisler, M. W., & Squires, N. K. (1995). Construct validity in the Trail Making Test: what makes Part B harder? *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 17(4), 529-535.

Gevins, A., & Smith, M. E. (2000). Neurophysiological measures of working memory and individual differences in cognitive ability and cognitive style. *Cerebral Cortex*, 10(9), 829-839.

Gevins, A., & Smith, M. E. (2003). Neurophysiological measures of cognitive workload during human-computer interaction. *Theoretical issues in ergonomics science*, 4(1-2), 113-131.

Giovagnoli, A. R., Del Pesce, M., Mascheroni, S., Simoncelli, M., Laiacoma, M., & Capitani, E. (1996). Trail making test: normative values from 287 normal adult controls. *The Italian journal of neurological sciences*, 17, 305-309.

Giroux, F., Boasen, J., Stagg, C. J., Sénécal, S., Coursaris, C., & Léger, P.-M. (2021). Motor dysfunction simulation in able-bodied participants for usability evaluation of assistive technology: a research proposal. *Information Systems and Neuroscience: NeuroIS Retreat 2021*,

Giroux, F., Couture, L., Lasbareille, C., Boasen, J., Stagg, C. J., Fleming, M. K., Sénécal, S., & Léger, P.-M. (2022). Usability evaluation of assistive technology for ICT accessibility: Lessons learned with stroke patients and able-bodied participants experiencing a motor dysfunction simulation. In *Information Systems and Neuroscience: NeuroIS Retreat 2022* (pp. 349-359). Springer.

Golden, C. J., & Freshwater, S. M. (1978). Stroop color and word test.

Golden, C. J., & Freshwater, S. M. (2001). Luria-Nebraska neuropsychological battery. *Understanding psychological assessment*, 59-75.

Gonzalez, D., Carnahan, H., Praamsma, M., Macrae, H., & Dubrowski, A. (2005). Control of laparoscopic instrument motion in an inanimate bench model: implications for the training and evaluation of technical skills. *Studies in Health Technology and Informatics*, 111, 149-152.

Gossweiler, R., Kamvar, M., & Baluja, S. (2009). What's up CAPTCHA? A CAPTCHA based on image orientation. In *Proceedings of the 18th international conference on World wide web* (pp. 841-850).

Gottfredson, L. S. (1997). Why g matters: The complexity of everyday life. *Intelligence*, 24(1), 79-132.

Gould, M. C., & Perrin, F. (1916). A comparison of the factors involved in the maze learning of human adults and children. *Journal of Experimental Psychology*, 1(2), 122.

Granic, I., Lobel, A., & Engels, R. C. (2014). The benefits of playing video games. *American psychologist*, 69(1), 66.

Grant, D. A., & Berg, E. A. (1993). Wisconsin card sorting test. *Journal of Experimental Psychology*.

Green, C. S., & Bavelier, D. (2015). Action video game training for cognitive enhancement. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 4, 103-108.

Groff, M. G., & Hubble, L. (1981). A factor analytic investigation of the Trail Making Test. *Clinical neuropsychology*.

Guertin-Lahoud, S., Coursaris, C. K., Sénechal, S., & Léger, P.-M. (2023). User Experience Evaluation in Shared Interactive Virtual Reality. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 26(4), 263-272.

Gustafsson, J.-E., & Undheim, J. O. (1996). Individual differences in cognitive functions.

Halbrook, Y. J., O'Donnell, A. T., & Msetfi, R. M. (2019). When and how video games can be good: A review of the positive effects of video games on well-being. *Perspectives on Psychological Science*, 14(6), 1096-1104.

Halverson, K. K. (2020). *Executive Functioning in Struggling Readers: The NIH Examiner* University of Houston].

Halverson, K. K., Derrick, J. L., Medina, L. D., & Cirino, P. T. (2021). Executive functioning with the NIH EXAMINER and inference making in struggling readers. *Developmental neuropsychology*, 46(3), 213-231.

Halverson, T., & Hornof, A. J. (2011). A computational model of “active vision” for visual search in human–computer interaction. *Human–Computer Interaction*, 26(4), 285-314.

Hamdan, A. C., & Hamdan, E. M. L. (2009). Effects of age and education level on the Trail Making Test in a healthy Brazilian sample. *Psychology & Neuroscience*, 2, 199-203.

Hartson, R., & Pyla, P. S. (2012). *The UX Book: Process and guidelines for ensuring a quality user experience*. Elsevier.

