



HAL
open science

Projet AlzVR : Conception et évaluation d'un outil digital multimodal de détection des troubles cognitifs dans la maladie d'Alzheimer

Florian Maronnat

► **To cite this version:**

Florian Maronnat. Projet AlzVR : Conception et évaluation d'un outil digital multimodal de détection des troubles cognitifs dans la maladie d'Alzheimer. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Paris-Saclay, 2024. Français. NNT : 2024UPASG066 . tel-04845762

HAL Id: tel-04845762

<https://theses.hal.science/tel-04845762v1>

Submitted on 18 Dec 2024

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

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

Projet AlzVR : Conception et évaluation d'un outil digital multimodal de détection des troubles cognitifs dans la maladie d'Alzheimer

*AlzVR project : Design and evaluation of a multimodal
digital tool for detecting cognitive disorders in
Alzheimer's disease*

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n°580 Sciences et Technologies de l'Information et de la
communication (STIC)

Spécialité de doctorat : Informatique

École graduée : Informatique et sciences du numérique

Référent : Université d'Évry Val d'Essonne

Thèse préparée dans le laboratoire **IBISC (Université Paris-Saclay, Université d'Évry)**,
sous la direction de **Samir OTMANE**, professeur des universités,
et le co-encadrement de **Guillaume LOUP**, maître de conférences

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 21 novembre 2024, par

Florian MARONNAT

Composition du jury

Membres du jury avec voix délibérative

Mehdi AMMI Professeur des universités, Université Paris 8 Vincennes - Saint-Denis	Président
Brigitte LE PEVEDIC Professeure des universités, École nationale d'ingénieurs de Brest	Rapporteure
Anne-Sophie RIGAUD MONNET Professeure des universités - Praticienne hospitalière, Université Paris Cité	Rapporteure
Tifanie BOUCHARA Maîtresse de conférences, Université Paris Saclay	Examinatrice

Titre : Projet AlzVR : Conception et évaluation d'un outil digital multimodal de détection des troubles cognitifs dans la maladie d'Alzheimer

Mots clés : Maladie d'Alzheimer, diagnostic, tablette numérique, utilisabilité, réalité virtuelle immersive, olfaction

Résumé : La maladie d'Alzheimer représente un défi médical, social et économique dans un contexte de vieillissement de la population. Les outils de dépistage et de diagnostic actuels reposent sur des hétéro-évaluations papier.

De nombreux outils numériques non immersifs (tablettes, smartphones, écrans tactiles) ont été publiés avec de bonnes performances diagnostiques. D'autres évaluations en réalité virtuelle immersive ont montré des résultats similaires.

Le projet AlzVR propose la création de nouveaux outils dans la maladie d'Alzheimer dans une approche centrée sur l'utilisateur.

Se basant sur les tests MMSE et MoCA, nous avons conçu une auto-évaluation sur tablette tactile. Une étude multicentrique est en

cours avec inclusion de sujets sains, atteints de trouble cognitif léger, ou d'une maladie d'Alzheimer. Elle évalue un programme multimodal non immersif, incluant notre outil. Les résultats préliminaires d'utilisabilité (en population jeune et âgée) et d'efficacité des tâches cognitives sont encourageants.

Nous avons également créé deux outils en réalité virtuelle immersive dont une version innovante associant deux nouvelles modalités sensorielles pour l'évaluation cognitive à savoir l'olfaction et le retour haptique. Ces environnements multi-sensoriels permettront d'évaluer des fonctions cognitives jusqu'alors non explorées par les outils digitaux usuels. Nous espérons, à ce titre, débiter sous peu des études cliniques.

Title : AlzVR project : Design and evaluation of a multimodal digital tool for detecting cognitive disorders in Alzheimer's disease

Keywords : Alzheimer's disease, diagnosis, digital tablet, usability, immersive virtual reality, olfaction

Abstract : Alzheimer's disease represents a medical, social, and economic challenge in the situation of the aging population.

Current screening and diagnosis tools rely on paper tests with examiners.

Numerous publications showed good diagnosis abilities with non-immersive tools (digital tablets, smartphones, touchscreen). Other evaluations in immersive virtual reality showed similar results.

The AlzVR project proposes the creation of new tools for Alzheimer's disease with a user-centered design.

Based on MMSE et MoCA tests, we have conceived a non-immersive auto-evaluation. A multicentric study has begun, with healthy

subjects and subjects with mild cognitive impairment or Alzheimer's disease. It will evaluate a multimodal non-immersive program, including our tool. Preliminary usability results (in young and aged populations) and cognitive tasks efficacy are hopeful.

We also created two immersive tools with an innovative version, associating new sensorial modalities in cognitive evaluation, such as olfaction and haptic feedback. These multisensorial environments will allow new cognitive explorations, which are currently impossible using usual digital tools. Thus, we hope to start clinical studies soon.

Table des matières

REMERCIEMENTS	10
ABRÉVIATIONS	11
PUBLICATIONS	12
1 INTRODUCTION	14
1.1 CONTEXTE	14
1.2 PROJET ALZVR	15
1.3 MODÈLE DE CONCEPTION	15
1.4 DÉVELOPPEMENT DES OUTILS NUMÉRIQUES	16
2 TROUBLES NEUROCOGNITIFS ET MALADIE D'ALZHEIMER	18
2.1 TROUBLES NEUROCOGNITIFS	19
2.1.1 Explorations neurocognitives	19
2.1.2 Critères de sévérité	21
2.2 MALADIE D'ALZHEIMER	22
2.2.1 Historique	22
2.2.2 Épidémiologie	22
2.2.3 Physiopathologie	23
2.2.4 Critères diagnostiques	23
2.2.5 Exploration olfactive	24
2.2.6 Traitement	25
2.3 ORGANISATION TERRITORIALE DES CENTRES MÉMOIRE	26
3 LES OUTILS NUMÉRIQUES POUR LE DIAGNOSTIC DES TROUBLES COGNITIFS : ÉTAT DE L'ART	28
3.1 INTRODUCTION	29
3.2 OUTILS NON IMMERSIFS : LES ÉCRANS TACTILES	31
3.2.1 Méthodes	31
3.2.2 Résultats	32
3.3 OUTILS IMMERSIFS : LA RÉALITE VIRTUELLE	42
3.3.1 Domaines cognitifs	44
3.3.2 Types d'interfaces immersives	44
3.3.3 Types d'environnements	47
3.3.4 Populations d'étude et résultats	50
3.4 DISCUSSION	54
3.4.1 Éléments généraux	54
3.4.2 Tablettes numériques	56
3.4.3 Réalité virtuelle immersive	57

3.5	CONCLUSION	59
4	UN OUTIL DE DÉPISTAGE NON IMMERSIF	60
4.1	INTRODUCTION	61
4.2	CONCEPTION D'UN OUTIL DE DÉPISTAGE	62
4.2.1	Outil de conception et droits d'auteur	62
4.2.2	Menu d'accueil	62
4.2.3	Questionnaire médical	63
4.2.4	Anonymisation	64
4.2.5	Scène de jeu	64
4.2.6	Choix du matériel	67
4.2.7	Entraînement à la tablette	67
4.2.8	Transposition des questions	67
4.2.9	Résultats	72
4.2.10	Questionnaire F-SUS	72
4.2.11	Stockage des données	74
4.3	ÉTUDE PRÉLIMINAIRE	75
4.3.1	Méthodes	75
4.3.2	Résultats	76
4.3.3	Discussion	80
4.4	ÉTUDE COGNUM-ALZVR	82
4.4.1	Critères de sélection	82
4.4.2	Déroulement de l'évaluation cognitive	82
4.4.3	Démarrage de l'étude et résultats préliminaires	85
4.5	CONCLUSION	87
5	VERS UN OUTIL DE DÉTECTION IMMERSIF	88
5.1	INTRODUCTION	89
5.2	CONCEPTION D'UN OUTIL DE DÉPISTAGE	90
5.2.1	Choix du matériel	90
5.2.2	Délivrance des consignes	91
5.2.3	Méthode de réponse et validation	91
5.2.4	Entraînement à la RV	92
5.2.5	Transposition des questions	92
5.2.6	Discussion	99
5.3	PROTOTYPE D'ÉVALUATION OLFACTIVE ET HAPTIQUE	101
5.3.1	Choix de l'environnement	101
5.3.2	Conception du prototype	103
5.3.3	Discussion	111
5.4	CONCLUSION	115
6	CONCLUSION	116

7 ANNEXES	119
7.1 Mini-Mental Status Examination	120
7.2 Montréal Cognitive Assessment (version 7.1)	122
7.3 Analyse qualité QUADAS-2	125
7.4 Résultats de la revue systématique (Caractéristiques démographiques et statistiques) des études sur smartphone ou tablette	128
7.5 Résultats de la revue systématique (Caractéristiques démographiques et statistiques) des études sur ordinateurs à écran tactile	138
7.6 Échelle ADL de Katz	142
7.7 Échelle IADL de Lawton et Brody	143
7.8 Questionnaire VES-13	145
BIBLIOGRAPHIE	147

Table des figures

1	Projection de l'évolution mondiale de la MA [26]	22
2	Phénomènes cellulaires de la maladie d'Alzheimer [27]	23
3	Voies olfactives [36]	25
4	Indices d'évolution du nombre de dispositifs et du nombre de places de certains dispositifs entre 2003 et 2019 – (base 100 en 2003) [38]	27
5	Catégorisation des technologies de réalité virtuelle pour la MA [40]	30
6	Diagramme de flux	33
7	Nombre de publications par année (20-)	35
8	Exemple de test sur tablette avec stylet [69]	36
9	Exemples d'utilisation de la réalité augmentée	42
10	Nombre d'études avec tests en réalité virtuelle immersive et non immersive [129]	43
11	Fonctions cognitives explorées dans les études en réalité virtuelle immersive [129]	44
12	Matériel d'immersion selon Fernandez Montenegro et al. [130]	45
13	Environnement immersif selon Howett et al. [131]	45
14	Matériel d'immersion selon Zakzanis et al. [132]	46
15	Installation CAVE de Séo et al. [133]	46
16	Environnements immersifs spatiaux [132, 131]	47
17	Environnements immersifs d'activités quotidiennes [133]	48
18	Environnements immersifs avec tapis de marche [134]	48
19	Scène immersive de Fernandez Montenegro et al. [130]	49
20	Épreuve de reconnaissance d'objets anormaux [130]	49
21	Scènes immersives de Tsai et al. [135]	50
22	Nombre d'études en RV immersive dans l'évaluation cognitive	50
23	Courbe ROC de Liu et al. [127]	54
24	Menu d'accueil	62
25	Questionnaire médical (partie 1)	63
26	Questionnaire médical (partie 2)	64
27	Diagramme principal des classes	65
28	Modalités de réponse	66
29	Tâche d'entraînement	67
30	Tâche des trois mots	69
31	Reconnaissance d'horloges	70
32	Tâche des drapeaux	70
33	Tâche des villes	71
34	Tâche des saisons	71
35	Tâche des années	72
36	Tâche d'abstraction	72

37	Menu des résultats	73
38	Questionnaire F-SUS	73
39	Processus de stockage des données et anonymisation	74
40	Remarques des utilisateurs sains	81
41	Exemple d'une horloge patient indiquant 11h10	84
42	Exemple d'une tâche de motricité fine (Dextrain©)	85
43	Casque Oculus Quest®	90
44	Environnement virtuel	91
45	Tâche d'entraînement	92
46	Tâche des balles	95
47	Liste de lettres	95
48	Liste de mots	95
49	Tâche d'association	96
50	Tâche de langage	96
51	Ordre écrit	96
52	Tâche de dessin	97
53	Séquence logique	97
54	Reconnaissance d'horloge	97
55	Test des cinq mots	98
56	Tâche d'orientation temporo-spatiale	99
57	Breakfast task [184]	101
58	Préparation de petit-déjeuner (A) et déjeuner (B) [185]	102
59	The NonImmersive Virtual Coffee Task (NI-VCT) [186]	103
60	Système de diffusion olfactive [189]	104
61	Système de diffusion olfactive [190]	105
62	Système de diffusion par OLFY® [191]	106
63	Système de diffusion par OLFY®	106
64	Gants de rétroaction [192]	107
65	Gants haptiques®	108
66	Environnement de petit-déjeuner	108
67	Tâches virtuelles du petit-déjeuner	110
68	Tâches interférente des 7 différences	111
69	Évolution du type de RV à travers le temps [194]	112
70	Indication de la VR multi-sensorielle [194]	112
71	Répartition des modalités sensorielles utilisées [194]	113

Liste des tableaux

3.1	Analyse qualité QUADAS-2	34
3.2	Caractéristiques techniques des 62 études	37
3.3	Caractéristiques statistiques des études utilisant une tablette ou un smartphone	40
3.4	Caractéristiques statistiques des études utilisant un ordinateur avec écran tactile	41
3.5	Résultats des études en RV immersive	52
3.6	Analyses en sous-groupes de Liu et al. [127]	55
3.7	Termes MeSH pour l'extraction d'articles	56
4.1	Correspondances entre tâches cognitives numériques et tâches papier	68
4.2	Caractéristiques de la population	76
4.3	Habitudes numériques de la population	77
4.4	Temps de réalisation des tâches numériques	78
4.5	Résultats au questionnaire F-SUS	79
4.6	Temps de réalisation des tâches numériques	86
5.1	Correspondances entre tâches numériques et tâches papier	93
5.2	Interactions naturelles utilisateur de chaque tâche	94

"Une pomme par jour éloigne le médecin, pourvu que l'on vise bien."
Winston Churchill

REMERCIEMENTS

Des remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, permirent que ce projet de thèse nébuleux arrive à sa soutenance.

À mes directeurs de thèse, Samir OTMANE et Guillaume LOUP pour leur accompagnement.

À Frédéric DAVESNE, pour sa bonne humeur constante et son investissement bienveillant dans ce projet et dans le laboratoire.

Aux Professeures Brigitte LE PEVEDIC et Anne-Sophie RIGAUD, pour leur relecture attentive de mon manuscrit.

Au Professeur Mehdi AMMI et au Dr Tifanie BOUCHARA, d'avoir accepté de faire partie de mon jury et d'y apporter votre regard.

Aux développeurs, Margaux SEGUIN, Jonathan DEGAND et Suphanie GNANASOTHY, sans qui tous ces programmes n'auraient jamais vu le jour.

À Nathavy UM DIN, tout ce travail n'aurait pas été possible sans toi et sans ton professionnalisme, merci beaucoup.

À Sylvie MADRANGE et Sandra LENIK, de l'hôpital des Magnolias, pour leur aide dans l'étude COGNUM-A1zVR.

Aux équipes du Temps des Roses, Cèdre Bleu et Larris qui m'ont écouté et soutenu durant ces presque six années.

À Christophe

Ce projet doctoral n'aurait pas de sens s'il n'avait pas de but

Madame la Professeure Armelle GENTRIC, merci infiniment de votre confiance dans ce nouveau long parcours qui m'attend...au bout de la terre.

Enfin, à tou.te.s les patient.e.s que je croise; nos échanges et nos regards (parfois sans mots) me rappellent chaque jour, en toute humilité, la chance et l'honneur d'exercer un métier unique. Puisse ma maigre contribution aider à améliorer vos parcours de soins.

ABRÉVIATIONS

AUC : Area Under the Curve (Aire sous la courbe)

HAS : Haute Autorité de Santé

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

MA : Maladie d'Alzheimer

MCI : Mild Cognitive Impairment

MMSE : Mini-Mental Status Examination

MoCA : Montréal Cognitive Assessment

RV : Réalité Virtuelle

TNC : Trouble neuro-cognitif

PUBLICATIONS

Articles publiés dans des conférences à comité de lecture

Maronnat F, Seguin M, Djemal K; *Cognitive tasks modelization and description in VR environment for Alzheimer's disease state identification*, 2020 Tenth International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA), 2020 : p. 1-7

doi:[10.1109/IPTA50016.2020.9286627](https://doi.org/10.1109/IPTA50016.2020.9286627)

<https://hal.science/hal-03404812v1>

Maronnat F, Davesne F, Otmane S; *Cognitive assessment in virtual environments : How to choose the Natural User Interfaces?*, Laval Virtual VRIC ConVRgence Proceedings, Int Journal Virtual Reality (2022); 1(1) : 23-27

doi:[10.20870/IJVR.2022.1.1.5503](https://doi.org/10.20870/IJVR.2022.1.1.5503)

<https://hal.science/hal-03622384v2>

Maronnat F, Loup G, Degand J, Davesne F, Ortmane S; *Évaluation préliminaire de l'utilisabilité d'un outil de dépistage des troubles cognitifs sur tablette numérique (AlzVR)*, Colloque JETSAN Paris 2023

<https://jetsan2023.sciencesconf.org/>

Maronnat F, Loup G, Degand J, Davesne F, Otmane S; *Design of a New Digital Cognitive Screening Tool on Tablet : AlzVR Project*, In Proceedings of the 19th International Conference on Software Technologies (ICSOFT 2024), SciTePress, pages 283-292.

doi:[10.5220/0012837800003753](https://doi.org/10.5220/0012837800003753)

<https://hal.science/hal-04649906v1>

Articles publiés dans des revues scientifiques

Um Din N, Maronnat F, Le Boterff Q, Otmane S, Badra F, Lindbergd P.G, Belmin J; *Contribution of a Digital Tablet-Based Tests to the Diagnosis of Neurocognitive Disorders in Older Adults : a Feasibility Study*, Stud Health Technol Inform. 2024 Aug 22;316 :1163-1164

doi:[10.3233/SHTI240616](https://doi.org/10.3233/SHTI240616)

Um Din N, Maronnat F, Pariel S, Badra F, Belmin J; *A Digital Clock Drawing Test on Tablet for the Diagnosis of Neurocognitive Disorders in Older Adults*, *Stud Health Technol Inform*. 2024 Aug 22;316 :1878-1882.

doi:[10.3233/SHTI240798](https://doi.org/10.3233/SHTI240798)

Um Din N, Maronnat F, Loup G, Badra F, Otmame S, Belmin J; *Cognitive testings on a touch-screen tablet for older adults : a feasibility study*, *Gerontechnology*. 2024 Jul 31;23(s) :1-1.

doi:<https://doi.org/10.4017/gt.2024.23.s.987.opp>

Posters

Maronnat F, Otmame S, Djemal K; *Réalité virtuelle et maladie d'Alzheimer : Où en sommes-nous dans le diagnostic des troubles de la mémoire?*, Colloque Évry-Sénart Sciences et Innovation – 2019

Maronnat F, Otmame S; *Use of virtual reality for cognitive assessment in elderly people : a brief review*, *Eur Geriatr Med* 2021; 12 (Suppl 1) : S1-387,

doi:[10.1007/s41999-021-00585-2](https://doi.org/10.1007/s41999-021-00585-2)

Soumission en cours dans *Digital Health*¹

Maronnat F, Loup G, Degand J, Davesne F, Otmame S; *Design of a new digital cognitive screening tool on tablet : AlzVR project*

Révisions en cours

Projets de soumissions

Systematic review of cognitive assessment on a touch tablet or smartphone in older adults with neurocognitive disorders

Interest of Two Digital Devices for the Diagnosis of Neurocognitive Disorders in Elderly People With Cognitive Symptoms

1. <https://journals.sagepub.com/home/dhj>

1 - INTRODUCTION

1.1 . CONTEXTE

Le monde connaît un vieillissement de sa population, dans les pays à revenu élevé comme dans ceux aux revenus faible ou intermédiaire [1]. La France présente une trajectoire similaire et l'on estime que les personnes de 65 ans et plus représenteront environ 29 % de la population en 2070 (versus 21 % aujourd'hui) [2].

Cette évolution démographique représente un véritable défi pour nos économies et systèmes de santé [3] où l'on s'attend à un accroissement des coûts tant sanitaires que sociaux [4].

L'apparition de multiples pathologies en lien avec le vieillissement, notamment les maladies neurodégénératives, entraîne une augmentation des dépenses sanitaires (consultations, hospitalisations, médicaments). Selon l'Assurance Maladie, 1,04 % de la population (soit environ 710 000 personnes) est atteinte d'une maladie neuro-dégénérative (affection longue durée déclarée) pour un coût total de 2,4 milliards d'euros [5]. Pour autant, la prévalence réelle semble bien plus importante et dépasser le million de personnes [6].

La *maladie d'Alzheimer* (MA) est la maladie neurodégénérative la plus fréquente dans le monde [7]. Cette pathologie provoque une destruction des neurones (neurodégénérescence) avec apparition de troubles de la mémoire et du comportement, ainsi qu'une perte d'autonomie progressive. Son diagnostic repose principalement sur des évaluations cognitives papier, des examens radiologiques comme l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et des dosages de marqueurs biologiques spécifiques dans certains cas. Toutes ces explorations sont généralement réalisées dans des centres mémoires hospitaliers labélisés où les délais de rendez-vous sont variables et les distances parfois longues [8]. Le dépistage en soins primaires reste un élément central dans la prise en charge des patients mais la France fait face à une baisse de la démographie médicale concomitante à une augmentation du nombre de personnes âgées [9].

Parallèlement à ce phénomène de vieillissement démographique, nous assistons à une généralisation de l'utilisation des dispositifs numériques au sein de la population. Leurs coûts réduits ont permis leur nette diffusion pour

des applications médicales [10]. Celle-ci reste cependant moins répandue dans le domaine des soins aux sujets âgés [11].

Ces nouvelles technologies étant devenues plus accessibles, il est indispensable de proposer des outils numériques simples et rapides pour améliorer le dépistage cognitif au plus proche des patients.

1.2 . PROJET ALZVR

Le projet doctoral ALZVR, porté par le laboratoire IBISC (Informatique, Bioinformatique, Systèmes Complexes) de l'Université d'Évry-Val d'Essonne Paris Saclay, propose la création d'un nouvel **outil digital multimodal** de diagnostic des troubles cognitifs dans la maladie d'Alzheimer.

L'approche s'articule autour de deux modalités numériques en **environnement non immersif** (tablette) et **immersif** (réalité virtuelle).

À travers ce projet, nous souhaitons étudier l'apport des outils numériques (non immersifs et immersifs) pour la détection des troubles cognitifs dans la maladie d'Alzheimer.

Deux questions de recherche sont posées :

⇒ Peut-on concevoir un outil d'auto-évaluation sur interface non immersive avec des tâches cognitives usuelles? Quels sont les éléments nécessaires pour le rendre simple, rapide et facile d'utilisation par tout professionnel de soins primaires?

⇒ La réalité virtuelle immersive est-elle un outil pertinent pour explorer les fonctions cognitives, y compris complexes?

1.3 . MODÈLE DE CONCEPTION

Étant gériatre, j'exprime la vision d'un professionnel souhaitant réaliser une évaluation cognitive numérique. De façon concomitante, j'apporte également le regard sur la population gériatrique et ses spécificités pour orienter la conception d'un outil digital.

De l'autre côté, ce projet est soutenu par un laboratoire ayant l'expérience technique de créations d'environnements numériques qu'ils soient immersifs ou non.

Nous souhaitons un travail collaboratif et itératif ciblant les besoins

d'utilisateurs ayant des attentes précises. Ces raisons nous ont naturellement guidé vers le choix d'une **conception centrée sur l'utilisateur** [12].

Cela signifie que le développement de l'outil se base à chaque étape sur *l'utilisateur final*. Ses besoins, attentes et caractéristiques propres sont pris en compte. Ainsi, la conception n'est pas imposée par les créateurs de l'outil; mais la technologie utilisée doit s'adapter. On peut citer une approche par le scénario [13] où on l'on recueille directement les attentes des utilisateurs par des questionnaires, des groupes de paroles. Les concepteurs peuvent également s'immerger dans l'environnement des utilisateurs finaux pour écrire le scénario de leur programme.

1.4 . DÉVELOPPEMENT DES OUTILS NUMÉRIQUES

Le développement d'un outil par une *démarche centrée utilisateur* doit suivre **trois phases** de conception conseillées :

- phase d'*analyse*;
- phase de *conception*;
- phase d'*évaluation*.

❶ Pendant la **phase d'analyse**, on procède au recueil des besoins et attentes des utilisateurs. C'est également le moment d'apprécier le **contexte** de développement de l'outil, son utilité recherchée.

→ Dans le chapitre 2, nous commencerons par des généralités sur les troubles neurocognitifs, les tests cognitifs usuels et les consultations mémoire. Nous présenterons également l'épidémiologie, la physiopathologie et les critères diagnostiques de la maladie d'Alzheimer

→ Nous consacrerons la deuxième partie de cette phase d'analyse à **l'état de l'art** sur les dispositifs numériques dans la détection des troubles cognitifs (Chapitre 3). Nous exposerons tout d'abord les résultats d'un travail original avec une *revue systématique de la littérature* (62 articles) sur l'utilisation des *écrans tactiles* comme les tablettes ou les smartphones (Sections 3.2 et 3.4). Nous apporterons ensuite les éléments récents de la littérature sur la *réalité virtuelle immersive* (Sections 3.3 et 3.4).

❷ La **phase de conception** correspond à l'élaboration propre du **prototype** de l'outil. Cette maquette doit tenir compte des éléments recueillis lors de la phase d'analyse et s'adapter conformément aux retours des utilisateurs.

→ La conception générale de l'**outil non immersif** (tablette) sera présentée à la section 4.2.

→ Dans le chapitre 5, nous aborderons la conception de deux prototypes d'outils diagnostiques en **réalité virtuelle immersive** avec l'utilisation de systèmes sensoriels innovants via l'odorat et le toucher. Nous verrons ainsi que la réalité virtuelle simple, comme multi-sensorielle, permet d'évaluer plus de fonctions cognitives qu'un outil non immersif.

③ La dernière phase est celle de l'**évaluation**. Il s'agit ici de mesurer l'**utilisabilité de l'outil**. Cette évaluation se déroule généralement en condition réelle, l'utilisateur exprimant sa *satisfaction* et ses *difficultés* dans l'utilisation de l'outil. Ces informations permettront aux concepteurs d'améliorer le prototype développé lors de la phase de conception.

→ Nous présenterons les premières études réalisées dans le cadre du projet A1zVR. Après avoir exposé les éléments préliminaires d'utilisabilité auprès de sujets sains de l'outil non immersif (Section 4.3), nous dévoilerons en section 4.4 les premiers résultats de l'évaluation de cet outil non immersif à travers l'étude nationale multicentrique COGNUM-A1zVR (NCT06032611)¹.

1. <https://clinicaltrials.gov/>

2 - TROUBLES NEUROCOGNITIFS ET MALADIE D'ALZHEIMER

2.1	TROUBLES NEUROCOGNITIFS	19
2.1.1	Explorations neurocognitives	19
2.1.2	Critères de sévérité	21
2.2	MALADIE D'ALZHEIMER	22
2.2.1	Historique	22
2.2.2	Épidémiologie	22
2.2.3	Physiopathologie	23
2.2.4	Critères diagnostiques	23
2.2.5	Exploration olfactive	24
2.2.6	Traitement	25
2.3	ORGANISATION TERRITORIALE DES CENTRES MÉMOIRE	26

2.1 . TROUBLES NEUROCOGNITIFS

Les troubles neurocognitifs (TNC) sont définis par le manuel statistique et diagnostique des troubles mentaux (cinquième version) en 2013 [14] comme une atteinte des fonctions cognitives suivantes :

- attention ;
- fonctions exécutives : prise de décision, mémoire de travail, planification ;
- mémoire et apprentissage : court terme, long terme, rappel libre ou indicé ;
- langage : fluence, grammaire, syntaxe écrite et orale ;
- praxies : écriture, mémoire des gestes ;
- cognition sociale : comportement, régulation émotionnelle, attitude.

Le trouble ne doit pas survenir dans le cadre d'une maladie psychiatrique ni dans un contexte d'état confusionnel.

Il existe deux types de TNC :

- **majeur** : le TNC entraîne une *perte d'autonomie*. On parle également de *démence*. C'est le cas par exemple de la MA ;
- **mineur (ou léger)** : le TNC n'entraîne pas de perte d'autonomie. Il est également appelé déficit cognitif modéré ou *Mild Cognitive Impairment* (MCI). Il peut par exemple correspondre à un état prodromal de la MA.

Le **MCI** a été défini par Petersen et al. en 1997 [15] comme :

- plainte d'un déficit mnésique ;
- autonomie conservée ;
- fonction cognitive globale normale ;
- mémoire altérée pour l'âge ;
- absence de démence.

2.1.1 . Explorations neurocognitives

Les bilans cognitifs classiques reposent sur la réalisation de tests explorant les différents champs de la cognition (mémoire, fonctions exécutives, attention etc.). Ils peuvent examiner une fonction cognitive précise ou bien réaliser une évaluation globale.

Trois tests de détection des troubles cognitifs sont utilisés en pratique courante :

- Mini-Mental Status Examination (MMSE);
- Montréal Cognitive Assessment (MoCA);
- les cinq mots de Dubois.

Ils sont recommandés dans le dépistage et le diagnostic des troubles cognitifs [16, 17].

2.1.1.1 . Mini-Mental Status Examination

C'est le test de mémoire le plus connu. Publié en 1975 par Folstein [18], il se compose de 30 questions avec un score allant de 0 à 30 (meilleur score). Il explore plusieurs fonctions comme l'orientation temporo-spatiale, le calcul, le langage ou bien encore les praxies.

Bien que très général, il demeure **le test le plus diffusé** tant dans le dépistage que dans le diagnostic des troubles mnésiques. Il est d'ailleurs proposé par l'*Assurance Maladie* comme premier outil d'évaluation [19].

Le questionnaire complet est disponible en annexe 7.1.

2.1.1.2 . Montréal Cognitive Assessment

Le Montréal Cognitive Assessment (MoCA), originellement francophone, est actuellement de plus en plus utilisé en remplacement et/ou en complément du MMSE [20].

Il présente des caractéristiques intéressantes (meilleure exploration des fonctions frontales que le MMSE par exemple) et de bons résultats en termes d'exploration cognitive. Ciesielska et al. ont montré que le MoCA possédait une sensibilité supérieure au MMSE pour différencier des sujets sains de sujets MCI même si le MMSE garde une meilleure spécificité [21].

Le questionnaire complet est disponible en annexe 7.2.

2.1.1.3 . Les 5 mots de Dubois

Afin d'explorer les fonctions d'encodage (mémorisation) et de rappel, Dubois et al. ont publié en 2002 un test appelé "5 Mots de Dubois" [22]. L'épreuve est constituée de 5 mots avec un rappel immédiat (libre et indicé) suivi d'une tâche interférente puis d'un rappel. Ce test a montré une sensibilité de 91% et une spécificité de 87 % dans le dépistage de la MA.

2.1.2 . Critères de sévérité

Les maladies neurocognitives sont des processus évolutifs conduisant progressivement à une perte d'autonomie partielle voire totale chez les patients.

Cette sévérité peut se mesurer et se coter à l'aide d'échelles comme la Global Deterioration Scale ou la Clinical Dementia Rating.

2.1.2.1 . Global Deterioration Scale (GDS)

Cette échelle a été publiée en 1982 par Reisberg et al. [23]. La détérioration cognitive est divisée en 7 stades allant de 1 (sujet objectivement et subjectivement normal) à 7 (démence sévère). Sans algorithme sous-jacent, l'évaluation tient compte de paramètres comme l'autonomie, la mémoire et de la continence.

2.1.2.2 . Clinical Dementia Rating (CDR)

Cette autre échelle a été publiée en 1984 par Berg [24]. Le score se compose de six questions cotées chacune de 0 (pas de déficit) à 3 (déficit sévère) : mémoire, orientation, jugement et résolution de problème, gestion administrative, loisirs, soins personnels.

Le score total est calculé via un algorithme et va de 0 à 3 sur le même modèle.

2.2 . MALADIE D'ALZHEIMER

2.2.1 . Historique

La MA a été décrite en 1907 par Aloïs Alzheimer lui-même [25] devant le cas d'une patiente de 51 ans. Il rapporta les premières lésions histologiques de la maladie : l'atrophie cérébrale, les plaques "séniles" et la dégénérescence des neurones. Ces anomalies seront décrites avec précision au cours du temps et de l'évolution des techniques. Elles sont aujourd'hui admises comme paradigme principal de la MA (section 2.2.3).

2.2.2 . Épidémiologie

La MA est la première cause de démence d'origine neurodégénérative entraînant une dégradation cognitive majeure associée à une perte d'autonomie [26].

La prévalence était estimée à 47 millions de cas dans le monde en 2015 avec une projection de 139 millions de malades en 2050 (Figure 1) représentant un coût de presque 2 000 milliards de dollars [26].

Il s'agit d'un enjeu mondial de santé publique tant sur le plan diagnostique que thérapeutique.

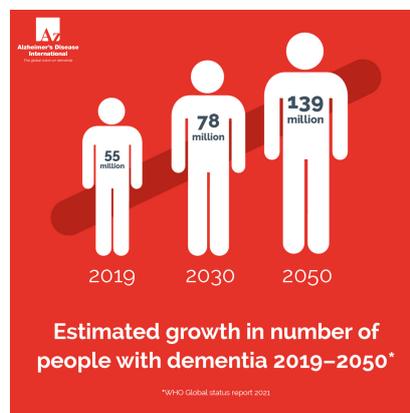


Figure 1 – Projection de l'évolution mondiale de la MA [26]

À titre d'exemple, le mot "Alzheimer" recherché dans la base médicale Pubmed¹ donne plus de 220 000 articles.

1. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>

2.2.3 . Physiopathologie

La MA est caractérisée au niveau cellulaire par deux phénomènes majeurs [27] présentés dans la figure 2 :

- **les plaques amyloïdes**
 - la *protéine amyloïde* est une protéine présente naturellement dans le cerveau et participe au fonctionnement des neurones. Dans la MA, l'élimination de cette protéine est altérée avec accumulation et formation de plaques.
- **dégénérescence neuro-fibrillaire**
 - la *protéine tau* (Tubulin Associated Unit) participe à la stabilité du squelette interne des neurones. Une modification de cette protéine a lieu dans la MA entraînant une altération de l'architecture des neurones et la formation de filaments.

Ces phénomènes entraînent une neuro-dégénérescence et une atrophie cérébrale notamment dans une zone appelée hippocampes (lobes temporaux).

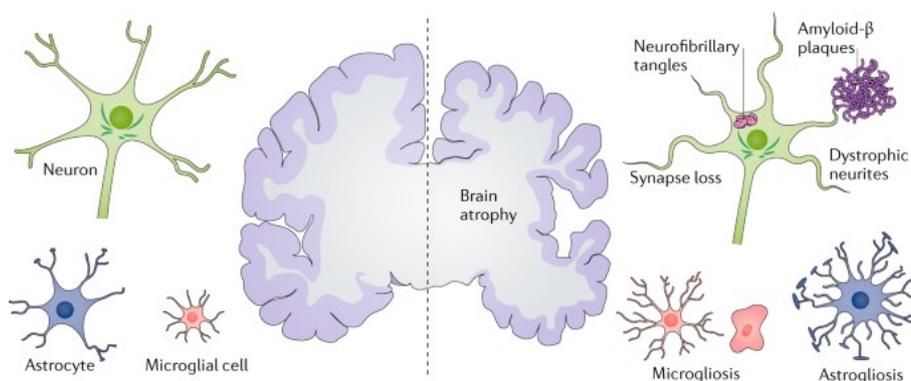


Figure 2 – Phénomènes cellulaires de la maladie d'Alzheimer [27]

2.2.4 . Critères diagnostiques

2.2.4.1 . Critères IWG

Les critères diagnostiques du *International Working Group* (IWG) furent proposés en 2011 par Dubois et al [28] et définissent une maladie d'Alzheimer de la façon suivante :

- phénotype clinique cognitif compatible avec une MA entraînant **ou non** une perte d'autonomie (TNC mineur versus majeur);

- biomarqueurs positifs (τ et β -amyloïde) dans le liquide céphalo-rachidien et/ou lors d'imageries fonctionnelles comme la scintigraphie cérébrale.

2.2.4.2 . Critères HAS

La Haute Autorité de Santé a émis des critères diagnostiques en 2011 puis 2018 [29] qui définissent la MA avec :

- baisse des performances lors d'évaluations neuropsychologiques évaluant les différents types de mémoire, les fonctions exécutives, l'attention, le langage, les praxies/gnosies, les fonctions visuo-constructives, les cognitions sociales;
- imagerie cérébrale morphologique par IRM avec atrophie des zones hippocampiques;
- biomarqueurs physiopathologiques dans le liquide cérébro-spinal (amyloïde et tau).

Nous voyons que deux approches existent et contribuent à définir la MA de manières différentes.

2.2.5 . Exploration olfactive

Depuis plusieurs années, les **troubles olfactifs** sont apparus comme un symptôme précoce de la MA [30, 31, 32].

Sur le plan neuronal, on retrouve une **atrophie des réseaux neuronaux** de l'olfaction chez les patients atteints de troubles cognitifs débutants avec une atrophie du bulbe olfactif dans les stades évolués (Figure 3) [33]. À noter que l'influx nerveux issu du bulbe nasal traverse le cortex olfactif primaire, composé lui-même de l'hippocampe; zone préférentielle d'atteinte de la neuro-dégénérescence dans la MA (chapitre 2.2.3).

Au delà des symptômes cognitifs habituels, il existe donc une altération des fonctions sensorielles. Cette découverte physiopathologique représente une nouvelle voie d'exploration de la MA par l'olfaction.

Les tests olfactifs principalement utilisés sont des échantillons multiples d'odeurs sur des bandelettes ou flacons que le patient doit sentir et identifier [32]. On peut notamment citer deux kits majeurs que sont le Sniffin' Sticks test® [34] et le University of Pennsylvania Smell Identification Test (UPSIT®) [35].

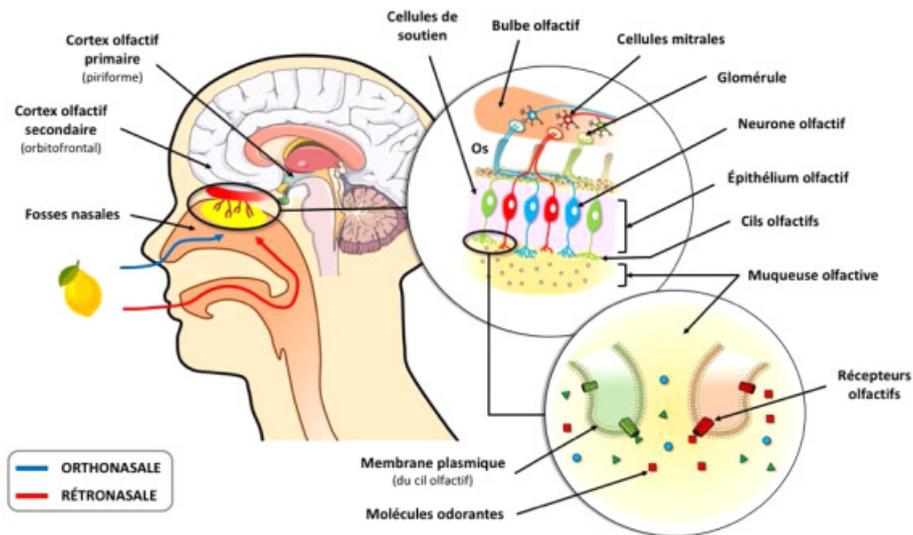


Figure 3 – Voies olfactives [36]

2.2.6 . Traitement

À ce jour, il n'existe aucun traitement *curatif* commercialisé de la maladie. Le traitement repose donc sur des médicaments *symptomatiques* ainsi que des thérapies non médicamenteuses (orthophonie, stimulation cognitive, psychothérapie).

