

MindPulse : Un nouvel outil pour mesurer les capacités décisionnelles et le degré de vigilance

Dr. S. Suarez (1), Dr. B. Eynard (2)

- (1) Dr. en Neurosciences et NeuroPsychologue, Directrice de Recherches à It's Brain
(2) Dr en Physique-Mathématiques, Directeur de Recherches CEA.

1. Les capacités décisionnelles : un élément clé des fonctions Exécutives et un enjeu opérationnel majeur !

La cognition englobe un large éventail de fonctions, jouant un rôle fondamental dans le comportement humain, les interactions sociales et la manière dont les individus appréhendent et interagissent avec leur environnement.

Dans la cognition, les capacités à prendre des décisions éclairées est au cœur de l'efficacité des forces armées modernes. Face à des environnements de plus en plus complexes et à des menaces en constante évolution, la prise de décision rapide et appropriée est une compétence cruciale pour les soldats. Cette aptitude, issue des **fonctions exécutives**, constitue une composante essentielle de la performance opérationnelle.

Cependant, les capacités décisionnelles sont sensibles et peuvent être altérées par des émotions comme le stress, par le manque de sommeil ainsi que par des substances ou environnements neurotoxiques (alcool, drogues etc.) mais aussi par les situations de surcharge cognitive liées notamment à l'utilisation d'équipements de plus en plus nombreux et complexes.

La cognition est l'ensemble des processus mentaux qui se rapportent à la fonction de connaissance et qui mettent en jeu des éléments essentiels tels que la mémoire, le langage, le raisonnement, l'apprentissage, l'intelligence, la résolution de problèmes, la prise de décision, la perception et l'attention. Sa définition a évolué pour intégrer les fonctions émotionnelles, qui font partie intégrante du raisonnement et de la prise de décision.



PRENDRE LA « BONNE DÉCISION »

« Pour les forces militaires, les capacités cognitives de prise de décision sont enjeu opérationnel majeur pour sélectionner, pour évaluer la préparation et la capacité à partir en mission, pour la gestion opérationnelle et pour le suivi ».

Pour anticiper et gérer les situations de **surcharge cognitive**, il est indispensable de pouvoir mesurer les capacités décisionnelles de base des soldats. Cela permet d'identifier les faiblesses cognitives potentielles, d'aider ceux qui sont les plus à risque et d'adapter les entraînements pour renforcer la résilience cognitive en situation de stress.

Le challenge est de pouvoir « mesurer de façon objective » si la capacité décisionnelle est

affectée ou pas, et de pouvoir avoir un indicateur permettant de développer des méthodes pour améliorer la prise de décision.

Le test MindPulse est un test innovant conçu à partir des modèles récents de neurosciences et de mathématiques de haut niveau, qui permet justement de mesurer ces données cognitives (Suarez et al., 2021 ; Ansado et al., 2024). C'est une technologie déjà utilisée dans des études concernant la marine, l'aérospatial, les pompiers, l'Armée de Terre ou la gendarmerie.

Prendre la bonne décision : un enjeu critique

Les fonctions exécutives sont un ensemble de compétences cognitives essentielles qui jouent un rôle central dans notre capacité à rester adaptés à un environnement changeant, à résoudre des problèmes et à réussir nos interactions sociales et professionnelles. Ces fonctions nous permettent de planifier, d'organiser, de gérer notre temps et nos émotions et de prendre des décisions. Ces capacités sont cruciales pour la réussite dans de nombreux aspects de nos vies. Parmi ces compétences, la prise de décision occupe une place centrale et constitue une fenêtre sur la manière dont nous utilisons nos fonctions exécutives pour faire des choix éclairés et adaptés à notre environnement.

Prendre des décisions sous pression

Dans un contexte militaire, on observe une introduction de plus en plus importante de technologies et de nouveaux équipements. Ces outils permettent de traiter de grandes quantités de données, mais augmentent également la charge cognitive sur les soldats.