- Heaven, P. C., & Ciarrochi, J. (2012). When IQ is not everything: Intelligence, personality and academic performance at school. *Personality and Individual Differences*, 53(4), 518-522.
- Helander, M. G. (2014). *Handbook of human-computer interaction*. Elsevier.
- Herff, C., Heger, D., Fortmann, O., Hennrich, J., Putze, F., & Schultz, T. (2014). Mental workload during n-back task—quantified in the prefrontal cortex using fNIRS. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 935.
- Hommel, B. E., Ruppel, R., & Zacher, H. (2022). Assessment of cognitive flexibility in personnel selection: Validity and acceptance of a gamified version of the Wisconsin Card Sorting Test. *International Journal of Selection and Assessment*, 30(1), 126-144.
- Hussain, J., Ul Hassan, A., Muhammad Bilal, H. S., Ali, R., Afzal, M., Hussain, S., Bang, J., Banos, O., & Lee, S. (2018). Model-based adaptive user interface based on context and user experience evaluation. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 12, 1-16.
- Hwang, A. D., Higgins, E. C., & Pomplun, M. (2009). A model of top-down attentional control during visual search in complex scenes. *Journal of Vision*, 9(5), 25-25.
- Irwin, D. E. (2004). Fixation location and fixation duration as indices of cognitive processing. *The interface of language, vision, and action: Eye movements and the visual world*, 217, 105-133.
- Isaacs, E., Oates, J., & be, I. E. a.-p. i. (2008). Nutrition and cognition: assessing cognitive abilities in children and young people. *European journal of nutrition*, 47, 4-24.
- Jensen, A. R., & Rohwer Jr, W. D. (1966). The Stroop color-word test: a review. *Acta psychologica*, 25, 36-93.
- Jevremovic, A., Arsic, S., Antonijevic, M., Ioannou, A., & Garcia, N. (2018). Human-computer interaction monitoring and analytics platform-Wisconsin card sorting test application. In *International Conference on IoT Technologies HealthCare (EAI), HealthyIoT*.

Ji, H., Yun, Y., Lee, S., Kim, K., & Lim, H. (2018). An adaptable UI/UX considering user's cognitive and behavior information in distributed environment. *Cluster Computing*, 21(1), 1045-1058.

Jing, Z., Barreto, A. B., Chin, C., & Chao, L. (2005, 8-10 April 2005). Realization of stress detection using psychophysiological signals for improvement of human-computer interactions. In *Proceedings. IEEE SoutheastCon, 2005*. (pp. 415-420). IEEE.

Johann, V., Könen, T., & Karbach, J. (2020). The unique contribution of working memory, inhibition, cognitive flexibility, and intelligence to reading comprehension and reading speed. *Child Neuropsychology*, 26(3), 324-344.

Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1976). Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive psychology*, 8(4), 441-480.

Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: from eye fixations to comprehension. *Psychological review*, 87(4), 329.

Kane, M. J., Conway, A. R., Miura, T. K., & Colflesh, G. J. (2007). Working memory, attention control, and the N-back task: a question of construct validity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 33(3), 615.

Kane, M. J., & Engle, R. W. (2003). Working-memory capacity and the control of attention: the contributions of goal neglect, response competition, and task set to Stroop interference. *Journal of experimental psychology: General*, 132(1), 47.

Karahoca, D., Karahoca, A., & Güngör, A. (2008). Assessing effectiveness of the cognitive abilities and individual differences on e-learning portal usability evaluation. In *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Systems and Technologies and Workshop for PhD Students in Computing* (pp. IV-8).

Karran, A. J., Demazure, T., Leger, P.-M., Labonte-LeMoine, E., Senecal, S., Fredette, M., & Babin, G. (2019). Toward a hybrid passive bci for the modulation of sustained attention using EEG and fNIRS. *Frontiers in human neuroscience*, 13, 393.

Kaspar, K., & König, P. (2012). Emotions and personality traits as high-level factors in visual attention: a review. *Frontiers in human neuroscience*, 6, 321.

Kay, R., & Lauricella, S. (2011). Exploring the benefits and challenges of using laptop computers in higher education classrooms: A formative analysis. *Canadian Journal of Learning and Technology/La revue canadienne de l'apprentissage et de la technologie*, 37(1).

Kazemi, F., Yektayar, M., & Abad, A. M. B. (2012). Investigation the impact of chess play on developing meta-cognitive ability and math problem-solving power of students at different levels of education. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 32, 372-379.

