



**ANAÏS MARTINS**



**DOSSIER DE  
VEILLE**

**INFORMATIONNELLE TECHNOLOGIQUE**

**BTS SIO**

# SOMMAIRE

- 01** PROBLÉMATIQUE
- 02** DÉMARCHE DE VEILLE
- 03** ANALYSE ARGUMENTÉE
- 04** RECOMMANDATIONS
- 05** GLOSSAIRE
- 06** SOURCES

Ce dossier présente la réalisation d'une veille informationnelle technologique dans le cadre de l'épreuve E4, en lien avec la compétence « 1.6 Organisation de son développement professionnel ».

# 1) Problématique

Les interactions entre l'être humain et la machine n'ont cessé d'évoluer au fil des décennies : du clavier à la souris, de l'écran tactile à la reconnaissance vocale, chaque avancée a cherché à rendre cette communication plus naturelle, plus rapide et plus intuitive. Aujourd'hui, une nouvelle frontière se dessine : celle d'une interaction directe entre le cerveau humain et les systèmes informatiques, sans intermédiaire physique. C'est le principe des Interfaces Cerveau-Machine (ICM).

Nées dans les laboratoires de recherche en neurosciences dans les années 1970, les ICM ont longtemps été cantonnées au domaine médical, principalement pour redonner des capacités de communication ou de mouvement à des patients atteints de paralysie sévère. Mais les progrès conjugués des neurosciences, de l'électronique miniaturisée et de l'intelligence artificielle – en particulier du machine learning – ont considérablement élargi leur champ d'application potentiel. On parle désormais de contrôle d'outils robotisés, de monitoring de l'état cognitif en temps réel, d'assistance dans des environnements contraignants, ou encore d'interfaces de communication augmentée.

Ces perspectives soulèvent cependant des questions fondamentales. Si les ICM montrent des résultats prometteurs en laboratoire, leur déploiement dans des contextes réels et exigeants – où la fiabilité n'est pas une option mais une nécessité – reste un défi majeur. Les signaux cérébraux sont bruités, variables d'un individu à l'autre, et sensibles à la fatigue ou au stress. Les algorithmes de classification, aussi performants soient-ils, doivent fonctionner en temps réel, sur des données imparfaites, dans des conditions qui ne ressemblent pas toujours à celles d'un laboratoire contrôlé.

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette veille technologique, qui cherche à répondre à la question suivante :

## Problématique



**Les ICM peuvent-elles devenir un outil opérationnel fiable pour améliorer la sécurité et les performances humaines dans les environnements professionnels exigeants ?**

# 2) Démarche de veille

## 2.1) État des lieux des Interfaces Cerveau-Machine

Une Interface Cerveau-Machine (ICM), ou *Brain-Computer Interface* (BCI) en anglais, est un système technologique permettant une communication directe entre le cerveau humain et un dispositif externe, sans passer par les voies nerveuses et musculaires habituelles. Concrètement, le système capte l'activité électrique ou métabolique du cerveau, l'analyse en temps réel, et la traduit en commandes interprétables par une machine.

Le fonctionnement d'une ICM repose sur un pipeline en quatre étapes :

**Acquisition** – le signal cérébral est capté par des capteurs placés sur ou dans le cerveau.

**Prétraitement** – le signal brut est filtré et nettoyé avec un algorithme de machine learning, pour éliminer les artefacts (mouvements des yeux, tension musculaire, interférences électromagnétiques).

**Extraction de features et classification** – des caractéristiques pertinentes sont extraites du signal, puis un algorithme de machine learning identifie l'intention ou l'état mental de l'utilisateur.

**Commande** – le résultat de la classification est traduit en action concrète : déplacement d'un curseur, déclenchement d'une alerte, contrôle d'un bras robotique.

---

Les ICM se divisent en deux catégories selon leur mode d'acquisition du signal.

Les ICM **invasives** nécessitent une intervention chirurgicale pour implanter des électrodes directement dans le tissu cérébral, ou sur la surface du cortex (on parle alors d'électrocorticographie, ou ECoG). Ce positionnement au plus près des neurones garantit un signal d'une très grande précision et richesse, permettant des applications très fines comme le contrôle de membres bioniques avec une dextérité proche du naturel. En contrepartie, les risques chirurgicaux, l'infection potentielle et la dégradation progressive des électrodes limitent leur usage à des contextes médicaux lourds ou à la recherche fondamentale.