L'exigence cognitive prend une part prépondérante

D'ici 2040, la demande cognitive dominera entièrement les niveaux stratégique et opérationnel et représentera les trois quarts des exigences tactiques, transformant profondément le rôle, autrefois physique, du combattant en un rôle centré sur des compétences cognitives avancées
cf. Billing et al., 2021.

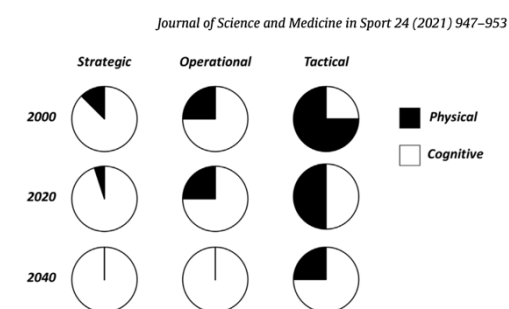


Fig. 1. Evolution of cognitive-physical balance of demands for the human combatant at the strategic, operation and tactical levels in 2000 and 2020 and projected through to 2040.

Selon **Billing et al. (2021)**, d'ici 2040 « la demande cognitive dominera entièrement les niveaux stratégiques et opérationnels et représentera les trois quarts des exigences tactiques, transformant profondément le rôle autrefois physique, du combattant en un rôle centré sur les compétences cognitives avancées ».

Ces innovations peuvent donc accentuer les risques de surcharge cognitive, notamment lorsque les soldats doivent simultanément interpréter des

recommandations issues de ces technologies et prendre des décisions éclairées dans un temps contraint.

Une gestion inadéquate de cette surcharge peut entraîner des erreurs critiques dans des situations tactiques à haut risque.

2. Mesurer et Prévenir la Surcharge Cognitive

Pour prévenir les effets de la surcharge cognitive, il est crucial de mesurer et d'évaluer

La **surcharge cognitive** se réfère à un état dans lequel un individu est confronté à un excès d'informations ou à des exigences mentales qui dépassent sa capacité de traitement cognitif. Dans le contexte militaire, la surcharge cognitive peut survenir lorsque les soldats doivent gérer simultanément de nombreuses tâches complexes, telles que l'analyse d'informations en temps réel, la prise de décision stratégique, la communication avec d'autres membres de l'équipe et l'évaluation des menaces. Cette surcharge peut avoir des conséquences graves, notamment des erreurs de jugement, une diminution de la performance, une augmentation du stress et une incapacité à réagir rapidement et efficacement aux situations critiques. Les environnements opérationnels modernes, avec leurs technologies avancées et leurs flux d'informations en constante augmentation, exacerbent ce phénomène.

régulièrement les capacités décisionnelles des soldats afin d'identifier les individus les plus susceptibles de subir des effets délétères d'un effet de surcharge cognitive. Cette évaluation permettrait de détecter les vulnérabilités potentielles et pourrait permettre d'offrir une réponse personnalisée soit en diminuant la charge cognitive soit en renforçant

les compétences spécifiques, et/ou la régulation émotionnelle.

MindPulse : Un Outil de Mesure Innovant pour la Prise de Décision

MindPulse est un test neurocognitif numérique qui permet d'évaluer et de quantifier les fonctions attentionnelles et exécutives, y compris la capacité décisionnelle. C'est une innovation française, brevetée et lauréate du concours à l'innovation scientifique iLab. Le test mesure les temps de réaction et la précision des réponses pour caractériser l'état cognitif du sujet.

Un temps de réaction simple, qui comprend le temps de perception et d'analyse visuelle, une décision d'action simple et l'action des muscles varie entre 200-300 ms, mais si on demande au sujet une tâche de catégorisation des images,

Les échelles de temps montrent que notre cerveau prend plus de temps à réfléchir qu'à percevoir et répondre musculairement.



- > **Évaluation / Sélection / Affectation** (enrôlement / missions / risques).
- > **Repérage des comportements à risque** (Difficultés exécutives issues de dépression / addiction / traumatismes, etc.)
- > **Évaluation de l'impact des environnements** isolés, confinés, extrêmes et inhabituels sur les réponses psycho-physio-cognitives des militaires.