Khalili-Mahani, N., Assadi, A., Li, K., Mirgholami, M., Rivard, M.-E., Benali, H., Sawchuk, K., & De Schutter, B. (2020). Reflective and reflexive stress responses of older adults to three gaming experiences in relation to their cognitive abilities: mixed methods crossover study. *JMIR mental health*, 7(3), e12388.

Kieras, D. E. (2011). The persistent visual store as the locus of fixation memory in visual search tasks. *Cognitive Systems Research*, 12(2), 102-112.

Kieras, D. E., & Hornof, A. J. (2014). Towards accurate and practical predictive models of active-vision-based visual search. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 3875-3884).

Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (1995). Predicting human performance in dual-task tracking and decision making with computational models using the EPIC architecture. In *Proceedings of the First International Symposium on Command and Control Research and Technology, National Defense University, June. Washington, DC: National Defense University*.

Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (1997). An overview of the EPIC architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction. *Human–Computer Interaction*, 12(4), 391-438.

Kieras, D. E., Wood, S. D., & Meyer, D. E. (1995). Predictive engineering models using the EPIC architecture for a high-performance task. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 11-18).

Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M., & Koch, I. (2010). Control and interference in task switching—A review. *Psychological bulletin*, 136(5), 849.

Kirchner, W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of Experimental Psychology*, 55(4), 352.

Konishi, S., Kawazu, M., Uchida, I., Kikyo, H., Asakura, I., & Miyashita, Y. (1999). Contribution of working memory to transient activation in human inferior prefrontal cortex during performance of the Wisconsin Card Sorting Test. *Cerebral Cortex*, 9(7), 745-753.

Kordovski, V. M., Tierney, S. M., Rahman, S., Medina, L. D., Babicz, M. A., Yoshida, H., Holcomb, E. M., Cushman, C., & Woods, S. P. (2021). Older age and online health information search behaviors: The mediating influence of executive functions. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 43(7), 689-703.

Kramer, J. H., Mungas, D., Possin, K. L., Rankin, K. P., Boxer, A. L., Rosen, H. J., Bostrom, A., Sinha, L., Berhel, A., & Widmeyer, M. (2014). NIH EXAMINER: conceptualization and development of an executive function battery. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 20(1), 11-19.

Kuncel, N. R., Hezlett, S. A., & Ones, D. S. (2004). Academic performance, career potential, creativity, and job performance: Can one construct predict them all? *Journal of personality and social psychology*, 86(1), 148.

Kunda, M., McGregor, K., & Goel, A. K. (2013). A computational model for solving problems from the Raven's Progressive Matrices intelligence test using iconic visual representations. *Cognitive Systems Research*, 22, 47-66.

- Lahav, O., & Katz, N. (2020). Independent Older Adult's IADL and Executive Function According to Cognitive Performance. *OTJR: Occupational Therapy Journal of Research*, 40(3), 183-189. <https://doi.org/10.1177/1539449220905813>
- Lai, M.-L., Tsai, M.-J., Yang, F.-Y., Hsu, C.-Y., Liu, T.-C., Lee, S. W.-Y., Lee, M.-H., Chiou, G.-L., Liang, J.-C., & Tsai, C.-C. (2013). A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012. *Educational research review*, 10, 90-115.
- Lallemand, C., & Gronier, G. (2015). *Méthodes de design UX: 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs*. Editions Eyrolles.
- Langdon, D., Amato, M., Boringa, J., Brochet, B., Foley, F., Fredrikson, S., Hämäläinen, P., Hartung, H., Krupp, L., & Penner, I. (2012). Recommendations for a brief international cognitive assessment for multiple sclerosis (BICAMS). *Multiple Sclerosis Journal*, 18(6), 891-898.
- Lewis, J. R. (2012). Usability testing. *Handbook of human factors and ergonomics*, 1267-1312.
- Lezak, M. (1995). Executive functions and motor performance. *Neuropsychological assessment*, 650-685.
- Lezak, M. D., Howieson, D. B., Loring, D. W., & Fischer, J. S. (2004). *Neuropsychological assessment*. Oxford University Press, USA.
- Lohman, D. F. (2013). Spatial ability and g. In *Human abilities* (pp. 97-116). Psychology Press.
- Mackworth, N. H. (1948). The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly journal of experimental psychology*, 1(1), 6-21.
- Mahmud, M., & Kurniawan, H. (2005). Involving psychometric tests for input device evaluation with older people. In *Proceedings of the 17th Australia Conference on*

*Computer-Human interaction: Citizens online: Considerations For Today and the Future* (pp. 1-10).