Les ICM **non-invasives** ne requièrent aucune chirurgie. Les capteurs sont positionnés à l'extérieur du crâne, ce qui les rend utilisables dans des environnements variés et sur des sujets sains. C'est cette famille qui présente le plus grand potentiel pour des applications industrielles. Leur principal inconvénient est la qualité du signal, nécessairement dégradée par son passage à travers le crâne et le cuir chevelu.

---

Les modalités de capture du signal

Plusieurs technologies permettent de mesurer l'activité cérébrale de manière non-invasive. Elles se distinguent par leur résolution temporelle (capacité à détecter des événements rapides) et leur résolution spatiale (capacité à localiser précisément l'origine du signal).

**L'électroencéphalographie (EEG)** est la modalité de référence pour les ICM non-invasives. Elle mesure l'activité électrique du cerveau via des électrodes posées sur le cuir chevelu. Sa résolution temporelle est excellente – elle capture des variations en quelques millisecondes – ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications temps réel. En revanche, sa résolution spatiale est faible : le signal est diffus et difficile à localiser précisément. L'EEG est également sensible aux artefacts, notamment les mouvements oculaires et la tension des muscles faciaux. Malgré ces limitations, son faible coût, sa portabilité et sa maturité technologique en font la modalité la plus utilisée dans la recherche et le développement ICM.

**L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)** mesure les variations du flux sanguin cérébral liées à l'activité neuronale. Sa résolution spatiale est très élevée, permettant de localiser l'activité au millimètre près. Cependant, sa résolution temporelle est médiocre (plusieurs secondes de délai) et l'équipement est volumineux et coûteux, ce qui la rend inadaptée aux applications temps réel ou embarquées.

**La spectroscopie proche infrarouge fonctionnelle (fNIRS)** utilise la lumière infrarouge pour mesurer l'oxygénation du sang dans le cerveau. Plus portable que l'IRMf, elle reste lente et est souvent utilisée en complément de l'EEG pour enrichir l'information spatiale.

**La magnétoencéphalographie (MEG)** mesure les champs magnétiques produits par l'activité neuronale. Elle offre à la fois une bonne résolution temporelle et spatiale, mais son équipement est extrêmement coûteux et encombrant, ce qui limite son usage à des laboratoires spécialisés.

**L'électrocorticographie (ECoG)** est une technique invasive dans laquelle des électrodes sont placées directement sur la surface du cortex, après ouverture chirurgicale du crâne. Elle offre un signal d'une qualité et d'une précision bien supérieures à l'EEG, car non dégradé par le passage à travers le crâne et le cuir chevelu. En contrepartie, son caractère invasif la réserve à des contextes médicaux lourds – neurochirurgie, traitement de l'épilepsie réfractaire – ou à la recherche fondamentale. Elle n'est pas envisageable pour des applications professionnelles courantes.

Pour les applications ICM opérationnelles, l'EEG reste la technologie de référence en raison de sa portabilité, de son coût accessible et de sa résolution temporelle adaptée au temps réel.

---

Les rythmes cérébraux : lire le cerveau à travers ses fréquences

Le cerveau produit en permanence des oscillations électriques, appelées rythmes cérébraux, classifiées par bande de fréquence. Chaque bande est associée à des états cognitifs spécifiques, ce qui permet d'inférer l'état mental d'un utilisateur à partir de son signal EEG.

Bande	Fréquence	État associé
Delta	0,5 – 4 Hz	Sommeil profond
Thêta	4 – 8 Hz	Somnolence, mémoire
Alpha	8 – 13 Hz	Relaxation, repos cognitif
Bêta	13 – 30 Hz	Attention active, activité motrice
Gamma	> 30 Hz	Traitement cognitif intense

Pour les ICM de contrôle moteur, les bandes alpha et bêta sont les plus exploitées : lorsqu'un utilisateur imagine un mouvement, ces bandes présentent une diminution caractéristique de puissance appelée *désynchronisation liée à l'événement* (ERD – *Event-Related Desynchronization*). Ce phénomène est le fondement des ICM basées sur l'imagerie motrice.