De nombreuses thérapeutiques sont néanmoins à l'étude mais non encore commercialisées [37].

2.3 . ORGANISATION TERRITORIALE DES CENTRES MÉMOIRE

En France, l'exploration d'un trouble cognitif comme la MA peut se réaliser dans un **centre mémoire**.

Les **centres mémoire de territoire** sont des services de consultations rattachés à un établissement de santé et ayant reçu un **label spécifique** pour réaliser des bilans de mémoire. Il s'agit notamment d'avoir à disposition un médecin, un professionnel en neuropsychologie et la possibilité d'accéder à des examens complémentaires comme la biologie ou l'imagerie cérébrale.

Lorsque le diagnostic est incertain et/ou nécessite un avis complémentaire, le patient peut être adressé à un **centre mémoire ressources et recherche** (CMRR). Un CMRR est implanté dans un centre hospitalier universitaire (CHU), disposant de professionnels spécialisés et d'un plateau technique complet.

Les centres mémoire sont ainsi chargés d'évaluer, diagnostiquer et suivre les personnes atteintes de la MA.

Le dernier rapport de la Fondation Médéric Alzheimer [38], datant de 2021, recense 602 centres mémoire (dont 436 labellisés et 50 rattachés à un CMRR). Le nombre de ces centres augmente au cours du temps (+ 18 % par rapport à l'année 2011) comme le montre la figure 4. Cela correspond à **9,6 centres mémoire pour 100 000 personnes de 75 ans** en 2019 contre 8,9 en 2011.

Malgré une meilleure offre, les premiers rendez-vous sont de plus en plus tardifs. En 2019, le délai moyen pour obtenir une première consultation était de **74 jours** (versus 51 jours en 2011). Ces données vont à l'encontre des recommandations qui préconisent une réduction du délai entre l'apparition des premiers symptômes de la maladie et son diagnostic [28, 29].

Face à cette constatation, il est indispensable d'améliorer le parcours de soins des patients atteints de troubles cognitifs. Il faut faciliter le dépistage au plus proche de la population, en proposant de nouveaux outils d'évaluation.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons un état de l'art sur l'utilisation des écrans tactiles et de la réalité virtuelle immersive dans le diagnostic des troubles cognitifs.

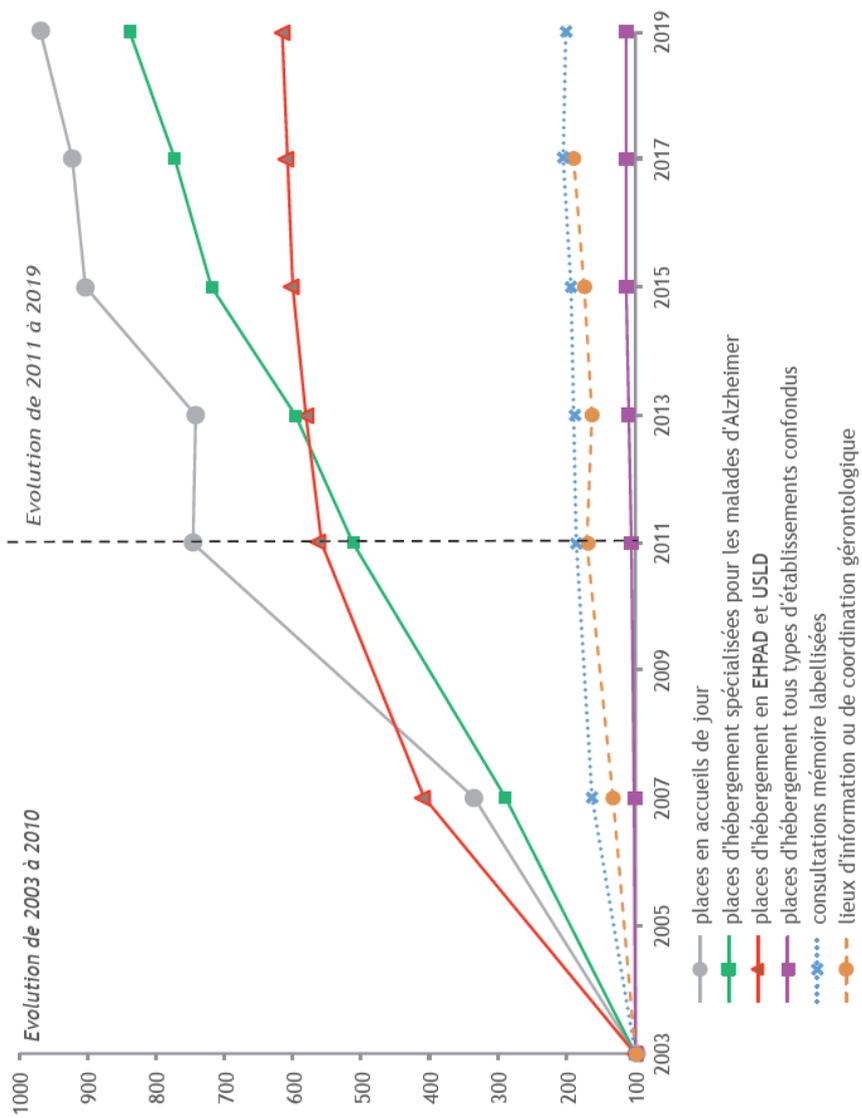


Figure 4 - Indices d'évolution du nombre de dispositifs et du nombre de places de certains dispositifs entre 2003 et 2019 - (base 100 en 2003) [38]

3 - LES OUTILS NUMÉRIQUES POUR LE DIAGNOSTIC DES TROUBLES COGNITIFS : ÉTAT DE L'ART

3.1	INTRODUCTION	29
3.2	OUTILS NON IMMERSIFS : LES ÉCRANS TACTILES	31
3.2.1	Méthodes	31
3.2.2	Résultats	32
3.3	OUTILS IMMERSIFS : LA RÉALITÉ VIRTUELLE	42
3.3.1	Domaines cognitifs	44
3.3.2	Types d'interfaces immersives	44
3.3.3	Types d'environnements	47
3.3.4	Populations d'étude et résultats	50
3.4	DISCUSSION	54
3.4.1	Éléments généraux	54
3.4.2	Tablettes numériques	56
3.4.3	Réalité virtuelle immersive	57
3.5	CONCLUSION	59

3.1 . INTRODUCTION

Les évaluations cognitives usuelles se présentent sous formes de questionnaires papier nécessitant un examinateur externe dans la majorité des cas. En parallèle, les technologies numériques non immersives, semi-immersives et immersives comme la **réalité virtuelle** se sont largement développées, y compris dans le domaine médical. Elles offrent de nouvelles possibilités tant dans les champs *diagnostiques* que thérapeutiques.

La réalité virtuelle (RV) est "*un domaine scientifique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entité 3D*" [39]. Le graphisme doit permettre de créer un monde qui semble réaliste. Le sujet doit ressentir une immersion dans l'environnement virtuel.

L'**immersion** peut se définir comme la sensation de perte de conscience d'être dans un environnement virtuel, du "*degré d'objectivité avec lequel le système de réalité virtuelle contrôle les récepteurs sensoriels de l'utilisateur*" [39]. Il s'agit de plonger dans un monde artificiel et d'interagir avec lui en utilisant ses propres sens.

Cette immersion dans une réalité virtuelle se commande par *l'interaction naturelle* entre l'utilisateur et l'environnement (voix, mouvements, etc.). D'autres *canaux sensoriels* peuvent être utilisés pour augmenter l'immersion comme le toucher ou l'odorat.

Le degré d'immersion dépend généralement du type de technologie utilisée.

García-Betances et al. ont défini les technologies de réalité virtuelle dans la MA selon plusieurs axes [40] :

- but de l'outil : **diagnostic/dépistage cognitif** ou rééducation ;
- population visée : patients, aidants ;
- **degré d'immersion** : non immersif, semi-immersif et immersif.

Ils ont également défini le type d'interaction et la méthodologie de ces outils en réalité virtuelle (Figure 5).

Dans ce chapitre, nous allons ainsi nous intéresser à l'utilisation de ces technologies dans le diagnostic des *fonctions cognitives* à travers un **état de l'art** divisé en deux parties.

La première partie s'intéressera aux **outils non immersifs**, qui, nous le verrons, ont été largement étudiés à travers de nombreuses publications. Cette recherche bibliographique s'appuiera sur un travail original de **revue systématique de la littérature** portant sur 62 articles ayant évalué l'utilisation des écrans tactiles (tablettes, téléphones...) dans le diagnostic cognitif.

La deuxième partie abordera les **outils immersifs** (réalité virtuelle) avec un travail de recherche centré sur les publications récentes et revues systématiques déjà publiées. Contrairement aux outils non immersifs, nous constaterons que les études sont plus rares.

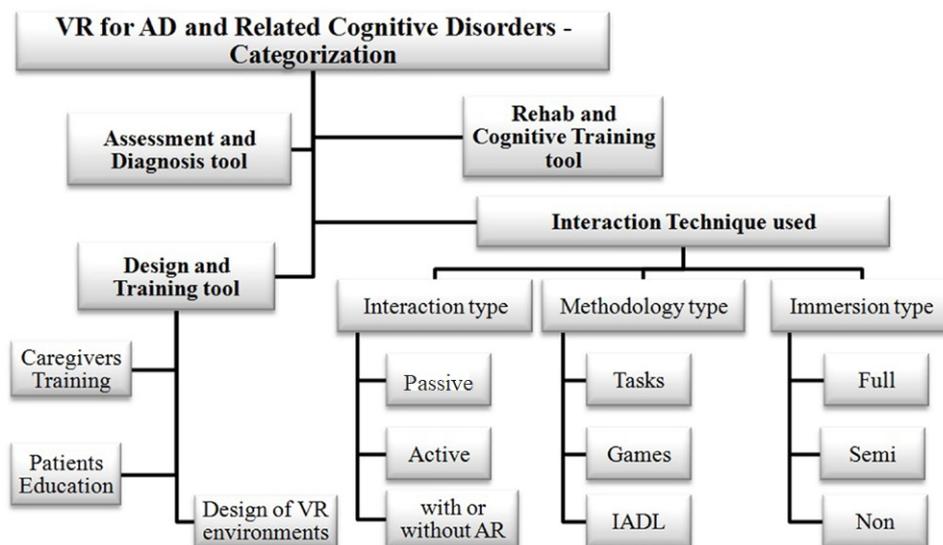


Figure 5 - Catégorisation des technologies de réalité virtuelle pour la MA [40]

3.2 . OUTILS NON IMMERSIFS : LES ÉCRANS TACTILES

Dans cette section, nous présentons une **revue systématique de la littérature** concernant le diagnostic des troubles cognitifs (mineurs ou majeurs) à l'aide des tablettes numériques, smartphones ou écrans tactiles.

Il s'agit des outils qui présentent une *faible immersion* puisqu'elle reste en deux dimensions. Ces technologies font partie de notre quotidien avec l'utilisation d'interfaces comme les **téléphones ou tablettes numériques**. L'utilisateur garde un contrôle total sur l'environnement extérieur et peut compléter son expérience avec un clavier, une souris ou encore une manette simple comme dans les jeux vidéos.

Ce travail est le fruit d'une collaboration avec une autre doctorante et ingénieure de recherche à l'hôpital Charles Foix, **Nathavy Um Din**.

3.2.1 . Méthodes

Nous avons appliqué les recommandations PRISMA [41] et défini les critères suivants pour la revue systématique :

- **langue**
 - articles écrits en langue française ou anglaise
- **population**
 - participants : personnes âgées de 60 ans ou plus;
 - diagnostics : MCI ou démence (MA);
 - critères d'exclusion : étude sur sujets sains exclusivement, autre pathologie neuro-dégénérative.
- **intervention**
 - évaluation cognitive sur tablette, smartphone ou écran tactile;
 - test d'une ou plusieurs fonctions cognitives;
 - auto ou hétéro-évaluation (examineur externe);
 - critères d'exclusion : programme d'entraînement et autre dispositif (ordinateur simple).
- **extraction**
 - bases de données : MEDLINE, EMBASE, Web of Science et IEEE;
 - période d'extraction : tous les articles jusque décembre 2023.

- **évaluation de la qualité des articles**

- échelle utilisée : QUADAS-2 [42] qui comprend quatre domaines (sélection des patients, test évalué, test de référence, déroulement et temporalité). Pour chaque domaine sont évalués les risques de biais et d'applicabilité (correspondance avec le but de la revue). Chaque risque peut être classé comme *faible, haut ou incertain* ;
- règles de décision (*établie par nos soins*) avec exclusion des articles comprenant :
 - deux risques élevés de biais ;
 - deux risques élevés d'applicabilité ;
 - trois risques incertains de biais ;
 - deux risques incertains d'applicabilité ;
 - un risque incertain d'applicabilité et un risque élevé d'applicabilité.

- **données recueillies**

- données générales : pays, période d'inclusion, nombre de participants, test de référence ;
- type d'outil : support digital, auto/hétéro-questionnaire, durée du test, langue ;
- données médicales : diagnostics ;
- données statistiques : sensibilité, spécificité, précision, aire sous la courbe.

3.2.2 . Résultats

3.2.2.1 . Extraction

L'extraction initiale a permis de trouver **5397 articles**. Après retrait des doublons, analyse des titres et des abstracts, 76 articles étaient éligibles à l'analyse qualité. Le processus de sélection des articles est présenté dans le diagramme de flux (Figure 6).

3.2.2.2 . Analyse de la qualité

Après évaluation de la qualité des 76 articles par l'échelle QUADAS-2, **62 articles** ont été inclus dans la revue et 14 ont été exclus. Les résultats de l'analyse qualité sont présentés au tableau 3.1 et à l'annexe 7.3.

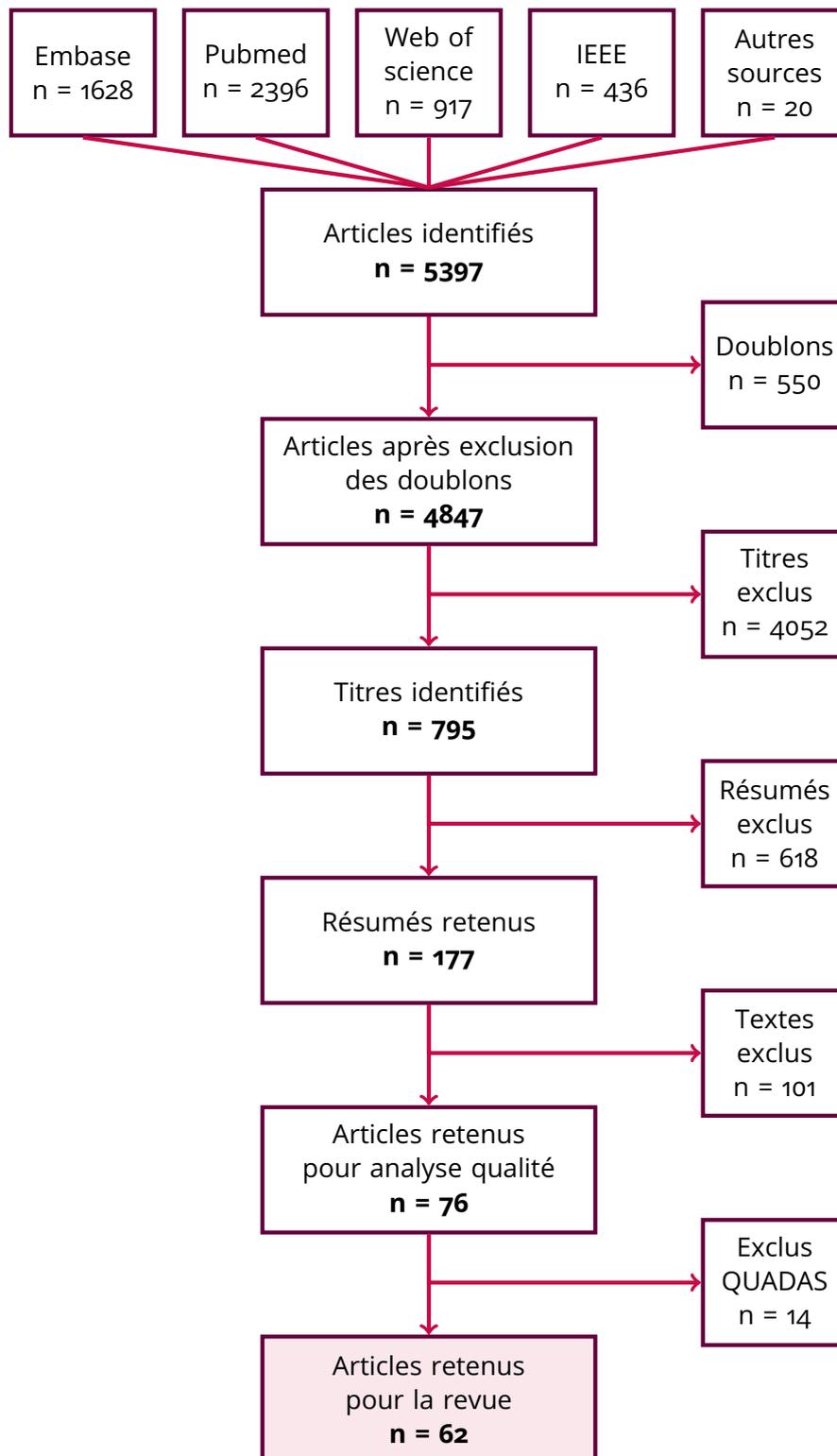


Figure 6 - Diagramme de flux

Article	Biais				Applicabilité			Décision
	SP	TE	TR	DT	SP	TE	TR	
[43]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[44]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[45]	?	?	?	?	✗	✓	?	<i>Exclu</i>
[46]	✓	?	✗	✓	✗	✓	✗	<i>Exclu</i>
[47]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[48]	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[49]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[50]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[51]	?	?	✓	?	✓	✓	✓	<i>Exclu</i>
[52]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[53]	?	✓	?	✓	?	✓	✓	<i>Inclus</i>
[54]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[55]	?	✓	✓	✓	?	✓	✓	<i>Inclus</i>
[56]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[57]	?	✓	✗	✓	?	✓	✗	<i>Exclu</i>
[58]	✓	?	✓	✓	✓	?	✓	<i>Inclus</i>
[59]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[60]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[61]	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[62]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[63]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[64]	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	<i>Exclu</i>
[65]	✓	✓	?	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[66]	✓	✓	✓	?	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[67]	?	?	✗	?	✗	?	✗	<i>Exclu</i>
[68]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[69]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[70]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[71]	?	✓	NA	✓	✗	✓	NA	<i>Inclus</i>
[72]	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[73]	✓	✓	✓	✓	?	✓	✓	<i>Inclus</i>
[74]	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	<i>Exclu</i>
[75]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[76]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[77]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>

SP : sélection des patients; TE : test évalué; TR : test de référence; DT : déroulement et temporalité
 ✓ : risque faible/préoccupation minime
 ✗ : risque élevé/préoccupation élevée
 ? : risque incertain/préoccupation incertaine

Table 3.1 – Analyse qualité QUADAS-2

3.2.2.3 . Population

Toutes les études étaient des recherches cliniques et ont été publiées entre 2005 [75] et 2023 [78, 79, 80, 81]. Les articles étaient exclusivement publiés en anglais et provenaient de différents pays (Europe, Asie, Amérique ou Afrique).

Les populations comprenaient toutes des hommes et des femmes avec un âge moyen variant de 53 ans [82] à 81,78 ans [83]. L'âge moyen des groupes contrôles allait de 53 [82] à 82 ans [83] et de 65 [68] à 81 ans [43] dans les groupes d'intervention.

Le nombre de patients variait de 10 [71] à 840 [84] avec une moyenne à 159 et une médiane à 99.

Soixante études avaient un groupe contrôle ainsi qu'un ou plusieurs groupes d'intervention selon le diagnostic. Deux études n'avaient pas de groupe contrôle.

Les années de publication des études sont présentées à la figure 7.

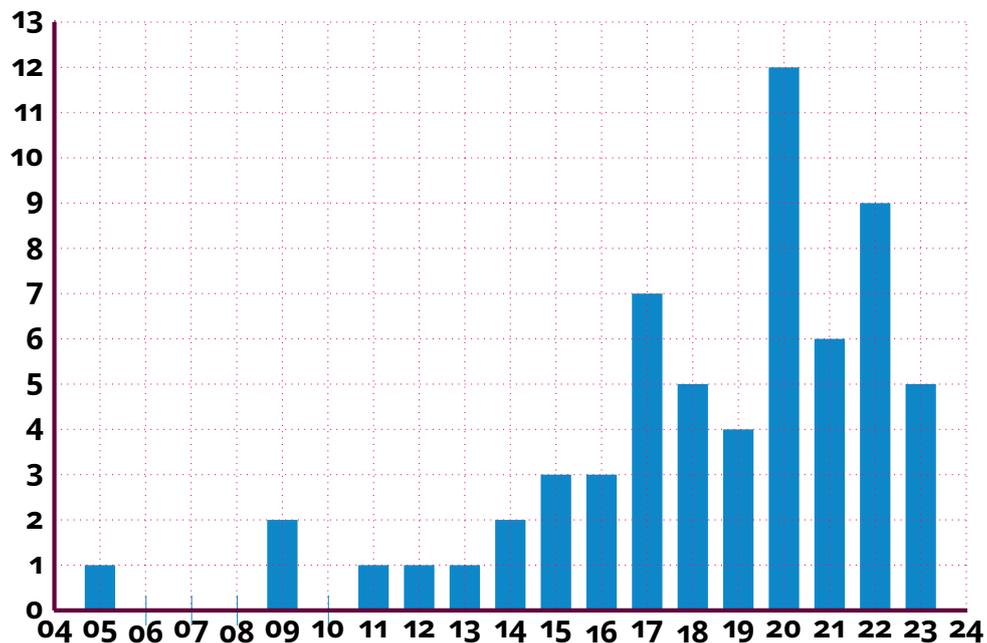


Figure 7 - Nombre de publications par année (20-)

3.2.2.4 . Localisation des études

Les participants étaient recrutés via des centres mémoire (n = 30), résidences pour personnes âgées (n = 12), centres mémoire et résidences (n = 6), hôpitaux généraux (n = 5), services de psychiatrie (n = 3), service de neurologie (n = 1), cohortes d'études en cours (n = 1) et maisons de retraite (n = 1). Trois études ne précisait pas leurs modes de recrutement. Des consentements de participation étaient recueillis avant les inclusions dans toutes les études.

3.2.2.5 . Type d'évaluation

Quarante-huit études utilisaient un outil d'auto-évaluation (77 %), 6 études un outil d'hétéro-évaluation (10 %) et 8 études ne le précisait pas (13 %).

3.2.2.6 . Interfaces utilisateur

Les outils inclus étaient des dispositifs avec écrans tactiles, majoritairement des **tablettes numériques** (n = 40), puis des ordinateurs à écran tactiles (n = 19) et enfin des smartphones ou tablettes (n = 3). Certaines épreuves (n = 11) nécessitaient l'usage d'un stylet notamment pour des tâches de dessin (Figure 8).



Figure 8 – Exemple de test sur tablette avec stylet [69]

3.2.2.7 . Temps de réalisation

Le temps de réalisation des tests numériques variait de moins de 4 minutes à un temps illimité (pas de chronomètre imposé). Douze études avaient un temps de réalisation de moins de 5 minutes, huit études entre 10 et 15 minutes, onze études entre 15 et 30 minutes, deux études entre 30 et 60 minutes et plus d'une heure pour quatre études. Vingt-cinq études ne mentionnaient pas leurs temps de réalisation.

Les caractéristiques techniques (interface, type de questionnaire, durée du test) des outils utilisés dans les 62 études sont présentées au tableau 3.2.

Article	Année de publication	Auto/hétéro questionnaire	Durée du test	Interface utilisée
[47]	2021	AQ	-	S/T
[85]	2015	semi-AQ	10 min	T
[82]	2022	AQ	5 min	T
[86]	2020	AQ	30 min	T
[49]	2020	HQ	25 min	T
[54]	2020	AQ	30 min	T
[87]	2016	AQ	10 min	T
[88]	2018	AQ	-	T
[89]	2022	AQ	-	T
[69]	2022	AQ	-	T
[90]	2009	-	10 min	T
[91]	2013	AQ	10 min	T
[92]	2014	AQ	< 5 min	T
[93]	2018	-	-	T
[70]	2018	semi-AQ	< 15 min	T
[94]	2021	AQ	79 min	T
[52]	2020	AQ	5 min	T
[95]	2021	AQ	19,2 min	T
[96]	2021	AQ	10 min	T
[55]	2017	AQ	-	T
[71]	2017	AQ	-	T
[97]	2022	AQ	5-60 min	S/T
[98]	2020	AQ	-	S/T
[44]	2020	AQ	30 min	T + Rvoc
[68]	2020	AQ	-	T + stylet
[65]	2022	AQ	illimité	T + stylet
[77]	2017	AQ	<2min	T + stylet
[99]	2019	-	-	T + stylet
[58]	2018	AQ	-	T + stylet
[66]	2017	HQ	-	T + stylet
[100]	2019	AQ	4 min	T + stylet

AQ : auto-questionnaire; HQ : hétéro-questionnaire; R-voc : reconnaissance vocale; S : smartphone; T : tablette

Table 3.2 - Caractéristiques techniques des 62 études

Article	Année de publication	Auto/hétéro questionnaire	Durée du test	Interface utilisée
[101]	2022	AQ	-	T + stylet
[63]	2019	HQ	-	T + stylet
[53]	2022	-	-	T + stylet
[73]	2020	AQ	-	T + stylet
[72]	2021	AQ	2 min	ET
[62]	2021	AQ	2-4 min	ET
[102]	2015	-	-	ET
[76]	2014	AQ	30-50 min	ET
[80]	2023	AQ	-	T
[79]	2023	HQ	-	T
[78]	2023	AQ	-	T
[81]	2023	AQ	10 min	T
[60]	2009	AQ	< 4 min	OET
[61]	2011	AQ	30 min	OET
[84]	2020	AQ	5 min	OET
[50]	2020	AQ	-	OET
[103]	2016	-	8-10 min	OET
[75]	2015	AQ	5 min	OET
[43]	2012	AQ	30 min	OET
[104]	2017	AQ	16 minutes	OET + JS
[105]	2022	AQ	15-37 min	T/OT
[106]	2022	-	150 min	OT
[48]	2020	AQ	-	OT
[83]	2015	-	-	OT
[107]	2018	HQ	10 min	OT
[108]	2016	AQ	4 min	OT
[109]	2017	AQ	-	OT
[110]	2017	AQ	15 min	OT
[59]	2019	AQ	11 min	OT
[111]	2020	HQ	-	OT
[112]	2023	AQ	2 min	OT

AQ : auto-questionnaire; HQ : hétéro-questionnaire; JS : joystick; OT/OET : ordinateur tactile/avec écran tactile; R-voc : reconnaissance vocale; S : smartphone; T : tablette

3.2.2.8 . Effets secondaires

Aucun effet secondaire n'a été rapporté avec une bonne tolérance de l'utilisation des écrans tactiles.

3.2.2.9 . Diagnostics

Les études incluait différentes pathologies neurocognitives : MA (n = 30), maladie de Parkinson (n = 2), démence à corps de Lewy (n = 1), démence vasculaire (n = 1), MCI (n = 51) et démence sans précision (n = 11). Les diagnostics étaient établis par des professionnels spécialisés en utilisant des critères de référence comme ceux de Petersen [15] pour la définition du MCI (Chapitre 2.1). Les études souhaitaient diagnostiquer une (n = 30) ou plusieurs pathologies (n = 32).

3.2.2.10 . Tests utilisés

Dans toutes les études, un test de référence était comparé à un test digital. De multiples tests de référence ont été utilisés en combinaison (n = 16) ou bien seuls tels que le MMSE (n = 14), MoCA (n = 8), diagnostic lui-même (n = 4), ainsi que d'autres tests comme l'ADAS-Cog [113] ou le test de l'horloge [114] (n = 10), les biomarqueurs (n = 1) et le DSM (n = 1). Trois études ne précisaient pas leur test de référence.

De multiples tests digitaux ont été évalués parmi les 62 études. La plupart d'entre eux (n = 54) proposaient un nouveau test informatique créé par les auteurs. D'autres s'inspiraient directement d'évaluations déjà existantes comme le Trail Making Test (n = 3) [115], la figure de Rey-Osterrieth (n = 2) [116] ou le test de l'horloge (n = 1).

3.2.2.11 . Présentation des résultats

Quarante études ont mesuré la performance de leur outil en calculant la sensibilité et la spécificité. Les scores de sensibilité allaient de 18,6 % [63] à 99 % [66, 107]. La spécificité, quant à elle, variait de 51 % [95] à 100 % [63, 66].

Les résultats démographiques et statistiques des 62 études sont partiellement présentés dans les tableaux 3.3 et 3.4 (intégralité des résultats en annexe 7.4 et 7.5).

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[47]	MA, MCI	38 MCI + MA (70,7 +/- 6,9) 105 SC (67,9 +/- 6,0)	Remote Digital Memory Composite	PACC5	0,82	0,72
[85]	MCI	11 MCI-SD (65,5 +/- 1,7) 23 MCI-MD (72,1 +/- 1,5) 21 SC (66,6 +/- 1,2)	Virtual Supermarket Test	TN	0,82	0,95
[82]	MCI	22 MCI (67,2 +/- 6,0) 22 SC (53,0 +/- 1,5)	Digital TMT Black and white	TMT Black and white	-	-
[86]	MCI	47 MCI (67,9 +/- 0,8) 48 DCS (66,0 +/- 0,6)	Virtual supermarket Test	MMSE, MocA	0,76	0,91
[49]	MCI	37 MCI (70,4 +/- 7,3) 52 SC (67,6 +/- 6,0)	Virtual supermarket	MMSE	0,74	0,85

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence;

MCI-SD/MD : Simple Domain/Multi-Domain; PACC5 : Preclinical Alzheimer's Cognitive composite; SC : sujets contrôles; TMT : Trail Making Test; TN : tests neurocognitifs

Table 3.3 – Caractéristiques statistiques des études utilisant une tablette ou un smartphone

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[60]	MA	72 MA (80,0 +/- 5,1) 102 SC (77,1 +/- 5,8)	CTB	diagnostic	0,96	0,86
[61]	MA	34 MA (79,2 +/- 7,9)	TDAS	ADAS-Cog	-	-
[84]	DEM, MCI	336 MA (65,9 +/- NC) 137 MCI (56,6 +/- NC) 367 SC (64,9 +/- NC)	C-ABC	MMSE	0,83 0,77	0,72 (MA) 0,64 (MCI)
[50]	MCI	32 MCI (76,7 +/- 5,3) 107 SC (76,5 +/- 3,0)	SASG	MoCA, FCSRT, TMT A et B	0,84	0,755 0,64

Se : sensibilité ; Sp : spécificité ; TD : test digital ; TR : test de référence
† nombre (âge moyen +/- écart type)
ADAS-cog : Alzheimer's Disease Assessment Scale Alzheimer's-cognitive subscale ; C-ABC : Computerized Assessment Battery for Cognition ; CTB : Computerized Test Battery ; DEM : Démence ; FCSRT : Free and Cued Selective Reminding Test ; MA : Maladie d'Alzheimer ; NC : Non Connu ; SASG : Smart Aging Serious Game ; TDAS : Touch Panel-type Dementia Assessment Scale ; TMT : Trail Making Test ;

Table 3.4 - Caractéristiques statistiques des études utilisant un ordinateur avec écran tactile

Cette revue de la littérature met en évidence de bonnes performances des évaluations digitales sur écrans tactiles dans le diagnostic des troubles cognitifs. Dans la section suivante, nous allons nous intéresser à la **réalité virtuelle immersive** et à la bibliographie récente dans le domaine de l'évaluation du déficit cognitif.

3.3 . OUTILS IMMERSIFS : LA RÉALITE VIRTUELLE

Les outils immersifs se différencient par le degré d'immersion et d'illusion apportés par l'environnement virtuel.

Dans un environnement **semi-immersif**, l'utilisateur évolue au sein d'un monde virtuel avec la perception d'une autre réalité, tout en gardant une connexion avec l'environnement réel. Les éléments virtuels sont projetés en trois dimensions dans le monde réel avec des interfaces comme des casques ou lunettes connectées. La sensation d'immersion peut être améliorée par l'ajout de sons, de vidéos ou de textes. Il s'agit notamment de la **réalité augmentée**¹ qui s'est fortement développée dans le domaine de l'éducation ou l'entraînement professionnel tel le pilotage (Figure 9).



Figure 9 – Exemples d'utilisation de la réalité augmentée

La **réalité virtuelle immersive** est la technique d'*illusion maximale* avec rupture entre l'utilisateur et la réalité physique. Il existe un sentiment de **présence** qui se définit comme le "*sentiment d'être là physiquement dans l'environnement virtuel*" [39]. L'utilisateur va assimiler ce qu'il voit tel du réel, oubliant le rôle de la technologie. La présence est maximale lorsque l'utilisateur concentre son attention sur l'aspect virtuel de l'expérience plutôt que sur le monde réel dans lequel il se trouve.

Dans un environnement virtuel immersif, l'immersion (quasi-totale) peut être multiple : sensori-motrice, cognitive, émotionnelle, spatiale, psychologique, sensorielle. Différentes technologies existent pour produire une immersion totale. On peut citer **les casques** de RV ou bien les CAVE (Cave Automatic Virtual Environment ou Cube immersif 3D). Ces éléments peuvent s'accompagner de casques audio-phoniques ou de contrôleurs de gestes (gants, manettes). L'amélioration continue de la qualité graphique des

1. <https://www.augmented-reality.fr>

images permet de créer des environnements de plus en plus immersifs et réalistes.

La RV immersive est devenue en quelques années un outil essentiel en informatique dans le domaine des jeux vidéos mais également dans l'exercice de la médecine comme en chirurgie [117, 118], neurologie [119, 120], psychiatrie [121, 122] ou bien encore la rééducation [123, 124, 125].

Dans cette partie, nous allons ainsi nous intéresser à la bibliographie récente sur la RV immersive dans le diagnostic des troubles cognitifs.

Quelques revues systématiques de la littérature ont été publiées ces dernières années [126, 127, 128] montrant qu'il existe un champ d'étude de la RV dans l'exploration cognitive.

La RV immersive reste cependant bien moins étudiée que la non immersive comme l'exposent Pieri et al. [129] dans une revue systématique sur l'évaluation neuropsychologique de façon globale (toutes pathologies confondues) et portant sur 290 études (Figure 10).

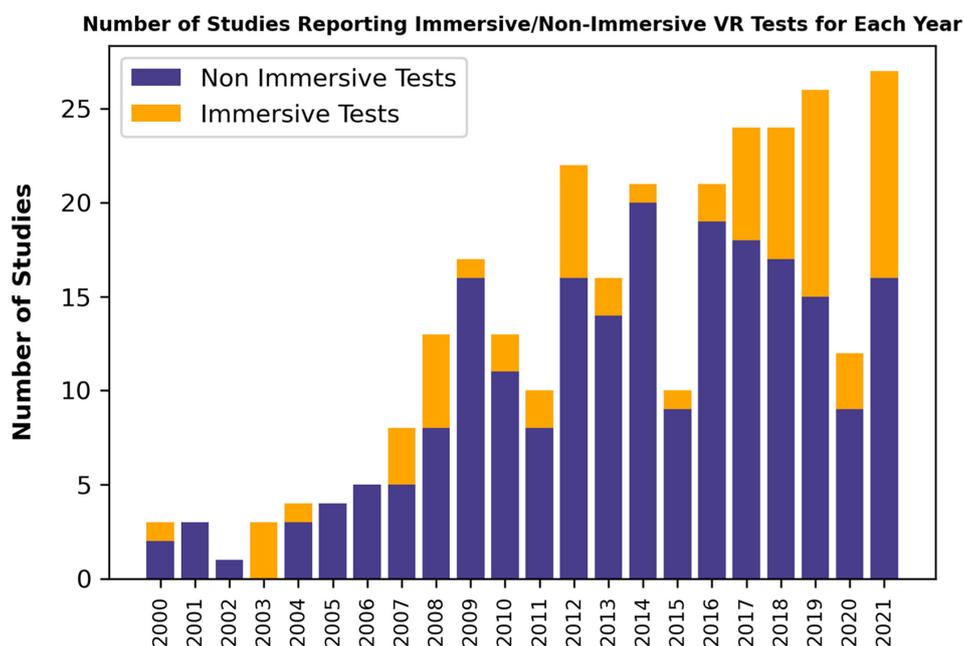


Figure 10 – Nombre d'études avec tests en réalité virtuelle immersive et non immersive [129]

3.3.1 . Domaines cognitifs

Lorsque l'on regarde les fonctions cognitives explorées dans ces environnements virtuels [129], on retrouve très majoritairement l'évaluation des capacités de navigation, la mémoire, les fonctions exécutives et l'attention (Figure 11). Ces données sont également retrouvées dans la revue systématique de Kirkham et al. [128] avec la mémoire évaluée dans 58 % des études et l'attention dans 68 % des cas.

On remarque ainsi que la RV immersive permet une évaluation exhaustive des différents domaines cognitifs.

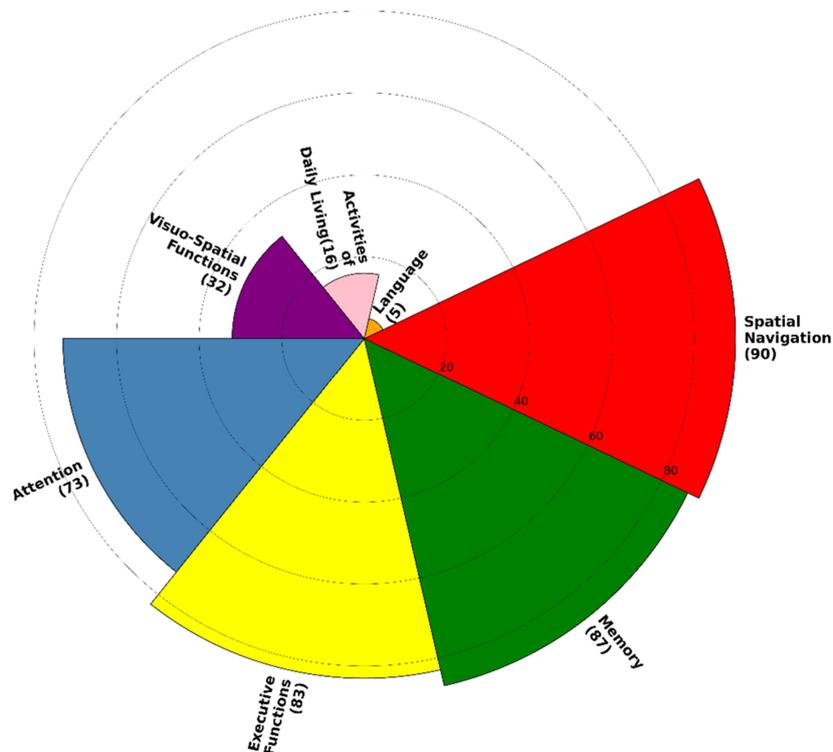


Figure 11 – Fonctions cognitives explorées dans les études en réalité virtuelle immersive [129]

3.3.2 . Types d'interfaces immersives

Comme évoqué en introduction de cette section, plusieurs matériels de réalité virtuelle immersive existent avec des degrés de mouvements et d'interaction variables.