Majaranta, P., & Bulling, A. (2014). Eye tracking and eye-based human-computer interaction. *Advances in physiological computing*, 39-65.

Martins, A. I., Silva, A. G., Pais, J., Cruz, V. T., & Rocha, N. P. (2022). The impact of users' cognitive function on evaluator perceptions of usability. *Scientific Reports*, 12(1), 13753.

McClelland, D. C. (1987). *Human motivation*. Cup Archive.

Meegan, D. V., & Tipper, S. P. (1999). Visual search and target-directed action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(5), 1347.

Mikadze, Y. V., Ardila, A., & Akhutina, T. V. (2019). AR Luria's approach to neuropsychological assessment and rehabilitation. *Archives of clinical neuropsychology*, 34(6), 795-802.

Mishra, J., Bavelier, D., & Gazzaley, A. (2012). How to assess gaming-induced benefits on attention and working memory. *Games for Health: Research, Development, and Clinical Applications*, 1(3), 192-198.

Mitrushina, M., Boone, K. B., Razani, J., & D'Elia, L. F. (2005). *Handbook of normative data for neuropsychological assessment*. Oxford University Press.

Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current directions in psychological science*, 21(1), 8-14.

Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive psychology*, 41(1), 49-100.

Monchi, O., Petrides, M., Petre, V., Worsley, K., & Dagher, A. (2001). Wisconsin Card Sorting revisited: distinct neural circuits participating in different stages of the task identified by event-related functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, 21(19), 7733-7741.

Nakarada-Kordic, I., & Lobb, B. (2005). Effect of perceived attractiveness of web interface design on visual search of web sites. In *Proceedings of the 6th ACM SIGCHI New Zealand chapter's international conference on Computer-human interaction: making CHI natural* (pp. 25-27).

Nasreddine, Z. S., Phillips, N. A., Bédirian, V., Charbonneau, S., Whitehead, V., Collin, I., Cummings, J. L., & Chertkow, H. (2005). The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: A Brief Screening Tool For Mild Cognitive Impairment. *Journal of the American Geriatrics Society*, 53(4), 695-699. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x>

Nguyen, D. C., Ding, M., Pathirana, P. N., Seneviratne, A., Li, J., & Poor, H. V. (2021). Federated learning for internet of things: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(3), 1622-1658.

Nielsen, J. (1994). *Usability engineering*. Morgan Kaufmann.

Nyhus, E., & Barceló, F. (2009). The Wisconsin Card Sorting Test and the cognitive assessment of prefrontal executive functions: a critical update. *Brain and cognition*, 71(3), 437-451.

Oliveira, J., Gamito, P., Alghazzawi, D. M., Fardoun, H. M., Rosa, P. J., Sousa, T., Picareli, L. F., Morais, D., & Lopes, P. (2018). Performance on naturalistic virtual reality tasks depends on global cognitive functioning as assessed via traditional neurocognitive tests. *Applied Neuropsychology: Adult*, 25(6), 555-561. <https://doi.org/10.1080/23279095.2017.1349661>

Olson, J. R., & Olson, G. M. (1995). The growth of cognitive modeling in human-computer interaction since GOMS. In *Readings in Human–Computer Interaction* (pp. 603-625). Elsevier.

Papathanasiou, A., Messinis, L., Georgiou, V. L., & Papathanasopoulos, P. (2014). Cognitive impairment in relapsing remitting and secondary progressive multiple sclerosis patients: efficacy of a computerized cognitive screening battery. *International Scholarly Research Notices, 2014*.

Papp, K. V., Snyder, P. J., Maruff, P., Bartkowiak, J., & Pietrzak, R. H. (2011). Detecting subtle changes in visuospatial executive function and learning in the amnestic variant of mild cognitive impairment. *PLoS One, 6*(7), e21688.

Passalacqua, M., Léger, P.-M., Nacke, L. E., Fredette, M., Labonté-Lemoyne, É., Lin, X., Caprioli, T., & Sénécal, S. (2020). Playing in the backstore: interface gamification increases warehousing workforce engagement. *Industrial Management & Data Systems, 120*(7), 1309-1330.

Patel, V. L., & Kushniruk, A. W. (1998). Interface design for health care environments: the role of cognitive science. In *Proceedings of the AMIA Symposium* (p. 29). American Medical Informatics Association.