---

Les **paradigmes ICM** : comment interagir avec l'interface

Un paradigme ICM désigne le protocole d'interaction entre l'utilisateur et le système – autrement dit, ce que l'utilisateur doit faire mentalement pour envoyer une commande.

**L'imagerie motrice** consiste à imaginer mentalement un mouvement (main gauche, main droite, pied) sans l'exécuter physiquement. Le signal EEG se modifie de façon caractéristique selon le membre imaginé, permettant au système de classifier l'intention. C'est le paradigme le plus étudié pour le contrôle d'interfaces et de robots.

**Le P300** repose sur une réponse cérébrale involontaire : lorsqu'un stimulus rare et attendu apparaît parmi d'autres, le cerveau génère une réponse électrique caractéristique environ 300 millisecondes après l'événement. En faisant clignoter des éléments d'une interface, le système détecte sur lequel l'utilisateur concentre son attention. Ce paradigme est particulièrement utilisé pour la sélection d'items ou l'épellation.

**Le SSVEP** (*Steady-State Visual Evoked Potential*) exploite la synchronisation naturelle du cerveau sur des stimuli visuels clignotant à fréquence fixe. Chaque cible de l'interface clignote à une fréquence différente ; le cerveau de l'utilisateur se synchronise sur la fréquence de la cible qu'il regarde, ce qui est détectable dans l'EEG. Ce paradigme est réputé pour sa fiabilité et sa rapidité.

---

Au-delà des paradigmes d'interaction, les ICM se distinguent également par leur finalité : selon ce qu'on cherche à détecter ou à contrôler, on parle de types d'ICM différents, chacun répondant à des besoins spécifiques.

**ICM motrices** – les plus développées. L'utilisateur imagine un mouvement et la machine le traduit en commande. C'est ce qu'on utilise pour contrôler un bras robotique ou un curseur.

**ICM de monitoring cognitif** – on ne cherche pas à contrôler quelque chose, mais à monitorer l'état mental : niveau d'attention, fatigue, charge cognitive, stress. C'est particulièrement pertinent pour le CNES (surveillance des astronautes et opérateurs).

**ICM émotionnelles** – détecter les états émotionnels (anxiété, calme, frustration) à partir du signal cérébral. Encore très expérimental.

**ICM de communication** – permettre à des personnes paralysées de communiquer via P300 ou SSVEP. C'est l'application médicale la plus aboutie aujourd'hui (patients locked-in).

**ICM passives vs actives** – une distinction importante :

- *Active* : l'utilisateur fait un effort conscient pour envoyer une commande (imagerie motrice)
  - *Passive* : le système surveille en arrière-plan sans que l'utilisateur fasse quoi que ce soit (monitoring cognitif)
- 

## Le rôle central du **Machine Learning**

Le signal EEG brut est par nature bruité, variable d'un individu à l'autre, et même variable chez une même personne d'une session à l'autre. Extraire manuellement des règles de classification serait illusoire – c'est pourquoi le machine learning est au cœur de toute ICM moderne.

Le ML intervient à deux niveaux. D'abord dans le **prétraitement**, pour filtrer automatiquement les artefacts et normaliser le signal. Ensuite dans la **classification**, pour identifier l'état mental ou l'intention de l'utilisateur à partir des features extraites.

Les algorithmes classiques comme le SVM (*Support Vector Machine*) et la Random Forest ont longtemps dominé le domaine, notamment grâce à leurs bonnes performances sur des volumes de données limités – contrainte fréquente en EEG où la collecte est longue et fatigante pour les sujets.

Plus récemment, les architectures de deep learning – en particulier les CNN 1D (pour détecter des patterns locaux dans le signal temporel) et les LSTM (pour capturer les dépendances temporelles longues) – ont montré des performances supérieures sur des datasets plus volumineux, au prix d'une complexité accrue et d'un besoin de données plus important.

## 2.2) Analyse des besoins métier : quels secteurs, pour quels usages ?

Si les ICM sont nées dans un contexte médical, leur potentiel dépasse aujourd'hui largement ce cadre initial. Plusieurs secteurs d'activité présentent des besoins concrets auxquels les ICM pourraient apporter une réponse pertinente : améliorer la sécurité, augmenter les performances humaines, ou permettre des interactions impossibles avec les interfaces traditionnelles. Cette section propose un panorama des principaux domaines concernés et des besoins identifiés dans chacun d'eux.