L'interface fréquemment utilisée est le **casque d'immersion**. La réalisation des tests peut se faire en position assise comme dans l'étude de Fernandez

Montenegro et al. [130] avec utilisation concomitante d'un outil de détection des mouvements (Figure 12).

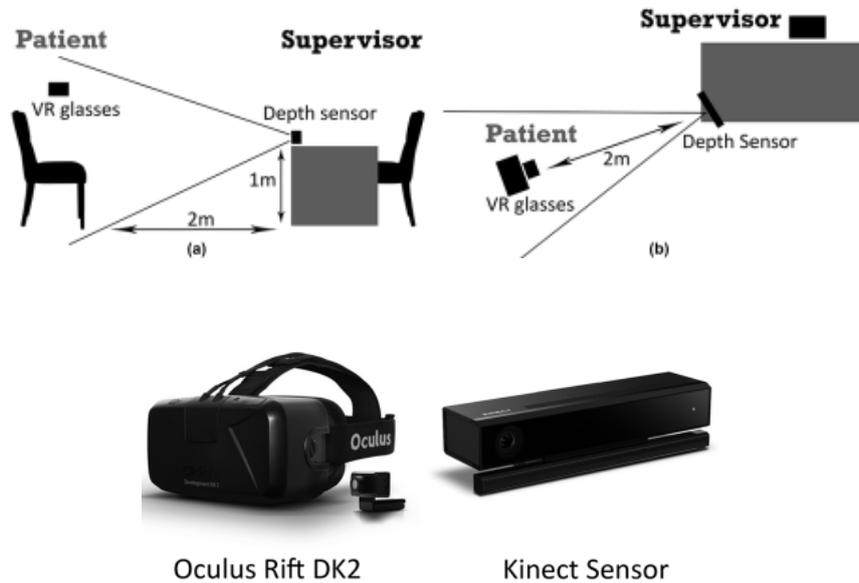


Figure 12 – Matériel d’immersion selon Fernandez Montenegro et al. [130]

À l’inverse, d’autres auteurs comme Howett et al. [131] proposent un test avec marche possible à travers une pièce en embarquant le PC portable dans un sac à dos (Figure 13).



Figure 13 – Environnement immersif selon Howett et al. [131]

Les systèmes d’immersion ont considérablement évolué tant en taille qu’en complexité. On peut citer en exemple un système plus ancien proposé par Zakzanis et al. en 2009 avec l’utilisation d’un casque et d’un joystick [132]. Cet environnement présentait de surcroît une immersion limitée dans l’espace

(champ de 50° diagonale, 30° vertical et 40° horizontal) comparativement aux nouvelles générations de casques (Figure 14)



1. ZX-10 Intergraph Computer Workstation. 2. Proview XL-50 Mounted Display. 3. miniBird 800 6 Degree-of-Freedom tracker. 4. Joystick. 5. Sony Scan Converter. 6. Mitsubishi Video Cassette Recorder. 7. Sony TV monitor. 8. Movable desk unit.

Figure 14 – Matériel d'immersion selon Zakzanis et al. [132]

Il existe un autre système d'immersion appelé **CAVE** (Cave Automatic Virtual Environment ou Cube immersif 3D) qui utilise les parois (murs, sols, plafonds) comme surfaces de projection. Cette association permet de proposer des environnements hautement immersifs. C'est le cas de l'étude publiée par Séo et al. en 2017 [133]. Les auteurs ont créé une pièce cubique (4 m x 2,5 m x 2,5 m) avec quatre écrans de projection. L'utilisateur portait des lunettes stéréoscopiques légères (moins de 50 g) pour apporter de la profondeur et offrir une vue en 3 dimensions (Figure 15).



Figure 15 – Installation CAVE de Séo et al. [133]

3.3.3 . Types d'environnements

Compte-tenu de la diversité des fonctions cognitives évaluables (Figure 11), les auteurs ont donc développé des environnements différents.

Dans l'exploration des capacités visuo-spatiales, plusieurs auteurs [131, 132] ont simulé des villes ou des chemins (Figure 16). L'immersion complète dans de tels environnements permet d'évaluer la capacité d'un sujet à se repérer dans l'espace mais aussi la mémorisation de lieux, de noms (rue) ou d'indices (éléments du décor pouvant potentialiser l'attention). La navigation dans la scène se faisait grâce à un joystick [132] ou en se déplaçant directement dans la pièce [131]. Les deux études mesuraient des paramètres similaires comme la distance parcourue, la présence d'erreurs sur le parcours ou encore le temps de réalisation.



Figure 16 – Environnements immersifs spatiaux [132, 131]

Seo et al. [133] ont reproduit un environnement avec exploration d'activités instrumentales quotidiennes comme retirer de l'argent dans un distributeur (Figure 17) ou prendre le bus.

L'utilisation de la CAVE permettait au patient de se mouvoir dans l'espace virtuel pour effectuer les différentes tâches et reproduire au mieux l'activité du monde réel.



Figure 17 – Environnements immersifs d'activités quotidiennes [133]

Tarnanas et al. [134] ont publié une configuration atypique, inspirée d'un cube immersif avec un détecteur de mouvements. Le sujet avançait sur un tapis roulant face à un écran d'immersion (Figure 18). Le mouvement dans l'espace virtuel était donc semi-libre et imposé par la cadence du tapis

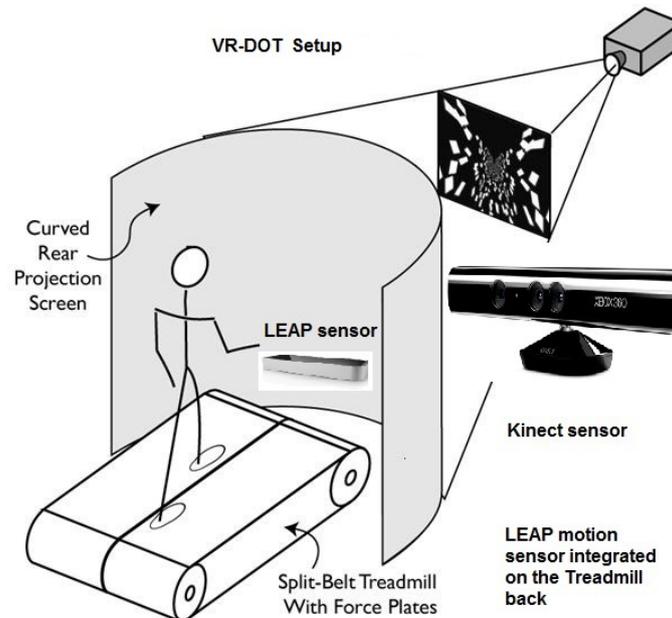


Figure 18 – Environnements immersifs avec tapis de marche [134]

L'ensemble de ces évaluations immersives nécessitent de se déplacer physiquement dans le monde virtuel de façon directe (CAVE) ou indirecte (joystick). D'autres auteurs comme Fernandez Montenegro et al. [130] ont proposé une solution sans déplacement (position assise) où l'utilisateur doit observer son environnement. Dans leur protocole, l'utilisateur devait effectuer différentes tâches comme :

- mémorisation visuelle d'objets : mémorisation d'une scène (Figure 19) puis présentation d'un nouvel environnement où l'utilisateur doit retrouver les bons objets ;
- reconnaissance d'objets anormaux : présentation d'une scène avec incohérences comme une plante au plafond (Figure 20) avec nécessité de reconnaissance des anomalies ;
- identification de sons réels versus des sons virtuels.



Figure 19 – Scène immersive de Fernandez Montenegro et al. [130]

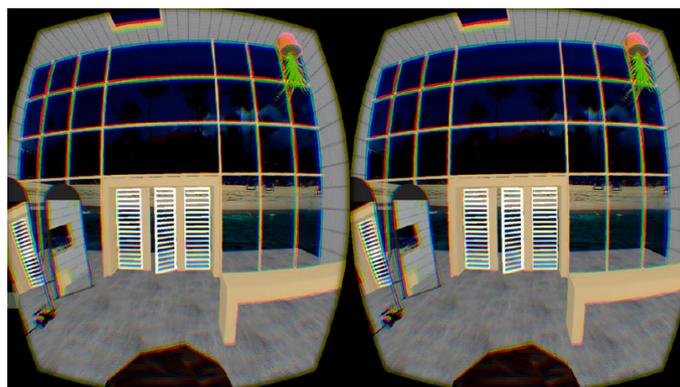


Figure 20 – Épreuve de reconnaissance d'objets anormaux [130]

Dans les différentes études, on retrouve des scènes familières comme le *supermarché*. Déjà évalué sur outil non immersif [85, 49] avec des tablettes

numériques, cet environnement a été étudié en RV immersive par Tsai et al. [135]. Le test était une liste de produits à trouver dans le magasin (liste fournie) puis passer en caisse avec ces produits (Figure 21). Le casque de réalité virtuelle était accompagné d'une manette externe pour manipuler les objets virtuels et se déplacer dans le supermarché.



Figure 21 – Scènes immersives de Tsai et al. [135]

3.3.4 . Populations d'étude et résultats

Contrairement aux études sur les outils non immersifs (cf. chapitre 3.2), nous avons choisi, dans cet état de l'art sur la RV immersive, de nous focaliser sur les dix dernières années de publication.

En effet, lorsque l'on effectue une recherche simple sur Pubmed² avec les mots clés ["immersive virtual reality" AND cognit*], il existe assez peu d'études au delà de 10 ans (Figure 22).

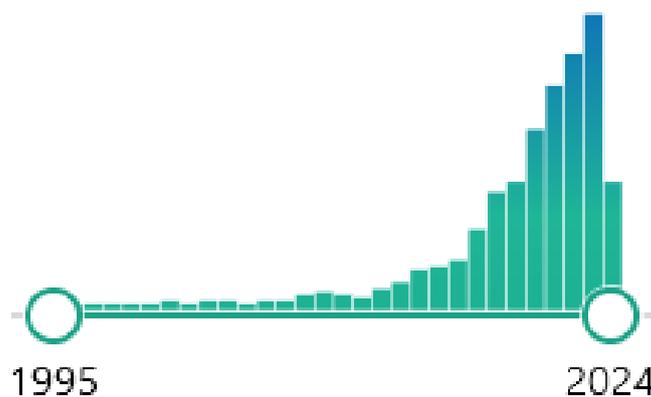


Figure 22 – Nombre d'études en RV immersive dans l'évaluation cognitive

2. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>

De nombreuses études traitaient de la RV immersive comme d'un *outil thérapeutique* (rééducation) et non diagnostique. Il y avait également des publications dans les champs de la psychiatrie, pédiatrie ou encore en neurologie (traumatismes cérébraux).

La démarche de recherche bibliographique n'était pas celle d'une revue systématique et il n'y a pas eu d'analyse qualité type QUADAS -2 en raison du nombre faible d'études. Au final, **9 études** pertinentes ont été retenues. C'est un nombre bien inférieur à celui avec des outils non immersifs (62 études) mais cela était attendu au vu des résultats de l'étude de Pieri et al. [129] avec une proportion nettement moindre d'études en réalité virtuelle immersive (Figure 10).

Les outils immersifs étaient assez variés avec une nette prédominance pour l'utilisation de casques de RV associés à des manettes [130, 131, 135, 136, 137, 138, 139]. Les tâches à réaliser étaient diverses (épreuves cognitives classiques, activités instrumentales) ainsi que des tests de navigation spatiale.

Les populations étaient hétérogènes en taille avec une nette majorité d'études sur les patients MCI. Toutes les études ont montré de bonnes performances avec des sensibilités et spécificités atteignant 100 %.

Les caractéristiques des neuf études sont présentées dans le tableau 3.5.

Étude	Année	Matériel utilisé	Type de tâche	Participants†	Résultat
[134]	2013	Écran de projection incurvé Détecteur de mouvements	Tâches instrumentales	72 SC (72,63 +/- 5,06) 65 MCI (72,78 +/- 6,21) 68 MA (72,58 +/- 6,21)	AUC = 0,933 Se = 1,0 Sp = 0,742
[130]	2017	Casque de RV Détecteur de mouvements	Tâches cognitives	20 sujets (sains et MA)	$p < 0,05$ (3 tests/4)
[133]	2017	Cube immersif 3D Lunettes stéréoscopiques	Tâches instrumentales (bus et retrait d'argent)	22 SC (72,3 +/- 3,7) 20 MCI (72,4 +/- 3,9)	Pr = 0,929 Se = 0,9; Sp = 0,955
[131]	2019	Casque VR Deux manettes	Tâche de navigation	41 SC (69,3 +/- 7,5) 45 MCI (71,7 +/- 8,3)	AUC = 0,82 Se = 0,84; Sp = 0,68
[135]	2021	Casque VR Manettes	Tâches instrumentales (supermarché)	6 SC (70,17 +/- 5,15) 6 MCI (74,83 +/- 4,07)	AUC = 1,0 Se = 1,0
[136]	2022	Casque VR Manettes	Tâches de navigation	29 SC (70,21 +/- 5,28) 19 MCI (72,53 +/- 6,50)	AUC = 0,725 Se = 0,737; Sp = 0,621

† nombre (âge moyen +/- écart type)

AUC : aire sous la courbe; MA : maladie d'Alzheimer; MCI : Mild Cognitive Impairment; Pr : précision; Se : sensibilité; SC : sujets contrôles; Sp : spécificité

Table 3.5 - Résultats des études en RV immersive

Étude	Année	Matériel utilisé	Type de tâche	Participants†	Résultat
[137]	2017	Casque de RV Détecteur de mouvements	Tâches cognitives	42 SC (67,71 +/- 4,947) 44 MCI (68,81 +/- 6,172)	Pr = 0,874 Se = 0,864
[138]	2023	Casque RV Manettes	Tâches instrumentales (borne de commande)	20 SC (70,95 +/- 6,02) 31 MCI (72,68 +/- 7,75)	AUC = 0,98; Pr = 0,933 Se = 1,0; Sp = 0,833
[139]	2023	Casque VR Deux manettes	Tâches cognitives navigation	15 SC (68 +/- 8) 14 MCI (71 +/- 7) 17 MA (69 +/- 8)	$p < 0,05$ 5 exercices/5

† nombre (âge moyen +/- écart type)

AUC : aire sous la courbe; MA : maladie d'Alzheimer; MCI : Mild Cognitive Impairment; Pr : précision; Se : sensibilité; SC : sujets contrôlés; Sp : spécificité

3.4 . DISCUSSION

3.4.1 . Éléments généraux

Notre état de l'art montre que les outils digitaux apparaissent depuis plusieurs années comme une nouvelle possibilité dans le diagnostic des troubles cognitifs à la fois sur des interfaces non immersives (ordinateurs, smartphones, tablettes) et immersives (CAVE, casques).

Pour autant, les publications sur des outils non immersifs sont nettement plus nombreuses qu'en RV immersive (Figure 10). On peut potentiellement expliquer cette différence par une plus grande facilité d'utilisation des interfaces tactiles [140] et des prix abordables.

Bien que l'ensemble des études montrent des résultats positifs dans le diagnostic des troubles cognitifs, nous n'avons retrouvé qu'une seule méta-analyse dans le domaine de la réalité virtuelle et l'exploration cognitive des pathologies neuro-dégénératives.

Liu et al. [127] ont publié une méta-analyse des études en RV (toutes immersions confondues) dans la détection du MCI. La sensibilité globale était à 0,89 avec une spécificité à 0,91 et une AUC à 0,95. La courbe ROC de cette étude est présentée à la figure 23.

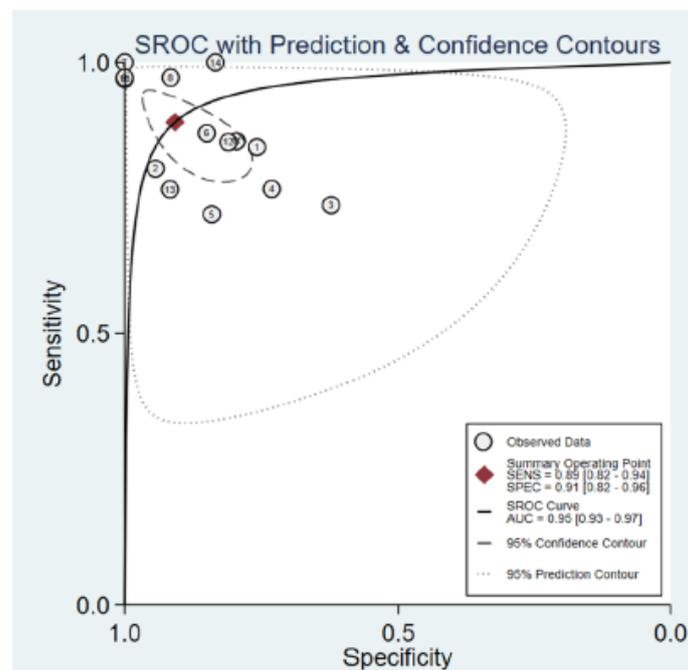


Figure 23 – Courbe ROC de Liu et al. [127]

Les auteurs ont également réalisé plusieurs analyses en sous-groupes selon de type de RV et l'âge (Tableau 3.6). Les outils non immersifs étaient groupés sous le terme "réalité virtuelle non immersive". Les données spécifiques à la RV immersive incluait néanmoins des études en RV semi-immersive. Toutes les analyses confortaient le résultat principal et montraient des bonnes capacités diagnostiques pour la réalité virtuelle immersive. On constate également de bons résultats chez les sujets âgés de plus de 70 ans (toutes immersions confondues).

Sous groupe	Nombre d'études	SE-g (IC95)	SP-g (IC95)	AUC (IC95)
RV NI	8	0,81 (0,76-0,85)	0,81 (0,75-0,85)	0,86 (0,82-0,89)
RV I	6	0,95 (0,85-0,98)	0,98 (0,82-1,00)	0,99 (0,97-0,99)
< 70 ans	5	0,79 (0,72-0,84)	0,89 (0,83-0,93)	0,86 (0,82-0,89)
> 70 ans	9	0,93 (0,84-0,97)	0,92 (0,78-0,97)	0,97 (0,95-0,98)

AUC : aire sous la courbe; RV I/NI : RV immersive/non immersive; SE-g : sensibilité globale; SP-g : spécificité globale

Table 3.6 – Analyses en sous-groupes de Liu et al. [127]

Une autre méta-analyse a été publiée par Chan et al. [141] avec une étude sur les tests digitaux de façon globale et non spécifiquement à la réalité virtuelle. Il existait néanmoins une bonne capacité des évaluations digitales pour différencier des patients MCI ou atteints de MA de sujets sains.

Malgré l'existence de plusieurs revues systématiques récentes dans le domaine des évaluations cognitives digitales [142, 143], la dernière ayant spécifiquement étudié les interfaces tactiles (tablettes, smartphones) datait de 2019 [144]. Il nous paraissait donc important de mettre à jour les connaissances.

3.4.2 . Tablettes numériques

Face à de nombreux synonymes pour les mots clés (Tableau 3.7), nous avons tout d'abord dû valider une **large équation** de recherche afin de collecter le plus d'articles possible. Dans le processus de sélection, seul un article n'a pas été inclus par échec d'accès (malgré des recherches multiples sur les bases documentaires et un contact direct auprès des auteurs). D'autres articles ont été exclus en raison de leur langue d'écriture (non en français ou anglais), conformément à nos critères d'inclusion.

Dépistage/diagnostic	Personnes âgées
diagnosis diagnose(s) screening assessment evaluation testing detection	aged elderly elder older adult geriatrics
neurodegenerative diseases cognitive disorders cognition disorders neurocognitive disorders dementia Alzheimer disease	handheld computer numeric tablet smartphone mobile applications cell phone touch screen computer device mobile technology computer electronic device tablet tablet computer mobile device web app
Trouble neurocognitif	Tablette/smartphone

Table 3.7 – Termes MeSH pour l'extraction d'articles

S'agissant de l'**analyse qualité**, l'échelle QUADAS-2 [42] ne définit pas de critères de décision. Ainsi, dans toutes les revues parcourues, l'ensemble des articles avaient été gardés, y compris en cas de faible qualité (ou

multiplés biais). Nous n'avons pas retrouvé de références ou d'éléments antérieurs dans la littérature pour définir ce qu'est une faible qualité et établir un seuil d'exclusion. Souhaitant uniquement inclure des articles avec une qualité acceptable, nous avons ainsi établi nos *propres critères de décision*, considérant qu'un nombre trop important de risques élevés (ou incertains) conduirait à des résultats peu interprétables. Afin de réduire le risque de biais d'exclusion, tous les articles ont été analysés par les deux auteurs (NUD et FM) avec discussion systématique en cas de désaccord. Ces nouvelles règles ont conduit à exclure **14 articles** (sur 76) (cf. Annexe 7.3).

Soixante-deux articles ont été inclus après analyse de la qualité, soit environ deux fois plus que dans la dernière revue publiée [144]. Cette différence s'explique par le nombre de publications retrouvées depuis 2019 (n = 40).

Nous constatons que de nombreux tests de références ont été choisis dans les différentes études même si le MMSE et le MoCA restent largement utilisés. Cette diversité dans les évaluations (tests de référence), les populations (MCI, déclin cognitif) et la présentation des résultats (AUC, sensibilité, spécificité, corrélations) entraîne des difficultés de comparaison entre les études.

Malgré ces limites, toutes les études rapportent une efficacité de leurs outils digitaux dans la discrimination de sujets malades par rapport à des sujets sains.

3.4.3 . Réalité virtuelle immersive

Les évaluations en réalité virtuelle immersive sont plus rares et il n'y a pas eu de méta-analyse spécifique, probablement par manque d'un nombre d'études suffisant. Pour autant les études présentées montrent de bons résultats et ce, dans des environnements très différents et des tâches variées.

La RV immersive permet d'évaluer des fonctions cognitives qu'un simple environnement en deux dimensions ne permet pas, comme la navigation spatiale ou les activités instrumentales via des tâches du quotidien. Cette spécificité de la RV immersive fait appel à une notion apparue à la fin des années 1990 : **l'écologie d'une évaluation neuro-psychologique** [145, 146, 147].

L'écologie se définit comme "*la relation prédictive et fonctionnelle entre la performance d'un patient à une batterie de tests neuropsychologiques et son comportement dans divers contextes du monde réel*" [145].

Il s'agit donc de mettre en relation un score avec une **capacité fonctionnelle**.

Les évaluations cognitives, spécifiques ou générales, ne font que mesurer les niveaux d'une ou plusieurs fonctions. En gériatrie, il est indispensable d'avoir une vision globale du sujet et notamment ses aptitudes sur les tâches du quotidien. Cette approche, appelée "**évaluation gériatrique standardisée**" permet d'évaluer un sujet âgé sur différents plans comme la cognition, l'humeur, l'autonomie ou bien encore le statut nutritionnel [148].

Le degré d'autonomie se mesure habituellement par deux grandes échelles :

- échelle **ADL** (Activities of Daily Living) pour les activités du quotidien [149]. Ce sont les actes de base comme l'alimentation, la continence ou l'habillage (Annexe 7.6);
- échelle **IADL** (Instrumental Activities of Daily Living) pour les activités instrumentales du quotidien [150]. Il s'agit là d'actes plus complexes qui permettent de vivre de façon indépendante. Les processus cognitifs sous-jacents sont plus complexes (Annexe 7.7).

Le lien entre cognition et autonomie n'est pas toujours linéaire et il peut exister des degrés d'autonomie différents pour des niveaux cognitifs similaires. Certains auteurs comme Han et al. [151] ont cependant étudié le lien entre tests cognitifs (MMSE) et autonomie (ADL/IADL). Leurs résultats auprès d'une population de 718 patients atteints de MA suggèrent une corrélation entre ces scores.

Les tâches instrumentales peuvent être reproduites dans des environnements mobiles tels les cubes immersifs [134, 133] ou des environnements plus statiques [135, 137]. Cette possibilité permet de proposer ce type d'évaluation à des patients ayant une mobilité restreinte comme les troubles de la marche.

Les sujets âgés ne sont pas nécessairement habitués aux nouvelles technologies de type réalité virtuelle immersive et l'on pourrait penser qu'une évaluation sur tablette serait plus simple et mieux tolérée. Dans deux études [130, 131], les auteurs ont étudié la tolérance et l'acceptabilité des environnements immersifs avec de bons retours sans effets secondaires d'intolérance (nausées par exemple).

3.5 . CONCLUSION

Dans cette première **phase d'analyse**, l'état de l'art met en évidence l'utilité, la pertinence et l'**efficacité des outils numériques** (immersifs et non immersifs) dans le diagnostic des troubles cognitifs dans la MA.

Les évaluations avec les outils non immersifs, largement publiées, montrent des résultats nettement significatifs avec des applications transposables sur des interfaces tactiles simples et accessibles comme les smartphones.

Malgré des études peu nombreuses, la RV immersive apparaît comme un outil écologique nouveau pour évaluer l'autonomie d'un patient avec un bon profil de tolérance clinique.

Les prochains chapitres présenteront les **phases de conception et d'évaluation** du programme AlzVR.

La conception de la modalité non immersive sera abordée à la section [4.2](#) et son évaluation dans les sections [4.3](#) et [4.4](#).

Nous exposerons par la suite la conception des outils immersifs au chapitre [5](#).

4 - UN OUTIL DE DÉPISTAGE NON IMMERSIF

4.1	INTRODUCTION	61
4.2	CONCEPTION D'UN OUTIL DE DÉPISTAGE	62
4.2.1	Outil de conception et droits d'auteur	62
4.2.2	Menu d'accueil	62
4.2.3	Questionnaire médical	63
4.2.4	Anonymisation	64
4.2.5	Scène de jeu	64
4.2.6	Choix du matériel	67
4.2.7	Entraînement à la tablette	67
4.2.8	Transposition des questions	67
4.2.9	Résultats	72
4.2.10	Questionnaire F-SUS	72
4.2.11	Stockage des données	74
4.3	ÉTUDE PRÉLIMINAIRE	75
4.3.1	Méthodes	75
4.3.2	Résultats	76
4.3.3	Discussion	80
4.4	ÉTUDE COGNUM-ALZVR	82
4.4.1	Critères de sélection	82
4.4.2	Déroulement de l'évaluation cognitive	82
4.4.3	Démarrage de l'étude et résultats préliminaires	85
4.5	CONCLUSION	87

4.1 . INTRODUCTION

Les tests MMSE et MoCA se réalisent en condition réelle face à un examinateur (hétéro-évaluation) qui pose les questions et recueille les réponses sur papier.

L'état de l'art présenté en phase initiale (Chapitre 3.2), montre qu'il est possible de réaliser des évaluations cognitives sur des supports numériques comme les tablettes, y compris en auto-évaluation.

Ces outils sur tablettes peinent pourtant à dépasser le stade expérimental des études cliniques et ne sont pas diffusés. De plus, peu de programmes présentés sont en **français** [109], limitant leur utilisation chez les patients francophones.

Compte-tenu de la forte prévalence des troubles cognitifs, il serait intéressant d'avoir un outil rapide, facile d'utilisation et disponible en soins primaires.

Cela semble réalisable puisque l'utilisabilité des tablettes numérique a été globalement démontrée dans des larges populations avec une meilleure accessibilité des nouvelles technologies [152].

Nous souhaitons développer un nouvel outil de dépistage simple et utilisable au plus proche des professionnels, limitant les instructions écrites et la surcharge cognitive lors de sa conception.

Ce chapitre présentera ainsi le premier volet de l'outil AlzVR sur tablette numérique avec les phases de **conception** et **d'évaluation**. Il s'agit d'un programme d'auto-détection basé sur des questions inspirées des tests MMSE et MoCA.

4.2 . CONCEPTION D'UN OUTIL DE DÉPISTAGE

4.2.1 . Outil de conception et droits d'auteur

L'outil a été programmé à l'aide de Unity® (v.2021.3.11) pour Android® (tablette). L'ensemble des images utilisées dans le programme étaient libres de droit.

La conception s'est réalisée de façon **itérative et régulière** entre les équipes de conception et de développement. De nombreux avis ont également été recueillis auprès de professionnels de santé de terrain avec présentation de l'outil à ses différentes phases de maturation.

4.2.2 . Menu d'accueil

Au démarrage de l'application, il existe trois possibilités pour l'utilisateur (Figure 24) :

- "Expérience encadrée" : questionnaire médical et évaluation cognitive ;
- "Expérience rapide" : évaluation cognitive seule ;
- "Résultats" : visualisation des résultats.

Sur le plan de la programmation, le jeu est divisé en trois scènes principales :

- la scène "Menu" qui inclut le menu principal, le questionnaire médical et la consultation des résultats ;
- la scène "InGame" qui contient les instructions d'utilisation (tâches d'entraînement) et toutes les tâches cognitives ;
- la scène "Survey" qui recueille le retour de l'utilisateur que seul l'administrateur peut voir.

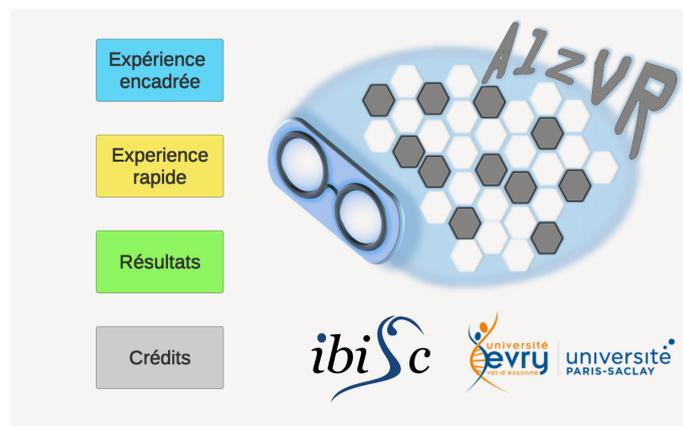


Figure 24 – Menu d'accueil

4.2.3 . Questionnaire médical

L'**expérience encadrée** inclut un questionnaire médical primaire (Figures 25 et 26) pour collecter les données socio-démographiques (nom, âge, type d'habitation) et les antécédents médicaux (diagnostic cognitif, tests précédents, traitements et déficits sensoriels).

Centre d'examen * : CFX 1 CFX 2 HPGM 1

Nom du patient * : Date de naissance * :

Prénom du patient * : Sexe du patient * : Homme Femme

Lieu de vie * : Domicile Foyer logement EPHAD Résidence Senior
 Non connu

[Retour au menu](#) [Valider](#)

Diagnostic :

Pas de dysfonction MCI Maladie d'Alzheimer Démence Mixte

Autre (préciser :)

Examens complémentaires : IRM/TDM Ponction lombaire Aucun

Date du diagnostic :

Score MMSE : Score IADL (/8) :

Score MOCA : Score GDS (/30) :

Score ADL (/6):

[Retour](#) [Valider](#)

Figure 25 – Questionnaire médical (partie 1)

Traitement symptomatique * :
 DONEPEZIL MEMANTINE RIVASTIGMINE GALANTAMINE
 Aucun Non connu

Traitement psychotrope * :
 Antidépresseur Benzodiazépine Neuroleptique ZOPICLONE/ZOLPIDEM
 Aucun Non connu

Trouble visuel * : Oui Non Non Connu

Trouble auditif * : Oui Non Non Connu

Trouble praxique * : Oui Non Non Connu

Retour

Valider

Figure 26 – Questionnaire médical (partie 2)

4.2.4 . Anonymisation

À la fin du questionnaire médical, le programme génère automatiquement un numéro d'anonymisation composé de la date et de l'heure (jusqu'à la seconde) sans intégrer les initiales de l'utilisateur. Un nombre typique anonyme a cette forme AAAAMMJJHHMMS. Ce processus protège la confidentialité des informations de l'utilisateur (informations personnelles) et permet une analyse ultérieure à l'aveugle. Ce nombre est précédé de la lettre "A" dans l'**expérience rapide** et de la lettre du centre médical éventuel dans l'**expérience supervisée**.

4.2.5 . Scène de jeu

4.2.5.1 . Architecture des expériences

Le module principal de la scène "InGame", le **GameManager**, référence la liste des neuf tâches cognitives à réaliser.

Bien que chaque tâche ait un objectif différent, chacune possède des instructions (textuelles et/ou orales) puis propose une ou plusieurs réponses sous la forme d'images ou de texte. Ainsi, la classe expérience parent "JExperience" partage les mêmes attributs et méthodes communs à toutes les autres tâches.

Cependant, les spécificités de présentation de chaque tâche nécessitent la création de nouvelles classes ("JExpMonoChoice", "JExpChoiceTown", "JExpImages") toutes héritées de la classe "JExperience" (Figure 27).

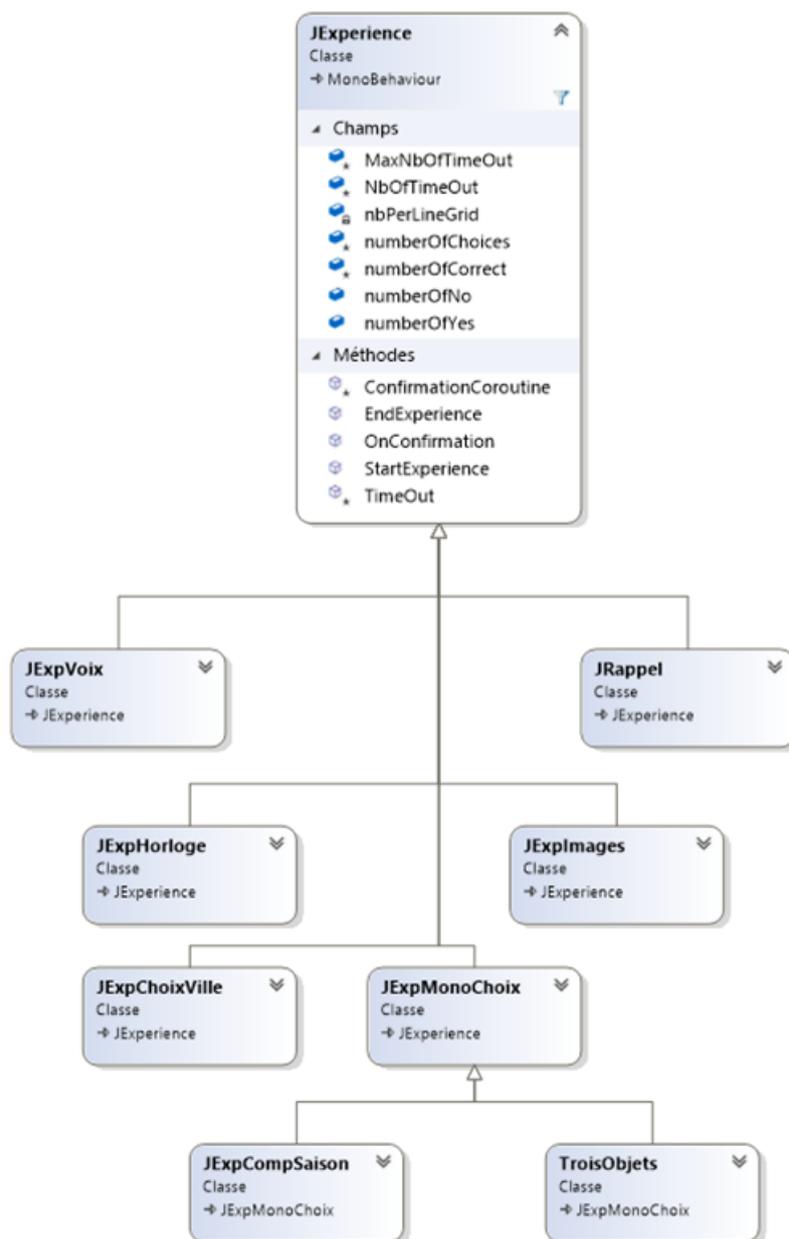


Figure 27 – Diagramme principal des classes

4.2.5.2 . Aspect général

L'aspect visuel devait être simple et **épuré**. Toutes les scènes apparaissent donc sur un fond bleu uniforme. Cette couleur reprend le bleu du logo AlzVR , offrant un contraste avec les vignettes d'images sans être agressif. Les consignes sont délivrées oralement par le programme via l'enceinte de la tablette. Elles ont été enregistrées par un de nos collaborateurs en utilisant

sa propre voix. Ce choix de conception reproduit la conduction habituelle des tests cognitifs où l'examineur pose oralement les questions au patient.

4.2.5.3 . Modalités de réponse

Suite à la consigne, l'utilisateur doit sélectionner la ou les réponse(s) en touchant un ou plusieurs boutons, qui sont de grande taille. Afin d'assurer une bonne visibilité, leur nombre est limité à huit sur l'écran. Cela réduit également la probabilité d'avoir la bonne réponse au hasard ($1/8 = 12,5 \%$). Dès que l'utilisateur a sélectionné la ou les réponse(s) de son choix, un écran de confirmation apparaît avec deux boutons : **OUI** et **NON**. Cette étape permet d'éviter les réponses d'inattention tout en validant le choix (Figure 28). Un "oui" conduit à la tâche suivante, et un "non" permet une nouvelle tentative de réponse avec nouvelle délivrance de la consigne.

Chaque exercice dure 30 secondes maximum. La question suivante survient automatiquement si l'utilisateur ne répond pas dans le temps imparti (*Timeout*). Le choix d'un "non" réinitialise le temps mais seules trois tentatives sont possibles.

Dans tous les cas (succès ou échec à la réponse), un message "Bravo!" félicite l'utilisateur. Ce message crée une ambiance rassurante et peut réduire des erreurs ultérieures dues à la peur ou au stress

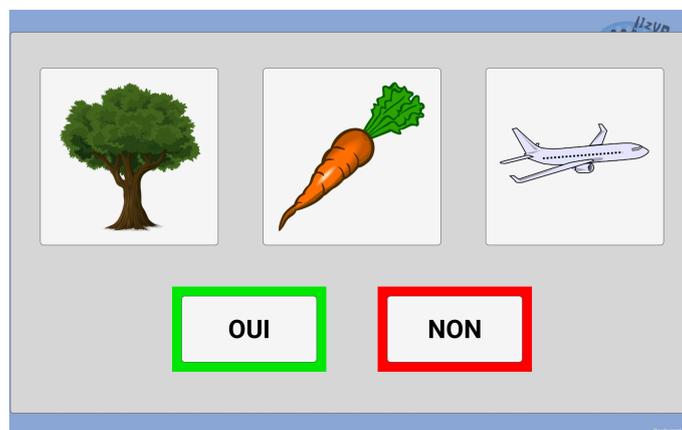


Figure 28 – Modalités de réponse

4.2.6 . Choix du matériel

Nous avons choisi d'utiliser la tablette Samsung Galaxy Tab S7 FE® (écran de 315.0 mm, 2560 x 1600) sous Android 11 (interface utilisateur One UI 3.1). L'écran de grande taille associé à une bonne résolution permettra une **meilleure ergonomie** chez des sujets potentiellement moins habitués aux écrans tactiles. Un smartphone aurait eu un écran trop petit. Dans l'optique d'une diffusion future de l'outil, nous optâmes pour une interface qui soit un objet facilement accessible. Une tablette numérique est plus autonome et plus simple à transporter qu'un ordinateur à écran tactile ou un tableau interactif.

