

Intelligence Artificielle Explicable et Neuropsychologie Cognitive : aide à la décision pour la reprise de la conduite automobile en cas de déficit du champ visuel

Explainable Artificial Intelligence and Cognitive Neuropsychology: decision support system for resuming driving in the case of visual field deficit

Mots clés : Intelligence artificielle ; explicabilité ; système d'aide à la décision ; champ visuel attentionnel ; données quantitatives ; aptitudes à la conduite.

Key Words: Artificial intelligence, XAI; decision support systems; UFOV test (useful field of view), quantitative data; driving skills.

Résumé

Selon les normes définies par le Journal Officiel de la République Française (arrêté du 18 décembre 2015), la conduite automobile est incompatible avec une atteinte du champ visuel binoculaire affectant un périmètre précis (Figure 1). Un tel déficit neurovisuel contre-indique la reprise de la conduite automobile, impactant fortement l'autonomie et limitant les possibilités de réinsertion professionnelle, notamment pour les personnes résidant dans des zones périphériques ou éloignées.

Au sein du service d'exploration fonctionnelle de la vision de l'hôpital Salengro (CHU de Lille), une procédure clinique a été mise en place pour évaluer le champ visuel et les processus attentionnels impliqués dans la cognition spatiale, afin d'identifier les possibilités de compensation de l'atteinte du champ visuel grâce aux processus cognitifs. Cette procédure, établie par des chercheurs et praticiens en neuropsychologie de l'adulte du CHU de Lille (Marks et al., 2015), a déjà été appliquée à un ensemble de participants, formant ainsi une Base de Données Clinique (BDC) riche et exploitable. Néanmoins, la prise de décision reste complexe lorsque le déficit du champ visuel s'approche des normes de l'arrêté de décembre 2015.

Dans ce contexte, les cliniciens spécialistes des déficits neurovisuels espèrent s'appuyer sur l'Intelligence Artificielle (IA) — qui révolutionne l'aide à la décision en santé avec une précision accrue — pour éclairer la reprise de la conduite automobile en cas de déficit du champ visuel. Dans cette optique, l'explicabilité de l'IA (XAI ou eXplainable AI) est primordiale pour garantir une aide à la décision transparente et justifiable.

L'objectif de cette thèse est donc de concevoir et de développer un Système d'Aide à la Décision Intelligent (SADI) basé sur l'IA Explicable (XAI), permettant de :

(1) perfectionner la procédure clinique existante : la BDC sera exploitée par l'IA pour identifier les facteurs expliquant et/ou prédisant les possibilités de compensation cognitive du champ visuel ;

(2) appuyer la décision de reprise ou non de la conduite automobile. Cette aide à la décision sera précieuse pour les cliniciens débutants ou confirmés, qui bénéficieront d'un modèle imitant les décisions d'un neuropsychologue expert.

Par ailleurs, le délai moyen pour obtenir un rendez-vous clinique pour un patient souffrant d'un déficit du champ visuel est d'environ six mois. Actuellement, le modèle de priorité est de type FIFO (First In, First Out), où le premier patient à soumettre son dossier est le premier planifié. Dans ce cadre, l'aide de l'IA pourrait également **(3) améliorer la prise en charge en optimisant les délais d'examens cliniques grâce à la priorisation des cas les plus critiques.**

Ce projet associe des objectifs scientifiques issus de domaines divers, notamment la neuropsychologie cognitive et les sciences numériques. Il vise à approfondir notre compréhension des liens entre vision, perception visuelle, cognition spatiale et attention, en développant des procédures d'analyse adaptées aux échantillons cliniques.

Abstract

According to the standards set by the Journal Officiel de la République Française (decree of December 18, 2015), driving is incompatible with binocular visual field impairment that affects a specific perimeter (Figure 1). Such a neurovisual deficit contraindicates the resumption of driving, significantly impacting autonomy and limiting professional reintegration opportunities, particularly for individuals residing in peripheral or remote areas.

Within the functional vision exploration service at Salengro Hospital (CHU of Lille), a clinical procedure has been implemented to assess the visual field and attentional processes involved in spatial cognition, with the aim of identifying potential compensatory mechanisms for visual field impairments through cognitive processes. This procedure, developed by researchers and practitioners in adult neuropsychology at the CHU of Lille (Marks et al., 2015), has already been applied to a group of participants, resulting in a rich and exploitable Clinical Database (BDC). However, decision-making remains complex when the visual field deficit approaches the standards specified in the December 2015 decree.