---

### **Médecine et handicap – le domaine fondateur**

C'est historiquement le premier secteur à avoir exploité les ICM, et celui où elles sont aujourd'hui les plus matures.

**Communication pour les patients paralysés** – les ICM ont permis à des patients atteints de locked-in syndrome (paralysie totale du corps, conscience intacte) de communiquer à nouveau, en épelant des mots lettre par lettre via des paradigmes P300 ou SSVEP. C'est l'application ICM la plus aboutie cliniquement.

**Contrôle de membres bioniques** – des ICM invasives permettent à des patients amputés ou paralysés de contrôler un bras prothétique avec une précision remarquable, en décodant directement les intentions motrices dans le cortex.

**Neurofeedback thérapeutique** – en rendant visible en temps réel son propre signal cérébral, un patient peut apprendre à moduler son activité cérébrale. Cette approche est utilisée dans le traitement de l'épilepsie, du TDAH, des troubles anxieux et de la dépression.

**Monitoring peropératoire** – pendant une intervention chirurgicale, une ICM peut surveiller l'état de conscience du patient ou détecter des signaux d'alerte neurologiques, renforçant ainsi la sécurité de l'acte médical.

Le besoin central dans ce secteur est la **fiabilité absolue** : une erreur de classification dans un contexte médical peut avoir des conséquences graves. C'est pourquoi la médecine est à la fois le secteur le plus avancé et le plus exigeant en termes de validation clinique.

---

### **Spatial – un environnement aux contraintes extrêmes**

Le secteur spatial présente des caractéristiques qui en font un terrain d'application particulièrement pertinent pour les ICM : isolement, microgravité, combinaisons contraignantes, opérations critiques où l'erreur humaine peut être fatale.

**Monitoring cognitif des astronautes et opérateurs** – en vol de longue durée, la fatigue, le stress et la surcharge mentale sont des risques réels. Une ICM passive pourrait surveiller en continu l'état cognitif d'un astronaute et alerter en cas de dégradation des capacités attentionnelles, avant qu'une erreur ne se produise.

**Contrôle d'outils robotisés** – dans un environnement en microgravité, les mouvements sont contraints et les manipulations délicates. Une ICM permettrait de contrôler un bras robotique par la pensée, libérant les mains pour d'autres tâches ou dans des situations où le mouvement physique est impossible.

**Assemblage, Intégration et Tests (AIT)** – les techniciens AIT travaillent en salle blanche, en combinaison complète, dans des postures difficiles et avec des contraintes de manipulation extrêmes. Une ICM pourrait leur permettre de consulter des données ou de déclencher des actions sans interaction physique avec une interface, réduisant ainsi les risques d'erreur ou de contamination.

Le besoin central dans ce secteur est la **robustesse en conditions dégradées** : les ICM doivent fonctionner de manière fiable dans des environnements qui ne ressemblent en rien à un laboratoire.

---

### **Industrie et environnements à risque**

Dans les secteurs industriels exigeants – nucléaire, aéronautique, pétrochimie, construction – le facteur humain est souvent identifié comme la première cause d'accident. Les ICM ouvrent ici deux grandes pistes.

**Monitoring de la vigilance et de la charge cognitive** – détecter en temps réel la fatigue ou la surcharge mentale d'un opérateur dans une centrale nucléaire, une tour de contrôle aérien ou une salle de crise, et adapter automatiquement la charge de travail ou déclencher une alerte.

**Contrôle d'équipements en environnement dangereux** – permettre à un opérateur de piloter un robot ou un drone dans une zone à risque (explosion, radiation, produits toxiques) par la pensée, sans avoir à s'y trouver physiquement.

**Formation et simulation** – évaluer objectivement l'état de stress ou de charge cognitive d'un opérateur en formation, pour adapter le programme pédagogique en temps réel.

Le besoin central ici est la **détection précoce des états à risque** : intervenir avant l'erreur, pas après.