4.2.7 . Entraînement à la tablette

Avant le début des tâches cognitives, deux **tâches d'entraînement** ont été intégrées afin de s'assurer de la bonne compréhension du fonctionnement de la tablette. Elles consistent à toucher des formes sur l'écran suite à une instruction orale délivrée par le programme (Figure 29). En cas d'échec à cette phase, l'évaluation s'arrête et les tâches cognitives n'ont pas lieu.

4.2.8 . Transposition des questions

Suite à la phase d'entraînement, sept tâches cognitives se succèdent. Nous souhaitons une évaluation variée et avons donc sélectionné des questions portant sur différents champs cognitifs (Tableau 4.1). La difficulté et l'enchaînement des tâches sont les mêmes quel que soit le diagnostic initial (sain, MCI ou MA).

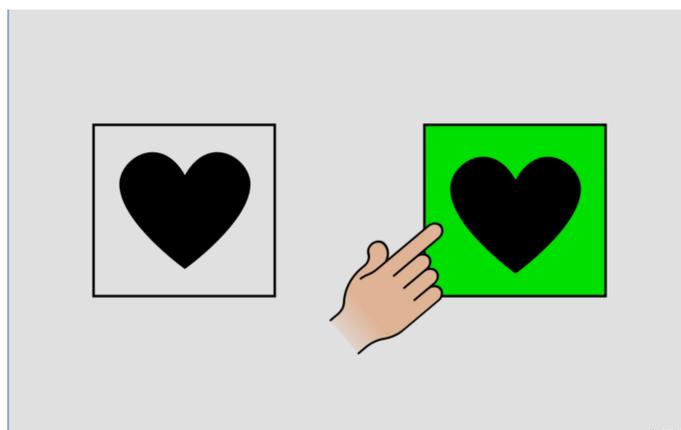


Figure 29 – Tâche d'entraînement

Test papier	Fonction cognitive explorée	Tâche cognitive numérique
MoCA, MMSE	Mémoire auditive et attention	Tâche des trois mots (rappel immédiat)
MoCA	Mémoire et attention	Reconnaissance d'horloges
MOCA, MMSE	Mémoire auditive et attention	Tâches des trois mots (rappel différé)
MoCA et MMSE	Orientation spatiale	Drapeaux Ville
MoCA et MMSE	Orientation temporelle	Année Saison
MoCA	Abstraction	Tâche d'abstraction

Table 4.1 - Correspondances entre tâches cognitives numériques et tâches papier

4.2.8.1 . Trois mots

La tâche se déroule en trois temps :

- délivrance orale de trois mots (sans images) à retenir;
- rappel immédiat avec sélection de trois images;
- rappel différé après la tâche suivante.

Au cours des évaluations habituelles, le patient doit répéter oralement les mots entendus avec un rappel immédiat et différé. Dans une optique d'auto-évaluation, le rappel des mots a été transformé en une sélection d'images (Figure 30). Après une délivrance orale par le programme (sans images), l'utilisateur doit choisir les trois mots entendus parmi une sélection de huit images. Les trois images/mots appartiennent à différents champs sémantiques (animal, véhicule, légume). Il existe un rappel immédiat et un rappel différé.



Figure 30 – Tâche des trois mots

4.2.8.2 . Reconnaissance d'horloges

Cet exercice s'inspire du test classique de l'horloge [114] où un patient doit dessiner des chiffres et aiguilles dans un cadran en indiquant une heure précise (p.e 11h10). Nous avons proposé une autre tâche où l'utilisateur doit choisir une horloge parmi trois selon l'heure indiquée par la consigne orale ("Quelle horloge indique..."). Les trois réponses comportent la bonne réponse, une horloge "inversée" (10h30 versus 05h50), et une horloge aberrante (Figure 31).

Deux séries d'horloges se succèdent et sont suivies par le rappel différé des trois mots (chapitre 4.2.8.1).

Dans cette épreuve, le nombre d'horloges présentées est limité à trois pour garder une résolution correcte. Malheureusement, cela augmente considérablement la probabilité (1/3) d'avoir la bonne réponse au hasard.

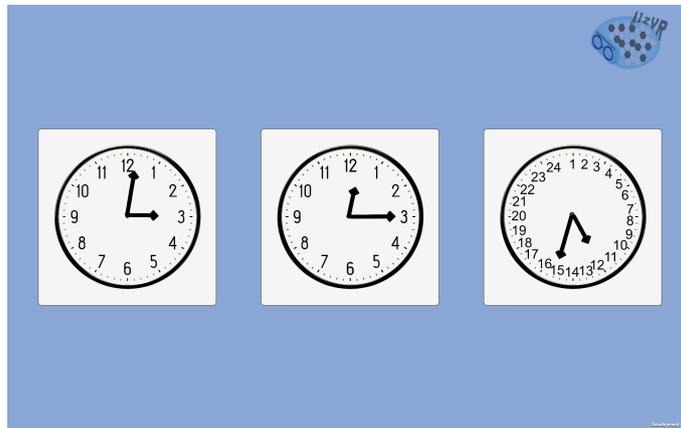


Figure 31 – Reconnaissance d'horloges

4.2.8.3 . Orientation spatiale

Les deux tâches suivantes évaluent l'orientation spatiale avec :

- le pays : reconnaissance du drapeau français (Figure 32);
- la ville : six choix sont proposés sous forme de panneaux de villes (Figure 33). Le choix de la ville peut se modifier selon le site d'évaluation.



Figure 32 – Tâche des drapeaux

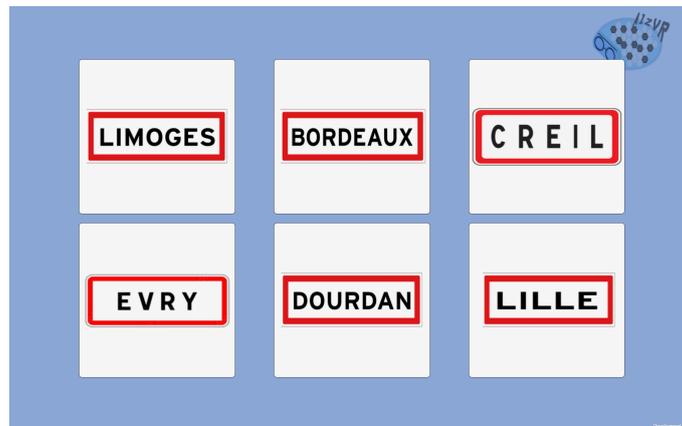


Figure 33 - Tâche des villes

4.2.8.4 . Orientation temporelle

Il existe deux tâches d'évaluation de l'orientation temporelle :

- saison : sélectionner la saison (écrite) avec image typique (Figure 34) et une marge de 48 heures compte-tenu des dates variables des saisons ;
- année : sélection de l'année (Figure 35).



Figure 34 - Tâche des saisons

4.2.8.5 . Abstraction

Dans le test MoCA, la capacité d'abstraction est évaluée par une similarité entre deux mots (p.e une orange et une banane sont des fruits). La dernière tâche du programme s'inspire de l'épreuve du MoCA et consiste à continuer une suite logique de deux images (deux fruits) et de sélectionner la bonne image (Figure 36). Un élément perturbateur figure parmi les quatre choix (une image appartient au test des trois mots).

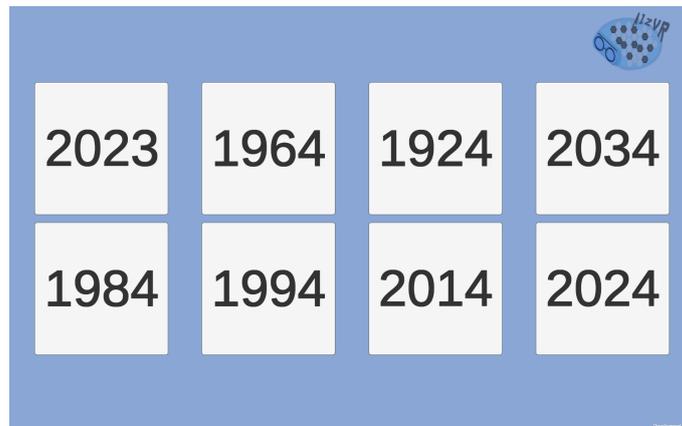


Figure 35 - Tâche des années

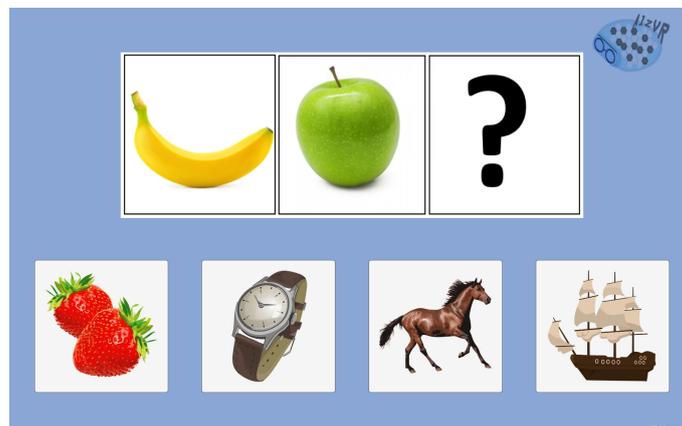


Figure 36 - Tâche d'abstraction

4.2.9 . Résultats

Le menu de consultation des résultats permet la visualisation des scores à chaque question et pour chaque patient (Figure 37). Cette section est protégée par un mot de passe et présente uniquement les résultats via le numéro d'anonymisation. Trois possibilités existent : "X" (échec), "V" (réussite) et "?" (temps dépassé).

4.2.10 . Questionnaire F-SUS

Le questionnaire F-SUS [153] (traduction française du System Usability Scale [154]) succède aux tâches de l'évaluation cognitive afin de recueillir l'**utilisabilité** du programme. Ce questionnaire évalue la satisfaction globale à travers dix questions et cinq degrés de réponse allant de 1 (Pas du tout d'accord) à 5 (Tout à fait d'accord) au moyen de cases à cocher (Figure 38).

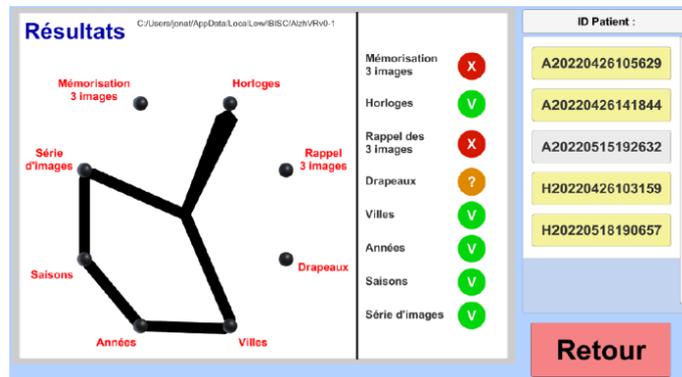


Figure 37 – Menu des résultats

Les dix questions du F-SUS sont les suivantes :

1. Je voudrais utiliser ce système fréquemment
2. Ce système est inutilement complexe
3. Ce système est facile à utiliser
4. J'aurais besoin du soutien d'un technicien pour être capable d'utiliser ce système
5. Les différentes fonctionnalités de ce système sont bien intégrées
6. Il y a trop d'incohérences dans ce système
7. La plupart des gens apprendront à utiliser ce système très rapidement
8. Ce système est très lourd à utiliser
9. Je me suis senti·e très en confiance en utilisant ce système
10. J'ai eu besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce système

<i>Pas d'accord</i>	<i>D'accord</i>
1) Je pense que je vais utiliser ce test fréquemment	
<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
2) Je pense que ce test est inutilement complexe	
<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
3) Je pense que le test est facile d'utilisation	
<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
4) Je pense avoir besoin d'aide pour utiliser ce test	
<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
5) Je trouve que le test fonctionne correctement	
<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5

Figure 38 – Questionnaire F-SUS

4.2.11 . Stockage des données

Toutes les données sont exportées et stockées sous un format .CSV qui permet une exploitation facile. Il existe un **stockage séparé** des données personnelles du reste des résultats (évaluation cognitive et questionnaire F-SUS). Une *analyse à l'aveugle* est ainsi possible en n'utilisant que les fichiers contenant les données anonymisées (Figure 39).

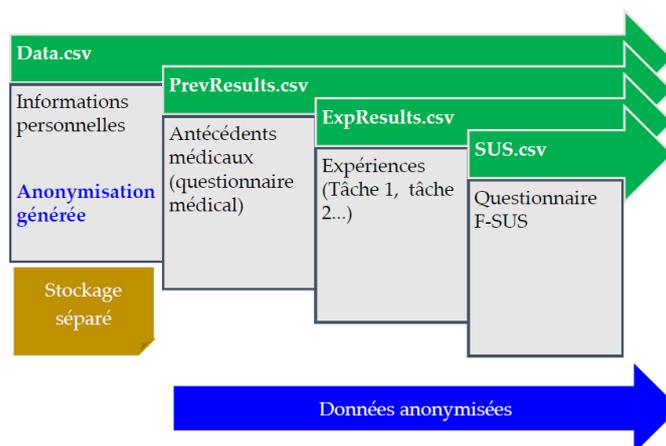


Figure 39 – Processus de stockage des données et anonymisation

4.3 . ÉTUDE PRÉLIMINAIRE

Afin d'évaluer notre outil, nous avons mené une étude préliminaire d'**utilisabilité** parmi des sujets sains.

4.3.1 . Méthodes

4.3.1.1 . Population

Il s'agit d'une étude expérimentale au sein du laboratoire IBISC (UFR Sciences et Technologies) avec inclusion de sujets sains (étudiants et personnels). Le programme était évalué selon la norme ISO 9241-11 [155] et la méthode de Nielsen [156].

Les critères d'inclusion étaient :

- âge supérieur ou égal à 18 ans révolus;
- compréhension de la langue française;
- pas de déficit sensoriel (visuel ou auditif) sauf si compensé par appareillage.

Les participants ont été recrutés par des listes d'adresses électroniques et des affichages dans les locaux de l'UFR.

4.3.1.2 . Démarche éthique

Cette étude a été réalisée en accord avec la déclaration d'Helsinki de l'Association Médicale Mondiale, révisée en 2013 pour les expérimentations impliquant des humains. Le protocole et tous les documents associés ont été validés par le comité d'éthique de la recherche de l'Université Paris Saclay. Tous les participants ont signé un consentement éclairé préalablement à leur inclusion. La participation était gratuite.

4.3.1.3 . Matériel

La tablette utilisée était une Samsung Galaxy Tab S7 FE ® (écran de 315,0 mm, 2560×1600) fonctionnant sur Android 11 (interface utilisateur One UI 3.1).

4.3.1.4 . Déroulement de l'expérimentation

Le protocole comprenait quatre phases :

1. recueil électronique anonyme en ligne des données socio-démographiques (âge, genre, profession, degré d'utilisation des outils numériques...);
2. passation du test cognitif sur tablette (*Expérience rapide*);

3. évaluation de l'application à l'aide du questionnaire F-SUS;
4. recueil électronique anonyme de commentaires généraux.

4.3.1.5 . Exploitation des données

Nous souhaitons collecter les paramètres suivants : réponse (réussite, échec), nombre d'essais et le temps de réponse (ms).

Le critère de jugement principal était le score F-SUS total (calculé selon les recommandations des auteurs [153, 154]) avec un objectif à 85,5 % considéré comme "excellent".

Toutes les données ont été collectées et analysées à l'aveugle en utilisant le numéro d'anonymisation généré par le programme (cf chapitre 4.2.4).

4.3.2 . Résultats

L'étude s'est déroulée entre septembre et octobre 2022 avec inclusion de **24 participants**. La moyenne d'âge des participants était de **41,88** (+/- 13,11) ans avec un intervalle allant de 23 à 66 ans. Les caractéristiques des participants sont présentées au tableau 4.2.

	Population	(n = 24)
Genre (F/H)	10/14	
Age (années) m(ec) [min-max]	41,88 (13,11) [23-66]	
Profession	Étudiant	2
	Ingénieur	2
	Doctorant	3
	Technicien	3
	Enseignant chercheur	5
	Personnel administratif	9

ec : écart-type

m : moyenne; min : minimum; max : maximum

Table 4.2 – Caractéristiques de la population

La totalité des participants possédaient un smartphone et 96 % avaient déjà utilisé une tablette numérique. Pour autant, seulement la moitié (52,2 %)

s'en servaient au moins une fois par mois. Les habitudes numériques des participants sont présentées au tableau 4.3.

Question	%	
Avez-vous déjà utilisé un smartphone? (%)	100	
<i>Depuis combien de temps (années)? m(ec)</i>		12,37 (4,8)
<i>Si oui, à quelle fréquence en 2022?</i>	100	Quotidiennement
Avez-vous déjà utilisé une tablette? (%)	96	Oui
<i>Si oui, depuis combien d'années? m(ec)</i>	4	Non
		8,25 (3,13)
	21,7	Quotidiennement
	13,1	Une fois par semaine
<i>Si oui, à quelle fréquence en 2022?</i>	17,4	Une fois par mois
	47,8	Une fois par an

ec : écart-type; m : moyenne

Table 4.3 – Habitudes numériques de la population

Les tâches cognitives ont été complétées par 100 % des participants avec un taux de réussite de **97,4 %** (187 réponses exactes sur 192). Les erreurs concernaient la reconnaissance d'horloge (2 erreurs) et la saison (3 erreurs).

Le temps moyen de réalisation du test (hors tâches d'entraînement) était de **141,47** (+/- 18,77) secondes avec un intervalle allant de 97,64 à 183,58 secondes. L'ensemble des temps de réalisation sont présentés dans le tableau 4.4.

Quatre-vingt-dix pour cent des participants ont répondu au questionnaire F-SUS (une personne a quitté l'application précocement). Le score global était de **89,24%** considéré comme « *excellent* ». Les résultats aux différentes questions sont présentés dans le tableau 4.5.

La plupart des utilisateurs n'ont pas eu de remarques sur le programme ou bien l'ont trouvé trop simple voire pas assez fluide au niveau des instructions. La figure 40 résume les commentaires des utilisateurs..

Tâche cognitive	Temps de réalisation m(ec) [min-max]
Tâche des trois mots (rappel immédiat)	31,98 (2,62) [25,16-38,60]
Reconnaissance d'horloges (2 séries)	36,43 (5,49) [25,86-51,05]
Tâche des trois mots (rappel différé)	17,41 (2,83) [11,04-22,65]
Drapeaux	12,23 (1,87) [8,66-16,29]
Ville	10,91 (2,39) [6,95-16,45]
Année	10,41 (2,12) [6,38-14,68]
Saison	11,73 (3,97) [6,75-23,68]
Abstraction	10,39 (2,67) [6,23-15,19]
Total	141,47 (18,77) [97,64-183,58]

ec : écart-type; m : moyenne; min : minimum; max : maximum

Table 4.4 – Temps de réalisation des tâches numériques

Question	Résultat m(ec)
1) Je voudrais utiliser ce système fréquemment	2.70 (1.46)
2) Ce système est inutilement complexe	1.52 (0.71)
3) Ce système est facile à utiliser	4.91 (0.28)
4) J'aurais besoin du soutien d'un technicien pour être capable d'utiliser ce système	1 (0)
5) Les différentes fonctionnalités de ce système sont bien intégrées	4.65 (0.87)
6) Il y a trop d'incohérences dans ce système	1.43 (0.97)
7) La plupart des gens apprendront à utiliser ce système très rapidement	4.96 (0.20)
8) Ce système est très lourd à utiliser	1.65 (1.34)
9) Je me suis senti-e très en confiance en utilisant ce système	4.83 (0.38)
10) J'ai eu besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce système	1.74 (1.42)

ec : écart-type ; m : moyenne

Table 4.5 - Résultats au questionnaire F-SUS

4.3.3 . Discussion

Dans les tests papier habituels, le patient répond oralement à l'examineur pour la plupart des questions. Dans l'élaboration de nos tâches, nous avons choisi de **ne pas utiliser la reconnaissance vocale** en raison de ses limitations actuelles [157, 158]. Une erreur d'interprétation conduirait à de faux résultats. Néanmoins, l'exclusion de réponses orales limite l'évaluation du langage comme dans le MMSE ou le MoCA. De plus les processus cognitifs sont différents entre donner une réponse spontanée et en sélectionner une parmi un choix de propositions.

Le test de l'horloge est utilisé en pratique quotidienne et appartient à des outils rapides de *dépistage* comme le Codex [159] ou le Minicog [160]. Müller et al. ont proposé un test de l'horloge numérique avec l'utilisation d'un stylet [99], montrant de bonnes corrélations avec la version papier. Cette transposition nécessite une lecture de l'image par un évaluateur externe ou via des techniques d'analyse automatique d'image [161]. Afin de garder le principe d'une **auto-évaluation simple et rapide**, le test de dessin a été remplacé par celui d'une sélection d'horloges. Dessiner une horloge avec des aiguilles requiert des capacités visuospatiales et des fonctions exécutives. Il existe des **limitations techniques** pour concevoir une auto-évaluation avec peu d'instructions écrites, sans validation extérieure et avec des consignes simples. Ces limitations peuvent conduire à un biais d'évaluation des fonctions exécutives.

Enfin, le programme n'explore pas l'écriture car nous ne souhaitons pas de stylet et une validation humaine ultérieure. Pour autant, la dysgraphie est un symptôme de la MA [162].

Afin d'évaluer notre outil digital de façon préliminaire, nous avons réalisé une étude d'utilisabilité parmi une population saine dans notre université.

Nous espérons un temps de réalisation court, et le temps moyen observé dans cette étude préliminaire (142 secondes) est un résultat satisfaisant. De plus, le critère de jugement principal (score total au F-SUS) qui visait un objectif de 85,5 % a été dépassé (89,24 %), atteignant presque le seuil de 90,9 % correspondant à une utilisabilité "meilleure imaginable".

Les participants ont globalement perçu le test comme simple à utiliser (questions 3, 5, 7 et 8). C'est un retour positif car les participants ne connaissaient pas les évaluations cognitives et découvraient nos questions pour la première fois. Ces résultats sont des données préliminaires encourageantes mais il existe une limitation majeure dans leur interprétation

compte-tenu de la population étudiée. En effet, nos participants étaient jeunes (41,88 années en moyenne), sans troubles cognitifs et habitués aux écrans tactiles. Cet âge moyen est bien en deçà de celui des patients atteints de MA (> 60 ans) [163], pouvant expliquer ces résultats. Il existe un risque de ne pas pouvoir les extrapoler à une population gériatrique. Les tâches ont été perçues comme "trop simples" ou "trop lentes". Ce type d'évaluation cognitive peut paraître simple pour des sujets sains, mais le test vise une population présentant un potentiel déficit cognitif avec une utilisation moindre des tablettes numériques.

Des erreurs ont pourtant été commises sur la tâche de reconnaissance des horloges, probablement en lien avec la forme des aiguilles (cf. Figure 40) pouvant induire une erreur de lecture. De récentes constatations ont cependant montré que les étudiants avaient de plus en plus de difficultés à lire les horloges "traditionnelles" [164] et nos utilisateurs ayant échoué avaient 24 ans. Ces difficultés se retrouvent également dans les temps de réalisation (Tableau 4.4). La tâche des horloges présente la plus grande différence entre les temps minimal et maximal de réalisation. Les erreurs dans le choix de la saison peuvent s'expliquer par le changement de saison à la fin du mois de septembre. Il existait également un temps de réalisation allongé pour cette tâche.

S'agissant de l'exploitation des données, l'extraction des fichiers .csv s'est bien déroulée et il n'y avait pas d'erreurs ou d'anomalies dans les fichiers.



Figure 40 - Remarques des utilisateurs sains

4.4 . ÉTUDE COGNUM-ALZVR

Dans l'optique de tester notre outil au sein d'une population gériatrique, nous avons rejoint le projet porté par l'association Rivages¹ qui vise à évaluer un outil de motricité fine dans le dépistage des troubles cognitifs.

Les deux projets réunis ont conduit à la création de l'étude "COGNUM-ALZVR" [165].

4.4.1 . Critères de sélection

Les critères d'inclusion sont :

- personne âgée consultant dans un des centres mémoire participants;
- personne ayant un des trois diagnostics cognitifs documentés (moins de 6 mois) :
 - trouble neurocognitif majeur dû à la maladie d'Alzheimer selon les critères de la DSM-5;
 - trouble neurocognitif léger dû à la maladie d'Alzheimer selon les critères de la DSM-5;
 - pas de dysfonctionnement cognitif documenté après bilan au centre mémoire.

Les critères d'exclusion sont :

- personne ayant une maladie affectant la main (orthopédique, neurologique, maladie de Parkinson) empêchant l'utilisation d'une tablette tactile;
- personne ayant une autre maladie pouvant être responsable d'une perte des fonctions cognitives (maladie cérébro-vasculaire, maladie neurologique autre, maladie psychiatrique);
- personne bénéficiant d'une mesure de protection juridique.

L'étude prévoit d'inclure **150 personnes au total** (50 sujets sains, 50 sujets MCI et 50 sujets MA) sur deux centres mémoire situés à l'hôpital Charles Foix (Ivry-sur-Seine) et à l'hôpital des Magnolias (Ballainvilliers).

4.4.2 . Déroulement de l'évaluation cognitive

Le déroulement de l'évaluation cognitive est la suivante :

1. recueil de données socio-démographiques, cliniques et évaluations cognitives antérieures sur un cahier d'observation papier;

1. Association rivages; 7, avenue de la république 94200 Ivry s/ Seine

2. test AlzVR (version "*expérience encadrée*") suivi du questionnaire F-SUS;
3. évaluation gériatrique et cognitive;
4. test de l'horloge à l'aide d'un stylet numérique et version papier;
5. questionnaire VES-13;
6. évaluation de la motricité fine (6 tests).

4.4.2.1 . Test AlzVR et questionnaire F-SUS

L'outil AlzVR (cf. chapitre 4.2) a été modifié par rapport à la version initiale pour y intégrer les deux villes des centres d'inclusion (Ivry sur Seine et Ballainvilliers). Le numéro d'anonymisation commence par C1 ou C2 pour le centre Charles Foix et par H1 pour le centre des Magnolias.

4.4.2.2 . Évaluation gériatrique et cognitive

À la demande de l'équipe de l'hôpital Charles Foix, nous avons ajouté des questions sur la tablette qui devaient initialement être posées et recueillies sur papier.

Il existe des items relevant de l'évaluation gériatrique standardisée (humeur, autonomie, antécédents médicaux, déficits sensoriels etc.) et deux séries de tâches cognitives : trois questions d'abstraction (similitudes entre deux images) et deux questions de calcul (rendu de monnaie et orientation temporelle rétrograde).

4.4.2.3 . Test de l'horloge numérique

Ce test est une adaptation numérique de la version papier originale [114] avec utilisation d'un stylet numérique. L'application utilisée pour ce test est une application simple de dessin et téléchargeable gratuitement via les plateformes usuelles comme Google Play® ou App store®.

Le patient doit alors dessiner les chiffres et les aiguilles (11h10) avec le stylet.

Un exemple d'horloge est présenté à la figure 41.

Il y a également l'épreuve de l'horloge classique sur papier.

4.4.2.4 . Questionnaire VES-13

Le questionnaire VES-13 (Vulnerable Elders Survey - 13) est un auto-questionnaire de 13 questions incluant une question pour l'âge et 12 questions explorant l'état de santé, la capacité fonctionnelle et les performances physiques [166, 167] (Annexe 7.8). Le recueil du VES-13 se fait uniquement sur le cahier d'observation papier.

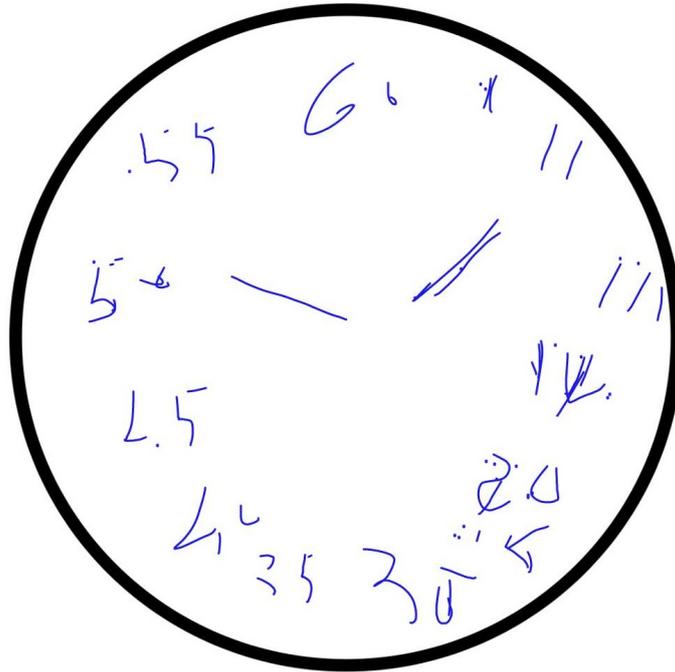


Figure 41 - Exemple d'une horloge patient indiquant 11h10

4.4.2.5 . Outil de motricité fine

L'outil de motricité fine (application Homecare®) a été développée par la société Dextrain² en collaboration avec le LIMICS³ suite à plusieurs travaux dans l'évaluation de la motricité et de la dextérité [168, 169, 170].

Homecare® propose une série de six exercices de motricité à réaliser en positionnant les doigts sur l'écran et en effectuant différents mouvements (Figure 42) :

- reconnaissance de cible digitale (main digitale);
- synchronisation de rythme;
- séquence de mouvements;
- vitesse maximale de tape;
- reconnaissance de cible digitale (barre lumineuse);
- suivi de ligne.

Chaque tâche est précédée d'une vidéo de démonstration et le déroulement de l'épreuve se fait en présence de l'évaluateur. Le programme propose trois

2. Dextrain - 12, rue Ampère 91430 IGNY

3. Laboratoire d'informatique médicale et d'ingénierie des connaissances en e-santé (Sorbonne Université)

niveaux de difficulté mais nous avons choisi de garder le niveau 1 pour l'étude (le plus simple).

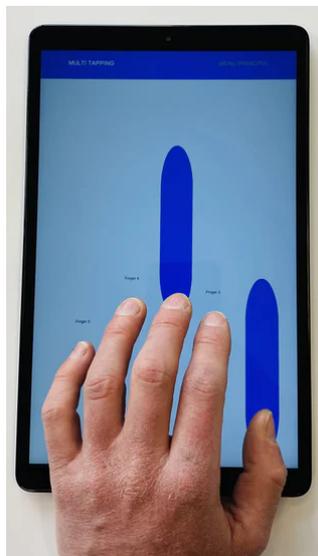


Figure 42 – Exemple d'une tâche de motricité fine (Dextrain©)

4.4.3 . Démarrage de l'étude et résultats préliminaires

Après accord du Comité de Protection des Personnes, les inclusions ont débuté en avril 2023 dans les deux centres. À ce jour les inclusions ne sont pas terminées.

Quelques analyses de données préliminaires ont été réalisées sur la faisabilité globale et les résultats aux tests cognitifs.

4.4.3.1 . Faisabilité globale

Les données de **122 patients (83 +/- 3,5 ans)** ont montré une bonne faisabilité avec l'absence d'abandon en cours d'étude. Les auto-questionnaires ont été remplis sans difficulté. Seuls deux participants ont refusé de réaliser le test de l'horloge. Il y avait des difficultés d'ordre technique lors de l'épreuve de dextérité en raison de déformation des doigts avec mauvais appui sur l'écran. La zone de pression ne captait pas toujours la position des doigts par ailleurs.

4.4.3.2 . Tests cognitifs

Les données de **105 patients (79,9 +/- 7,5 ans)** ont été extraites. Il y avait 40 sujets sains, 25 patients atteints de MCI et 40 patients atteints de MA. Sur ces premières analyses, Certaines tâches apparaissent discriminantes comme le **rappel différé** qui appartient à A1zVR (Tableau 4.6).

Donnée	Sujets sains (n = 40)	Sujets MCI (n = 25)	Sujets MA (n = 25)	p
Succès à la tâche, n (%)				
Rappel immédiat	38 (95)	24 (96)	30 (75)	0,900
Rappel différé	39 (98)	20 (80)	18 (45)	<0,001***
Reconnaissance d'horloge	29 (73)	18 (72)	25 (63)	0,575
Drapeaux	40 (100)	22 (88)	39 (98)	0,420
Ville	37 (93)	23 (92)	37 (93)	0,997
Année	40 (100)	22 (88)	32 (80)	0,130
Saison	38 (95)	21 (84)	31 (78)	0,790
Séquence logique	32 (80)	12 (48)	23 (58)	0,190
Date antérograde	38 (95)	19 (76)	26 (65)	0,004**
Catégorisation orange/banane	39 (98)	25 (100)	39 (98)	0,727
Catégorisation vélo/train	39 (98)	20 (80)	36 (90)	0,064
Catégorisation montre/règle	39 (98)	14 (56)	20 (50)	<0,001***
Temps de réponse, médiane (IIQ)				
Catégorisation orange/banane	7 (6, 13)	11 (8, 14)	13 (9, 17)	0,042*
Catégorisation vélo/train	7 (4, 13)	10 (5, 14)	13 (8, 19)	0,003**
Catégorisation montre/règle	9 (6, 14)	12 (7, 19)	12 (7, 25)	0,110
Rendu de monnaie	34 (29, 48)	29 (24, 34)	34 (22, 49)	0,197
Date rétrograde	22 (14, 27)	41 (27, 55)	41 (33, 61)	<0,001***

IIQ : intervalle inter-quartile

* : <0,05; ** : < 0,01; *** : <0,001

Table 4.6 - Temps de réalisation des tâches numériques

4.5 . CONCLUSION

Nous avons conçu un nouvel outil digital d'évaluation des troubles cognitifs sur interface non immersive.

Bien qu'il existe des limitations dans l'évaluation exhaustive des fonctions cognitives, nous notons de bons résultats préliminaires sur l'**utilisabilité** dans notre population jeune. Ils restent cependant à être validés au sein d'une cohorte globale via l'étude multicentrique COGNUM-A1zVR (en cours) dont les premiers résultats sont encourageants. En effet, le rappel différé, tâche du programme A1zVR, semble apparaître comme un test discriminant. Les données d'utilisabilité au sein de la population gériatrique de l'étude montrent que notre outil est bien toléré par les patients âgés.

Nous souhaitons réaliser une étude préliminaire sur des sujets âgés sains (en foyer logement par exemple) mais l'étude COGNUM-A1zVR a débuté plus tôt que prévu. Cette étude pourra, cependant, être conduite à posteriori lors d'un retour en phase de conception de l'outil.

Pour autant, cet outil non immersif n'évalue par exemple pas les praxies qui sont pourtant des fonctions cognitives majeures. L'utilisation d'un environnement immersif permettrait d'implémenter de nouvelles actions.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons ainsi l'autre modalité du projet A1zVR avec la **conception** de deux outils en **réalité virtuelle immersive**.

5 - VERS UN OUTIL DE DÉTECTION IMMERSIF

5.1	INTRODUCTION	89
5.2	CONCEPTION D'UN OUTIL DE DÉPISTAGE	90
5.2.1	Choix du matériel	90
5.2.2	Délivrance des consignes	91
5.2.3	Méthode de réponse et validation	91
5.2.4	Entraînement à la RV	92
5.2.5	Transposition des questions	92
5.2.6	Discussion	99
5.3	PROTOTYPE D'ÉVALUATION OLFACTIVE ET HAPTIQUE	101
5.3.1	Choix de l'environnement	101
5.3.2	Conception du prototype	103
5.3.3	Discussion	111
5.4	CONCLUSION	115

5.1 . INTRODUCTION

Notre *phase initiale* de recherche bibliographique (chapitre 3.3) montre que la réalité virtuelle immersive est un outil pertinent dans l'évaluation des fonctions cognitives, y compris chez le sujet âgé.

Les études sont cependant peu nombreuses et n'ont pas exploré des **populations francophones**. Face à l'augmentation attendue du nombre de patients atteints de troubles cognitifs, la RV immersive est un outil de choix notamment par ses **capacités écologiques**.

Précédemment, nous avons présenté le premier volet du projet AlzVR sur *une interface non immersive* (tablette numérique) avec sa *conception* et son *évaluation* clinique.

Dans ce chapitre nous allons aborder l'autre partie du projet AlzVR avec le développement de **deux outils en RV immersive**. Nous aborderons en premier lieu la **conception** d'un outil qui est une **auto-évaluation** basée sur des questions inspirées des tests MMSE, MoCA et 5 mots de Dubois. Nous présenterons ensuite un prototype innovant d'**évaluation cognitive avec immersion sensorielle multiple** (visuelle, olfactive et haptique).

5.2 . CONCEPTION D'UN OUTIL DE DÉPISTAGE

De façon similaire au projet sur tablette numérique (Chapitre 4), nous sommes partis de tests cognitifs usuels pour créer cette nouvelle évaluation en RV immersive à savoir, le MMSE, le MoCA et les 5 mots de Dubois.

Nous souhaitons ici proposer un évaluation en totale autonomie sans examinateur externe.

Comme pour la création de l'outil sur tablette, plusieurs contraintes devaient être levées afin de d'un hétéro-test oral à un auto-test numérique :

- choix du matériel;
- délivrance des consignes;
- méthode de réponse et validation;
- entraînement à la VR;
- transposition des questions.

5.2.1 . Choix du matériel

Le choix s'est porté sur le casque Oculus Quest® (Figure 43) car il répondait à plusieurs éléments nécessaires pour une évaluation immersive chez un sujet âgé :

- immersion totale
- son intégré (diffusion sonore en 3D via des écouteurs intégrés);
- faible poids (< 600 grammes);
- pas de câbles (batterie intégrée);
- compatible avec des lunettes de vue.



Figure 43 – Casque Oculus Quest®

Les mouvements des mains dans l'environnement virtuel (Figure 44) s'effectuent grâce aux manettes connectées (Figure 43) qui font apparaître des silhouettes de mains (Figure 44).



Figure 44 – Environnement virtuel

5.2.2 . Délivrance des consignes

Les consignes sont délivrées directement par le casque via les écouteurs intégrés à l'aide d'un avatar en forme de robot dans l'environnement virtuel. Le casque est compatible avec le port d'appareils auditifs.