In this context, clinicians specializing in neurovisual deficits are hopeful of leveraging Artificial Intelligence (AI) — which is revolutionizing decision support in healthcare with increased precision — to provide guidance on resuming driving in cases of visual field deficits. In this regard, the explainability of AI (XAI) is crucial for ensuring a transparent and justified decision support process.

The objective of this thesis is therefore to design and develop an Intelligent Decision Support System (SADI) based on Explainable AI (XAI), enabling:

- (1) the improvement of the existing clinical procedure: the BDC will be used by AI to help identify factors that explain and/or predict possible cognitive compensation of visual field impairment;**
- (2) support for decisions on whether or not to resume driving. This decision support tool will be invaluable for both novice and experienced clinicians, who will benefit from a model that mirrors the decisions of an expert neuropsychologist.**

Additionally, the average wait time for a clinical appointment for a patient with a visual field deficit is approximately six months. Currently, the priority model is FIFO (First In, First Out), where the first patient to submit their file is the first scheduled. In this framework, AI assistance could also **(3) enhance patient care by optimizing clinical examination wait times through the prioritization of the most critical cases.**

This project brings together scientific objectives from various fields, including cognitive neuropsychology and digital sciences. It aims to deepen our understanding of the links between vision, visual perception, spatial cognition, and attention by developing analytical procedures tailored to clinical samples.

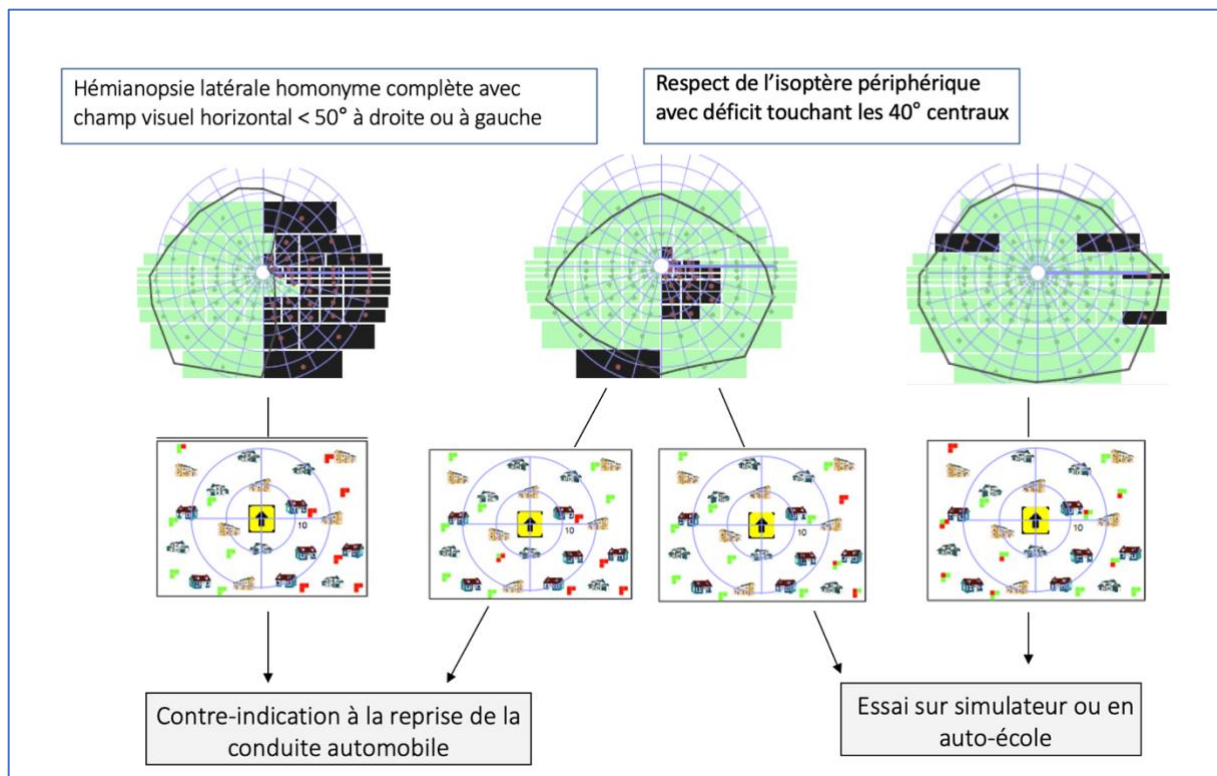


Figure 1. Représentation de la procédure clinique actuelle selon l'atteinte du champ visuel binoculaire

Contexte et problématique

Selon les normes établies par le Journal Officiel de la République Française (arrêté du 18 décembre 2015), la conduite automobile est incompatible avec une atteinte du champ visuel binoculaire affectant un périmètre défini. Un tel déficit neurovisuel contre-indique la reprise de la conduite automobile, impactant fortement l'autonomie et limitant ainsi les possibilités de réinsertion professionnelle, notamment pour les personnes résidant dans des zones périphériques ou éloignées.