Periáñez, J., Ríos-Lago, M., Rodríguez-Sánchez, J., Adrover-Roig, D., Sánchez-Cubillo, I., Crespo-Facorro, B., Quemada, J., & Barceló, F. (2007). Trail Making Test in traumatic brain injury, schizophrenia, and normal ageing: Sample comparisons and normative data. *Archives of clinical neuropsychology, 22*(4), 433-447.

Petersen, R. C., Doody, R., Kurz, A., Mohs, R. C., Morris, J. C., Rabins, P. V., Ritchie, K., Rossor, M., Thal, L., & Winblad, B. (2001). Current concepts in mild cognitive impairment. *Archives of neurology, 58*(12), 1985-1992.

Pietrzak, R. H. (2007). *The Groton Maze Learning Test: Construct validity, factor structure, and application to normal aging, pathological gambling, and attention deficit hyperactivity disorder*. University of Connecticut.

- Pietrzak, R. H., Cohen, H., & Snyder, P. J. (2007). Spatial learning efficiency and error monitoring in normal aging: An investigation using a novel hidden maze learning test. *Archives of clinical neuropsychology*, 22(2), 235-245.
- Pietrzak, R. H., Maruff, P., Mayes, L. C., Roman, S. A., Sosa, J. A., & Snyder, P. J. (2008). An examination of the construct validity and factor structure of the Groton Maze Learning Test, a new measure of spatial working memory, learning efficiency, and error monitoring. *Archives of clinical neuropsychology*, 23(4), 433-445.
- Poguntke, R., Wirth, M., & Gradl, S. (2019, 2019//). Same Same but Different: Exploring the Effects of the Stroop Color Word Test in Virtual Reality. Human-Computer Interaction – INTERACT 2019, Cham.
- Poole, A., & Ball, L. J. (2006). Eye tracking in HCI and usability research. In *Encyclopedia of human computer interaction* (pp. 211-219). IGI global.
- Prigatano, G. P. (1978). Wechsler memory scale: A selective review of the literature. *Journal of clinical psychology*, 34(4), 816-832.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1097-4679\(197810\)34:4<816::AID-JCLP2270340402>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1097-4679(197810)34:4<816::AID-JCLP2270340402>3.0.CO;2-Q)
- Pulakos, E. D., Schmitt, N., Dorsey, D. W., Arad, S., Borman, W. C., & Hedge, J. W. (2002). Predicting adaptive performance: Further tests of a model of adaptability. *Human performance*, 15(4), 299-323.
- Rafi, A., Anuar, K., Samad, A., Hayati, M., & Mahadzir, M. (2005). Improving spatial ability using a Web-based Virtual Environment (WbVE). *Automation in construction*, 14(6), 707-715.
- Rahman, S., Kordovski, V. M., Tierney, S. M., & Woods, S. P. (2021). Internet navigation skills for financial management: Associations with age, neurocognitive performance, and functional capacity. *Neuropsychology*, 35(6), 630.
- Rauscher, F. H., Shaw, G. L., & Ky, C. N. (1993). Music and spatial task performance. *Nature*, 365(6447), 611-611.

Reitan, R. M. (1955). The relation of the Trail Making Test to organic brain damage. *Journal of consulting psychology*, 19(5), 393-394. <https://doi.org/10.1037/h0044509>

Reitan, R. M. (1958). Validity of the Trail Making Test as an indicator of organic brain damage. *Perceptual and motor skills*, 8(3), 271-276.

Reitan, R. M., & Wolfson, D. (1992). Conventional intelligence measurements and neuropsychological concepts of adaptive abilities. *Journal of clinical psychology*, 48(4), 521-529.

Reitan, R. M., & Wolfson, D. (2004). The Trail Making Test as an initial screening procedure for neuropsychological impairment in older children. *Archives of clinical neuropsychology*, 19(2), 281-288.

Riedl, R., & Léger, P.-M. (2016). Fundamentals of NeuroIS. *Studies in neuroscience, psychology and behavioral economics*, 127.

Riedl, R., Léger, P.-M., Riedl, R., & Léger, P.-M. (2016). Tools in NeuroIS research: an overview. *Fundamentals of NeuroIS: Information Systems and the Brain*, 47-72.

Ritter, F. E., & Young, R. M. (2001). Embodied models as simulated users: Introduction to this special issue on using cognitive models to improve interface design. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(1), 1-14.