5.2.3 . Méthode de réponse et validation

Dans une optique d'auto-évaluation complète nous n'avons pas souhaité de système de reconnaissance vocale qui aurait pu induire des erreurs [157, 158]. Ainsi les modalités de réponse ont été conçues en utilisant les **interactions naturelles utilisateur** (Natural User Interactions ou **NUI**) [171].

Le terme "naturelles" signifie que l'interaction doit être intuitive, facile à utiliser et à comprendre [171]. L'interface n'est pas une barrière si la communication est naturelle et directe en utilisant ses propres sens. En réalité virtuelle augmentée et immersive, plusieurs modalités sensorielles ont été exploitées [172] comme le toucher [173, 174], les mouvements corporels [175], les mouvements labiaux [176] ou bien encore l'expression faciale [177].

Bowman et al. [178, 179] ont défini les NUI en quatre tâches d'interaction 3D : navigation, sélection, manipulation et contrôle d'application. Cette classification propose une traduction des gestes du monde réel en tâches virtuelles.

La **navigation** comprend tous les procédés et techniques permettant de connaître la position d'un objet mais également la liberté de se mouvoir dans l'environnement

La **sélection** correspond au processus de choix d'un objet dans l'environnement afin d'accomplir une action.

La **manipulation**, proche de la sélection correspond à l'ensemble des procédés conduisant à une modification des propriétés d'un objet (position, couleur).

Enfin le **contrôle d'application** est la possibilité pour l'utilisateur d'agir sur l'état et les propriétés de l'environnement via des commandes intégrées (menu, raccourcis, etc.).

Dans notre environnement, l'exécution des tâches se fait principalement par la *sélection* et la *manipulation*. La validation est effectuée en appuyant sur un bouton virtuel **Valider** présent dans chaque tâche (Chapitre 5.2.5).

5.2.4 . Entraînement à la RV

Comme dans l'évaluation non immersive, nous avons jugé pertinent d'intégrer une phase préliminaire d'entraînement afin de s'assurer de la bonne compréhension du fonctionnement de l'environnement virtuel et du matériel. Cette tâche consiste à réaliser quelques actions de manipulation des manettes puis de valider des réponses (Figure 45).



Figure 45 - Tâche d'entraînement

5.2.5 . Transposition des questions

Nous souhaitons une évaluation globale élargie et avons donc sélectionné des questions appartenant à différents domaines cognitifs. Les tâches "papier" ont ensuite été transposées en tâches numériques dans l'environnement virtuel (Tableau 5.1).

L'ensemble des NUI pour chaque tâche est présenté au tableau 5.2.

Domaine cognitif	Tâche virtuelle	Tâche papier	Test cognitif	
			MMSE	MoCA
Attention	Tâche des balles	Calcul	x	x
	Liste de lettres	Liste de lettres		x
	Liste de mots	Série de chiffres		x
Abstraction	Associations	Similarités		x
Langage	Noms	Noms	x	x
	Ordre écrit	Ordre écrit	x	
Fonctions exécutives et visuo-spatiales	Dessin	Dessin	x	x
	Séquence logique	Séquence logique		x
	Reconnaissance d'horloge	Test de l'horloge		x
Mémoire	5 mots (1er et 2ème rappel)	5 mots		x
Orientation	Temps	Temps	x	x
	Espace	Espace	x	x

Table 5.1 - Correspondances entre tâches numériques et tâches papier

Tâche virtuelle	Interaction naturelle utilisateur (NUI)			
	Interaction naturelle	Navigation	Sélection	Manipulation
				
Tâche d'entraînement	-	X	X	X
Tâche des balles	Réponse orale	X	X	
Liste de lettres	Mouvement manuel	X	X	
Liste de mots	Réponse orale	X	X	X
Associations	Réponse orale	X	X	X
Dessin	Dessiner	X	X	X
Séquence logique	Dessiner	X	X	
Reconnaissance d'horloge	Dessiner	X	X	
Noms	Réponse orale	X	X	
Ordre écrit	Écriture	X	X	X
5 mots (1er et 2ème rappel)	Réponse orale	X	X	
Orientation temporelle	Réponse orale	X	X	
Orientation spatiale	Réponse orale	X	X	

Table 5.2 - Interactions naturelles utilisateur de chaque tâche

5.2.5.1 . Attention

Tâches des balles : Cette tâche se base sur les questions de calcul (soustraction de 7 en 7). Ici, l'utilisateur doit appuyer sur la 7^{ème} balle en partant du début de la file. Les balles disparaissent et la tâche se renouvelle nécessitant de mémoriser la position de la nouvelle balle à toucher (Figure 46).

Liste de lettres : Dans le test initial, le patient doit taper d'une main lorsqu'il entend une lettre. Dans notre évaluation, la liste de lettres est diffusée à travers le casque et l'utilisateur doit alors appuyer sur un bouton virtuel quand la lettre demandée est entendue (Figure 47).

Liste de mots : Cette épreuve teste la mémorisation d'une suite de mots (noms de formes) à remettre ensuite dans l'ordre (Figure 48). Dans la version originale le patient doit retenir une série de chiffres.

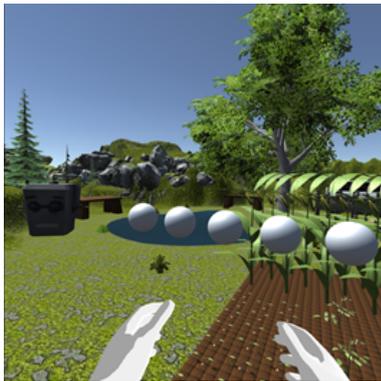


Figure 46 – Tâche des balles



Figure 47 – Liste de lettres



Figure 48 – Liste de mots

5.2.5.2 . Abstraction

Il s'agit ici d'associer des objets selon leurs similitudes (moyen de transport, légumes, outil) comme dans la version papier où le patient doit trouver une similitude entre deux mots (Figure 49).

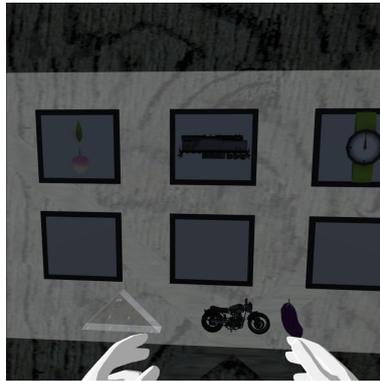


Figure 49 – Tâche d'association

5.2.5.3 . Langage

Noms : L'utilisateur doit appuyer sur le nom de l'animal présent dans l'enclos. La tâche du MoCA demande une réponse orale (Figure 50).

Ordre écrit : Dans cette scène, il faut effectuer des mouvements dans l'environnement virtuel via des consignes écrites de façon similaire à l'épreuve du MMSE "Fermez les yeux" (Figure 51).



Figure 50 – Tâche de langage



Figure 51 – Ordre écrit

5.2.5.4 . Fonctions exécutives et visuo-spatiales

Dessin : Il fallait ici transposer une épreuve de copie d'une figure réalisée avec un crayon. La tâche numérique consiste à associer deux formes pour reproduire la figure demandée (Figure 52).

Séquence logique : La tâche virtuelle est assez semblable à l'exercice papier où le patient doit poursuivre une suite logique alternant chiffre et lettre (Figure 53).

Reconnaissance d'horloges : Dans la version classique, le patient doit dessiner une horloge et des aiguilles indiquant une heure précise (souvent 11h10). Souhaitant un module d'auto-évaluation totale il était compliqué d'intégrer une tâche de dessin. Nous avons ainsi opté pour une reconnaissance d'horloge avec l'heure indiquée oralement par le programme (Figure 54).



Figure 52 – Tâche de dessin

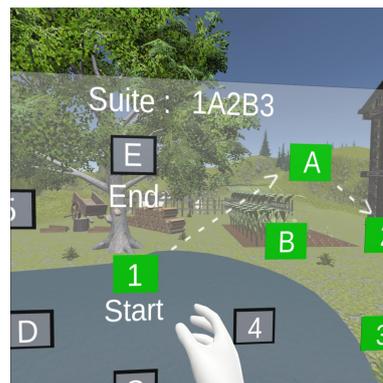


Figure 53 – Séquence logique



Figure 54 – Reconnaissance d'horloge

5.2.5.5 . Mémoire

Le *test des cinq mots* (Test de Dubois ou épreuve du MoCA) consiste à mémoriser et restituer oralement des mots avec ou sans indiciage. Dans notre épreuve les mots sont présentés une première fois seuls pour la mémorisation puis parmi une liste de mots pour la restitution (Figure 55).

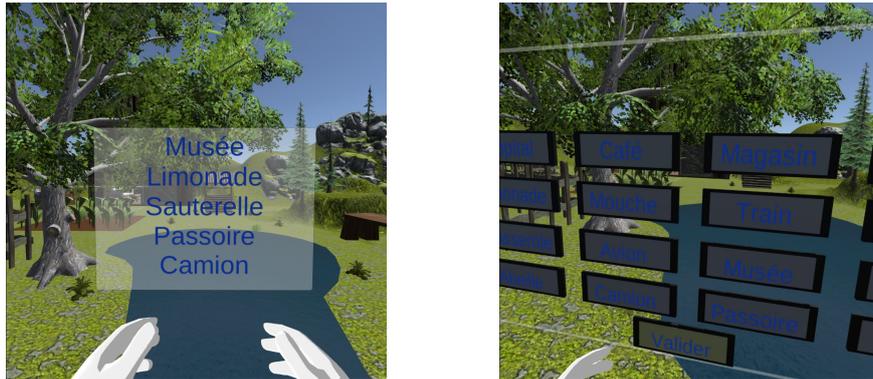


Figure 55 – Test des cinq mots

5.2.5.6 . Orientation temporo-spatiale

Initialement évaluée par des réponses orales, différentes scènes testent ici l'orientation (jour de la semaine, saison, lieu...) avec la nécessité d'appuyer sur la bonne réponse (Figure 56).



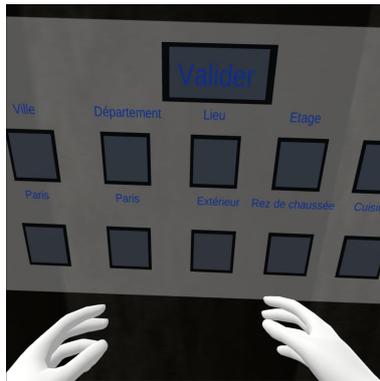


Figure 56 – Tâche d’orientation temporo-spatiale

5.2.6 . Discussion

Lors de la conception de cet outil immersif, notre premier objectif était de proposer une évaluation en **totale autonomie** (sans intervention d’un évaluateur extérieur). Le matériel devait permettre des mouvements libres avec un processeur intégré. L’Oculus Quest® répondait à ces caractéristiques (Chapitre 5.2.1). De plus, ce casque avait déjà été utilisé pour l’entraînement cognitif [180] mais aussi pour l’évaluation de la mémoire spatiale de sujets sains [181] et les capacités visuelles [182]; confortant ainsi notre choix.

Contrairement à un système de détecteur de mouvements habituel, le suivi et l’apparition des mains (sélection et manipulation) avec l’Oculus Quest® sont assurés grâce aux **deux manettes**. L’utilisateur doit appuyer sur les boutons pour effectuer les tâches. Cependant, les personnes présentant un trouble cognitif pourraient ne pas comprendre ce fonctionnement comparativement à un détecteur de mouvement potentiellement plus intuitif. L’intégration d’une tâche d’entraînement apparaissait donc essentielle afin que l’utilisateur puisse découvrir l’environnement ainsi que les actions de sélection et manipulation.

Compte-tenu des insuffisances actuelles dans les systèmes de reconnaissance vocale [157, 158], nous avons fait le choix de consignes orales et d’une sélection parmi plusieurs réponses affichées. Cette alternative résout partiellement le problème de reconnaissance vocale mais il existe une limite chez les utilisateurs avec un faible niveau d’éducation et des difficultés de lecture [183]. Pour autant, l’affichage de consignes écrites permet d’évaluer la mémoire visuelle.

Malgré ces limitations, cette nouvelle évaluation immersive couvre **plusieurs champs cognitifs** et est plus complète que la version non immersive

(Chapitre 4). Elle se base également sur des **tests classiques** et largement utilisés en pratique courante. Sa conception en auto-évaluation permet une utilisation plus simple et limite la mobilisation des ressources humaines.

Cet outil n'a cependant pas été testé au sein d'une population de patients (sains ou malades) et reste, pour le moment, à l'état de projet. Son étude au sein d'une large cohorte permettrait sa validation et sa diffusion en soins primaires.

Sur le plan sensoriel, le patient utilise ici son ouïe et sa vue pour explorer l'environnement et répondre aux questions. Précédemment nous avons abordé la notion d'écologie des tests cognitifs et la pertinence de la RV immersive dans l'évaluation dite écologique.

Dans la prochaine section, nous allons présenter un **prototype immersif multi-sensoriel** associant des éléments olfactifs et haptiques.

5.3 . PROTOTYPE D'ÉVALUATION OLFACTIVE ET HAPTIQUE

Compte-tenu des possibilités d'évaluation en RV des aptitudes instrumentales et de la capacité à y intégrer des interactions naturelles, nous avons décidé de concevoir un nouvel outil immersif en ajoutant deux autres fonctionnalités sensorielles : le toucher et l'olfaction.

5.3.1 . Choix de l'environnement

Afin de potentialiser l'immersion olfactive tout en évaluant les fonctions instrumentales, il fallait trouver une tâche du quotidien où les odeurs sont naturellement présentes. Nous avons ainsi choisi de créer une scène de préparation du **petit déjeuner**.

Craik et al. ont été les premiers à proposer la "Breakfast task" en 2006 [184] avec une étude sur *écran tactile* incluant des sujets sains jeunes et âgés (Figure 57). Leurs résultats ont montré un temps de préparation allongé et erreurs plus fréquentes dans le groupe des sujets âgés.

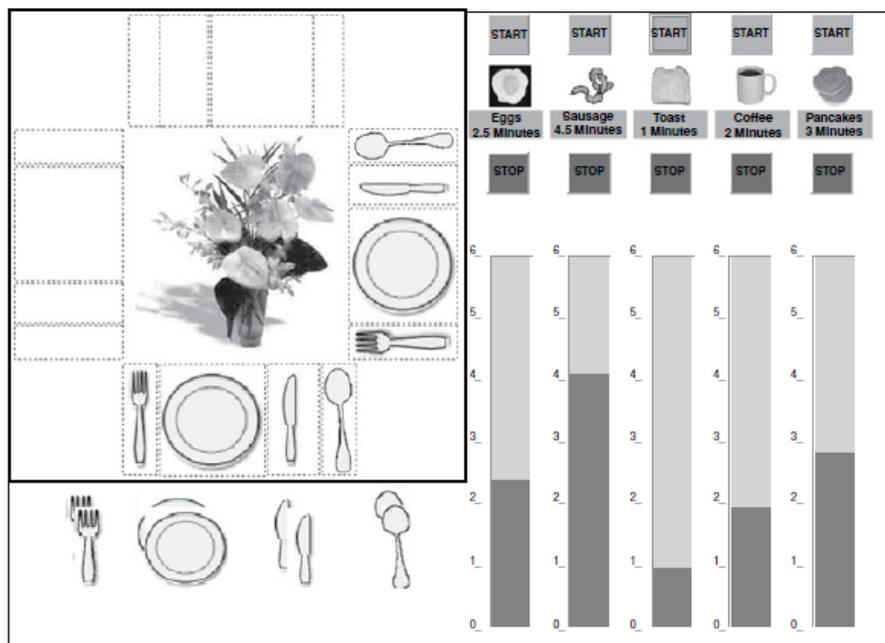


Figure 57 - Breakfast task [184]

Une autre étude a été publiée sur **écran tactile** par Giovannetti et al. en 2019 [185] dans l'évaluation du petit-déjeuner, le "Virtual Kitchen Challenge (VKC)". L'épreuve consistait à réaliser une tâche de préparation de petit-déjeuner et

de déjeuner à la fois sur la tablette mais également avec des *objets et aliments réels* (Figure 58). Trente-cinq sujets sains jeunes (n = 21) et âgés (n = 14; MMSE moyen à 27,57) ont été inclus. Il y avait plus d'erreurs chez les sujets âgés. La réussite au VKC était significativement associée aux performances à la tâche réelle et aux scores cognitifs.

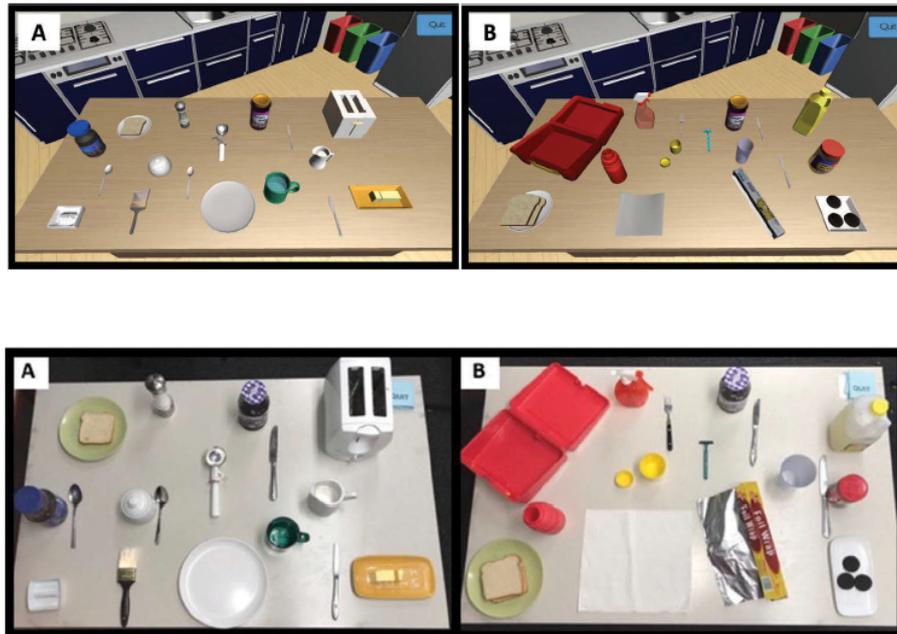


Figure 58 – Préparation de petit-déjeuner (A) et déjeuner (B) [185]

En 2014, Allain et al. ont utilisé une autre tâche avec la préparation de café, "The NonImmersive Virtual Coffee Task (NI-VCT)" [186]. Utilisant *un ordinateur simple (avec souris)*, des sujets sains et atteints de la MA ont été inclus (Figure 59). Les sujets atteints de MA avaient des performances moindres que les sujets sains. Il existait une corrélation entre les résultats à la NI-VCT et les tests cognitifs mais également avec le score IADL (Chapitre 3.4.3) [150].

D'autres auteurs comme Kosowicz et MacPherson ont repris la Breakfast Task [187]. Les modalités de réalisation étaient plus simples puisqu'il n'y avait pas de support informatique mais de la *vaisselle en carton* tout en reproduisant les mêmes tâches que l'étude initiale [184]. Des sujets sains (jeunes et âgés) ont été inclus mais les résultats n'ont pas montré de différence entre les groupes d'âge (temps de réalisation, erreur), suggérant un effet de l'outil numérique (tâche plus difficile en version numérique).



Figure 59 – The NonImmersive Virtual Coffee Task (NI-VCT) [186]

Il existe également une utilisation de la Breakfast Task dans l'*entraînement* des fonctions cognitives auprès de sujets âgés sains avec un *ordinateur* [188]. Les auteurs ont constaté une amélioration de la courbe d'apprentissage et du taux de réussite après plusieurs sessions d'entraînement.

La tâche du petit déjeuner est donc une épreuve validée par plusieurs études mais n'a **jamais été étudiée en RV immersive**. Cette activité du quotidien se déroule très souvent dans un environnement olfactif (boissons, fruits, odeurs de cuisson) et avec de nombreuses manipulations d'objets. Nous allons ainsi aborder la conception de cet outil dans un environnement virtuel avec ajout d'éléments olfactifs et haptiques.

5.3.2 . Conception du prototype

5.3.2.1 . Informations générales

La création de l'environnement virtuel a été réalisée grâce au logiciel Unity® version 2022.3.20.

Afin d'assurer un sentiment d'immersion complet, nous avons décidé de garder un test sur casque et avons choisi le **MétaQuest 2®**. Semblable à l'Oculus Quest®, il assure cependant le suivi des mains grâce à des manettes ou un détecteur de mouvement (caméra). Lorsque les programmes ont été chargés sur le casque, il peut fonctionner en **autonomie** sans nécessiter de connexion filaire.

Le casque permet une immersion visuelle et auditive de l'utilisateur. Pour ce prototype, il fallait donc ajouter deux autres matériels pour assurer la diffusion olfactive et le retour haptique.

5.3.2.2 . Diffuseur d'odeurs

Il existe différents systèmes de diffusion olfactive avec une intégration directe au casque de RV (Figure 60) [189] ou bien sous forme de masque en complément du casque (Figure 61) [190]. Dans un environnement de type cube immersif, il peut y avoir une diffusion d'une odeur ambiante.

Ces systèmes utilisent différents procédés pour libérer leur parfum :

- *vaporisation naturelle* : permet une libération peu intense sur le long terme. Le stockage peut se faire sous forme de solide, gel ou liquide. La libération intervient à travers un matériel poreux (coton, mèche en bois, etc.). La vaporisation naturelle peut être couplée à une source d'air pour accélérer le processus ou à une source chauffante pour générer de la fumée. Ce mode de diffusion permet un contrôle précis du flux odorant;
- *atomisation* : libération des molécules odorantes par une onde ultrasonique avec vaporisateur dans des micro-gouttelettes d'eau en suspension. C'est le cas des diffuseurs domestiques d'huiles essentielles.

Ces dispositifs intègrent également des **fonctions de modulation** de l'intensité ou de la durée via la ventilation ou le chauffage pour obtenir l'odeur désirée. La plupart des substrats se présentent sous forme liquide (huiles essentielles, parfum) plus rarement sous forme solide (cire) ou gazeuse.

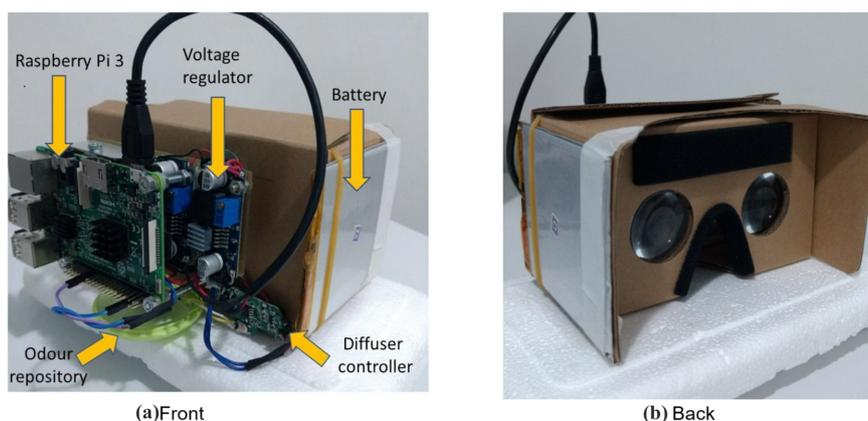


Figure 60 – Système de diffusion olfactive [189]

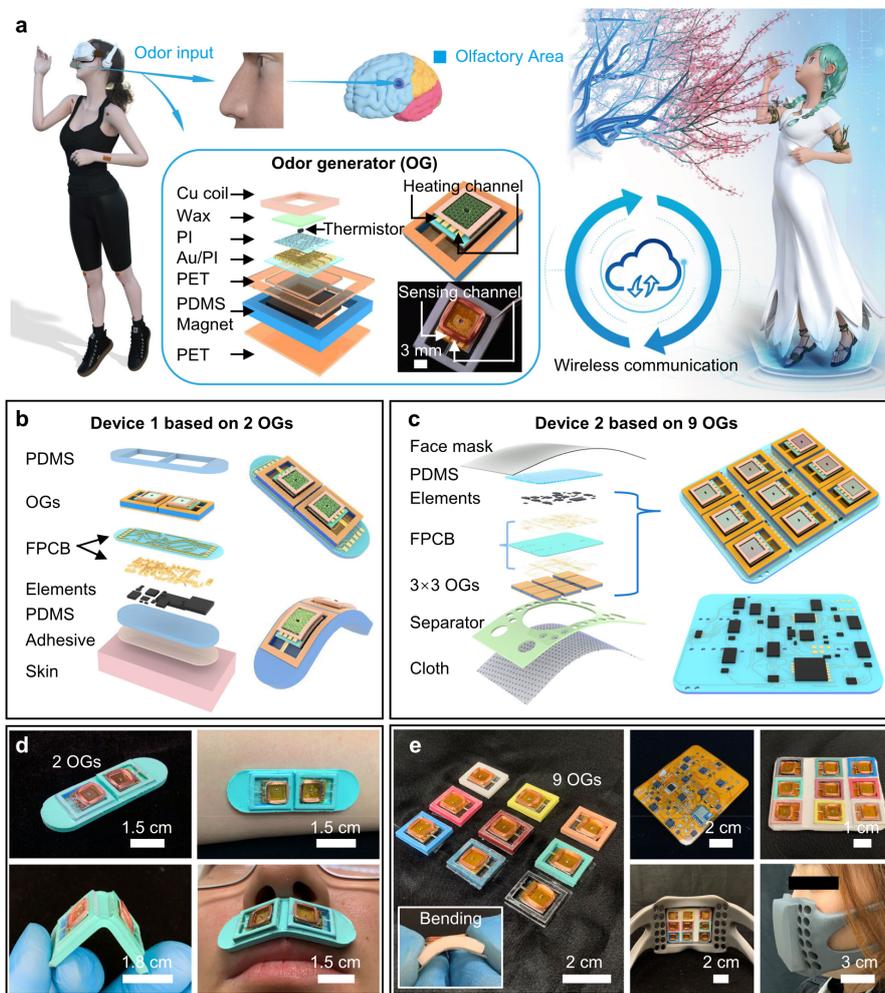


Figure 61 – Système de diffusion olfactive [190]

Pour la création de notre programme, nous avons choisi de collaborer avec la société française OLFY®¹ qui a développé un nouveau type de diffuseur spécifique à la réalité virtuelle.

Il s'agit d'un module externe au casque, connecté en filaire ou par voie Bluetooth (Figure 62). Le système de diffusion (Figure 63) est un atomiseur avec trois compartiments (trois flacons d'odeurs au choix).

Le logiciel fourni et développé par la société OLFY® permet de moduler la diffusion de l'odeur (durée, intensité et fréquence).

1. SAS OLFY – 6, rue Leonard de Vinci 53000 LAVAL
<https://olfy-official.com/>



Figure 62 - Système de diffusion par OLFY® [191]



Figure 63 - Système de diffusion par OLFY®

5.3.2.3 . Système haptique

Contrairement au premier test développé en RV immersive (Chapitre 5.2), il n'y a pas eu d'utilisation de manettes pour cette nouvelle évaluation.

Nous souhaitons un mode d'interaction plus naturel ainsi qu'un **retour haptique** direct lors de la manipulation et la sélection.

Dans la littérature, nous n'avons pas trouvé de publications concernant l'utilisation de matériels haptiques en RV immersive chez des sujets atteints de troubles cognitifs. Une seule étude, réalisée chez des sujets jeunes (âge moyen à 22,71 +/- 2,01 ans) a comparé des manettes classiques à des *gants de rétroaction* dans l'évaluation de la mémoire spatiale [192]. Ce type de gants est

composé de capteurs qui peuvent suivre les mouvements de doigts, appliquer et délivrer un retour vibrotactile lors de la saisie d'un objet (Figure 64). Au final, le temps de réalisation était moindre avec des manettes, sans différence significative dans le nombre d'erreurs de placement d'objets. Néanmoins les gants de rétroaction étaient plus appréciés grâce à *l'augmentation de la sensation de présence de l'objet virtuel*.



Figure 64 – Gants de rétroaction [192]

Pour la conception de notre nouvel outil, nous trouvions intéressant d'étudier l'ajout d'un système de retour haptique, raison pour laquelle des **gants haptiques** ont été choisis.

Il s'agit des gants Tactglove de B-Haptics®, adaptés pour une utilisation en réalité virtuelle (Figure 65). Chaque gant est composé de **six émetteurs** de vibration (un à chaque doigt et un au poignet). La connexion au casque de RV ainsi qu'à Unity® se fait grâce au Bluetooth. Le site internet de la marque donne accès à la console de configuration des gants (types de vibrations, durée, intensité). Cela permet d'adapter la vibration à chaque action dans l'environnement virtuel (durée, fréquence, intensité). Une action de préhension forte d'un objet virtuel pourrait se ressentir plus intensément grâce aux gants; de façon similaire une sensation plus longue lors d'une préhension prolongée serait également configurable.

En parallèle, nous avons gardé, de principe, le suivi des mains par les caméras de détection de mouvements.

5.3.2.4 . Scènes de jeu

L'environnement se présente sous la forme d'une cuisine, l'utilisateur assis face à une table où sont disposés des éléments pour la préparation d'un petit-déjeuner (Figure 66). Sur le centre de la table il y a un plateau autour duquel sont disposés trois tasses différentes, trois pichets, une assiette de sucre et des couverts.



Figure 65 – Gants haptiques®

Les instructions apparaissent à l'écran et sont délivrées oralement par le programme.

Un bouton bleu sur la gauche (Figure 66) permet de réinitialiser la scène (recommencer l'épreuve); le bouton rouge de droite servant à valider.

Le reste de l'environnement est inerte et sans possibilité d'interaction (manipulation ou sélection) par l'utilisateur.

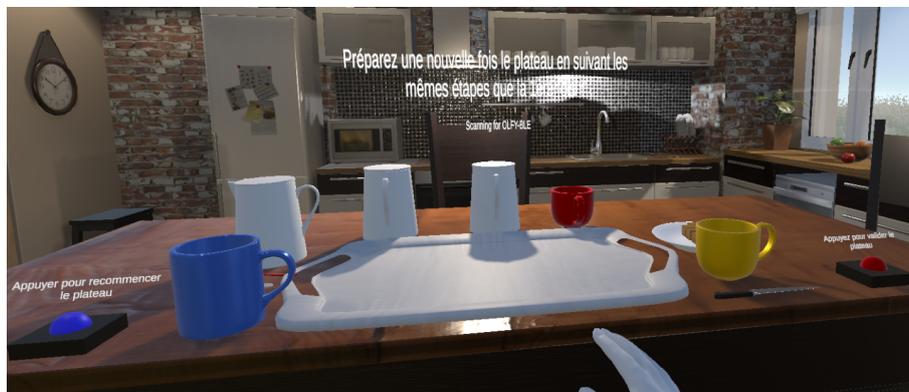


Figure 66 – Environnement de petit-déjeuner

Le scénario de l'épreuve s'articule en **trois temps** :

1. *préparation assistée* "pas à pas" d'un plateau de petit-déjeuner avec instructions données par le programme au fur et à mesure;
2. *tâche interférente* avec recherche de différences sur deux tableaux;
3. *préparation autonome* du plateau de petit-déjeuner sans instruction (restitution autonome).

Préparation assistée : L'utilisateur doit réaliser une série de mouvements (sélection et manipulation) pour préparer un plateau de petit-déjeuner. Chaque consigne est écrite dans l'environnement et délivrée oralement via le casque.

Les tâches à réaliser sont les suivantes (Figure 67) :

1. disposition des trois tasses sur le plateau (dessous de tasse de la même couleur déjà disposé);
2. remplissage des *trois* tasses avec la boisson correspondante
 - (a) saisie de la carafe : cette action va déclencher une odeur selon la carafe choisie. Nous avons sélectionné trois parfums de boissons habituelles d'un petit-déjeuner (café, chocolat, agrumes);
 - (b) identification de l'odeur;
 - (c) remplissage de la tasse correspondante (images apposées sur les tasses);
 - (d) repose de la carafe (fin de la diffusion de l'odeur).
3. dépôt d'un morceau de sucre dans la tasse de café;
4. dépôt de la cuillère dans la même tasse (*fin de l'épreuve*).

Dans ce nouvel environnement, lorsqu'une des mains de l'utilisateur saisit un objet, le gant émet des vibrations à chaque doigt de la main; permettant la sensation de préhension de l'objet virtuel.

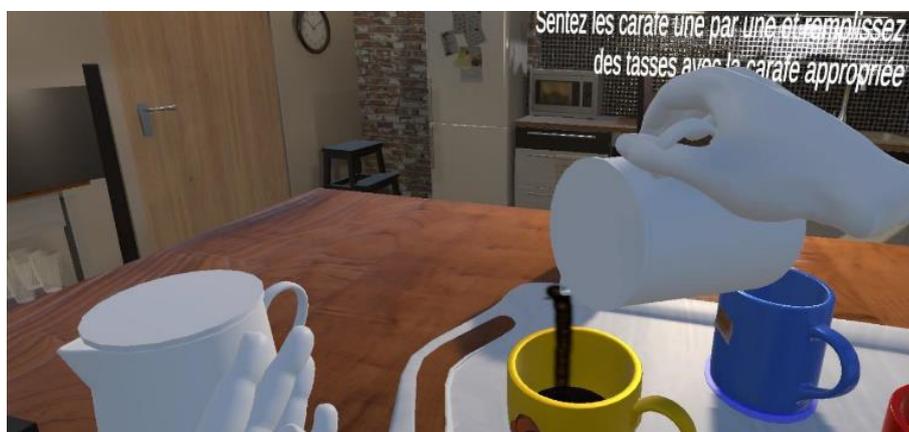


Figure 67 – Tâches virtuelles du petit-déjeuner

Tâche interférente : Cette scène a été intégrée entre la réalisation assistée et la réalisation autonome. Sur le principe du *rappel libre et différé* de mots (MMSE, MoCA ou test de Dubois), cela permet à l'utilisateur de se concentrer sur autre chose. Deux tableaux sont présentés à l'utilisateur qui doit trouver le maximum de différences (sept au total) dans un intervalle de 90 secondes. Pour sélectionner une erreur, il suffit de toucher le tableau à l'endroit voulu (Figure 68).



Figure 68 - Tâches interférente des 7 différences

Un autre type de vibrations a été implémenté pour le jeu des 7 différences. Dès lors que l'utilisateur touche le tableau (erreur trouvée), le gant vibre sur le doigt.

Préparation autonome : Dans cette dernière épreuve, l'utilisateur doit reproduire le même plateau qu'en phase assistée mais **sans indication écrite ou orale du programme**. Le bouton bleu permettra de recommencer l'action. Le test se termine lorsque le patient appuie sur le bouton "Valider" même si le plateau n'a pas été complètement restitué à l'identique (erreurs, oublis)

5.3.3 . Discussion

Les tests olfactifs dans le dépistage cognitif sont encore basés sur des reconnaissances directes d'odeurs en monde réel (Chapitre 2.2.5).

Une seule étude en *RV non immersive* réalisée sur 54 sujets jeunes (âge moyen = 22,8 +/- 2,3 ans) a montré une meilleure récupération du contexte épisodique dans un environnement odorant [193].

Une méta-analyse publiée en 2022 par Melo et al. a décrit les modalités sensorielles utilisées dans 105 études en RV (non immersive, semi immersive et immersive) [194]. Le total des études en RV immersive atteignait 42%, RV semi-immersive 20 % et RV non immersive 48 %.

Le premier résultat montre que la RV immersive tend très progressivement à devenir prépondérante face à la RV non immersive (Figure 69). Ces données sont concordantes avec la revue systématique de Pieri et al. [129], présentée dans l'état de l'art (Chapitre 3.3).

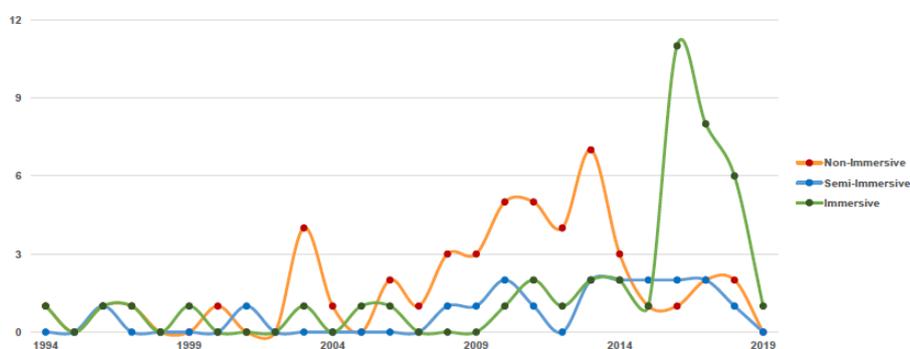


Figure 69 – Évolution du type de RV à travers le temps [194]

Dans ces études, la principale indication de la RV était une évaluation générale de satisfaction ou d'utilisabilité (52,4 %) suivie de loin par une indication pour des professionnels de santé (22,9 %). L'utilisation des modalités sensorielles restent ainsi peu développées dans un but médical (Figure 70).

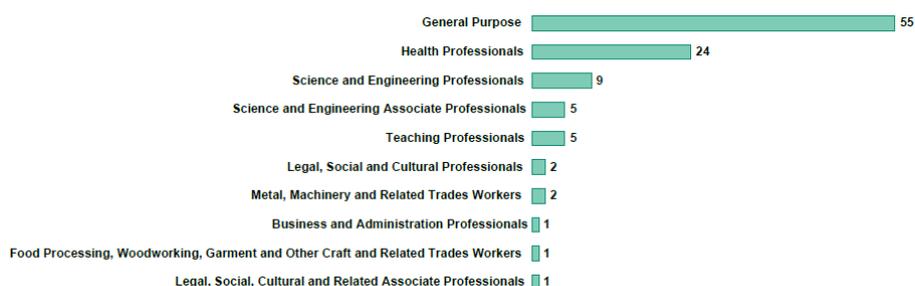


Figure 70 – Indication de la VR multi-sensorielle [194]

Enfin, les modalités sensorielles prépondérantes utilisées étaient "*visuel + audio + haptique*" (51,4 %), puis "*visuel + haptique*" (35,2 %). La quadruple association "*visuel + audio + haptique + odorat*" ne représentait que 1,9 % (Figure 71). Au total, le retour sensoriel haptique concernait 90 % des études quand l'utilisation des odeurs ne représentait que 13,4 % des études. Cette

différence peut s'expliquer par l'apparition récente de l'olfaction dans les environnements immersifs.