Au sein du service d'exploration fonctionnelle de la vision de l'hôpital Salengro (CHU de Lille), une procédure clinique a été mise en place pour évaluer le champ visuel, la cognition spatiale et les processus attentionnels. Cette approche permet d'identifier des possibilités de compensation de l'atteinte du champ visuel grâce aux processus cognitifs. Développée par des chercheurs et praticiens en neuropsychologie de l'adulte du CHU de Lille (Marks et al., 2015), cette procédure a été appliquée à un groupe de participants, constituant ainsi une riche Base de Données Clinique (BDC). Néanmoins, la prise de décision reste complexe lorsque le déficit du champ visuel s'approche des normes de l'arrêté de décembre 2015.

Soutenue par la Structure Fédérative de Recherche – Technologies pour la Santé et Médicament (SFR-TSM), une première collaboration (2022/2023) entre le laboratoire PSITEC - ULR 4072 (Psychologie : Interactions, Temps, Émotions, Cognition) et le Centre de Recherche en Informatique CRISTAL UMR CNRS 9189 a permis d'explorer l'apport de l'IA pour aider à la décision de reprise de la conduite automobile en cas de déficit du champ visuel. Cette étude a montré qu'il n'existe actuellement aucune solution basée sur l'IA permettant d'atteindre cet objectif. Les travaux existants (voir état de l'art) proposent uniquement des solutions de prédiction de l'évolution du champ visuel pour des pathologies ophtalmiques telles que le glaucome. **Suite à cette collaboration, nous avons récemment soumis** (en cours de révision) une première publication à la revue *Expert Systems with*

Applications (JCR Q1), explorant certains algorithmes de base du machine learning pour l'aide à la décision en matière de reprise de la conduite automobile en cas de déficit du champ visuel.

Objectifs de la thèse

La thèse vise à concevoir et développer un Système d'Aide à la Décision Intelligent (SADI), basé sur l'IA Explicable (XAI), permettant de :

- (1) Perfectionner la procédure clinique en place : la Base de Données Clinique (BDC) sera exploitée par l'IA afin d'aider à identifier les facteurs expliquant et/ou prédisant les possibilités de compensation cognitive de l'atteinte du champ visuel ;
- (2) Faciliter la prise de décision pour la reprise ou non de la conduite automobile. Cette aide à la décision sera extrêmement précieuse pour les cliniciens, débutants ou confirmés, qui bénéficieront d'un modèle imitant les choix d'un neuropsychologue expert.

Par ailleurs, le délai moyen pour obtenir un rendez-vous clinique pour un patient présentant un déficit du champ visuel est d'environ six mois. Actuellement, le modèle de priorité utilisé suit le principe du FIFO (First In, First Out), où les dossiers sont traités dans l'ordre de dépôt.

Dans ce contexte, l'IA permettra également de :

- (3) Garantir une prise en charge optimisée en priorisant les cas les plus critiques, afin de réduire les délais d'attente pour les examens cliniques les plus urgents.

Ce projet rassemble des objectifs scientifiques issus de plusieurs disciplines, dont la psychologie cognitive et les sciences numériques. Il permettra d'approfondir notre compréhension des interactions entre la vision, la perception visuelle, la cognition spatiale et l'attention, en développant des procédures d'analyse adaptées aux échantillons cliniques.

La base de données cliniques (BDC) fournie dans le cadre de cette thèse est entièrement numérique et comprend les résultats chiffrés des divers tests cliniques réalisés lors des consultations. Une perspective intéressante serait d'exploiter également les données visuelles issues des consultations ophtalmiques, réalisées en parallèle des évaluations neuropsychologiques.

Programme prévisionnel de travail

1. Data engineering et Data management (T0+36)

Exploration, analyse et gestion de la Base de Données Clinique (BDC) fournie par les cliniciens et neuropsychologues du CHU de Lille. Cette tâche s'étendra sur toute la durée de la thèse, avec de nouvelles données régulièrement fournies par nos partenaires du CHU de Lille, en fonction des consultations cliniques.