Robbins, T., & Sahakian, B. J. (2002). Computer methods of assessment of cognitive function. *Principles and practice of geriatric psychiatry*, 147-151.

Robertson, I. T., & Smith, M. (2001). Personnel selection. *Journal of occupational and Organizational psychology*, 74(4), 441-472.

Rohde, T. E., & Thompson, L. A. (2007). Predicting academic achievement with cognitive ability. *Intelligence*, 35(1), 83-92.

Ryan, J., Woods, R. L., Britt, C. J., Murray, A. M., Shah, R. C., Reid, C. M., Wolfe, R., Nelson, M. R., Orchard, S. G., & Lockery, J. E. (2020). Normative data for the symbol

digit modalities test in Older White Australians and Americans, African-Americans, and Hispanic/Latinos. *Journal of Alzheimer's disease reports*, 4(1), 313-323.

Sahakian, B. J., & Owen, A. (1992). Computerized assessment in neuropsychiatry using CANTAB: discussion paper. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 85(7), 399.

Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological review*, 103(3), 403.

Salthouse, T. A. (2011). What cognitive abilities are involved in trail-making performance? *Intelligence*, 39(4), 222-232.

Sánchez-Cubillo, I., Periáñez, J. A., Adrover-Roig, D., Rodríguez-Sánchez, J. M., Ríos-Lago, M., Tirapu, J., & Barceló, F. (2009). Construct validity of the Trail Making Test: role of task-switching, working memory, inhibition/interference control, and visuomotor abilities. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 15(3), 438-450.

Scales, S.-B. I., & Edition, F. (2003). History of the Stanford-Binet Intelligence Scales: Content and Psychometrics.

Scarpina, F., & Tagini, S. (2017). The stroop color and word test. *Frontiers in psychology*, 8, 557.

Schatz, R., Egger, S., & Masuch, K. (2012). The impact of test duration on user fatigue and reliability of subjective quality ratings. *Journal of the Audio Engineering Society*, 60(1/2), 63-73.

Schehar, J. M., & Sato, S. D. (1989). Effects of visual acuity and visual motor speed and dexterity on cognitive test performance. *Archives of clinical neuropsychology*, 4(1), 25-32.

Schellenberg, E. G. (2004). Music lessons enhance IQ. *Psychological Science*, 15(8), 511-514.

Schellenberg, E. G. (2005). Music and cognitive abilities. *Current directions in psychological science*, 14(6), 317-320.

Schellenberg, E. G. (2006). Long-term positive associations between music lessons and IQ. *Journal of educational Psychology*, 98(2), 457.

Schellenberg, E. G. (2012). Cognitive performance after listening to music: A review of the Mozart effect. *Music, health, and wellbeing*, 324-338.

Schellenberg, E. G., & Weiss, M. W. (2013). Music and cognitive abilities.

Schmiedek, F., Oberauer, K., Wilhelm, O., Süß, H.-M., & Wittmann, W. W. (2007). Individual differences in components of reaction time distributions and their relations to working memory and intelligence. *Journal of experimental psychology: General*, 136(3), 414.

Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological review*, 84(1), 1.

Sears, A., & Hanson, V. (2011, May). Representing users in accessibility research. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 2235-2238).

Sharit, J., Taha, J., Berkowsky, R. W., Profità, H., & Czaja, S. J. (2015). Online information search performance and search strategies in a health problem-solving scenario. *Journal of cognitive engineering and decision making*, 9(3), 211-228.

Sheridan, L. K., Fitzgerald, H. E., Adams, K. M., Nigg, J. T., Martel, M. M., Puttler, L. I., Wong, M. M., & Zucker, R. A. (2006). Normative Symbol Digit Modalities Test performance in a community-based sample. *Archives of clinical neuropsychology*, 21(1), 23-28.

Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological review*, 84(2), 127.

Slegers, K., Van Boxtel, M. P., & Jolles, J. (2009). The efficiency of using everyday technological devices by older adults: the role of cognitive functions. *Ageing & Society*, 29(2), 309-325.

Smith, A. (1973). *Symbol digit modalities test*. Western psychological services Los Angeles.

Snyder, P. J., Jackson, C. E., Piskulic, D., Olver, J., Norman, T., & Maruff, P. (2008). Spatial working memory and problem solving in schizophrenia: the effect of symptom stabilization with atypical antipsychotic medication. *Psychiatry Research*, 160(3), 316-326.