Repérer et prévenir les risques de surcharge cognitive dans les conflits de haute intensité demandant une gestion accrue d'outils technologiques

même simple, le temps moyen est autour de 500 ms. Et pour une tâche demandant une double catégorisation et de l'inhibition, notre temps d'action passe autour de 800 ms.

Le dispositif mesure au centième de seconde la réaction d'un sujet à des images dans des conditions de catégorisation de plus en plus complexes. Un algorithme permet ensuite d'analyser la performance

du sujet pour en dégager une mesure des capacités décisionnelles, englobant sa vitesse psychomotrice liée à son état d'alerte, ses fonctions exécutives (dans un équilibre vitesse-précision), son attention partagée et un nouvel indicateur appelé "Réaction à la Difficulté", qui offre un aperçu de la manière dont le sujet s'adapte à la difficulté perçue (en lien avec son état émotionnel face à la situation) avec une mesure chiffrée de l'impact de cette adaptation/mal-adaptation sur sa vitesse cognitive exécutive.

En seulement 15 minutes, cet outil fournit un rapport détaillé avec 16 indicateurs, qui aide à identifier les forces et faiblesses cognitives d'un individu.

Ce test est particulièrement pertinent pour les forces armées, car il permet de suivre l'évolution des compétences cognitives des soldats dans le temps, à la fois en présentiel et en distanciel et de distinguer l'effet d'une fatigue physique d'une atteinte exécutive plus profonde sur les capacités décisionnelles.

3. Le rôle clé de la vigilance

La vigilance (ou état d'alerte) constitue le premier niveau de l'attention. Il s'agit de notre capacité à augmenter brusquement notre état d'éveil en réaction à un événement dans notre environnement, ce qui va nous permettre de réagir rapidement et de manière adéquate aux stimuli environnementaux. Elle est influencée par l'interaction entre l'individu et son environnement, compliquant ainsi sa reproduction en laboratoire. Bien que de nombreuses méthodes d'évaluation existent, comme des tests psychométriques et des mesures physiologiques, il est souvent difficile de concilier les résultats objectifs avec les ressentis subjectifs de fatigue, ce qui fait naître des modèles récents qui considèrent la vigilance comme un processus dynamique affectant les interactions entre le cerveau, le comportement et l'environnement (Klösch et al., 2022).

Cette problématique est si importante qu'elle a fait l'objet de la création d'une unité de recherche au sein de l'Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA), l'unité « Fatigue et Vigilance » dont la thématique d'intérêt est : « la fatigue et la dégradation de la vigilance induite par les situations opérationnelles militaires et à la gestion de la récupération ». Ses travaux ont pour objectifs de « comprendre les conséquences physiologiques des altérations du cycle veille/sommeil et du temps passé à la tâche ».

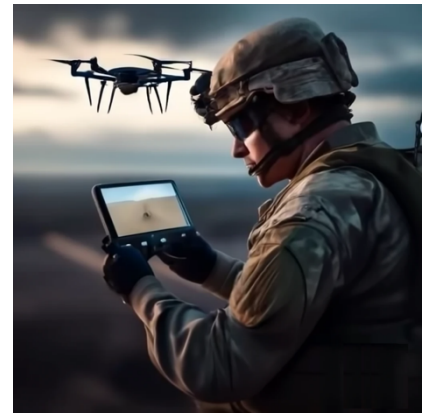
Le développement d'outils comme MindPulse ouvre des perspectives pour évaluer cette vigilance dans des contextes contrôlés où les distractions sont éliminées, fournissant ainsi une mesure étalon précise des capacités cognitives maximales d'un soldat en interaction avec son fonctionnement exécutif.

4. La notion de complexité de la tâche et de surcharge cognitive

La complexité de la tâche est un facteur déterminant qui influence directement la performance cognitive des soldats dans des situations opérationnelles. À mesure que la complexité de la tâche augmente, les exigences cognitives sur les soldats s'intensifient, ce qui peut mener à une surcharge cognitive et notamment une difficulté exécutive ce qui va entraîner des prises de décision problématiques.