---

### **Défense – des applications sensibles et avancées**

Le secteur de la défense investit depuis plusieurs décennies dans les ICM, notamment via des agences comme la DARPA américaine, avec des objectifs qui vont au-delà du simple contrôle d'interface.

**Contrôle de drones et systèmes autonomes** – piloter des drones ou contrôler des systèmes informatiques par la pensée, sans chirurgie, est un objectif activement poursuivi par le secteur de la défense. La DARPA finance depuis 2019 le programme N3 (*Next-Generation Nonsurgical Neurotechnology*), doté de plusieurs dizaines de millions de dollars, visant à développer des casques permettant exactement cela avec une latence inférieure à 50 millisecondes.

**Monitoring des soldats en opération** – détecter la fatigue, le stress post-traumatique ou la surcharge cognitive en conditions opérationnelles réelles, pour mieux gérer les rotations et prévenir les erreurs de

jugement.

**Communication silencieuse** – transmettre des intentions ou des informations sans signal sonore ni visuel, uniquement par décodage cérébral, dans des situations où la discrétion est critique.

Le besoin central dans ce secteur est la **performance en temps réel dans des conditions extrêmes**, ce qui en fait l'un des domaines les plus exigeants techniquement.

---

### **Divertissement et grand public – un vecteur d'adoption émergent**

Souvent perçu comme anecdotique, le secteur du divertissement joue en réalité un rôle important dans le développement des ICM : il constitue un marché de masse qui finance la miniaturisation et l'accessibilisation des technologies, bénéficiant ensuite aux applications professionnelles.

**Jeux vidéo et expériences immersives** – des casques EEG grand public (Emotiv, Muse, Neurosity) permettent déjà de contrôler des jeux ou d'adapter une expérience de réalité virtuelle à l'état émotionnel du joueur.

**Bien-être et méditation** – des applications de neurofeedback grand public permettent d'apprendre à moduler son niveau de stress ou de concentration, rendant accessibles des techniques thérapeutiques jusque-là réservées aux cliniques.

**Accessibilité** – pour des personnes en situation de handicap léger, des ICM non-invasives peuvent offrir des interfaces alternatives pour interagir avec des appareils du quotidien.

Le besoin central ici est l'**accessibilité et la simplicité d'usage** : contrairement aux secteurs précédents, la tolérance à l'erreur est plus élevée, ce qui permet de déployer des technologies encore imparfaites et d'accumuler des données précieuses pour la recherche.

## 2.3) Dispositif de veille continue

Afin d'inscrire ma veille sur le long terme, j'ai mis en place plusieurs dispositifs.

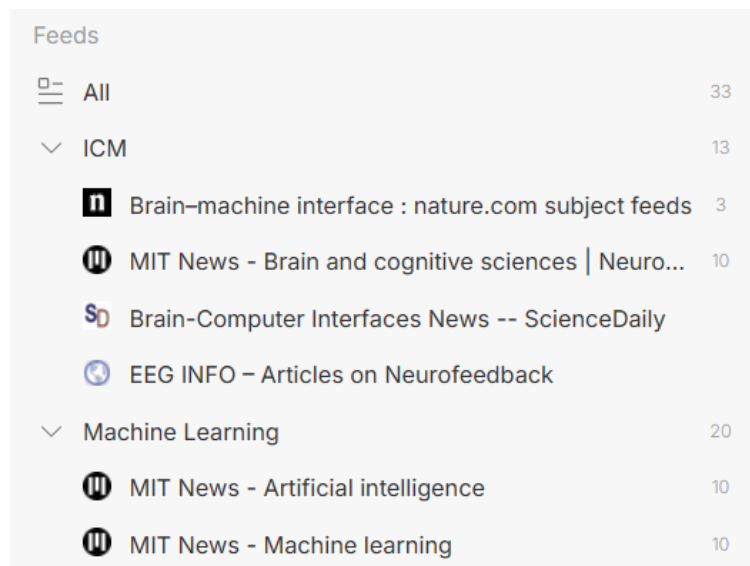
J'ai créé un compte **Feedly**, afin de pouvoir centraliser les sources d'information qui m'intéressaient.