2. Revue de la littérature et positionnement (T0+30)

Cette tâche sera clôturée 6 mois avant la fin de la thèse, avec des mises à jour régulières de la méta-analyse en cours :

- a) Actualiser la revue de la littérature initiée par les laboratoires PSITEC et CRISTAL, sur les sujets suivants :
 - i. Les recherches sur l'aide à la décision dans la prédiction des pathologies ophtalmiques et neurologiques.
 - ii. Les méthodes et techniques d'IA appliquées à ces pathologies.
- b) Développer une revue spécifique aux méthodes et techniques de l'IA Explicable (XAI) et leurs applications potentielles aux pathologies ophtalmiques et neurologiques.

- c) Synthétiser quantitativement les revues de la littérature à l'aide de tableaux et d'une méta-analyse (effet combiné) sur la problématique de la thèse.
- d) Positionner le projet de thèse par rapport aux travaux existants.

3. Méthode/Solution proposée (T6+30)

Cette partie sera également finalisée 6 mois avant la fin de la thèse, avec des améliorations continues de l'architecture et de la méthodologie de la solution : Concevoir et développer un système d'aide à la décision basé sur l'XAI :

- a) Sélection des méthodes et techniques, validation par preuves et démonstrations.
- b) Conception, développement et optimisation des algorithmes.

4. Expérimentations, optimisations et résultats (T24+12)

Expérimentations et optimisation de la solution XAI proposée :

- a) Comparer différentes configurations de la solution XAI.
- b) Validation par preuves (semi-)formelles et optimisation de la solution.
- c) Évaluer la solution par rapport :
 - i. À la procédure clinique.
 - ii. Aux méthodes de machine learning conventionnelles, non explicables.

État de l'art

La décision concernant la capacité à conduire des personnes souffrant de déficits du champ visuel constitue un sujet d'intérêt majeur (Büla et al., 2011). Lors des bilans ophtalmologiques pour la reprise de la conduite, en plus du test standard du champ visuel, une analyse du champ visuel attentionnel, ou "Useful Field of View" (UFOV), est réalisée pour les patients cérébrolésés (Clay et al., 2005 ; Sekuler & Ball, 1986). En l'absence de normes établies pour la prise de décision en matière de conduite, une étude de 2015 menée par des chercheurs et praticiens en ophtalmologie et en neuropsychologie de l'adulte du CHU de Lille (Marks et al., 2015) a permis de proposer des normes basées sur le score seuil (5e percentile) pour les omissions aux tâches du test UFOV : tâche simple (ST), double tâche (DT) et double tâche avec distracteurs visuels (DT-dis). Cette démarche vise à évaluer les possibilités de compensation cognitive du champ visuel déficitaire grâce aux capacités d'attention visuelle, permettant ainsi de statuer sur l'aptitude d'un patient à reprendre la conduite.

Comme précisé dans la première partie de ce document (contexte et problématique), le protocole établi repose sur des études statistiques inférentielles, qui ne permettent pas toujours une aide à la décision efficace, ni une planification optimale des consultations.

Dans ce contexte, et face aux progrès constants de l'Intelligence Artificielle (IA), les spécialistes des déficits neurovisuels espèrent aujourd'hui s'appuyer sur l'IA pour faciliter la prise de décision et permettre aux patients avec un déficit du champ visuel de reprendre la conduite en toute sécurité. Les experts du CHU de Lille mettent ainsi à disposition une Base de Données Clinique (BDC) enrichie au fil des consultations.

Plusieurs travaux d'IA ont visé la prédiction de l'évolution des déficits du champ visuel en lien avec des pathologies ophtalmiques ou neurologiques, ou encore l'estimation de la taille de l'UFOV. **Cependant, aucune étude ne s'est spécifiquement focalisée sur l'usage de l'IA pour un système d'aide à la décision visant une compensation du champ visuel déficitaire par les processus attentionnels en exploitant des données numériques issues des divers tests cliniques réalisés lors des consultations sous forme de valeurs chiffrées, et non d'images.**

Les chercheurs travaillant sur cette problématique s'intéressent particulièrement au Machine Learning (ML), qui permet aux systèmes informatiques d'améliorer leur prise de décision par l'expérience. Par exemple, McNaught et al. (1995) et O'Leary et al. (2012) ont montré que les modèles de régression linéaire sont efficaces pour prédire l'état futur du champ visuel, bien que d'autres études indiquent que des modèles plus complexes offrent des prédictions plus fiables.

Les réseaux de neurones (RN), sous-catégorie du ML aussi appelée deep learning (DL), ont démontré une excellente performance dans la prédiction de la progression des déficits du champ visuel. Dans l'étude de Morishima et al. (2015), trois méthodes de ML - Support Vector Machine (SVM), boosting et Radial Basis Function Network (RBFN) - ont été testées pour estimer la taille de l'UFOV. Le boosting a atteint une précision d'environ 85 % dans des conditions définies, bien que la précision pour la discrimination de faibles rétrécissements du champ visuel ait été moins satisfaisante.