Repérer et prévenir les éléments de surcharge cognitive dans les conflits de haute intensité demandant une gestion accrue d'outils technologiques devient un enjeu opérationnel majeur.

La difficulté pour pouvoir comprendre l'impact de la surcharge cognitive est de pouvoir mesurer le degré de difficulté d'une tâche. Une des prouesses techniques du test MindPulse est justement d'avoir réussi à déduire une échelle du traitement cérébral de la difficulté d'une tâche. C'est-à-dire de pouvoir mesurer de « combien » une tâche est plus « difficile » qu'une autre ! C'est ce qui va permettre de comparer les réponses et surtout la vitesse et la précision des réponses lors de tâches de difficulté différentes. Ce point d'objectivation très important est celui qui permet ensuite d'envisager l'élargissement des mesures à des mesures en temps et en environnement réel avec de l'Intelligence artificielle (voir plus bas).



Le développement de nouveaux outils basés sur les dernières avancées en neurosciences et

« La cognition humaine en situation à risque est un enjeu majeur de la sécurité dans un environnement technologique et opérationnel extrêmement dynamique. La complexité des systèmes d'armes impose de les asservir aux capacités de l'opérateur pour des raisons de performance et de sécurité. Il est nécessaire de disposer de biomarqueurs et de profils associés permettant l'identification et la prévention des dysfonctions cognitives et émotionnelles ».

capables de détecter finement le fonctionnement cognitif et d'anticiper les risques de surcharge cognitive est fondamental pour disposer d'outils scientifiques. MindPulse est ainsi utilisé aujourd'hui dans une dizaine de recherches militaires, pour

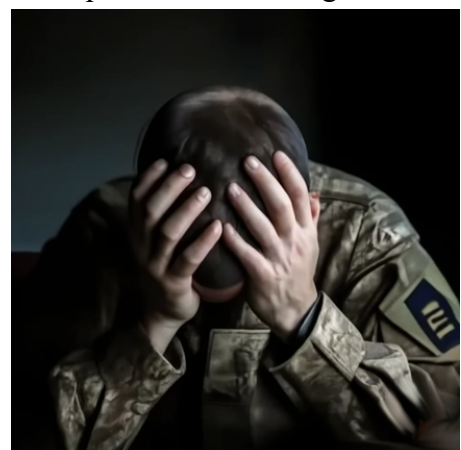
évaluer l'impact des environnements stressants ou extrêmes ; de l'isolement ; du manque de sommeil ; de la gravité, des conditions de survie, sur la réponse psycho-cognitive des militaires (ex. Le Roy et coll., 2023 ; 2024).

5. Le rôle des émotions dans la décision

Pendant longtemps on a cru que émotions et décisions rationnelles était indépendantes, voire

« Pour le bon et le moins bon » les émotions font partie intégrante de la raison et de la prise de décision. Sans émotion nos raisonnements sont faussés.

opposées, mais ce dogme a explosé notamment grâce aux recherches du Pr A. Damasio qui publie en 1995 un essai fracassant « L'erreur de Descartes ». Damasio y démontre que les émotions et les sentiments jouent un rôle fondamental dans la rationalité, l'élaboration de la pensée logique et la prise de décision humaine. Il présente la théorie des "marqueurs somatiques", qui montre le mécanisme par lequel les émotions sont indispensables à un comportement et une prise de décision ajustés.



MindPulse permet d'avoir un aperçu de cette interaction des émotions sur les capacités décisionnelles. Le nouvel indice de « Réaction à la difficulté » qui fait l'objet d'un brevet conjoint avec le CNRS et l'Université Paris Saclay est une mesure corrélée à la situation émotionnelle du sujet (Suarez et al., 2021).

6. Un nouveau modèle pour comprendre le fonctionnement cérébral : le DDM

Grâce à la collaboration avec des mathématiciens et physiciens de haut niveau, le test *MindPulse* utilise le Modèle de Diffusion de la Décision (DDM) dans une version expérimentale pour analyser la manière dont un individu prend des décisions.