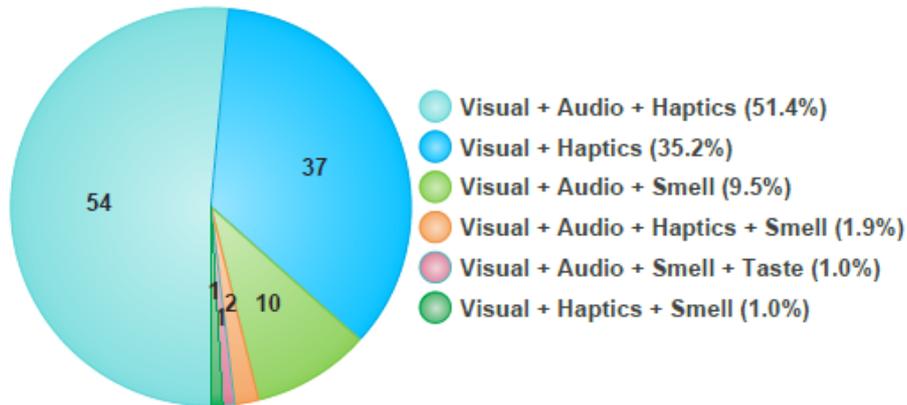


Figure 71 – Répartition des modalités sensorielles utilisées [194]

Seules deux études ont ainsi associé les modalités "*visuel + audio + haptique + odorat*" :

- Dinh et al (1999) [195] : étude sur 322 étudiants dans un environnement immersif représentant un espace de travail (bureaux). L'addition d'éléments sensoriels (notamment tactiles et auditifs) améliore la mémoire de l'environnement. Cette amélioration était moins marquée pour la modalité olfactive ;
- Ranasinghe et al (2018) [196] : étude en trois phases sur des jeunes adultes (moyenne d'âge inférieure à 30 ans) sur la reconnaissance d'odeurs en lien avec des saisons (fleurs, fruits, essences de bois). La reconnaissance était améliorée lorsque l'on associait le visuel, l'odeur, la sensation de vent (ventilateur intégré) et l'audio que les éléments sensoriels séparés.

Notre prototype est donc, à notre connaissance, le **premier** environnement immersif à **quatre modalités sensorielles** dans l'évaluation des troubles cognitifs. Il permet d'évaluer les praxies mais également la mémoire olfactive, ce que ne permet pas un outil non immersif.

L'ajout d'une modalité olfactive permettra d'évaluer si la présence d'une odeur facilite la mémorisation de la tâche (scénario avec et sans odeur). Comme dans l'étude de Firgiarini et al. [192], il sera également possible de comparer la réalisation de la tâche avec des gants haptiques, des manettes ou un détecteur de mouvement classique.

Bien que la création de l'environnement et l'implémentation des différentes fonctionnalités soient déjà bien avancées, il reste des **limitations techniques** à corriger.

Nous avons initialement fait le choix de trois odeurs qui nous paraissaient adaptées à une tâche de petit-déjeuner : café, agrumes et chocolat. Après réception des flacons de substrats odorants et malgré des adaptations du système de diffusion d'odeurs (intensité, flux), nous avons constaté que l'odeur de café était difficilement reconnaissable. En effet, l'odeur habituelle de café est une odeur de *substance chaude* (café chaud) et non une huile essentielle à froid. Après réflexion, nous pensons changer cette odeur pour un parfum de thé à la menthe qui est plus prononcé et reste connu de la plupart des utilisateurs. Afin de valider nos choix d'odeurs, nous souhaitons réaliser une *étude préalable de reconnaissance simple d'odeurs* auprès de sujets sains.

Par ailleurs, nous avons constaté des connexions parfois instables et variables entre les gants et le casque mais aussi entre le système de diffusion d'odeurs et le casque. La transmission initialement WiFi est passée par voie Bluetooth qui n'est pas toujours optimale. La programmation des outils, quant à elle, se passe bien et s'implémente sur Unity®. Ces ajustements techniques seront résolus en lien avec les entreprises commercialisant les produits.

Enfin, cet outil n'a pas été testé au sein d'une population de patients (sains ou malades) et reste, pour le moment, à l'état de projet. Son étude au sein d'une large cohorte permettrait sa **validation** et sa diffusion.

5.4 . CONCLUSION

Nous avons présenté la conception de deux nouvelles évaluations immersives pour le diagnostic des troubles cognitifs.

Le *premier environnement*, inspiré de questions issues du **MMSE, MoCA et 5 mots de Dubois**, permet d'évaluer plusieurs champs de la cognition à travers treize scènes successives. Les interactions naturelles étaient la navigation, la sélection et la manipulation avec une immersion sensorielle se limitant à la vue et l'ouïe.

Le *deuxième projet*, novateur, a intégré une **immersion sensorielle plus large** en intégrant un diffuseur d'odeur et des gants haptiques. La tâche cognitive du petit-déjeuner, déjà évaluée sur différents supports d'immersion, se voit ici prendre une dimension plus réelle et écologique par cette amélioration sensorielle. Malgré quelques difficultés techniques, le prototype est dans une phase de développement avancé.

Nous souhaitons des **auto-évaluations** dans les deux projets et y sommes parvenus. Néanmoins, une limitation subsiste puisque nous n'avons pas intégré de *système de reconnaissance vocale* en raison du risque d'erreur potentiel due à une mauvaise interprétation.

Ces deux nouveaux projets restent à l'état de développement puisqu'ils n'ont pas encore été évalués en population réelle. Afin de les valider, nous pourrions tout à fait envisager un schéma d'étude similaire à celui-ci de l'étude d'AlzVR avec trois groupes de patients (sains, MCI et MA).

6 - CONCLUSION

Face à un vieillissement de la population et à une augmentation attendue du nombre de patients atteints de troubles cognitifs comme la maladie d'Alzheimer, il est nécessaire de développer et favoriser l'accessibilité de la **détection en soins primaires**.

L'**état de l'art** exhaustif a permis de montrer que les outils non immersifs sont des moyens **pertinents et accessibles** pour diagnostiquer les troubles cognitifs. La revue systématique sur les interfaces tactiles propose une mise à jour substantielle des études répertoriées par rapport aux anciennes données publiées [144]. En RV immersive, les données sont moins nombreuses mais avec de bons résultats. Pour autant, ces outils sont restés au stade de publication et ne sont pas parvenus à se diffuser dans la pratique courante.

Le projet AlzVR allie la vision médicale gériatrique et les compétences d'une équipe universitaire spécialisée en interaction humain-machine (plus spécifiquement en réalité virtuelle et augmentée). Nous souhaitons faciliter le diagnostic cognitif et avons ainsi conçu et développé trois nouveaux outils d'auto-évaluation cognitive.

Le premier outil, sur **interface non immersive** (tablette), propose une **auto-évaluation rapide** à travers sept tâches cognitives inspirées de deux tests courants (MMSE et MoCA).

Les *premiers résultats d'utilisabilité* sur une population saine et jeune sont satisfaisants tant sur le temps de réalisation (moins de 3 minutes) que sur l'appréciation du dispositif (jugé "excellent").

Une **étude multi-centrique** est en cours (étude COGNUM-AlzVR) sur trois groupes de patients (sains, MCI et MA). L'extraction anticipée des résultats a montré des tendances encourageantes puisqu'une des tâches d'AlzVR (rappel différé) était significativement différente entre les groupes de patients. Ces données préliminaires devront être confirmées par une analyse sur la population globale à la fin des inclusions (prévue fin 2024).

Dans un second temps, nous avons présenté l'autre modalité en **réalité virtuelle immersive** avec la création **deux nouvelles auto-évaluations**.

Le premier environnement, explore plusieurs fonctions cognitives à travers

treize scènes en **immersion sensorielle bi-modale** (visuelle et auditive). De nouvelles fonctions cognitives comme le langage ou les praxies peuvent être évaluées dans ce test virtuel.

La deuxième modalité s'est orientée vers **l'évaluation écologique d'une tâche instrumentale** de préparation d'un petit-déjeuner. Pour cela, **l'immersion sensorielle** a été **presque complète** avec l'intégration d'un diffuseur d'odeurs et de gants haptiques au casque de RV classique. Il s'agit d'un prototype novateur jamais étudié dans l'évaluation cognitive.

Ces deux outils ne sont pas encore au stade de l'étude clinique, que nous souhaitons mettre en œuvre dans un second temps. En effet, seule une **intervention expérimentale au sein d'une population gériatrique** permettra d'évaluer la tolérance et l'utilisabilité de tels dispositifs mais également leur efficacité dans la détection des troubles cognitifs.

De nombreuses applications commerciales existent sur plateformes de téléchargement comme Apple iTunes® ou Google Play® mais ne sont pas utilisées en soins primaires.

L'**Organisation Mondiale de la Santé** a récemment développé et diffusé un tout nouveau programme numérique de dépistage destiné aux sujets âgés : le **programme ICOPE** (Integrated Care for Older People)¹. Cette application possède plusieurs questionnaires évaluant la nutrition, la vision, l'audition, l'humeur, la mobilité et la *cognition*.

L'application AlzVR souhaite proposer un programme de détection des troubles cognitifs accessible via l'interface tablette (également transposable sur téléphone) mais également explorer de nouvelles pistes diagnostiques avec son outil multi-sensoriel.

Bien qu'il n'existe pas de traitement curatif de la maladie d'Alzheimer, il est primordial de diagnostiquer les patients au plus tôt. Une prise en charge précoce permet d'accompagner les patients *et leurs aidants* dans le déclin cognitif et la perte d'autonomie progressive. De plus, les patients au stade léger sont une cible pour toutes les nouvelles études diagnostiques et thérapeutiques.

Il est indispensable de proposer de nouveaux outils numériques simples, rapides et accessibles. Nous espérons ainsi que le projet AlzVR trouve toute sa place dans cette démarche diagnostique que nous souhaitons au plus

1. <https://www.icope.fr/>

proche des professionnels et des patients.

La littérature nous montre que les outils digitaux ont également leur place dans la rééducation cognitive [197]. Au delà du diagnostic, AlzVR pourrait également intégrer de telles fonctionnalités rééducatives avec différents niveaux d'entraînement.

La simplicité des interfaces et des matériels permettront de diffuser ces nouveaux outils dans des consultations hospitalières, à domicile, dans des équipes mobiles spécialisées, ou bien encore dans des cabinets de médecine générale. À l'ère du développement de la télémédecine, l'intégration de tels outils dans les circuits de soins permettrait d'orienter les patients plus rapidement et plus efficacement.

Bien entendu, il faudra du temps pour changer les habitudes et accepter que le numérique puisse être un élément à part entière dans la prise en charge des troubles cognitifs, en complément et/ou remplacement des tests papier usuels. Cette évolution des pratiques passera par l'implication de professionnels motivés et des centres cliniques volontaires pour créer des réseaux efficaces.

7 - ANNEXES

7.1	Mini-Mental Status Examination	120
7.2	Montréal Cognitive Assessment (version 7.1)	122
7.3	Analyse qualité QUADAS-2	125
7.4	Résultats de la revue systématique (Caractéristiques démographiques et statistiques) des études sur smartphone ou tablette	128
7.5	Résultats de la revue systématique (Caractéristiques démographiques et statistiques) des études sur ordinateurs à écran tactile	138
7.6	Échelle ADL de Katz	142
7.7	Échelle IADL de Lawton et Brody	143
7.8	Questionnaire VES-13	145

7.1 . Mini-Mental Status Examination

Je vais vous poser quelques questions pour apprécier comment fonctionne votre mémoire. Les unes sont très simples, les autres un peu moins. Vous devez répondre du mieux que vous pouvez.

ORIENTATION (/10)

Quelle est la date complète d'aujourd'hui? (/5)

Si la réponse est incorrecte ou incomplète, posez les questions restées sans réponse, dans l'ordre suivant :

- En quelle année sommes-nous? (/1) En quelle saison? (/1)
 En quel mois? (/1) Quel jour du mois? (/1) Quel jour de la semaine? (/1)

Je vais vous poser maintenant quelques questions sur l'endroit où nous nous trouvons.

- Quel est le nom de l'Hôpital où nous sommes? (/1)
 Dans quelle ville se trouve-t-il? (/1)
 Quel est le nom du département dans lequel est située cette ville? (/1)
 Dans quelle province ou région est situé ce département? (/1)
 À quel étage sommes-nous ici? (/1)

APPRENTISSAGE (/3)

Je vais vous dire 3 mots; je voudrais que vous me les répétiez et que vous essayiez de les retenir car je vous les demanderai tout à l'heure.

- Cigare – Fleur – Porte (/1)
ou
 Citron – Clé – Ballon (/1)
ou
 Fauteuil – Tulipe – Canard (/1)

Répéter les 3 mots.

ATTENTION ET CALCUL (/5)

Voulez-vous compter à partir de 100 en retirant 7 à chaque fois?

- 93 (/1) 86 (/1) 79 (/1) 72 (/1) 65 (/1)

Pour tous les sujets, même pour ceux qui ont obtenu le maximum de points, demander : "voulez-vous épeler le mot MONDE à l'envers" : E D N O M

RAPPEL (/3)

Pouvez-vous me dire quels étaient les 3 mots que je vous ai demandé de répéter et de retenir tout à l'heure?

Cigare – Fleur – Porte (/1)

ou

Citron – Clé – Ballon (/1)

ou

Fauteuil – Tulipe – Canard (/1)

LANGAGE (/8)

Quel est le nom de cet objet? *Montrer un crayon (/1)*

Quel est le nom de cet objet? *Montrer une montre (/1)*

"Écoutez bien et répétez après moi : PAS DE MAIS, DE SI, NI DE ET" (/1)

Poser une feuille de papier sur le bureau, la montrer au sujet en lui disant : "écoutez bien et faites ce que je vais vous dire" (consignes à formuler en une seule fois) :

"Prenez cette feuille de papier avec la main droite" (/1)

"Pliez-la en deux" (/1)

"Et jetez-la par terre" (/1)

Tendre au sujet une feuille de papier sur laquelle est écrit en gros caractères : "FERMEZ LES YEUX" et dire au sujet :

"Faites ce qui est écrit" (/1)

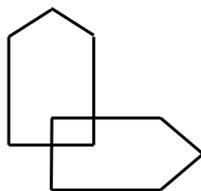
Tendre au sujet une feuille de papier et un stylo en disant :

"Voulez-vous m'écrire une phrase, ce que vous voulez, mais une phrase entière?" (/1)

PRAXIES CONSTRUCTIVES (/1)

Tendre au sujet une feuille de papier et lui demander :

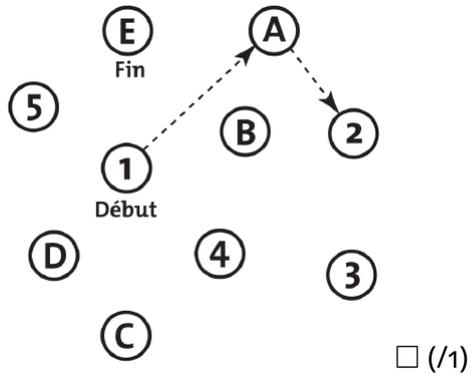
"Voulez-vous recopier ce dessin?" (/1)



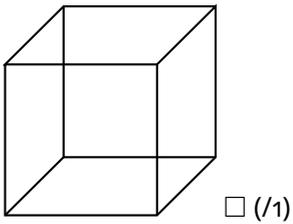
TOTAL : /30

7.2 . Montréal Cognitive Assessment (version 7.1)

VISUOSPATIAL/EXÉCUTIF (/5)



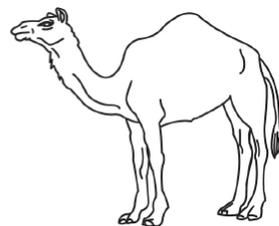
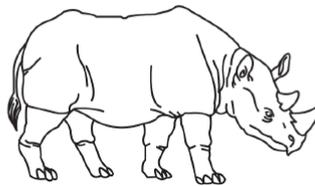
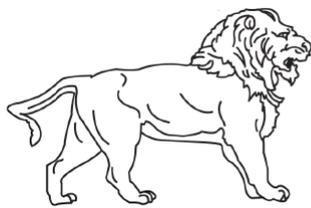
Copier le cube



Dessiner une horloge (11h10)

Contour (/1) Chiffres (/1) Aiguilles (/1)

DÉNOMINATION (/3)



MÉMOIRE (pas de point)

Lire la liste de lits, le patient doit répéter.

Faire deux essais même si le premier essai est réussi.

Faire un rappel 5 minutes après.

	VISAGE	VELOURS	ÉGLISE	MARGUERITE	ROUGE
1 ^{er} essai					
2 ^{eme} essai					

ATTENTION (/6)

Le patient doit la répéter : 2 1 8 5 4 (/1)

Le patient doit la répéter à l'envers : 7 4 2 (/1)

Lire la série de lettres. Le patient doit taper de la main à chaque lettre A. Pas de point si deux erreurs

F B A C M N A A J K L B A F A K D E A A J A M O F A A B (/1)

Soustraire série de 7 à partir de 100

93 86 79 72 65 (/3)

4 ou 5 soustractions correctes : **3 points**, 2 ou 3 correctes : **2 points**, 1 correcte : **1 point**, 0 correcte : **0 point**

LANGAGE (/3)

Répéter :

Le colibri a déposé ses œufs sur le sable (/1)

L'argument de l'avocat les a convaincus (/1)

Fluidité de langage. Nommer un maximum de mots commençant par la lettre "F" en 1 minute (N ≥ 11 mots) (/1)

ABSTRACTION (/2)

Similitude entre ex : banane - orange = fruits

train - bicyclette (/1)

montre - règle (/1)

RAPPEL (/5)

Points pour rappel SANS INDICES seulement

Mots rappelés SANS INDICES	VISAGE <input type="checkbox"/> (/1)	VELOURS <input type="checkbox"/> (/1)	ÉGLISE <input type="checkbox"/> (/1)	MARGUERITE <input type="checkbox"/> (/1)	ROUGE <input type="checkbox"/> (/1)
Indice					

ORIENTATION (/6)

Date (/1) Mois (/1) Année (/1) Jour (/1) Endroit (/1) Ville (/1)

TOTAL : /30

Ajouter 1 point si scolarité \leq 12 ans

7.3 . Analyse qualité QUADAS-2

Article	Biais				Applicabilité			Décision
	SP	TE	TR	DT	SP	TE	TR	
[43]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[44]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[45]	?	?	?	?	✗	✓	?	<i>Exclu</i>
[46]	✓	?	✗	✓	✗	✓	✗	<i>Exclu</i>
[47]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[48]	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[49]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[50]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[51]	?	?	✓	?	✓	✓	✓	<i>Exclu</i>
[52]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[53]	?	✓	?	✓	?	✓	✓	<i>Inclus</i>
[54]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[55]	?	✓	✓	✓	?	✓	✓	<i>Inclus</i>
[56]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[57]	?	✓	✗	✓	?	✓	✗	<i>Exclu</i>
[58]	✓	?	✓	✓	✓	?	✓	<i>Inclus</i>
[59]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[60]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[61]	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[62]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[63]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[64]	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	<i>Exclu</i>
[65]	✓	✓	?	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[66]	✓	✓	✓	?	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[67]	?	?	✗	?	✗	?	✗	<i>Exclu</i>
[68]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[69]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[70]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[71]	?	✓	NA	✓	✗	✓	NA	<i>Inclus</i>
[72]	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[73]	✓	✓	✓	✓	?	✓	✓	<i>Inclus</i>

SP : sélection des patients; TE : test évalué; TR : test de référence; DT : déroulement et temporalité

✓ : risque faible/préoccupation minimale

✗ : risque élevé/préoccupation élevée

? : risque incertain/préoccupation incertaine

Article	Biais				Applicabilité			Décision
	SP	TE	TR	DT	SP	TE	TR	
[74]	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	<i>Exclu</i>
[75]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[76]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[77]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[99]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[84]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[91]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[92]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[95]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[107]	✓	✓	✓	?	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[106]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[198]	?	?	✓	?	✓	✓	✓	<i>Exclu</i>
[98]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[100]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[87]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[103]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[199]	?	✓	✗	?	✗	✓	?	<i>Exclu</i>
[90]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[108]	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[200]	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	<i>Exclu</i>
[201]	✗	✗	?	?	✗	✗	?	<i>Exclu</i>
[82]	✓	✓	?	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[97]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[111]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[93]	✗	?	✓	?	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[88]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[202]	✓	✓	?	?	✓	✗	✓	<i>Exclu</i>
[96]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[104]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[203]	?	✓	✗	?	✓	?	?	<i>Exclu</i>
[110]	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	<i>Inclus</i>

SP : sélection des patients; TE : test évalué; TR : test de référence; DT : déroulement et temporalité

✓ : risque faible/préoccupation minimale

✗ : risque élevé/préoccupation élevée

? : risque incertain/préoccupation incertaine

Article	Biais				Applicabilité			Décision
	SP	TE	TR	DT	SP	TE	TR	
[109]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[89]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[101]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[105]	✓	✓	?	✗	✓	✓	✗	<i>Inclus</i>
[102]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[204]	?	?	?	?	✓	✓	✓	<i>Exclu</i>
[83]	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[85]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[86]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[80]	?	✓	✓	✓	?	✓	✓	<i>Inclus</i>
[78]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[79]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[112]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>
[81]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>Inclus</i>

SP : sélection des patients; TE : test évalué; TR : test de référence; DT : déroulement et temporalité

✓ : risque faible/préoccupation minimale

✗ : risque élevé/préoccupation élevée

? : risque incertain/préoccupation incertaine

7.4. Résultats de la revue systématique (Caractéristiques démographiques et statistiques) des études sur smartphone ou tablette

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[47] 	MA, MCI	38 MCI + MA (70,7 +/- 6,9) 105 SC (67,9 +/- 6,0)	Remote Digital Memory Composite	PACC5	0,82	0,72
[85] 	MCI	11 MCI-SD (65,5 +/- 1,7) 23 MCI-MD (72,1 +/- 1,5) 21 SC (66,6 +/- 1,2)	Virtual Supermarket Test	TN	0,82	0,95
[82] 	MCI	22 MCI (67,2 +/- 6,0) 22 SC (53,0 +/- 1,5)	Digital TMT Black and white	TMT Black and white	-	-
[86] 	MCI	47 MCI (67,9 +/- 0,8) 48 DCS (66,0 +/- 0,6)	Virtual supermarket Test	MMSE, Moca	0,76	0,91
[49] 	MCI	37 MCI (70,4 +/- 7,3) 52 SC (67,6 +/- 6,0)	Virtual supermarket	MMSE	0,74	0,85

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence

MCI-SD/MD : Simple Domaine/Multi-Domaine; PACC5 : Preclinical Alzheimer's Cognitive composite; SC : Sujets contrôles; TMT : Trail Making Test; TN : Tests neuropsychologiques

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[54]	MA, MCI MA ou MCI	29 MA (73,6 +/- 8,7) 42 MCI (71,7 +/- 7,3) 26 DCS (68,5 +/- 6,3)	Inbrain Cognitive	SNSB-II	0,82 0,81 0,85	0,83 (MA) 0,76 (MCI) 0,84 (MCI+MA)
[87]	DEM ou MCI MCI DEM	47 DEM (74,1 +/- 5,9) 46 MCI (73,4 +/- 6,7) 53 SC (70,4 +/- 5,9)	Episodix	Diagnostic	0,98 0,92 0,85	0,98 (DEM) 0,83 (MCI) 0,85 (MCI+DEM)
[88]	MA, MCI MA ou MCI	31 MA (74,2 +/- 6,3) 15 MCI (73,4 +/- 6,0) 48 SC (73,6 +/- 8,3)	JustTouch screen	MMSE	-	-
[89]	DEM et MCI	32 DEM (74,3 +/- 6,7) 67 MCI (74,1 +/- 4,5) 46 SC (72,3 +/- 3,9)	Five drawing tasks	MMSE	0,85 0,81	0,97 (DEM) 0,84 (MCI)

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence

DCS : déclin cognitif subjectif; DEM : démence; SC : Sujets contrôlés; SNSB-II : Seoul Neuropsychological Screening Battery-II

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[69] 	MA et MCI	27 MA (75,1 +/- 7,5) 65 MCI (74,5 +/- 4,9) 52 SC (72,6 +/- 3,8)	Five drawing tasks	TN	0,98 0,88	0,96 (MA) 0,76 (MCI)
[90] 	MCI	228 MCI (75,18 +/- 6,8) 296 SC (71,84 +/- 5,9)	CAMCI	MMSE	0,86	0,94
[91] 	DEM	50 DEM (75,9 +/- 5,6) 34 SC (70,7 +/- 5,0)	CADI	MMSE	0,96	0,77
[92] 	MA	27 MA (78,1 +/- 4,4) 27 SC (76,0 +/- 3,0)	CADi2	MMSE	0,93	0,93
[93] 	MA, MCI	20 MA (79,1 +/- 4,9) 16 MCI (70,9 +/- 8,1) 28 SC (75,6 +/- 7,1)	Episodix	Diagnostic	0,99 (MA) 0,99 (MCI) 0,96 (SC)	-

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence
CADI(2) : The Cognitive Assessment for Dementia (iPad version); CAMCI : The Computer Assessment of Mild Cognitive Impairment; DEM : démence; SC : Sujets contrôles; TN : Tests neuropsychologiques

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[70]	MPK, MA, MCI	27 MA + MCI (79,4 +/- 7,6) 29 SC (55,8 +/- 13,7)	UX-TMT	MMSE, MoCA	0,83	0,92
[94]	MCI	23 MCI (80,0 +/- 5,2) 23 SC (70,0 +/- 5,4)	Klondike Solitaire	MMSE	-	-
[52]	DEM, MCI	63 DEM (79,8 +/- 7,5) 54 MCI (78,4 +/- 7,6) 126 SC (70,0 +/- 9,3)	Electronic Cognitive Screen (EC-screen)	MoCA	0,79 0,82	0,78 (MCI + DEM) 0,76 (DEM)
[95]	DEM	201 DEM 85 possible DEM 324 SC	IDEA CS IDEA-IADL questionnaire	DSM V	0,88	0,51
[96]	DEM, MCI	47 DEM 93 MCI	BHA	Aβ	-	-

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence

Aβ : statut β-amyloïde; BHA : Brain Health Assessment; DEM : démence; DSM V : Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders 5th edition; IDEA-CS : Identification and Intervention for Dementia in Elderly Africans - Cognitive Screen; IDEA-IADL : Identification and Intervention for Dementia in Elderly Africans - Instrumental Activities of Daily Living; MPK : maladie de Parkinson; SC : Sujets contrôlés; UX-TMT : User eXperience-Trail Making Test

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[55] 	MPK, MCI	7 MPK 9 MCI 28 SC	Digital TMT	TICS, FAB, TMT	-	-
[71] 	MCI	4 MCI 6 SC	VR-IADL	-	-	-
[97] 	MCI	21 MCI (71,1 +/- NC) 17 MCI (71,1 +/- NC) 65 SC (70,2 +/- NC)	Miro Health	TICS, GDS, MMSE	-	-
[98]  	MA, MCI	79 MA 113 MCI 21 autres démences 283 SC	NMI	MMSE, MoCA, biomarqueur	-	-

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence

FAB : Frontal Assessment Battery; GDS : Global Deterioration Scale; MPK : maladie de Parkinson; Neuro-Motor Index; SC : Sujets contrôles; TICS : The Telephone Interview for Cognitive Status; TMT : Trail Making Test; VR-IADL : Virtual Reality - Instrumental Activities of Daily Living

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[44]	MCI	61 MCI (67,7 +/- 7,9) 154 SC (68,0 +/- 7,9)	Facememory®	MMSE	0,6-0,85	0,66-0,80
[68]	MA	17 MA (65) 17 SC (73)	SV-ROCFT	ROCFT	-	-
[65]	MA, MCI	26 MA (65,8 +/- 8,2) 43 MCI (61,6 +/- 9,6) 12 SC (58,3 +/- 14,6)	Tree drawing Test (TDT)	MMSE	0,93 0,87 0,78	0,87 (MA) 0,6 (MCI) 0,73 (MCI+MA)
[77]	MA, MCI	20 MA (69,6 +/- 6,1) 30 MCI (65,3 +/- 6,6) 20 SC (66,9 +/- 9,4)	DVCT	MMSE	0,8 0,83	0,95 (MA) 0,55 (MCI)
[99]	MA, MCI	106 MA (71,4 +/- 8,4) 138 MCI (70,8 +/- 8,4)) 137 SC (69,6 +/- 7,8)	dCDT	CERAD	0,91 0,85	0,94 (MA) 0,77 (MCI)

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence

CERAD : The Consortium to Establish a Registry for Alzheimer's Disease; dCDT : digital Clock Drawing Task; DVCT : Digitizing visuospatial construction task; SC : Sujets contrôles; (SV)-ROCFT : (Simplified Version) Rey-Osterrieth Complex Figure Test; TN : Tests neuropsychologiques

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[58] 	MA, MCI	36 MA (72,6 +/- 8,6) 32 MCI (65,7 +/- 11,5) 24 SC (60,8 +/- 10,7)	TDT	CDT	0,9	0,67
[66] 	MA, MA ou MCI	23 MA (72,6 +/- 7,9) 12 MCI (63,5 +/- 6,5) 17 SC (70,2 +/- 7,4)	Figures copy CDT et écriture	CAMCOG-R	1,00 1,0	1,00 (MCI) 0,9 (MCI+MA)
[100] 	MA, MCI, MA ou MCI	56 MA (72,7 +/- 9,2) 64 MCI (67,9 +/- 11,2) 67 SC (65,9 +/- 10,3)	dTDT	MMSE et CDT	0,86 0,56 0,78	0,82 (MA) 0,83 (MCI) 0,77 (MCI+MA)
[101] 	MA, DCL	47 MA+MCI (73,2 +/- 6,6) 27 DCL + MCI (75,1 +/- 5,0) 49 SC (72,3 +/- 3,8)	Five drawing tasks	TN	-	-

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence

CAMCOG-R : Cambridge Cognitive Examination - revised; CDT : Clock Drawing Task; SC : Sujets contrôlés; (d)TDT : (digital)Tree Drawing Test

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[63]	MA, MCI	10 MA (76,7 +/- 6,0) 25 MCI (75,9 +/- 5,3) 36 SC (70,0 +/- 5,0)	TMT et CDT	MMSE	0,19	1,00
[53]	MA, MCI	30 MA (77,7 +/- 7,0) 59 MCI (67,51 +/- 6,30) 89 SC (62,6 +/- 5,9)	ROCFT	diagnostic	-	-
[73]	DEM ou MCI	12 DEM (78,6 +/- 4,0) 49 MCI (78,0 +/- 5,4) 22 SC (76,2 +/- 4,2)	dTMT et d-Bells test	TMT et Bells paper test	-	-
[72]	MA ou MCI	50 DEM (70,5 +/- 10,6) 50 MCI (67,7 +/- 10,8) 50 SC (68,0 +/- 8,2)	MemTrax	MoCA-BJ	0,72	0,84 (MCI + AD)

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence

CDT : Clock Drawing Task; MoCA-BJ : MoCA (version Pékin); ROCFT : Rey-Osterrieth Complex Figure Test.

SC : Sujets contrôles; (d)TMT : (digital) Trail Making Test

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[62] 	MCI, DEM-V	27 DEM-V (74,2 +/- 3,4) 160 MCI (74,2 +/- 5,0) 74 SC (75,4 +/- 2,7)	SASG	MoCA, IFR, DFR	0,82 0,77	0,92 (DEM-V) 0,73 (MCI)
[102] 	MA, MCI	124 MA (75,6 +/- 5,9) 41 MCI (75,3 +/- 6,5) 75 SC (75,1 +/- 6,1)	TPST	MMSE HDS-R	-	-
[76] 	MA, MCI	21 MA (76,1 +/- 5,0) 35 MCI (73,8 +/- 5,5) 41 SC (71,7 +/- 4,6)	CANS-MCI	MoCA	1,0 0,81	0,97 (MA) 0,73 (MCI)
[80] 	MCI	93 MCI 73 SC	Inbrain CST	CERAD-K	-	-

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence

CANS-MCI : The Computer-Administered Neuropsychological Screen for Mild Cognitive Impairment; CERAD-K : Consortium to Establish a Registry for Alzheimer's Disease Assessment Packet (Korean version); DEM-V : démence vasculaire, DFR : Delayed Free recall; IFR : Immediate Free Recall; Inbrain CST : Inbrain cognitive screening test; HADS-R : Hasegawa dementia scale-revised; SASG : The Smart Aging Serious Game; SC : Sujets contrôles; TPST : Touch-panel Screening Tests

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[79]	MCI	30 MCI (69,23 +/- 5,88) 30 SC (66,07 +/- 7,93)	DE-FIH	MMSE	-	-
[78]	MCI	61 MCI (70,98 +/- 5,846) 59 SC (67,90 +/- 6,185)	TN + montre connectée	MMSE, MoCA	0,87	-
[81]	MCI	248 MCI 579 SC	EOMciSS AD8	MoCA, IADL	0,849	0,851

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence

AD8 : The Eight-item Informant Interview to Differentiate Aging and Dementia; DE-FIH : Digital Evaluation Fingertip Interaction Handwriting; EOMciSS : Efficient Online MCI Screening System; SC : Sujets contrôles; TN : Tests neuropsychologiques

7.5. Résultats de la revue systématique (Caractéristiques démographiques et statistiques) des études sur ordinateurs à écran tactile

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[60]	MA	72 MA (80,0 +/- 5,1) 102 SC (77,1 +/- 5,8)	CTB MSP-1000	diagnostic	0,96	0,86
[61]	MA	34 MA (79,2 +/- 7,9)	TDAS	ADAS-Cog	-	-
[84]	DEM, MCI	336 MA (65,9 +/- NC) 137 MCI (56,6 +/- NC) 367 SC (64,9 +/- NC)	C-ABC	MMSE	0,83 0,77	0,72 (MA) 0,64 (MCI)
[50]	MCI	32 MCI (76,7 +/- 5,3) 107 SC (76,5 +/- 3,0)	SASG	MoCA, FCSRT, TMT A et B	0,84	0,755 0,64
[103]	MCI	34 MCI (77,6 +/- 6,3) 64 SC (74,0 +/- 7,3)	MITS-L LASSI-L	MMSE	0,86	0,84

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence
 ADAS-Cog : Alzheimer's Disease Assessment Scale Alzheimer's-cognitive subscale; C-ABC : Computerized Assessment Battery for cognition; CTB : Computerized Test Battery; FCSRT : The Free and Cued Selective Reminding Test; LASSI-L : The Loewenstein-Acevedo Scales for Semantic Interference and Learning; MITS-L : Miami Test of Semantic Interference and Learning; SASG : The Smart Aging Serious Game; SC : Sujets contrôles; TDAS : Touch Panel-type Dementia Assessment Scale; TMT : Trail Making Test

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[75]	MA, MCI	29 MA (78,1 +/- 5,2) 22 MCI (72,0 +/- 9,6) 55 SC (72,6 +/- 7,3)	Pas de nom	DSM III-R et critères NINCDS-ADRDA	0,82	0,87
[43]	MCI	15 MCI (80,9 +/- 7,2) 20 SC (77,4 +/- 4,0)	CANS-MCI	ACER, MoCA	0,89	0,73
[104]	MA	18 MA (77,8 +/- 6,2) 20 SC (74,6 +/- 5,9)	Jeu sérieux	diagnostic	-	-
[105]	MA, MCI	42 MA (71,5 +/- 9,0) 22 MCI (73,5 +/- 5,9) 35 SC (67,8 +/- 9,6)	Brain Check Battery	none	0,88 0,86 0,83	0,94 (MA) 0,83 (MCI) 0,77 (MCI + MA)
[106]	MCI	18 MCI (71,0 +/- 5,4) 100 SC (66,3 +/- 7,8)	TAM battery	TN	-	-

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence
ACE-R : Addenbrooke's Cognitive Examination-Revised; CANS-MCI : The Computer-Administered Neuropsychological Screen for Mild Cognitive Impairment; DSM-III : Diagnostic and Statistical Manual (3rd version); NINCDS-ADRDA : National Institute of Neurological and Communicative Disorders and Stroke and the Alzheimer's Disease and Related Disorders Association; SC : Sujets contrôlés; TN : Tests neuropsychologiques

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[48] 	MCI ou MA	24 MCI + MA (71,5 +/- 10,3) 37 SC (65,5 +/- 9,2)	SATURN	MoCA	0,92	0,88
[83] 	DEM	14 DEM (72,5 +/- 9,9) 9 SC (81,8 +/- 4,8)	Dépistage cognitif mobile	MoCA	-	-
[107] 	MCI	74 MCI (74,4 +/- 6,5) 103 SC (74,9 +/- 7,0)	mSTS-MCI	MoCA-K	1,00	0,99 0
[108] 	DEM	40 DEM (76,5 +/- 12,5) 20 SC (72,2 +/- 12,0)	CCS	MoCA	-	-
[109] 	MCI, MA, MA ou MCI	84 MA (76,5 +/- 5,9) 129 MCI (76,5 +/- 7,5) 112 SC (74,7 +/- 6,9)	e-CT	K-T	0,77	0,806

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité ; Sp : spécificité ; TD : test digital ; TR : test de référence

CCS : Computerised cognitive screening ; DEM : dementia ; e-CT : tablet-based cancellation test ; K-T : paper-and-pencil cancellation test ; MoCA-K : MoCA (Korean Version) ; mSTS-MCI : The mobile screening test system for screening mild cognitive impairment ; SATURN : Self-Administered Tasks Uncovering Risk of Neurodegeneration ; SC : Sujets contrôlés ;

Article	Évènement	Participants †	TD	TR	Se	Sp
[110] 	MCI	59 MCI (78,2 +/- 8,1) 101 SC (70,5 +/- 8,6)	CoCoSc	MoCA	0,78	0,69
[59] 	MA, MCI, MA ou MCI	36 MA (80,0 +/- 11,8) 41 SC (75,0 +/- 12,5)	-	MMSE	-	-
[111] 	DEM	113 participants (70,68 +/- 9,31)	Co-Wis SNSB-II	K-MMSE,	0,83	0,83
[112] 	MCI	46 MCI (70,00) 46 SC (68,00)	Smart 2-min mobile Alerting Method	MMSE	-	-

† nombre (âge moyen +/- écart type)

Se : sensibilité; Sp : spécificité; TD : test digital; TR : test de référence

CoCoSc : Computerized Cognitive Screen; Co-Wis : Computer-Based Dementia Assessment Contents; MMSE-K : MMSE (Korean Version); SC : Sujets contrôles; SNSB-II : Seoul Neuropsychological Screening Battery-II

7.6 . Échelle ADL de Katz

Cette échelle, développée par Katz et al. [149], évalue l'autonomie sur **six** tâches de la vie quotidienne avec une pondération allant de 0 (non autonome) à 1 (totalement autonome) pour chaque item.

Hygiène corporelle

- 1 – Autonome
- 0,5 – Aide partielle
- 0 – Dépendant

Habillage

- 1 – Autonome pour le choix des vêtements et l'habillage
- 0,5 – Autonome pour le choix des vêtements, l'habillage mais a besoin d'aide pour se chausser
- 0 – Dépendant

Toilettes

- 1 – Autonome pour aller aux toilettes, se déshabiller et se rhabiller ensuite
- 0,5 – Doit être accompagné ou a besoin d'aide pour se déshabiller et se rhabiller
- 0 – Ne peut aller aux toilettes seul

Locomotion

- 1 – Autonome
- 0,5 – A besoin d'aide
- 0 – Grabataire

Continence

- 1 – Continent
- 0,5 – Incontinence occasionnelle
- 0 – Incontinent

Repas

- 1 – Mange seul
- 0,5 – Aide pour couper la viande ou peler les fruits
- 0 – Dépendant

Score total (/6) =

7.7 . Échelle IADL de Lawton et Brody

Cette échelle, développée par Lawton et Brody [150], évalue les capacités instrumentales sur **huit** activités de la vie quotidienne avec une pondération binaire de 0 (non autonome) ou 1 (totalement autonome) pour chaque item.