Le réseau neuronal récurrent (RNN) a également montré des performances remarquables. Contrairement aux autres réseaux neuronaux, le RNN conserve l'historique des données d'entrée, ce qui améliore la prédiction en tenant compte des séquences de données visuelles (Hochreiter & Schmidhuber, 1997). Cette capacité à intégrer les séquences est particulièrement utile dans le contexte des examens de champ visuel, permettant ainsi au RNN de mieux interpréter et prédire la progression du champ visuel (Park & Kim, 2019).

Wen et al. (2019) utilisent un CNN pour prédire l'évolution du champ visuel à partir d'un seul examen, tandis que Berchuck et al. (2019) s'appuient sur un autoencodeur variationnel pour estimer le taux de progression. D'autres études, telles que celle de Caprioli et al. (2011), comparent des modèles linéaires, quadratiques et exponentiels pour la prédiction des déficits visuels, soulignant la supériorité des modèles exponentiels. Une autre étude (Murata et al., 2014) montre que la régression linéaire de Bayes offre une meilleure capacité de prédiction que la régression linéaire classique pour les déficits du champ visuel, tandis que Wang et al. (2019) utilisent le ML non supervisé pour la détection de la progression du champ.

Bibliographie

- S. I. Berchuck, S. Mukherjee, F. A. Medeiros, *Estimating rates of progression and predicting future visual fields in glaucoma using a deep variational autoencoder*, *Scientific Reports* 9 (1) (2019) 18113.
- C. Büla, S. Eyer, A. von Gunten, B. Favrat, S. Monod, *Conduite automobile et troubles cognitifs : comment anticiper?*, *Revue médicale suisse* (316) (2011) 2184.
- J. Caprioli, D. Mock, E. Bitrian, A. A. Afifi, F. Yu, K. Nouri-Mahdavi, A. L. Coleman, *A method to measure and predict rates of regional visual field decay in glaucoma*, *Investigative ophthalmology & visual science* 52 (7) (2011) 4765–4773.
- O. J. Clay, V. G. Wadley, J. D. Edwards, D. L. Roth, D. L. Roenker, K. K. Ball, *Cumulative meta-analysis of the relationship between useful field of view and driving performance in older adults: Current and future implications*, *Optometry and vision science* 82 (8) (2005) 724–731.
- S. Hochreiter, J. Schmidhuber, *Long short-term memory*, *Neural computation* 9 (8) (1997) 1735–1780.
- C. Marks, I. Bouacha, S. Defoort, D. Basset, C. Moroni, *Principle of the useful field of view and normative data*, *Journal Francais D'ophtalmologie* 38 (6) (2015) 486–492.
- A. McNaught, R. A. Hitchings, D. Crabb, F. Fitzke, *Modelling series of visual fields to detect progression in normal-tension glaucoma*, *Graefe's archive for clinical and experimental ophthalmology* 233 (1995) 750–755.
- H. Murata, M. Araie, R. Asaoka, *A new approach to measure visual field progression in glaucoma patients using variational bayes linear regression*, *Investigative ophthalmology & visual science* 55 (12) (2014) 8386–8392.

N. O’Leary, B. C. Chauhan, P. H. Artes, *Visual field progression in glaucoma: estimating the overall significance of deterioration with permutation analyses of pointwise linear regression (poplr)*, *Investigative ophthalmology & visual science* 53 (11) (2012) 6776–6784.

K. Park, J. Kim, J. Lee, *Visual field prediction using recurrent neural network*, *Scientific reports* 9 (1) (2019) 8385.

R. Sekuler, K. Ball, *Visual localization: Age and practice*, *JOSA A* 3 (6) (1986) 864–867.

M. Wang, L. Q. Shen, L. R. Pasquale, P. Petrakos, S. Formica, M. V. Boland, S. R. Wellik, C. G. De Moraes, J. S. Myers, O. Saeedi, et al., *An artificial intelligence approach to detect visual field progression in glaucoma based on spatial pattern analysis*, *Investigative ophthalmology & visual science* 60 (1) (2019) 365–375.

J. C. Wen, C. S. Lee, P. A. Keane, S. Xiao, A. S. Rokem, P. P. Chen, Y. Wu, A. Y. Lee, *Forecasting future humphrey visual fields using deep learning*, *PloS one* 14 (4) (2019) e0214875.