Snyder, P. J., Werth, J., Giordani, B., Caveney, A. F., Feltner, D., & Maruff, P. (2005). A method for determining the magnitude of change across different cognitive functions in clinical trials: the effects of acute administration of two different doses alprazolam. *Human Psychopharmacology: Clinical and Experimental*, 20(4), 263-273.

Sobczyk, B., Dobrowolski, P., Skorko, M., Michalak, J., & Brzezicka, A. (2015). Issues and advances in research methods on video games and cognitive abilities. *Frontiers in psychology*, 6, 1451.

Sorby, S. A. (2009). Educational research in developing 3-D spatial skills for engineering students. *International Journal of Science Education*, 31(3), 459-480.

Strauss, E., Sherman, E. M., & Spreen, O. (2006). *A compendium of neuropsychological tests: Administration, norms, and commentary*. American chemical society.

Strenze, T. (2007). Intelligence and socioeconomic success: A meta-analytic review of longitudinal research. *Intelligence*, 35(5), 401-426.

Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>

Szulc, J. M., Davies, J., Tomeczak, M. T., & McGregor, F.-L. (2021). AMO perspectives on the well-being of neurodivergent human capital. *Employee Relations: The International Journal*.

Teng, E. L., Hasegawa, K., Homma, A., Imai, Y., Larson, E., Graves, A., Sugimoto, K., Yamaguchi, T., Sasaki, H., & Chiu, D. (1994). The Cognitive Abilities Screening Instrument (CASI): a practical test for cross-cultural epidemiological studies of dementia. *International psychogeriatrics*, 6(1), 45-58.

Terman, L. M. (1916). *The measurement of intelligence: An explanation of and a complete guide for the use of the Stanford revision and extension of the Binet-Simon intelligence scale*. Houghton Mifflin.

Theeuwes, J., & Burger, R. (1998). Attentional control during visual search: the effect of irrelevant singletons. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(5), 1342.

Thomas, E., Snyder, P. J., Pietrzak, R. H., & Maruff, P. (2014). Behavior at the choice point: Decision making in hidden pathway maze learning. *Neuropsychology review*, 24(4), 514-536.

Tombaugh, T. N. (2004). Trail Making Test A and B: normative data stratified by age and education. *Archives of clinical neuropsychology*, 19(2), 203-214.

Tombaugh, T. N., & McIntyre, N. J. (1992). The Mini-Mental State Examination: A Comprehensive Review. *Journal of the American Geriatrics Society*, 40(9), 922-935. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1992.tb01992.x>

Topol, E. (2015). *The patient will see you now: the future of medicine is in your hands*. Basic Books.

Topol, E. J. (2019). High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature medicine*, 25(1), 44-56.

- Tornatore, J. B., Hill, E., Laboff, J. A., & McGann, M. E. (2005). Self-administered screening for mild cognitive impairment: initial validation of a computerized test battery. *The Journal of neuropsychiatry and clinical neurosciences*, 17(1), 98-105.
- Toth, A. J., Ramsbottom, N., Kowal, M., & Campbell, M. J. (2020). Converging evidence supporting the cognitive link between exercise and esport performance: a dual systematic review. *Brain Sciences*, 10(11), 859.
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive psychology*, 12(1), 97-136.
- Tseng, Y. C., & Howes, A. (2008, April). The adaptation of visual search strategy to expected information gain. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 1075-1084).
- Tsoi, K. K., Chan, J. Y., Hirai, H. W., Wong, S. Y., & Kwok, T. C. (2015). Cognitive tests to detect dementia: a systematic review and meta-analysis. *JAMA internal medicine*, 175(9), 1450-1458.
- Ulrich, R. S. (1983). Aesthetic and affective response to natural environment. *Behavior and the natural environment*, 85-125.
- Unsworth, N., Redick, T. S., McMillan, B. D., Hambrick, D. Z., Kane, M. J., & Engle, R. W. (2015). Is playing video games related to cognitive abilities? *Psychological Science*, 26(6), 759-774.
- Vasseur, A., Léger, P. M., Courtemanche, F., Labonte-Lemoyne, E., Georges, V., Valiquette, A., ... & Sénécal, S. (2021). Distributed remote psychophysiological data collection for UX evaluation: a pilot project. In *Human-Computer Interaction. Theory, Methods and Tools: Thematic Area, HCI 2021, Held as Part of the 23rd HCI International Conference, HCII 2021, Virtual Event, July 24–29, 2021, Proceedings, Part I 23* (pp. 255-267). Springer International Publishing.
- Vasseur, A., Léger, P.-M., & Sénécal, S. (2019). Eyetracking for IS research: A literature review. *Proceedings of SIGHCI*.