Aptitude à utiliser le téléphone

- 1 - Se sert du téléphone de sa propre initiative, cherche les numéros, les compose
- 1 - Compose quelques numéros bien connus
- 1 - Répond au téléphone, mais ne compose pas
- 0 - N'utilise pas du tout le téléphone

Faire les courses

- 1 - Fait toutes les courses tout seul
- 0 - Fait les courses lui-même pour les petits achats
- 0 - A besoin d'accompagnement pour toutes les courses
- 0 - Totalement incapable de faire les courses

Préparation des aliments

- 1 - Planifie, prépare et sert des repas équilibrés de manière indépendante
- 0 - Prépare des repas équilibrés s'il dispose des ingrédients
- 0 - Réchauffe des repas préparés et les sert ou prépare des repas mais n'assure pas une alimentation suffisamment équilibrée
- 0 - Les repas doivent lui être préparés et servis

Ménage

- 1 - S'occupe seul du ménage ou le fait avec une aide occasionnelle (travaux ménagers lourds)
- 1 - Exécute des tâches quotidiennes légères comme faire la vaisselle, refaire les lits
- 1 - Exécute des tâches journalières, mais n'arrive pas à maintenir un niveau acceptable de propreté
- 1 - A besoin d'aide pour toutes les tâches ménagères
- 0 - Ne participe absolument pas aux tâches ménagères

Lessive

- 1 - Fait la lessive lui-même
- 1 - Lave le petit linge, les chaussettes, les bas, etc
- 0 - La lessive doit être réalisée par une tierce personne

Transport

- 1 – Voyage seul en utilisant les transports en commun ou utilise sa propre voiture
- 1 – Organise lui-même ses déplacements avec un taxi, mais n'utilise pas les transports en commun
- 1 – Utilise les transports en commun, s'il est aidé ou accompagné
- 0 – les déplacements reposent sur le recours au taxi ou à la voiture avec l'aide d'une tierce personne
- 0 – Ne se déplace absolument pas

Gestion thérapeutique

- 1 – Assure la préparation et la prise des médicaments à la dose correcte et aux heures appropriées
- 0 – Gère la prise des médicaments si ceux-ci ont été préalablement préparés
- 0 – Est incapable de préparer et prendre seul ses médicaments

Capacité à gérer ses finances

- 1 – Règle lui-même de manière autonome ses affaires financières (budget, établissement de chèques, paiement du loyer et des factures, aller à la banque), contrôle ses revenus
- 1 – Assure les achats quotidiens, mais a besoin d'aide pour les opérations bancaires, les achats importants, etc
- 0 – Incapable de gérer les affaires financières

Score total (/8) =

7.8 . Questionnaire VES-13

1- AGE

- 75-84 ans (1 point)
- 85 et plus (3 points)

2- SANTÉ

D'une manière générale, par rapport aux personnes de votre âge, trouvez-vous que votre santé est :

- Mauvaise (1 point)
- Assez bonne (1 point)
- Bonne
- Très bonne
- Excellente

3- DIFFICULTÉS PHYSIQUES

*En **moyenne**, quelles difficultés rencontrez-vous pour effectuer les activités physiques suivantes ?*

	0	1	2	3	4
a) vous pencher en avant, vous accroupir ou vous agenouiller					
b) soulever ou porter des objets d'au moins 4,5 kg					
c) lever ou étendre les bras au-dessus niveau de vos épaules					
d) écrire ou manipuler et saisir de petits objets					
e) marcher sur une distance de 400 mètres					
f) faire des tâches ménagères assez physiques comme nettoyer le sol ou faire les vitres					

- 0 = pas de difficultés ; 1 = peu de difficultés ;
2 = quelques difficultés ; 3 = beaucoup de difficultés ;
4 = incapable de le faire

Attribuez 1 point chaque fois qu'une **case colorée** est cochée dans la section 3 (questions a à f). **Maximum de 2 points.**

4- AUTONOMIE

À cause de votre état de santé ou de votre état physique, avez-vous des difficultés pour...

a) faire vos courses personnelles (ex : acheter des produits de toilette ou des médicaments)?

OUI >>> vous faites-vous aider? OUI* NON

NON

Je ne le fais pas

>>> Est-ce à cause de votre état de santé? OUI* NON

b) gérer votre argent (ex : faire vos comptes ou payer les factures)?

OUI >>> vous faites-vous aider? OUI* NON

NON

Je ne le fais pas

>>> Est-ce à cause de votre état de santé? OUI* NON

c) vous déplacer dans une pièce en marchant (même en utilisant une canne ou un déambulateur)?

OUI >>> vous faites-vous aider? OUI* NON

NON

Je ne le fais pas

>>> Est-ce à cause de votre état de santé? OUI* NON

d) faire de petites tâches ménagères (ex : faire la vaisselle, ranger ou faire de petits travaux de nettoyage)?

OUI >>> vous faites-vous aider? OUI* NON

NON

Je ne le fais pas

>>> Est-ce à cause de votre état de santé? OUI* NON

e) prendre un bain ou une douche?

OUI >>> vous faites-vous aider? OUI* NON

NON

Je ne le fais pas

>>> Est-ce à cause de votre état de santé? OUI* NON

Attribuez 4 points pour une ou plusieurs réponses marquée(s) d'un astérisque (*) pour les questions de la section 4 (questions a à e).

BIBLIOGRAPHIE

1. OMS. Vieillesse et santé. 2022. Available from: who.int
2. INSEE. Tableau de bord de l'économie française. Démographie. Available from: insee.fr
3. Cusset P, d'Albis H, Navaux J et Pelletan J. « Protection sociale : qui paie le coût du vieillissement de la population? », La note d'analyse de France Stratégie. 2021; 103:1-16. doi : [10.3917/lna.103.0001](https://doi.org/10.3917/lna.103.0001)
4. INSEE. Portail social. État de santé de la population et perte d'autonomie. Available from: insee.fr
5. Assurance Maladie. Data pathologies ameli. Available from: [data . ameli.fr/pages/data-pathologies](http://data.ameli.fr/pages/data-pathologies)
6. Santé Publique France. Maladie d'Alzheimer et autres démences. Available from: santepubliquefrance.fr
7. OMS. Démence. 2023. Available from: who.int
8. Blanchet M. L'accès au diagnostic de la maladie d'Alzheimer en milieu rural. Sciences sociales et santé. 2020; 38:5-33. doi : [10 . 1684 / sss . 2020.0181](https://doi.org/10.1684/sss.2020.0181)
9. Conseil national de l'ordre des médecins. La démographie médicale. Available from: conseil-national.medecin.fr
10. Yang K, Hu Y et Qi H. Digital Health Literacy : Bibliometric Analysis. Journal of Medical Internet Research. 2022 Jul 6; 24:e35816. doi : [10 . 2196/35816](https://doi.org/10.2196/35816)
11. Wang X et Luan W. Research progress on digital health literacy of older adults : A scoping review. Frontiers in Public Health. 2022; 10:906089. doi : [10 . 3389 / fpubh . 2022 . 906089](https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.906089)
12. Nielsen J. Usability Engineering. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1994
13. Rosson MB et Carroll JM. Human Computer Interaction Handbook. 3ème. T. Scenario-Based Design. CRC Press, 2012
14. American PA. Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders. DSM Library, American Psychiatric Publishing, Inc. 2013
15. Petersen RC, Smith GE, Waring SC, Ivnik RJ, Kokmen E et Tangelos EG. Aging, memory, and mild cognitive impairment. International Psychogeriatrics. 1997; 9 Suppl 1:65-9. doi : [10 . 1017 / s1041610297004717](https://doi.org/10.1017/s1041610297004717)

16. Janssen J, Koekkoek PS, Moll van Charante EP, Jaap Kappelle L, Biessels GJ et Rutten GEHM. How to choose the most appropriate cognitive test to evaluate cognitive complaints in primary care. *BMC Family Practice*. 2017 Dec 16; 18:101. doi : [10.1186/s12875-017-0675-4](https://doi.org/10.1186/s12875-017-0675-4)
17. Pinto TCC, Machado L, Bulgacov TM, Rodrigues-Júnior AL, Costa MLG, Ximenes RCC et Sougey EB. Is the Montreal Cognitive Assessment (MoCA) screening superior to the Mini-Mental State Examination (MMSE) in the detection of mild cognitive impairment (MCI) and Alzheimer's Disease (AD) in the elderly? *International Psychogeriatrics*. 2019 Apr; 31:491-504. doi : [10.1017/S1041610218001370](https://doi.org/10.1017/S1041610218001370)
18. Folstein MF, Folstein SE et McHugh PR. "Mini-mental state". A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*. 1975 Nov; 12:189-98
19. Perte de mémoire : bilan mémoire et traitement. Available from: <https://www.ameli.fr/assure/sante/themes/troubles-memoire/consultation-traitement>
20. Nasreddine ZS, Phillips NA, Bédirian V, Charbonneau S, Whitehead V, Collin I, Cummings JL et Chertkow H. The Montreal Cognitive Assessment, MoCA : a brief screening tool for mild cognitive impairment. *Journal of the American Geriatrics Society*. 2005 Apr; 53:695-9. doi : [10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x](https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x)
21. Ciesielska N, Sokołowski R, Mazur E, Podhorecka M, Polak-Szabela A et Kędziora-Kornatowska K. 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. *Psychiatria Polska*. 2016 Oct 31; 50:1039-52. doi : [10.12740/PP/45368](https://doi.org/10.12740/PP/45368)
22. Dubois B, Touchon J, Portet F, Ousset PJ, Vellas B et Michel B. ["The 5 words" : a simple and sensitive test for the diagnosis of Alzheimer's disease]. *Presse Medicale (Paris, France : 1983)*. 2002 Nov 9; 31:1696-9
23. Reisberg B, Ferris SH, Leon MJ de et Crook T. The Global Deterioration Scale for assessment of primary degenerative dementia. *The American Journal of Psychiatry*. 1982 Sep; 139:1136-9. doi : [10.1176/ajp.139.9.1136](https://doi.org/10.1176/ajp.139.9.1136)
24. Berg L. Clinical Dementia Rating. *The British Journal of Psychiatry : The Journal of Mental Science*. 1984 Sep; 145:339
25. Alzheimer A, Stelzmann RA, Schnitzlein HN et Murtagh FR. An English translation of Alzheimer's 1907 paper, "Über eine eigenartige Erkrankung der Hirnrinde". *Clinical Anatomy (New York, NY)*. 1995; 8:429-31. doi : [10.1002/ca.980080612](https://doi.org/10.1002/ca.980080612)
26. Alzheimer's Disease International (ADI). Available from: <https://www.alzint.org/>

27. Congdon EE et Sigurdsson EM. Tau-targeting therapies for Alzheimer disease. *Nature Reviews Neurology*. 2018 Jul; 14. Number : 7 Publisher : Nature Publishing Group:399-415. doi : [10.1038/s41582-018-0013-z](https://doi.org/10.1038/s41582-018-0013-z)
28. Dubois B, Villain N, Frisoni GB, Rabinovici GD, Sabbagh M, Cappa S, Bejanin A, Bombois S, Epelbaum S, Teichmann M, Habert MO, Nordberg A, Blennow K, Galasko D, Stern Y, Rowe CC, Salloway S, Schneider LS, Cummings JL et Feldman HH. Clinical diagnosis of Alzheimer's disease : recommendations of the International Working Group. *The Lancet Neurology*. 2021 Jun; 20:484-96. doi : [10.1016/S1474-4422\(21\)00066-1](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(21)00066-1)
29. Guide parcours de soins des patients présentant un trouble neurocognitif associé à la maladie d'Alzheimer ou à une maladie apparentée. Haute Autorité de Santé. Available from: https://www.has-sante.fr/jcms/c_2906096/fr/patients-presentant-un-trouble-neurocognitif-associe-a-la-maladie-d-alzheimer-ou-a-une-maladie-apparentee
30. Dan X, Wechter N, Gray S, Mohanty JG, Croteau DL et Bohr VA. Olfactory dysfunction in aging and neurodegenerative diseases. *Ageing Research Reviews*. 2021 Sep; 70:101416. doi : [10.1016/j.arr.2021.101416](https://doi.org/10.1016/j.arr.2021.101416)
31. Laukka EJ, Ekström I, Larsson M, Grande G, Fratiglioni L et Rizzuto D. Markers of olfactory dysfunction and progression to dementia : A 12-year population-based study. *Alzheimer's & Dementia : The Journal of the Alzheimer's Association*. 2023 Jul; 19:3019-27. doi : [10.1002/alz.12932](https://doi.org/10.1002/alz.12932)
32. Bouhaben J, Delgado-Lima AH et Delgado-Losada ML. The role of olfactory dysfunction in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease : A meta-analysis. *Archives of Gerontology and Geriatrics*. 2024 Aug; 123:105425. doi : [10.1016/j.archger.2024.105425](https://doi.org/10.1016/j.archger.2024.105425)
33. Carnemolla SE, Kumfor F, Liang CT, Foxe D, Ahmed RM et Piguet O. Olfactory Bulb Integrity in Frontotemporal Dementia and Alzheimer's Disease. *Journal of Alzheimer's disease : JAD*. 2022; 89:51-66. doi : [10.3233/JAD-220080](https://doi.org/10.3233/JAD-220080)
34. Rumeau C, Nguyen DT et Jankowski R. Comment tester l'olfaction avec le Sniffin' Sticks test®. *Annales françaises d'Oto-rhino-laryngologie et de Pathologie Cervico-faciale*. 2016 Jun 1; 133:183-6. doi : [10.1016/j.aforl.2015.04.010](https://doi.org/10.1016/j.aforl.2015.04.010)
35. Doty RL, Frye RE et Agrawal U. Internal consistency reliability of the fractionated and whole University of Pennsylvania Smell Identification Test. *Perception & Psychophysics*. 1989 Sep 1; 45:381-4. doi : [10.3758/BF03210709](https://doi.org/10.3758/BF03210709)

36. Delompré T, Leloup C, Salles C et Briand L. Goût et olfaction : des récepteurs au cerveau. *Médecine des Maladies Métaboliques. Sens chimiques / Goût et odorat* 2022 Oct 1; 16:491-501. doi : [10.1016/j.mmm.2022.08.004](https://doi.org/10.1016/j.mmm.2022.08.004)
37. Cummings J, Zhou Y, Lee G, Zhong K, Fonseca J et Cheng F. Alzheimer's disease drug development pipeline : 2023. *Alzheimer's & Dementia : Translational Research & Clinical Interventions.* 2023; 9. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/trc2.12385>. doi : [10.1002/trc2.12385](https://doi.org/10.1002/trc2.12385)
38. M_palm. Enquêtes nationales sur les dispositifs. Fondation Médéric Alzheimer. 2023 Mar 23. Available from: <https://www.fondation-mederic-alzheimer.org/enquetes-nationales/>
39. Berthoz A, Vercher JL, Fuchs P et Moreau G. *Le traité de la réalité virtuelle.* Paris : Presses des Mines, 2006
40. García-Betances RI, Arredondo Waldmeyer MT, Fico G et Cabrera-Umpiérrez MF. A Succinct Overview of Virtual Reality Technology Use in Alzheimer's Disease. *Frontiers in Aging Neuroscience.* 2015 May 12; 7. Publisher : Frontiers. doi : [10.3389/fnagi.2015.00080](https://doi.org/10.3389/fnagi.2015.00080)
41. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hróbjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald S, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch VA, Whiting P et Moher D. The PRISMA 2020 statement : an updated guideline for reporting systematic reviews. *The BMJ.* 2021 Mar 29; 372:n71. doi : [10.1136/bmj.n71](https://doi.org/10.1136/bmj.n71)
42. Whiting PF, Rutjes AW, Westwood ME, Mallett S, Deeks JJ, Reitsma JB, Leeflang MM, Sterne JA et Bossuyt PM. QUADAS-2 : A Revised Tool for the Quality Assessment of Diagnostic Accuracy Studies. *Annals of Internal Medicine.* 2011 Oct 18; 155. Publisher : American College of Physicians:529-36. doi : [10.7326/0003-4819-155-8-201110180-00009](https://doi.org/10.7326/0003-4819-155-8-201110180-00009)
43. Ahmed S, Jager C de et Wilcock G. A comparison of screening tools for the assessment of Mild Cognitive Impairment : Preliminary findings. *NEUROCASE.* 2012; 18:336-51. doi : [10.1080/13554794.2011.608365](https://doi.org/10.1080/13554794.2011.608365)
44. Alegret M, Muñoz N, Roberto N, Rentz DM, Valero S, Gil S, Marquié M, Hernández I, Riveros C, Sanabria A, Perez-Cordon A, Espinosa A, Ortega G, Mauleón A, Abdelnour C, Rosende-Roca M, Papp KV, Orellana A, Benaque A, Tarraga L, Ruiz A et Boada M. A computerized version of the Short Form of the Face-Name Associative Memory Exam (FACEmemory®) for the early detection of Alzheimer's disease. *Alzheimer's Research & Therapy.* 2020 Mar 16; 12:25. doi : [10.1186/s13195-020-00594-6](https://doi.org/10.1186/s13195-020-00594-6)

45. Angelillo MT, Balducci F, Impedovo D, Pirlo G et Vessio G. Attentional Pattern Classification for Automatic Dementia Detection. *IEEE Access*. 2019; 7. Conference Name : IEEE Access:57706-16. doi : [10 . 1109 / ACCESS . 2019 . 2913685](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913685)
46. Bergeron MF, Landset S, Zhou X, Ding T, Khoshgoftaar TM, Zhao F, Du B, Chen X, Wang X, Zhong L, Liu X et Ashford JW. Utility of MemTrax and Machine Learning Modeling in Classification of Mild Cognitive Impairment. *Journal of Alzheimer's disease : JAD*. 2020; 77:1545-58. doi : [10 . 3233 / JAD - 191340](https://doi.org/10.3233/JAD-191340)
47. Berron D, Glanz W, Billette O, Grande X, Güsten J, Hempen I, Naveed M, Butryn M, Spottke A, Buerger K, Perneczky R, Schneider A, Teipel S, Wiltfang J, Wagner M, Jessen F et Düzel E. A remote digital memory composite to detect cognitive impairment in memory clinic samples in unsupervised settings using mobile devices. *medRxiv*. 2021; ((Berron D., david.berron@dzne.de; Glanz W.; Grande X.; Güsten J.; Butryn M.; Düzel E.) German Center for Neurodegenerative Diseases, Magdeburg, Germany). doi : [10 . 1101 / 2021 . 11 . 12 . 21266226](https://doi.org/10.1101/2021.11.12.21266226)
48. Bissig D, Erten-Lyons D, Lutsep H et Kaye J. Validation of saturn; An inexpensive, freelyavailable, and fully self-administered cognitive screening test. *Neurology*. 2020; 94. Available from: [https : / / www . embase . com / search / results ? subaction = viewrecord & id = L633068660&from=export](https://www.embase.com/search/results?subaction=viewrecord&id=L633068660&from=export)
49. Eraslan Boz H, Limoncu H, Zygouris S, Tsolaki M, Giakoumis D, Votis K, Tzovaras D, Öztürk V et Yener GG. A new tool to assess amnesic mild cognitive impairment in Turkish older adults : virtual supermarket (VSM). *Neuropsychology, Development, and Cognition Section B, Aging, Neuropsychology and Cognition*. 2020 Sep; 27:639-53. doi : [10 . 1080 / 13825585 . 2019 . 1663146](https://doi.org/10.1080/13825585.2019.1663146)
50. Cabinio M, Rossetto F, Isernia S, Saibene FL, Di Cesare M, Borgnis F, Pazzi S, Migliazza T, Alberoni M, Blasi V et Baglio F. The Use of a Virtual Reality Platform for the Assessment of the Memory Decline and the Hippocampal Neural Injury in Subjects with Mild Cognitive Impairment : The Validity of Smart Aging Serious Game (SASG). *Journal of Clinical Medicine*. 2020 May 6; 9:1355. doi : [10 . 3390 / jcm9051355](https://doi.org/10.3390/jcm9051355)
51. Cerino ES, Katz MJ, Wang C, Qin J, Gao Q, Hyun J, Hakun JG, Roque NA, Derby CA, Lipton RB et Sliwinski MJ. Variability in Cognitive Performance on Mobile Devices Is Sensitive to Mild Cognitive Impairment : Results From the Einstein Aging Study. *Frontiers in Digital Health*. 2021; 3:758031. doi : [10 . 3389 / fdgth . 2021 . 758031](https://doi.org/10.3389/fdgth.2021.758031)
52. Chan J, Wong A, Yiu B, Mok H, Lam P, Kwan P, Chan A, Mok V, Tsoi K et Kwok T. Electronic Cognitive Screen Technology for Screening Older Adults With Dementia and Mild Cognitive Impairment in a Community

- Setting : Development and Validation Study. JOURNAL OF MEDICAL INTERNET RESEARCH. 2020 Dec 18; 22. doi : [10.2196/17332](https://doi.org/10.2196/17332)
53. Cheah WT, Hwang JJ, Hong SY, Fu LC, Chang YL, Chen TF, Chen IA et Chou CC. A Digital Screening System for Alzheimer Disease Based on a Neuropsychological Test and a Convolutional Neural Network : System Development and Validation. JMIR medical informatics. 2022 Mar 9; 10:e31106. doi : [10.2196/31106](https://doi.org/10.2196/31106)
 54. Chin J, Kim D, Lee H, Yun J, Lee B, Park J, Yeom J, Shin D et Na D. A Validation Study of the Inbrain CST : a Tablet Computer-based Cognitive Screening Test for Elderly People with Cognitive Impairment. Journal of Korean medical science. 2020; 35:e292. doi : [10.3346/jkms.2020.35.e292](https://doi.org/10.3346/jkms.2020.35.e292)
 55. Dahmen J, Cook D, Fellows R et Schmitter-Edgecombe M. An analysis of a digital variant of the Trail Making Test using machine learning techniques. Technology and Health Care : Official Journal of the European Society for Engineering and Medicine. 2017; 25:251-64. doi : [10.3233/THC-161274](https://doi.org/10.3233/THC-161274)
 56. Gielis K, Vanden Abeele ME, Verbert K, Tournoy J, De Vos M et Vanden Abeele V. Detecting Mild Cognitive Impairment via Digital Biomarkers of Cognitive Performance Found in Klondike Solitaire : A Machine-Learning Study. Digital Biomarkers. 2021 Apr; 5:44-52. doi : [10.1159/000514105](https://doi.org/10.1159/000514105)
 57. Groppe S, Soto-Ruiz KM, Flores B, Dawkins W, Smith I, Eagleman DM et Katz Y. A Rapid, Mobile Neurocognitive Screening Test to Aid in Identifying Cognitive Impairment and Dementia (BrainCheck) : Cohort Study. JMIR aging. 2019 Mar 21; 2:e12615. doi : [10.2196/12615](https://doi.org/10.2196/12615)
 58. Heymann P, Gienger R, Hett A, Müller S, Laske C, Robens S, Ostermann T et Elbing U. Early Detection of Alzheimer's Disease Based on the Patient's Creative Drawing Process : First Results with a Novel Neuropsychological Testing Method. Journal of Alzheimer's disease : JAD. 2018; 63:675-87. doi : [10.3233/JAD-170946](https://doi.org/10.3233/JAD-170946)
 59. Huang Y, Singh A, Chen S, Sun F, Huang C et Liu S. Validity of a Novel Touch Screen Tablet-Based Assessment for Mild Cognitive Impairment and Probable AD in Older Adults. ASSESSMENT. 2019 Dec; 26:1540-53. doi : [10.1177/1073191117748395](https://doi.org/10.1177/1073191117748395)
 60. Inoue M, Jinbo D, Nakamura Y, Taniguchi M et Urakami K. Development and Evaluation of a Computerized Test Battery for Alzheimer's Disease Screening in Community-based Settings. AMERICAN JOURNAL OF ALZHEIMERS DISEASE AND OTHER DEMENTIAS. 2009 Apr; 24:129-35. doi : [10.1177/1533317508330222](https://doi.org/10.1177/1533317508330222)

61. Inoue M, Jimbo D, Taniguchi M et Urakami K. Touch Panel-type Dementia Assessment Scale : a new computer-based rating scale for Alzheimer's disease. *Psychogeriatrics : The Official Journal of the Japanese Psychogeriatric Society*. 2011 Mar; 11:28-33. doi : [10.1111/j.1479-8301.2010.00345.x](https://doi.org/10.1111/j.1479-8301.2010.00345.x)
62. Isernia S, Cabinio M, DI Tella S, Pazzi S, Vannetti F, Gerli F, Mosca I, Lombardi G, MacChi C, Sorbi S, Baglio F et Bozzali M. Diagnostic Validity of the Smart Aging Serious Game : An Innovative Tool for Digital Phenotyping of Mild Neurocognitive Disorder. *Journal of Alzheimer's Disease*. 2021; 83:1789-801. doi : [10.3233/JAD-210347](https://doi.org/10.3233/JAD-210347)
63. Ishikawa T, Nemoto M, Nemoto K, Takeuchi T, Numata Y, Watanabe R, Tsukada E, Ota M, Higashi S, Arai T et Yamada Y. Handwriting Features of Multiple Drawing Tests for Early Detection of Alzheimer's Disease : A Preliminary Result. *Studies in Health Technology and Informatics*. 2019 Aug 21; 264:168-72. doi : [10.3233/SHTI190205](https://doi.org/10.3233/SHTI190205)
64. Ishiwata A, Kitamura S, Nomura T, Nemoto R, Ishii C, Wakamatsu N et Katayama Y. Early identification of cognitive impairment and dementia : Results from four years of the community consultation center. *ARCHIVES OF GERONTOLOGY AND GERIATRICS*. 2014 Sep; 59:457-61. doi : [10.1016/j.archger.2014.06.003](https://doi.org/10.1016/j.archger.2014.06.003)
65. J. Li, J. Yang, J. Yang, H. Yang, M. Lan et L. Gao. Characterizing cognitive impairment through drawing features extracted from the Tree Drawing Test. *2022 7th International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Science (ICIIBMS)*. 2022 7th International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Science (ICIIBMS). T. 7. Journal Abbreviation : 2022 7th International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Science (ICIIBMS). 2022 Nov 24:341-7. doi : [10.1109/ICIIBMS55689.2022.9971538](https://doi.org/10.1109/ICIIBMS55689.2022.9971538)
66. Garre-Olmo J, Faúndez-Zanuy M, López-de-Ipiña K, Calvó-Perxas L et Turró-Garriga O. Kinematic and Pressure Features of Handwriting and Drawing : Preliminary Results Between Patients with Mild Cognitive Impairment, Alzheimer Disease and Healthy Controls. *Current Alzheimer Research*. 2017 Sep; 14:960-8. doi : [10.2174/1567205014666170309120708](https://doi.org/10.2174/1567205014666170309120708)
67. Tsoi K, Lam MW, Chu C, Wong MP et Meng H. Td-P-023 : Machine Learning on Digital Drawing Data for Preliminary Dementia Screening. *Alzheimer's & Dementia*. 2018; 14. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1016/j.jalz.2018.06.2039>; P196-P196. doi : [10.1016/j.jalz.2018.06.2039](https://doi.org/10.1016/j.jalz.2018.06.2039)
68. Kim KW, Lee SY, Choi J, Chin J, Lee BH, Na DL et Choi JH. A Comprehensive Evaluation of the Process of Copying a Complex Figure in Early- and Late-Onset Alzheimer Disease : A Quantitative Analysis of

- Digital Pen Data. *Journal of Medical Internet Research*. 2020 Aug 12; 22:e18136. doi : [10.2196/18136](https://doi.org/10.2196/18136)
69. Kobayashi M, Yamada Y, Shinkawa K, Nemoto M, Nemoto K et Arai T. Automated Early Detection of Alzheimer's Disease by Capturing Impairments in Multiple Cognitive Domains with Multiple Drawing Tasks. *JOURNAL OF ALZHEIMERS DISEASE*. 2022; 88:1075-89. doi : [10.3233/JAD-215714](https://doi.org/10.3233/JAD-215714)
 70. Kokubo N, Yokoi Y, Saitoh Y, Murata M, Maruo K, Takebayashi Y, Shinmei I, Yoshimoto S et Horikoshi M. A new device-aided cognitive function test, User eXperience-Trail Making Test (UX-TMT), sensitively detects neuropsychological performance in patients with dementia and Parkinson's disease. *BMC psychiatry*. 2018 Jul 5; 18:220. doi : [10.1186/s12888-018-1795-7](https://doi.org/10.1186/s12888-018-1795-7)
 71. Kubota Y, Yamaguchi T, Maeta T, Okada Y, Miura Y, Martono N, Ohwada H et Tania G. Feature Extraction based on Touch Interaction Data in Virtual Reality-based IADL for Characterization of Mild Cognitive Impairment. *PROCEEDINGS OF THE 12TH INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON COMPUTER VISION, IMAGING AND COMPUTER GRAPHICS THEORY AND APPLICATIONS (VISIGRAPP 2017), VOL 2*. Sous la dir. de Richard P, Yamaguchi T et Braz J. 2017 :152-7. doi : [10.5220/0006265201520157](https://doi.org/10.5220/0006265201520157)
 72. Liu X, Chen X, Zhou X, Shang Y, Xu F, Zhang J, He J, Zhao F, Du B, Wang X, Zhang Q, Zhang W, Bergeron MF, Ding T, Ashford JW et Zhong L. Validity of the MemTrax Memory Test Compared to the Montreal Cognitive Assessment in the Detection of Mild Cognitive Impairment and Dementia due to Alzheimer's Disease in a Chinese Cohort. *Journal of Alzheimer's disease : JAD*. 2021; 80:1257-67. doi : [10.3233/JAD-200936](https://doi.org/10.3233/JAD-200936)
 73. Lunardini F, Luperto M, Romeo M, Basilico N, Daniele K, Azzolino D, Damanti S, Abbate C, Mari D, Cesari M, Borghese N et Ferrante S. Supervised Digital Neuropsychological Tests for Cognitive Decline in Older Adults : Usability and Clinical Validity Study. *JMIR MHEALTH AND UHEALTH*. 2020 Sep 21; 8. doi : [10.2196/17963](https://doi.org/10.2196/17963)
 74. Maki Y, Yoshida H et Yamaguchi H. Computerized visuo-spatial memory test as a supplementary screening test for dementia. *PSYCHOGERIATRICS*. 2010 Jun; 10:77-82. doi : [10.1111/j.1479-8301.2010.00320.x](https://doi.org/10.1111/j.1479-8301.2010.00320.x)
 75. Inoue M, Urakami K, Taniguchi M, Kimura Y, Saito J et Nakashima K. Evaluation of a computerized test system to screen for mild cognitive impairment. *Psychogeriatrics*. 2005; 5. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1479-8301.2005.00090.x>; 36-41. doi : [10.1111/j.1479-8301.2005.00090.x](https://doi.org/10.1111/j.1479-8301.2005.00090.x)

76. Memória C, Yassuda M, Nakano E et Forlenza O. Contributions of the Computer-Administered Neuropsychological Screen for Mild Cognitive Impairment (CANS-MCI) for the diagnosis of MCI in Brazil. *International Psychogeriatrics*. 2014; 26:1483-91. doi : [10.1017/S1041610214000726](https://doi.org/10.1017/S1041610214000726)
77. Müller S, Preische O, Heymann P, Elbing U et Laske C. Diagnostic Value of a Tablet-Based Drawing Task for Discrimination of Patients in the Early Course of Alzheimer's Disease from Healthy Individuals. *Journal of Alzheimer's Disease*. 2017; 55:1463-9. doi : [10.3233/JAD-160921](https://doi.org/10.3233/JAD-160921)
78. Li A, Li J, Zhang D, Wu W, Zhao J et Qiang Y. Synergy through integration of digital cognitive tests and wearable devices for mild cognitive impairment screening. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2023; 17:1183457. doi : [10.3389/fnhum.2023.1183457](https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1183457)
79. Li K, Ma X, Chen T, Xin J, Wang C, Wu B, Ogihara A, Zhou S, Liu J, Huang S, Wang Y, Li S, Chen Z et Xu R. A new early warning method for mild cognitive impairment due to Alzheimer's disease based on dynamic evaluation of the "spatial executive process". *Digital Health*. 2023; 9:20552076231194938. doi : [10.1177/20552076231194938](https://doi.org/10.1177/20552076231194938)
80. Na S, Seo SW, Kim YJ, Yoo H et Lee ES. Correlation analysis between subtest scores of CERAD-K and a newly developed tablet computer-based digital cognitive test (Inbrain CST). *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2023; 15:1178324. doi : [10.3389/fnagi.2023.1178324](https://doi.org/10.3389/fnagi.2023.1178324)
81. Wu J, Tu J, Liu Z, Cao L, He Y, Huang J, Tao J, Wong MNK, Chen L, Lee TMC et Chan CCH. An Effective Test (EOmciSS) for Screening Older Adults With Mild Cognitive Impairment in a Community Setting : Development and Validation Study. *Journal of Medical Internet Research*. 2023 Jan 30; 25:e40858. doi : [10.2196/40858](https://doi.org/10.2196/40858)
82. Simfukwe C, Youn YC, Kim SY et An SS. Digital trail making test-black and white : Normal vs MCI. *Applied Neuropsychology Adult*. 2022; 29:1296-303. doi : [10.1080/23279095.2021.1871615](https://doi.org/10.1080/23279095.2021.1871615)
83. Zorluoglu G, Kamasak M, Tavacioglu L et Ozanar P. A mobile application for cognitive screening of dementia. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2015; 118:252-62. doi : [10.1016/j.cmpb.2014.11.004](https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2014.11.004)
84. Noguchi-Shinohara M, Domoto C, Yoshida T, Niwa K, Yuki-Nozaki S, Samuraki-Yokohama M, Sakai K, Hamaguchi T, Ono K, Iwasa K, Matsunari I, Komai K, Nakamura H et Yamada M. A new computerized assessment battery for cognition (C-ABC) to detect mild cognitive impairment and dementia around 5 min. *PLoS ONE*. 2020 Dec 11; 15:e0243469. doi : [10.1371/journal.pone.0243469](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243469)

85. Zygouris S, Giakoumis D, Votis K, Doumpoulakis S, Ntovas K, Segkouli S, Karagiannidis C, Tzouvaras D et Tsolaki M. Can a Virtual Reality Cognitive Training Application Fulfill a Dual Role? Using the Virtual Supermarket Cognitive Training Application as a Screening Tool for Mild Cognitive Impairment. *JOURNAL OF ALZHEIMERS DISEASE*. 2015; 44:1333-47. doi : [10.3233/JAD-141260](https://doi.org/10.3233/JAD-141260)
86. Zygouris S, Iliadou P, Lazarou E, Giakoumis D, Votis K, Alexiadis A, Triantafyllidis A, Segkouli S, Tzouvaras D, Tsiatsos T, Papagianopoulos S et Tsolaki M. Detection of Mild Cognitive Impairment in an At-Risk Group of Older Adults : Can a Novel Self-Administered Serious Game-Based Screening Test Improve Diagnostic Accuracy? *JOURNAL OF ALZHEIMERS DISEASE*. 2020; 78:405-12. doi : [10.3233/JAD-200880](https://doi.org/10.3233/JAD-200880)
87. Rodríguez-Salgado A, Llibre-Guerra J, Tsoy E, Peñalver-Guía A, Bringas G, Erlhoff S, Kramer J, Allen I, Valcour V, Miller B, Llibre-Rodríguez J et Possin K. A Brief Digital Cognitive Assessment for Detection of Cognitive Impairment in Cuban Older Adults. *Journal of Alzheimer's Disease*. 2021; 79:85-94. doi : [10.3233/JAD-200985](https://doi.org/10.3233/JAD-200985)
88. Suzumura S, Osawa A, Maeda N, Sano Y, Kandori A, Mizuguchi T, Yin Y et Kondo I. Differences among patients with Alzheimer's disease, older adults with mild cognitive impairment and healthy older adults in finger dexterity. *Geriatrics & Gerontology International*. 2018 Jun; 18:907-14. doi : [10.1111/ggi.13277](https://doi.org/10.1111/ggi.13277)
89. Yamada Y, Kobayashi M, Shinkawa K, Nemoto M, Ota M, Nemoto K et Arai T. Automated Analysis of Drawing Process for Detecting Prodromal and Clinical Dementia. 2022 *IEEE International Conference on Digital Health (ICDH)*. 2022 IEEE International Conference on Digital Health (ICDH). 2022 Jul :1-6. doi : [10.1109/ICDH55609.2022.00008](https://doi.org/10.1109/ICDH55609.2022.00008)
90. Saxton J, Morrow L, Eschman A, Archer G, Luther J et Zuccolotto A. Computer assessment of mild cognitive impairment. *Postgraduate Medicine*. 2009 Mar; 121:177-85. doi : [10.3810/pgm.2009.03.1990](https://doi.org/10.3810/pgm.2009.03.1990)
91. Onoda K, Hamano T, Nabika Y, Aoyama A, Takayoshi H, Nakagawa T, Ishihara M, Mitaki S, Yamaguchi T, Oguro H, Shiwaku K et Yamaguchi S. Validation of a new mass screening tool for cognitive impairment : Cognitive assessment for Dementia, iPad version. *Clinical Interventions in Aging*. 2013; 8((Onoda K.; Nabika Y.; Aoyama A.; Takayoshi H.; Nakagawa T.; Ishihara M.; Mitaki S.; Yamaguchi T.; Oguro H.; Yamaguchi S., yamagu3n@med.shimane-u.ac.jp) Department of Neurology, Japan):353-60. doi : [10.2147/CIA.S42342](https://doi.org/10.2147/CIA.S42342)
92. Onoda K et Yamaguchi S. Revision of the Cognitive Assessment for Dementia, iPad version (CADi2). *PloS One*. 2014; 9:e109931. doi : [10.1371/journal.pone.0109931](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109931)