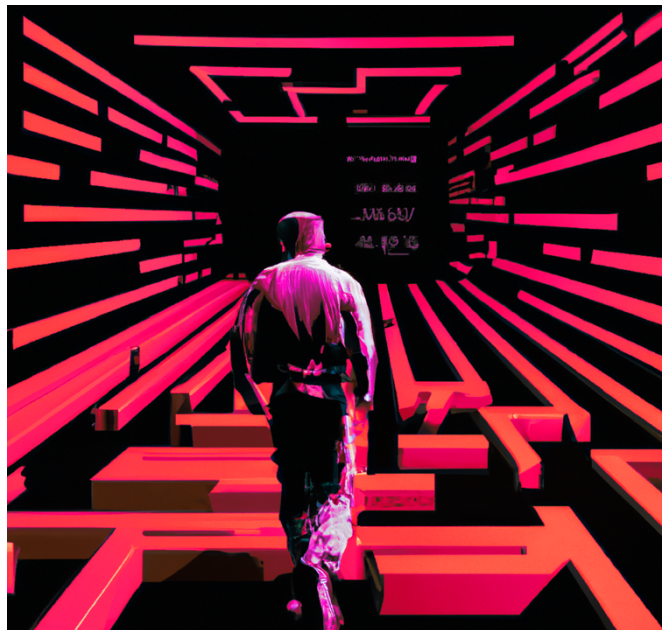
Le DDM constitue un paradigme au plus proche du fonctionnement neurobiologique, permettant de modéliser et d'analyser la prise de décision à partir d'une tâche de Go-NoGo¹. La diffusion est un principe physique, décrivant par exemple la façon dont les électrons diffusent en interagissant de proche en proche, rebondissant de façon quasi-aléatoire dans un matériau pour finalement produire un courant électrique. C'est le physicien et neuroscientifique Roger Ratcliff (Ratcliff, 1978) qui proposa en premier d'utiliser le modèle de diffusion stochastique pour comprendre le fonctionnement des neurones dans les capacités décisionnelles. Ce modèle a été validé dans de nombreuses études expérimentales, chez l'homme et chez l'animal, il est considéré comme le modèle le plus fiable de la prise de décision, permettant notamment de dégager des indices reflétant d'une part le niveau attentionnel et d'autre part une composante de nature plus « émotionnelle ».

Cependant son haut niveau technique du point de vue mathématique, constitue une barrière qui a freiné son utilisation, et le *MindPulse* est l'un des tout premiers à l'implémenter -en phase de développement aujourd'hui- dans un test court et utilisable. Il est actuellement testé dans certaines études chez des commandos.

7. L'utilisation de l'intelligence artificielle pour comprendre le style d'adaptation à la décision de chacun

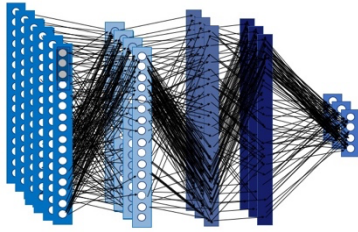
La technologie de *MindPulse* évolue avec l'apport d'une Intelligence Artificielle classificatrice permettant d'évaluer pour chaque sujet des Profils d'Adaptation dynamique à la prise de Décision (PAD). Ces profils permettent de regarder comment chaque sujet s'adapte et fait évoluer sa décision au cours du test. Ainsi, ce qui est regardé par l'IA ce n'est pas simplement la moyenne des performances, mais la dynamique avec laquelle chaque sujet s'adapte au fur et à mesure de la tâche, ce qui permettra de repérer des difficultés liées au style d'adaptation de la personne (IA classificatrice non supervisée).