Velayudhan, L., Ryu, S.-H., Raczek, M., Philpot, M., Lindesay, J., Critchfield, M., & Livingston, G. (2014). Review of brief cognitive tests for patients with suspected dementia. *International psychogeriatrics*, 26(8), 1247-1262.

Vickers, J. N. (2007). *Perception, cognition, and decision training: The quiet eye in action*. Human Kinetics.

Wagner, N., Hassanein, K., & Head, M. (2014). The impact of age on website usability. *Computers in Human Behavior*, 37, 270-282.

Wai, J., Lubinski, D., & Benbow, C. P. (2009). Spatial ability for STEM domains: Aligning over 50 years of cumulative psychological knowledge solidifies its importance. *Journal of educational Psychology*, 101(4), 817.

Wang, S., Gwizdka, J., & Chaovalltwongse, W. A. (2015). Using wireless EEG signals to assess memory workload in the \$ n \$-back task. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 46(3), 424-435.

Wechsler, D. (1945). A standardized memory scale for clinical use. *The Journal of Psychology*, 19(1), 87-95.

Wechsler, D. (1955). Wechsler adult intelligence scale. *Archives of clinical neuropsychology*.

Wechsler, D. (2008). Wechsler adult intelligence scale–fourth edition (WAIS-IV). *APA PsycTests*.

Weintraub, S., Dikmen, S. S., Heaton, R. K., Tulsky, D. S., Zelazo, P. D., Bauer, P. J., Carlozzi, N. E., Slotkin, J., Blitz, D., & Wallner-Allen, K. (2013). Cognition assessment using the NIH Toolbox. *Neurology*, 80(11 Supplement 3), S54-S64.

Weiss, L. G., Saklofske, D. H., Coalson, D., & Raiford, S. E. (2010). *WAIS-IV clinical use and interpretation: Scientist-practitioner perspectives*. Academic Press.

- Wherry Jr, R. J. (1976). The human operator simulator—HOS. In *Monitoring behavior and supervisory control* (pp. 283-293). Springer.
- Wickens, C. D., & Carswell, C. M. (2021). Information processing. *Handbook of human factors and ergonomics*, 114-158.
- Wild, K., Howieson, D., Webbe, F., Seelye, A., & Kaye, J. (2008). Status of computerized cognitive testing in aging: a systematic review. *Alzheimer's & Dementia*, 4(6), 428-437.
- Williams, A. M., Ford, P. R., Eccles, D. W., & Ward, P. (2011). Perceptual-cognitive expertise in sport and its acquisition: Implications for applied cognitive psychology. *Applied Cognitive Psychology*, 25(3), 432-442.
- Williams, J. M., & Leffingwell, T. R. (2002). Cognitive strategies in sport and exercise psychology.
- Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2017). Five factors that guide attention in visual search. *Nature Human Behaviour*, 1(3), 0058.
- Wong, A. W., Chan, C. C., Li-Tsang, C. W., & Lam, C. S. (2004). Neuropsychological function for accessibility of computer program for people with mental retardation. In *Computers Helping People with Special Needs: 9th International Conference, ICCHP 2004, Paris, France, July 7-9, 2004. Proceedings* 9 (pp. 1062-1068). Springer Berlin Heidelberg.
- Wothke, W., Curran, L. T., Augustin, J. W., Guerrero Jr, C., Bock, R., Fairbank, B. A., & Gillet, A. H. (1991). *Factor analytic examination of the armed services vocational aptitude battery (ASVAB) and the KIT of factor-referenced tests*.
- Zax, J. S., & Rees, D. I. (2002). IQ, academic performance, environment, and earnings. *Review of Economics and Statistics*, 84(4), 600-616.
- Zhai, J., & Barreto, A. (2006). Stress detection in computer users based on digital signal processing of noninvasive physiological variables. In *2006 international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society* (pp. 1355-1358). IEEE.

Zolyomi, A., & Snyder, J. (2021). Social-emotional-sensory design map for affective computing informed by neurodivergent experiences. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 5(CSCW1), 1-37.

Zygouris, S., & Tsolaki, M. (2015). Computerized cognitive testing for older adults: a review. *American Journal of Alzheimer's Disease & Other Dementias®*, 30(1), 13-28.