93. Valladares-Rodriguez S, Fernández-Iglesias MJ, Anido-Rifón L, Facal D et Pérez-Rodríguez R. Episodix : a serious game to detect cognitive impairment in senior adults. A psychometric study. PeerJ. 2018 Sep 5; 6:e5478. doi : [10.7717/peerj.5478](https://doi.org/10.7717/peerj.5478)
94. Gielis K, Vanden Abeele M, De Croon R, Dierick P, Ferreira-Brito F, Van Assche L, Verbert K, Tournoy J et Vanden Abeele V. Dissecting Digital Card Games to Yield Digital Biomarkers for the Assessment of Mild Cognitive Impairment : Methodological Approach and Exploratory Study. JMIR SERIOUS GAMES. 2021 Oct; 9. doi : [10.2196/18359](https://doi.org/10.2196/18359)
95. Paddick SM, Yoseph M, Gray W, Andrea D, Barber R, Colgan A, Dotchin C, Urasa S, Kissima J, Haule I, Kisoli A, Rogathi J, Safic S, Mushi D, Robinson L et Walker R. Effectiveness of App-Based Cognitive Screening for Dementia by Lay Health Workers in Low Resource Settings. A Validation and Feasibility Study in Rural Tanzania. Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology. 2021; 34:613-21. doi : [10.1177/0891988720957105](https://doi.org/10.1177/0891988720957105)
96. Tsoy E, Strom A, Iaccarino L, Erhoff S, Goode C, Rodriguez AM, Rabinovici G, Miller B, Kramer J, Rankin K, La Joie R et Possin K. Detecting Alzheimer's disease biomarkers with a brief tablet-based cognitive battery : sensitivity to A β and tau PET. Alzheimer's Research and Therapy. 2021; 13. doi : [10.1186/s13195-021-00776-w](https://doi.org/10.1186/s13195-021-00776-w)
97. Sloane K, Mefford J, Zhao Z, Xu M, Zhou G, Fabian R, Wright A et Glenn S. Validation of a Mobile, Sensor-based Neurobehavioral Assessment with Digital Signal Processing and Machine-learning Analytics. Cognitive and Behavioral Neurology. 2022; 35:169-78. doi : [10.1097/WNN.0000000000000308](https://doi.org/10.1097/WNN.0000000000000308)
98. Rai L, Boyle R, Brosnan L, Rice H, Farina F, Tarnanas I et Whelan R. Digital Biomarkers Based Individualized Prognosis for People at Risk of Dementia : the AltoidaML Multi-site External Validation Study. Advances in Experimental Medicine and Biology. 2020; 1194((Rai L.; Boyle R.; Brosnan L.; Rice H.; Farina F.; Whelan R.) Trinity College Institute of Neuroscience, Trinity College Dublin, Dublin, Ireland):157-71. doi : [10.1007/978-3-030-32622-7_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32622-7_14)
99. Müller S, Herde L, Preische O, Zeller A, Heymann P, Robens S, Elbing U et Laske C. Diagnostic value of digital clock drawing test in comparison with CERAD neuropsychological battery total score for discrimination of patients in the early course of Alzheimer's disease from healthy individuals. Scientific Reports. 2019 Mar 5; 9:3543. doi : [10.1038/s41598-019-40010-0](https://doi.org/10.1038/s41598-019-40010-0)
100. Robens S, Heymann P, Gienger R, Hett A, Müller S, Laske C, Loy R, Ostermann T et Elbing U. The Digital Tree Drawing Test for Screening of Early Dementia : An Explorative Study Comparing Healthy Controls, Patients with Mild Cognitive Impairment, and Patients with Early

- Dementia of the Alzheimer Type. *Journal of Alzheimer's disease : JAD.* 2019; 68:1561-74. doi : [10.3233/JAD-181029](https://doi.org/10.3233/JAD-181029)
101. Yamada Y, Kobayashi M, Shinkawa K, Nemoto M, Ota M, Nemoto K et Arai T. Characteristics of Drawing Process Differentiate Alzheimer's Disease and Dementia with Lewy Bodies. *Journal of Alzheimer's disease : JAD.* 2022 Sep 20. doi : [10.3233/JAD-220546](https://doi.org/10.3233/JAD-220546)
 102. Fukui Y, Yamashita T, Hishikawa N, Kurata T, Sato K, Omote Y, Kono S, Yunoki T, Kawahara Y, Hatanaka N, Tokuchi R, Deguchi K et Abe K. Computerized touch-panel screening tests for detecting mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Internal Medicine (Tokyo, Japan).* 2015; 54:895-902. doi : [10.2169/internalmedicine.54.3931](https://doi.org/10.2169/internalmedicine.54.3931)
 103. Curiel RE, Crocco E, Rosado M, Duara R, Greig MT, Raffo A et Loewenstein DA. A Brief Computerized Paired Associate Test for the Detection of Mild Cognitive Impairment in Community-Dwelling Older Adults. *Journal of Alzheimer's disease : JAD.* 2016 Sep 6; 54:793-9. doi : [10.3233/JAD-160370](https://doi.org/10.3233/JAD-160370)
 104. Vallejo V, Wyss P, Rampa L, Mitache AV, Müri RM, Mosimann UP et Nef T. Evaluation of a novel Serious Game based assessment tool for patients with Alzheimer's disease. *PLoS One.* 2017; 12:e0175999. doi : [10.1371/journal.pone.0175999](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175999)
 105. Ye S, Sun K, Huynh D, Phi HQ, Ko B, Huang B et Ghomi RH. A Computerized Cognitive Test Battery for Detection of Dementia and Mild Cognitive Impairment : Instrument Validation Study. *JMIR Aging.* 2022 Apr 15; 5. Company : JMIR Aging Distributor : JMIR Aging Institution : JMIR Aging Label : JMIR Aging Publisher : JMIR Publications Inc., Toronto, Canada:e36825. doi : [10.2196/36825](https://doi.org/10.2196/36825)
 106. Porrselvi AP. TAM battery : Development and pilot testing of a Tamil computer-assisted cognitive test battery for older adults. *Clinical Neuropsychologist.* 2022 Dec 15. Place : Philadelphia Publisher : Taylor & Francis Inc WOS :000899101500001:1-20. doi : [10.1080/13854046.2022.2156396](https://doi.org/10.1080/13854046.2022.2156396)
 107. Park JH, Jung M, Kim J, Park HY, Kim JR et Park JH. Validity of a novel computerized screening test system for mild cognitive impairment. *International Psychogeriatrics.* 2018 Oct; 30:1455-63. doi : [10.1017/S1041610218000923](https://doi.org/10.1017/S1041610218000923)
 108. Scanlon L, O'Shea E, O'Caomh R et Timmons S. Usability and Validity of a Battery of Computerised Cognitive Screening Tests for Detecting Cognitive Impairment. *Gerontology.* 2016; 62:247-52. doi : [10.1159/000433432](https://doi.org/10.1159/000433432)
 109. Wu YH, Vidal JS, De Rotrou J, Sikkes S, Rigaud AS et Plichart M. Can a tablet-based cancellation test identify cognitive impairment in older adults? *PLoS ONE.* 2017; 12. doi : [10.1371/journal.pone.0181809](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181809)

110. Wong A, Fong C, Mok V, Leung K et Tong R. Computerized Cognitive Screen (CoCoSc): A Self-Administered Computerized Test for Screening for Cognitive Impairment in Community Social Centers. *JOURNAL OF ALZHEIMERS DISEASE*. 2017; 59:1299-306. doi : [10.3233/JAD-170196](https://doi.org/10.3233/JAD-170196)
111. Song SI, Jeong HS, Park JP, Kim JY, Bai DS, Kim GH, Cho DH, Koo BH et Kim HG. A Study of the Effectiveness Verification of Computer-Based Dementia Assessment Contents (Co-Wis) : Non-Randomized Study. *Applied Sciences*. 2020 Jan; 10. Number : 5 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute:1579. doi : [10.3390/app10051579](https://doi.org/10.3390/app10051579)
112. Wang Y, Chen T, Wang C, Ogihara A, Ma X, Huang S, Zhou S, Li S, Liu J et Li K. A New Smart 2-Min Mobile Alerting Method for Mild Cognitive Impairment Due to Alzheimer's Disease in the Community. *Brain Sciences*. 2023 Jan 31; 13:244. doi : [10.3390/brainsci13020244](https://doi.org/10.3390/brainsci13020244)
113. Rosen WG, Mohs RC et Davis KL. A new rating scale for Alzheimer's disease. *The American Journal of Psychiatry*. 1984 Nov; 141:1356-64. doi : [10.1176/ajp.141.11.1356](https://doi.org/10.1176/ajp.141.11.1356)
114. Sunderland T, Hill JL, Mellow AM, Lawlor BA, Gundersheimer J, Newhouse PA et Grafman JH. Clock drawing in Alzheimer's disease. A novel measure of dementia severity. *Journal of the American Geriatrics Society*. 1989 Aug; 37:725-9. doi : [10.1111/j.1532-5415.1989.tb02233.x](https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1989.tb02233.x)
115. Battery AIT. Manual of Directions and Scoring. Washington, DC : War Department, Adjutant General's Office. 1944
116. Osterrieth P. Le test de copie d'une figure complexe : Contribution à l'étude de la perception et de la mémoire. *Archives de Psychologie*. 1944 :286-356
117. Judy BF, Menta A, Pak HL, Azad TD et Witham TF. Augmented Reality and Virtual Reality in Spine Surgery : A Comprehensive Review. *Neurosurgery Clinics of North America*. 2024 Apr; 35:207-16. doi : [10.1016/j.nec.2023.11.010](https://doi.org/10.1016/j.nec.2023.11.010)
118. Nanchahal S, Arjomandi Rad A, Naruka V, Chacko J, Liu G, Afoke J, Miller G, Malawana J et Punjabi P. Mitral valve surgery assisted by virtual and augmented reality : Cardiac surgery at the front of innovation. *Perfusion*. 2024 Mar; 39:244-55. doi : [10.1177/02676591221137480](https://doi.org/10.1177/02676591221137480)
119. Dockx K, Bekkers EM, Van den Bergh V, Ginis P, Rochester L, Hausdorff JM, Mirelman A et Nieuwboer A. Virtual reality for rehabilitation in Parkinson's disease. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2016 Dec 21; 12:CD010760. doi : [10.1002/14651858.CD010760.pub2](https://doi.org/10.1002/14651858.CD010760.pub2)
120. Khokale R, S Mathew G, Ahmed S, Maheen S, Fawad M, Bandaru P, Zerín A, Nazir Z, Khawaja I, Sharif I, Abdin ZU et Akbar A. Virtual and Augmented Reality in Post-stroke Rehabilitation : A Narrative Review. *Cureus*. 2023 Apr; 15:e37559. doi : [10.7759/cureus.37559](https://doi.org/10.7759/cureus.37559)

121. Freeman D, Reeve S, Robinson A, Ehlers A, Clark D, Spanlang B et Slater M. Virtual reality in the assessment, understanding, and treatment of mental health disorders. *Psychological Medicine*. 2017 Oct; 47:2393-400. doi : [10.1017/S003329171700040X](https://doi.org/10.1017/S003329171700040X)
122. Wiebe A, Kannen K, Selaskowski B, Mehren A, Thöne AK, Pramme L, Blumenthal N, Li M, Asché L, Jonas S, Bey K, Schulze M, Steffens M, Pensel MC, Guth M, Rohlfen F, Ekhlās M, Lügering H, Fileccia H, Pakos J, Lux S, Philipsen A et Braun N. Virtual reality in the diagnostic and therapy for mental disorders : A systematic review. *Clinical Psychology Review*. 2022 Dec; 98:102213. doi : [10.1016/j.cpr.2022.102213](https://doi.org/10.1016/j.cpr.2022.102213)
123. Chen J, Or CK et Chen T. Effectiveness of Using Virtual Reality-Supported Exercise Therapy for Upper Extremity Motor Rehabilitation in Patients With Stroke : Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *Journal of Medical Internet Research*. 2022 Jun 20; 24:e24111. doi : [10.2196/24111](https://doi.org/10.2196/24111)
124. Chen X, Liu F, Lin S, Yu L et Lin R. Effects of Virtual Reality Rehabilitation Training on Cognitive Function and Activities of Daily Living of Patients With Poststroke Cognitive Impairment : A Systematic Review and Meta-Analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2022 Jul; 103:1422-35. doi : [10.1016/j.apmr.2022.03.012](https://doi.org/10.1016/j.apmr.2022.03.012)
125. Xie M, Zhou K, Patro N, Chan T, Levin M, Gupta MK et Archibald J. Virtual Reality for Vestibular Rehabilitation : A Systematic Review. *Otology & Neurotology : Official Publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology*. 2021 Aug 1; 42:967-77. doi : [10.1097/MAO.0000000000003155](https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000003155)
126. Clay F, Howett D, FitzGerald J, Fletcher P, Chan D et Price A. Use of Immersive Virtual Reality in the Assessment and Treatment of Alzheimer's Disease : A Systematic Review. *Journal of Alzheimer's disease : JAD*. 2020; 75:23-43. doi : [10.3233/JAD-191218](https://doi.org/10.3233/JAD-191218)
127. Liu Q, Song H, Yan M, Ding Y, Wang Y, Chen L et Yin H. Virtual reality technology in the detection of mild cognitive impairment : A systematic review and meta-analysis. *Ageing Research Reviews*. 2023 Jun; 87:101889. doi : [10.1016/j.arr.2023.101889](https://doi.org/10.1016/j.arr.2023.101889)
128. Kirkham R, Kooijman L, Albertella L, Myles D, Yücel M et Rotaru K. Immersive Virtual Reality-Based Methods for Assessing Executive Functioning : Systematic Review. *JMIR serious games*. 2024 Feb 26; 12:e50282. doi : [10.2196/50282](https://doi.org/10.2196/50282)
129. Pieri L, Tosi G et Romano D. Virtual reality technology in neuropsychological testing : A systematic review. *Journal of Neuropsychology*. 2023 Jun; 17:382-99. doi : [10.1111/jnp.12304](https://doi.org/10.1111/jnp.12304)

130. Fernandez Montenegro JM et Argyriou V. Cognitive evaluation for the diagnosis of Alzheimer's disease based on Turing Test and Virtual Environments. *Physiology & Behavior*. 2017 May 1; 173:42-51. doi : [10.1016/j.physbeh.2017.01.034](https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.01.034)
131. Howett D, Castegnaro A, Krzywicka K, Hagman J, Marchment D, Henson R, Rio M, King JA, Burgess N et Chan D. Differentiation of mild cognitive impairment using an entorhinal cortex-based test of virtual reality navigation. *Brain : A Journal of Neurology*. 2019 Jun 1; 142:1751-66. doi : [10.1093/brain/awz116](https://doi.org/10.1093/brain/awz116)
132. Zakzanis KK, Quintin G, Graham SJ et Mraz R. Age and dementia related differences in spatial navigation within an immersive virtual environment. *Medical Science Monitor : International Medical Journal of Experimental and Clinical Research*. 2009 Apr; 15:CR140-150
133. Seo K, Kim JK, Oh DH, Ryu H et Choi H. Virtual daily living test to screen for mild cognitive impairment using kinematic movement analysis. *PLoS One*. 2017; 12:e0181883. doi : [10.1371/journal.pone.0181883](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181883)
134. Tarnanas I, Schlee W, Tsolaki M, Müri R, Mosimann U et Nef T. Ecological validity of virtual reality daily living activities screening for early dementia : longitudinal study. *JMIR serious games*. 2013 Aug 6; 1:e1. doi : [10.2196/games.2778](https://doi.org/10.2196/games.2778)
135. Tsai CF, Chen CC, Wu EHK, Chung CR, Huang CY, Tsai PY et Yeh SC. A Machine-Learning-Based Assessment Method for Early-Stage Neurocognitive Impairment by an Immersive Virtual Supermarket. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2021; 29. Conference Name : IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering:2124-32. doi : [10.1109/TNSRE.2021.3118918](https://doi.org/10.1109/TNSRE.2021.3118918)
136. Costa RQM da, Pompeu JE, Moretto E, Silva JM, Dos Santos MD, Nitrini R et Brucki SMD. Two Immersive Virtual Reality Tasks for the Assessment of Spatial Orientation in Older Adults with and Without Cognitive Impairment : Concurrent Validity, Group Comparison, and Accuracy Results. *Journal of the International Neuropsychological Society : JINS*. 2022 May; 28:460-72. doi : [10.1017/S1355617721000655](https://doi.org/10.1017/S1355617721000655)
137. Wu R, Li A, Xue C, Chai J, Qiang Y, Zhao J et Wang L. Screening for Mild Cognitive Impairment with Speech Interaction Based on Virtual Reality and Wearable Devices. *Brain Sciences*. 2023 Aug 21; 13:1222. doi : [10.3390/brainsci13081222](https://doi.org/10.3390/brainsci13081222)
138. Kim SY, Park J, Choi H, Loeser M, Ryu H et Seo K. Digital Marker for Early Screening of Mild Cognitive Impairment Through Hand and Eye Movement Analysis in Virtual Reality Using Machine Learning : First Validation Study. *Journal of Medical Internet Research*. 2023 Oct 20; 25:e48093. doi : [10.2196/48093](https://doi.org/10.2196/48093)

139. Kim KW, Choi JD, Chin J, Lee BH, Choi JH et Na DL. Development and preliminary validation of a virtual reality memory test for assessing visuospatial memory. *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2023; 15:1236084. doi : [10.3389/fnagi.2023.1236084](https://doi.org/10.3389/fnagi.2023.1236084)
140. Wilson SA, Byrne P, Rodgers SE et Maden M. A Systematic Review of Smartphone and Tablet Use by Older Adults With and Without Cognitive Impairment. *Innovation in Aging*. 2022; 6:igac002. doi : [10.1093/geroni/igac002](https://doi.org/10.1093/geroni/igac002)
141. Chan JYC, Kwong JSW, Wong A, Kwok TCY et Tsoi KKF. Comparison of Computerized and Paper-and-Pencil Memory Tests in Detection of Mild Cognitive Impairment and Dementia : A Systematic Review and Meta-analysis of Diagnostic Studies. *Journal of the American Medical Directors Association*. 2018 Sep; 19:748-756.e5. doi : [10.1016/j.jamda.2018.05.010](https://doi.org/10.1016/j.jamda.2018.05.010)
142. Tsoy E, Zygouris S et Possin KL. Current State of Self-Administered Brief Computerized Cognitive Assessments for Detection of Cognitive Disorders in Older Adults : A Systematic Review. *The Journal of Prevention of Alzheimer's Disease*. 2021; 8:267-76. doi : [10.14283/jpad.2021.11](https://doi.org/10.14283/jpad.2021.11)
143. Chan JYC, Yau STY, Kwok TCY et Tsoi KKF. Diagnostic performance of digital cognitive tests for the identification of MCI and dementia : A systematic review. *Ageing Research Reviews*. 2021 Dec 1; 72:101506. doi : [10.1016/j.arr.2021.101506](https://doi.org/10.1016/j.arr.2021.101506)
144. Koo B et Vizer L. Mobile Technology for Cognitive Assessment of Older Adults : A Scoping Review. *INNOVATION IN AGING*. 2019 Jan; 3. doi : [10.1093/geroni/igy038](https://doi.org/10.1093/geroni/igy038)
145. Sbordone RJ et Purisch AD. Hazards of blind analysis of neuropsychological test data in assessing cognitive disability : the role of confounding factors. *NeuroRehabilitation*. 1996 Jan 1; 7. Publisher : IOS Press:15-26. doi : [10.3233/NRE-1996-7103](https://doi.org/10.3233/NRE-1996-7103)
146. Chaytor N et Schmitter-Edgecombe M. The Ecological Validity of Neuropsychological Tests : A Review of the Literature on Everyday Cognitive Skills. *Neuropsychology Review*. 2003 Dec 1; 13:181-97. doi : [10.1023/B:NERV.0000009483.91468.fb](https://doi.org/10.1023/B:NERV.0000009483.91468.fb)
147. Parsons TD. Virtual Reality for Enhanced Ecological Validity and Experimental Control in the Clinical, Affective and Social Neurosciences. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2015; 9:660. doi : [10.3389/fnhum.2015.00660](https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00660)
148. Parker SG, McCue P, Phelps K, McCleod A, Arora S, Nockels K, Kennedy S, Roberts H et Conroy S. What is Comprehensive Geriatric Assessment (CGA)? An umbrella review. *Age and Ageing*. 2018 Jan 1; 47:149-55. doi : [10.1093/ageing/afx166](https://doi.org/10.1093/ageing/afx166)

149. Katz S, Downs TD, Cash HR et Grotz RC. Progress in development of the index of ADL. *The Gerontologist*. 1970; 10:20-30. doi : [10.1093/geront/10.1_part_1.20](https://doi.org/10.1093/geront/10.1_part_1.20)
150. Lawton MP et Brody EM. Assessment of older people : self-maintaining and instrumental activities of daily living. *The Gerontologist*. 1969; 9:179-86
151. Han G, Maruta M, Ikeda Y, Ishikawa T, Tanaka H, Koyama A, Fukuhara R, Boku S, Takebayashi M et Tabira T. Relationship between Performance on the Mini-Mental State Examination Sub-Items and Activities of Daily Living in Patients with Alzheimer's Disease. *Journal of Clinical Medicine*. 2020 May 20; 9:1537. doi : [10.3390/jcm9051537](https://doi.org/10.3390/jcm9051537)
152. Kortum P et Sorber M. Measuring the Usability of Mobile Applications for Phones and Tablets. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2015 Aug 3; 31. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/10447318.2015.1064658>:518-29. doi : [10.1080/10447318.2015.1064658](https://doi.org/10.1080/10447318.2015.1064658)
153. Gronier G et Baudet A. Psychometric Evaluation of the F-SUS : Creation and Validation of the French Version of the System Usability Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2021 Oct 2; 37. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1898828>:1571-82. doi : [10.1080/10447318.2021.1898828](https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1898828)
154. Brooke J. SUS : A 'Quick and Dirty' Usability Scale. *Usability Evaluation In Industry*. Num Pages : 6. CRC Press, 1996 :189-94
155. 14 :00-17 :00. ISO 9241-11 :2018. ISO. Available from: <https://www.iso.org/standard/63500.html>
156. Valentin A et Lemarchand C. La construction des échantillons dans la conception ergonomique de produits logiciels pour le grand public. Quel quantitatif pour les études qualitatives? *Le travail humain*. 2010; 73. Place : Paris cedex 14 Publisher : Presses Universitaires de France:261-90. doi : [10.3917/th.733.0261](https://doi.org/10.3917/th.733.0261)
157. González Hautamäki R, Hautamäki V et Kinnunen T. On the limits of automatic speaker verification : Explaining degraded recognizer scores through acoustic changes resulting from voice disguise. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2019 Jul 31; 146:693-704. doi : [10.1121/1.5119240](https://doi.org/10.1121/1.5119240)
158. Basak S, Agrawal H, Jena S, Gite S, Bachute M, Pradhan B et Assiri M. Challenges and Limitations in Speech Recognition Technology : A Critical Review of Speech Signal Processing Algorithms, Tools and Systems. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2023; 135

159. Belmin J, Pariel-Madjlessi S, Surun P, Bentot C, Feteanu D, Lefebvre des Noettes V, Onen F, Drunat O, Trivalle C, Chassagne P et Golmard JL. The cognitive disorders examination (Codex) is a reliable 3-minute test for detection of dementia in the elderly (validation study on 323 subjects). *Presse Medicale* (Paris, France : 1983). 2007 Sep; 36:1183-90. doi : [10.1016/j.lpm.2007.03.016](https://doi.org/10.1016/j.lpm.2007.03.016)
160. Borson S, Scanlan JM, Chen P et Ganguli M. The Mini-Cog as a screen for dementia : validation in a population-based sample. *Journal of the American Geriatrics Society*. 2003 Oct; 51:1451-4. doi : [10.1046/j.1532-5415.2003.51465.x](https://doi.org/10.1046/j.1532-5415.2003.51465.x)
161. Park I et Lee U. Automatic, Qualitative Scoring of the Clock Drawing Test (CDT) Based on U-Net, CNN and Mobile Sensor Data. *Sensors* (Basel, Switzerland). 2021 Aug 3; 21:5239. doi : [10.3390/s21155239](https://doi.org/10.3390/s21155239)
162. Onofri E, Mercuri M, Archer T, Rapp-Ricciardi M et Ricci S. Legal medical consideration of Alzheimer's disease patients' dysgraphia and cognitive dysfunction : a 6 month follow up. *Clinical Interventions in Aging*. 2016 Mar 7; 11:279-84. doi : [10.2147/CIA.S94750](https://doi.org/10.2147/CIA.S94750)
163. What Are the Signs of Alzheimer's Disease? National Institute on Aging. Available from: <https://www.nia.nih.gov/health/what-are-signs-alzheimers-disease>
164. Young can 'only read digital clocks'. BBC News. 2018 Apr 24. Available from: <https://www.bbc.com/news/education-43882847>
165. RIVAGES. Interest of Two Digital Devices for the Diagnosis of Neurocognitive Disorders in Elderly People With Cognitive Symptoms. Clinical trial registration NCT06032611. submitted : September 1, 2023. clinicaltrials.gov, 2023 Sep 8. Available from: <https://clinicaltrials.gov/study/NCT06032611>
166. Saliba D, Elliott M, Rubenstein LZ, Solomon DH, Young RT, Kamberg CJ, Roth C, MacLean CH, Shekelle PG, Sloss EM et Wenger NS. The Vulnerable Elders Survey : a tool for identifying vulnerable older people in the community. *Journal of the American Geriatrics Society*. 2001 Dec; 49:1691-9. doi : [10.1046/j.1532-5415.2001.49281.x](https://doi.org/10.1046/j.1532-5415.2001.49281.x)
167. Belmin J, Khellaf L, Pariel S, Jarzebowski W, Valembois L, Zeisel J et Lafuente-Lafuente C. Validation of the French version of the Vulnerable Elders Survey-13 (VES-13). *BMC medical research methodology*. 2020 Feb 5; 20:21. doi : [10.1186/s12874-020-0910-x](https://doi.org/10.1186/s12874-020-0910-x)
168. Lindberg P, Ody C, Feydy A et Maier MA. Precision in isometric precision grip force is reduced in middle-aged adults. *Experimental Brain Research*. 2009 Feb; 193:213-24. doi : [10.1007/s00221-008-1613-4](https://doi.org/10.1007/s00221-008-1613-4)

169. Lindberg PG, Feydy A et Maier MA. White matter organization in cervical spinal cord relates differently to age and control of grip force in healthy subjects. *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience*. 2010 Mar 17; 30:4102-9. doi : [10 . 1523 / JNEUROSCI.5529-09.2010](https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5529-09.2010)
170. Carment L, Abdellatif A, Lafuente-Lafuente C, Pariel S, Maier MA, Belmin J et Lindberg PG. Manual Dexterity and Aging : A Pilot Study Disentangling Sensorimotor From Cognitive Decline. *Frontiers in Neurology*. 2018; 9:910. doi : [10 . 3389/fneur.2018.00910](https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00910)
171. O'hara K, Harper R, Mentis H, Sellen A et Taylor A. On the naturalness of touchless : Putting the "interaction" back into NUI. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*. 2013 Apr 11; 20:5 :1-5 :25. doi : [10 . 1145/2442106.2442111](https://doi.org/10.1145/2442106.2442111)
172. Djelil F, Otmane S et Wu S. Apport des NUIs pour les Applications de Réalité Virtuelle et Augmentée : État de l'Art. *8èmes journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle, Augmentée, Mixte et d'Intéraction 3D*. Laval, France, 2013 Oct. Available from: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02455134>
173. Song P, Yu H et Winkler S. Vision-based 3D finger interactions for mixed reality games with physics simulation. *Proceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*. VRCAI '08. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2008 Dec 8:1-6. doi : [10 . 1145/1477862.1477871](https://doi.org/10.1145/1477862.1477871)
174. Marton F, Agus M, Gobbetti E, Pintore G et Balsa Rodriguez M. Natural exploration of 3D massive models on large-scale light field displays using the FOX proximal navigation technique. *Computers & Graphics. Graphics Interaction* 2012 Dec 1; 36:893-903. doi : [10 . 1016/j . cag . 2012.06.005](https://doi.org/10.1016/j.cag.2012.06.005)
175. Hasenfratz JM, Lapierre M et Sillion FX. A real-time system for full body interaction with virtual worlds. *Virtual Environments 2004-10th Eurographics Symposium on Virtual Environments*. 2004 :147-56
176. Jian Z, Kaynak M, Cheok A et Chung KC. Real-time lip tracking for virtual lip implementation in virtual environments and computer games. *10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. (Cat. No.01CH37297)*. 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. (Cat. No.01CH37297). T. 3. 2001 Dec :1359-1362 vol.2. doi : [10 . 1109/FUZZ.2001.1008910](https://doi.org/10.1109/FUZZ.2001.1008910)
177. Busso C et Narayanan SS. Interrelation Between Speech and Facial Gestures in Emotional Utterances : A Single Subject Study. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*. 2007 Nov; 15. Conference Name : IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing:2331-47. doi : [10 . 1109/TASL.2007.905145](https://doi.org/10.1109/TASL.2007.905145)

178. Bowman DA, Kruijff E, Jr JLL et Poupyrev I. 3D User Interfaces : Theory and Practice. Google-Books-ID : It5QAAAAMAAJ. Addison-Wesley, 2005. 520 p.
179. Ouramdane N, Otmane S et Mallem M. Interaction 3D en Réalité Virtuelle - Etat de l'art. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information - Série TSI : Technique et Science Informatiques*. 2009 Mar; 28. Publisher : Lavoisier:1017-49. doi : [10.3166/tsi.28.1017-1049](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00376458). Available from: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00376458>
180. Varela-Aldás J, Palacios-Navarro G, Amariglio R et García-Magariño I. Head-Mounted Display-Based Application for Cognitive Training. *Sensors*. 2020 Jan; 20. Number : 22 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute:6552. doi : [10.3390/s20226552](https://doi.org/10.3390/s20226552)
181. Ijaz K, Ahmadpour N, Naismith SL et Calvo RA. An Immersive Virtual Reality Platform for Assessing Spatial Navigation Memory in Predementia Screening : Feasibility and Usability Study. *JMIR Mental Health*. 2019 Sep 3; 6. Company : JMIR Mental Health Distributor : JMIR Mental Health Institution : JMIR Mental Health Label : JMIR Mental Health Publisher : JMIR Publications Inc., Toronto, Canada:e13887. doi : [10.2196/13887](https://doi.org/10.2196/13887)
182. Foerster RM, Poth CH, Behler C, Botsch M et Schneider WX. Using the virtual reality device Oculus Rift for neuropsychological assessment of visual processing capabilities. *Scientific Reports*. 2016 Nov 21; 6. Publisher : Nature Publishing Group:37016. doi : [10.1038/srep37016](https://doi.org/10.1038/srep37016)
183. Franzen S, Berg Evd, Goudsmit M, Jurgens CK, Wiel Lvd, Kalkisim Y, Uysal-Bozkir Ö, Ayhan Y, Nielsen TR et Papma JM. A Systematic Review of Neuropsychological Tests for the Assessment of Dementia in Non-Western, Low-Educated or Illiterate Populations. *Journal of the International Neuropsychological Society*. 2020 Mar; 26:331-51. doi : [10.1017/S1355617719000894](https://doi.org/10.1017/S1355617719000894)
184. Craik FIM et Bialystok E. Planning and task management in older adults : cooking breakfast. *Memory & Cognition*. 2006 Sep; 34:1236-49. doi : [10.3758/bf03193268](https://doi.org/10.3758/bf03193268)
185. Giovannetti T, Yamaguchi T, Roll E, Harada T, Rycroft SS, Divers R, Hulswit J, Tan CC, Matchanova A, Ham L, Hackett K et Mis R. The Virtual Kitchen Challenge : preliminary data from a novel virtual reality test of mild difficulties in everyday functioning. *Neuropsychology, Development, and Cognition Section B, Aging, Neuropsychology and Cognition*. 2019 Nov; 26:823-41. doi : [10.1080/13825585.2018.1536774](https://doi.org/10.1080/13825585.2018.1536774)

186. Allain P, Foloppe DA, Besnard J, Yamaguchi T, Etcharry-Bouyx F, Le Gall D, Nolin P et Richard P. Detecting everyday action deficits in Alzheimer's disease using a nonimmersive virtual reality kitchen. *Journal of the International Neuropsychological Society : JINS*. 2014 May; 20:468-77. doi : [10.1017/S1355617714000344](https://doi.org/10.1017/S1355617714000344)
187. Kosowicz M et MacPherson SE. Improving multitasking assessment in healthy older adults using a prop-based version of the Breakfast task. *Applied Neuropsychology Adult*. 2017; 24:252-63. doi : [10.1080/23279095.2015.1136310](https://doi.org/10.1080/23279095.2015.1136310)
188. Sanz Simon S, Ben-Eliezer D, Pondikos M, Stern Y et Gopher D. Feasibility and acceptability of a new web-based cognitive training platform for cognitively healthy older adults : the breakfast task. *Pilot and Feasibility Studies*. 2023 Aug 4; 9:136. doi : [10.1186/s40814-023-01359-2](https://doi.org/10.1186/s40814-023-01359-2)
189. Paiva Guimarães M de, Martins JM, Dias DRC, Guimarães RdFR et Gnecco BB. An olfactory display for virtual reality glasses. *Multimedia Systems*. 2022 Oct 1; 28:1573-83. doi : [10.1007/s00530-022-00908-8](https://doi.org/10.1007/s00530-022-00908-8)
190. Liu Y, Yiu CK, Zhao Z, Park W, Shi R, Huang X, Zeng Y, Wang K, Wong TH, Jia S, Zhou J, Gao Z, Zhao L, Yao K, Li J, Sha C, Gao Y, Zhao G, Huang Y, Li D, Guo Q, Li Y et Yu X. Soft, miniaturized, wireless olfactory interface for virtual reality. *Nature Communications*. 2023 May 9; 14. Number : 1 Publisher : Nature Publishing Group:2297. doi : [10.1038/s41467-023-37678-4](https://doi.org/10.1038/s41467-023-37678-4)
191. Paule L et admin. Sentir en réalité virtuelle devient possible avec Olfy. *Le Blog de Laval Virtual | Actus VR/AR*. Section : Laval Virtual. 2024 Mar 16. Available from: <https://blog.laval-virtual.com/sentir-en-vr-devient-possible-avec-olfy/>
192. Forgiarini A, Buttussi F et Chittaro L. Virtual Reality for Object Location Spatial Memory : A Comparison of Handheld Controllers and Force Feedback Gloves. *Proceedings of the 15th Biannual Conference of the Italian SIGCHI Chapter*. CHIItaly 2023 : 15th Biannual Conference of the Italian SIGCHI Chapter. Torino Italy : ACM, 2023 Sep 20:1-9. doi : [10.1145/3605390.3605403](https://doi.org/10.1145/3605390.3605403)
193. Rey L, Désoche C, Saive AL, Thévenet M, Garcia S, Tillmann B et Plailly J. Episodic memory and recognition are influenced by cues' sensory modality : comparing odours, music and faces using virtual reality. *Memory (Hove, England)*. 2023 Oct; 31:1113-33. doi : [10.1080/09658211.2023.2208793](https://doi.org/10.1080/09658211.2023.2208793)
194. Melo M, Gonçalves G, Monteiro P, Coelho H, Vasconcelos-Raposo J et Bessa M. Do Multisensory Stimuli Benefit the Virtual Reality Experience? A Systematic Review. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2022 Feb; 28. Conference Name : IEEE

- Transactions on Visualization and Computer Graphics:1428-42. doi : [10.1109/TVCG.2020.3010088](https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.3010088)
195. Dinh H, Walker N, Hodges L, Song C et Kobayashi A. Evaluating the importance of multi-sensory input on memory and the sense of presence in virtual environments. *Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316)*. Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316). ISSN : 1087-8270. 1999 Mar :222-8. doi : [10.1109/VR.1999.756955](https://doi.org/10.1109/VR.1999.756955)
 196. Ranasinghe N, Jain P, Thi Ngoc Tram N, Koh KCR, Tolley D, Karwita S, Lien-Ya L, Liangkun Y, Shamaiah K, Eason Wai Tung C, Yen CC et Do EYL. Season Traveller : Multisensory Narration for Enhancing the Virtual Reality Experience. *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '18. Montreal QC, Canada : Association for Computing Machinery, 2018 :1-13. doi : [10.1145/3173574.3174151](https://doi.org/10.1145/3173574.3174151)
 197. Hill NTM, Mowszowski L, Naismith SL, Chadwick VL, Valenzuela M et Lampit A. Computerized Cognitive Training in Older Adults With Mild Cognitive Impairment or Dementia : A Systematic Review and Meta-Analysis. *eng. The American Journal of Psychiatry* 2017 Apr ; 174:329-40. doi : [10.1176/appi.ajp.2016.16030360](https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2016.16030360)
 198. Possin K, Moskowitz T, Erlhoff S, Rogers K, Johnson E, Steele N, Higgins J, Stiver J, Alioto A, Farias S, Miller B et Rankin K. The Brain Health Assessment for Detecting and Diagnosing Neurocognitive Disorders. *JOURNAL OF THE AMERICAN GERIATRICS SOCIETY*. 2018 Jan ; 66:150-6. doi : [10.1111/jgs.15208](https://doi.org/10.1111/jgs.15208)
 199. Satler C, Beham F, Garcias A, Tomaz C et Tavares M. Computerized spatial delayed recognition span task : a specific tool to assess visuospatial working memory. *FRONTIERS IN AGING NEUROSCIENCE*. 2015 Apr 24 ; 7. doi : [10.3389/fnagi.2015.0005.3](https://doi.org/10.3389/fnagi.2015.0005.3)
 200. Scharre DW, Chang SI, Nagaraja HN, Vrettos NE et Bornstein RA. Digitally translated Self-Administered Gerocognitive Examination (eSAGE) : relationship with its validated paper version, neuropsychological evaluations, and clinical assessments. *Alzheimer's Research & Therapy*. 2017 Jun 27 ; 9:44. doi : [10.1186/s13195-017-0269-3](https://doi.org/10.1186/s13195-017-0269-3)
 201. Shigemori T, Harbi Z, Kawanaka H, Hicks Y, Setchi R, Takase H et Tsuruoka S. Feature Extraction Method for Clock Drawing Test. *KNOWLEDGE-BASED AND INTELLIGENT INFORMATION & ENGINEERING SYSTEMS 19TH ANNUAL CONFERENCE, KES-2015*. Sous la dir. de Ding L, Pang C, Kew L, Jain L et Howlett R. T. 60. 2015 :1707-14. doi : [10.1016/j.procs.2015.08.280](https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.280)

202. Tamura T, Tshji M, Higashi Y, Sekine M, Kohdabashi A, Fujimoto T et Mitsuyama M. New Computer-based Cognitive Function Test for the Elderly. *2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. ISSN : 1557-170X. 2006 Aug :692-4. doi : [10.1109/IEMBS.2006.260295](https://doi.org/10.1109/IEMBS.2006.260295)
203. Wilks H, Aschenbrenner A, Gordon B, Balota D, Fagan A, Musiek E, Balls-Berry J, Benzinger T, Cruchaga C, Morris J et Hassenstab J. Sharper in the morning : Cognitive time of day effects revealed with high-frequency smartphone testing. *JOURNAL OF CLINICAL AND EXPERIMENTAL NEUROPSYCHOLOGY*. 2021 Sep 14; 43:825-37. doi : [10.1080/13803395.2021.2009447](https://doi.org/10.1080/13803395.2021.2009447)
204. Zhao K, Yoshizumi T, Ota M, Ekoyama S et Arai T. DEVELOPMENT OF COGNITIVE LEVEL ESTIMATION MODEL USING MOBILE APPLICATIONS. *Alzheimer's and Dementia*. 2019; 15:P957-P958. doi : [10.1016/j.jalz.2019.06.3110](https://doi.org/10.1016/j.jalz.2019.06.3110)

université
PARIS-SACLAY

THÈSE DE DOCTORAT
NNT : 2024UPASG066