Les profils obtenus par l'IA prennent en considération la vitesse des sujets, leur précision, leur variabilité et leurs évolutions au cours du test, y compris les



¹ Les sujets doivent répondre le plus rapidement possible (Go) à une certaine classe de stimuli, par exemple, en pressant une touche de clavier, et ne pas répondre à d'autres classes de stimuli (No Go).

modifications du comportement après une erreur. Les mesures cognitives deviennent « dynamiques » et non plus un cliché statique, ce qui les rend beaucoup plus proche du fonctionnement réel.



Ces innovations permettent de dégager des arguments cliniques inédits, ils sont actuellement utilisés pour l'étude des difficultés d'adaptation chez les patients avec dépression unipolaire majeure.

Avec ces nouveaux développements, MindPulse se dirige vers des modèles plus dynamiques et ambitionne de dégager des biomarqueurs cognitifs et pathologiques fiables pour mieux cibler les traitements.

8. Surveiller les capacités décisionnelles malgré la surcharge cognitive, en temps réel et en environnement réel ?

Pourrions-nous parvenir à une surveillance en temps réel et en environnement réel des capacités décisionnelles ?

Nous pouvons imaginer que de tels dispositifs vont se développer.

Monitorer l'adaptation décisionnelle

Le plus grand défi à venir est l'intégration d'un suivi des capacités cognitives en temps réel et en environnement réel !

Monitorer
Stimuler
Protéger



L'IA pourrait être utilisée en premier lieu pour calibrer un test cognitif, d'abord dans un environnement contrôlé, exempt de distractions et d'interférences, puis en simulateur avec des distractions calibrées, et enfin dans des environnements réels. Enfin l'IA pourrait reconnaître les états cognitifs optimaux en simulateur et suivre la performance des soldats sur le terrain, en surveillant les dérives

attentionnelles et exécutives.

Le défi technique serait alors de comparer des tâches de niveaux de difficulté différents, un objectif que le MindPulse a déjà commencé à accomplir.

L'objectif à terme est d'avoir des indicateurs dynamiques personnalisés de la cognition du sujet en situation pour proposer des actions de régulation dynamique de la cognition.

*Toutes les images ont été créées par Intelligence Artificielle (<https://www.crayon.com/>) ou DALL.E et remaniées (GIMP).

Bibliographie :

- Ansado J, Eynard B, Mirofle N, Mennetrey C, Banchereau J, Sablon M, Lokietek E, Le Vourc'h F, Tissot J, Wrobel J, Martel C, Granon S, Suarez S. Adult norms for the decision-making MindPulse Digital Test. *Appl Neuropsychol Adult*. 2024 Feb 14:1-19.
- Billing DC, Fordy GR, Friedl KE, Hasselstrøm H. The implications of emerging technology on military human performance research priorities. *J Sci Med Sport*. 2021 Oct;24(10):947-953.
- Damasio AR *L'Erreur de Descartes : la raison des émotions*, Paris, [Odile Jacob](#), 1995, 368 p.
- Klösch G, Zeitlhofer J, Ipsiroglu O. Revisiting the Concept of Vigilance. *Front Psychiatry*. 2022 Jun 14;13:874757.
- Ratcliff R. A theory of memory retrieval. *Psychological Review*. 1978;85:59–108.
- Le Roy B, Martin-Krumm C, Gille A, Jacob S, Vigier C, Laborde S, Claverie D, Besnard S, Trousselard M. Evaluation of taVNS for extreme environments: an exploration study of health benefits and stress operability. *Front Neurol*. 2023 Nov 22;14:1286919.
- Le Roy B, Martin-Krumm C, Poupon C, Rouquet C, Trouve C, Jegou C, Giaume L, Trousselard M. Lost at sea: Impact of an ocean survival experience on psychological, physiological and cognitive abilities (RAD'LÔ), *European Journal of Trauma & Dissociation*, Volume 8, Issue 4, 2024,100452, ISSN 2468-7499.
- Suarez S, Eynard B, Granon S. A Dissociation of Attention, Executive Function and Reaction to Difficulty: Development of the MindPulse Test, a Novel Digital Neuropsychological Test for Precise Quantification of Perceptual-Motor Decision-Making Processes. *Front Neurosci*. 2021 Jul 19;15:650219.