J'ai donc créé un Feed « **ICM** », dans lequel j'ai intégré les flux suivants :

- Nature.com – Brain-machine interface
- MIT News : Brain and cognitive sciences | Neuroscience
- ScienceDaily – Brain Computer Interfaces News
- EEG INFO – Articles on Neurofeedback

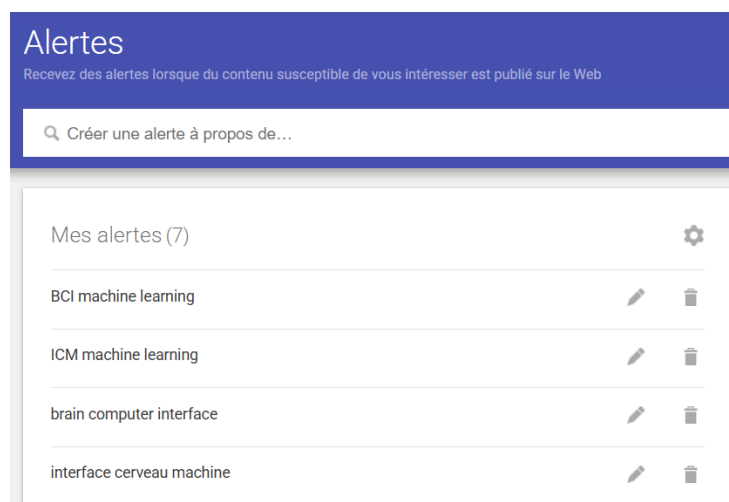
Et j'ai également créé un feed « **Machine Learning** », avec les flux suivants :

- MIT News – Artificial Intelligence
- MIT News – Machine Learning



<https://feedly.com/i/collection/content/user/e559aeef-fc4d-4250-adb6-7fa533ff8035/category/global.all>

En complément, et sachant que Feedly ne prend en charge les flux RSS que dans sa version payante, j’ai mis en place 4 **alertes Google** pour les termes “BCI machine learning”, “ICM machine learning”, “interface cerveau machine” et “brain computer interface”, reçues directement par e-mail, dans un dossier dédié.



En parallèle, afin de consolider mes connaissances théoriques sur le sujet, j'ai suivi le cours en ligne "Introduction to Cognitive Neuroscience" via la plateforme Alison, qui permet d'étudier le rôle des différentes zones du cerveau dans l'exécution des processus cognitifs.

<https://alison.com/course/introduction-to-cognitive-neuroscience>

# 3) Analyse argumentée : les ICM sont-elles prêtes pour les environnements professionnels exigeants ?

À travers cet état des lieux et cette analyse des besoins, on constate que les ICM suscitent un intérêt croissant dans de nombreux secteurs. Mais entre les démonstrations en laboratoire et un déploiement opérationnel réel, il y a encore un écart important. Cette partie propose d'analyser honnêtement ce qui fonctionne, ce qui freine, et ce qu'il faudrait pour que les ICM deviennent de véritables outils professionnels.

## 3.1) Ce qui plaide en faveur d'un déploiement

Les progrès réalisés ces dernières années sont réels et encourageants. Du côté du matériel, les casques EEG sont devenus beaucoup plus compacts, sans fil et abordables. Des marques comme Emotiv ou OpenBCI proposent aujourd'hui des dispositifs utilisables en dehors d'un laboratoire, ce qui ouvre la voie à des applications dans des environnements de travail réels.

Du côté des algorithmes, le deep learning a permis des avancées significatives dans la classification du signal EEG. Des architectures comme EEGNet, conçues spécifiquement pour les signaux cérébraux, montrent de bonnes performances même avec peu de données – ce qui est souvent la contrainte principale en ICM.

Enfin, plusieurs preuves de concept convaincantes ont été réalisées : contrôle de bras robotiques, pilotage de drones par la pensée, ou encore communication pour des patients en locked-in syndrome. Ces démonstrations montrent que la technologie fonctionne, même si elle n'est pas encore prête pour une utilisation quotidienne à grande échelle.

## 3.2) Les freins qui limitent encore l'adoption

Le principal obstacle reste la variabilité du signal EEG. Un modèle entraîné sur une personne ne fonctionne pas forcément bien sur une autre, et même chez une même personne, les performances peuvent varier d'une session à l'autre selon la fatigue ou le stress. C'est particulièrement

problématique dans des environnements exigeants, où l'utilisateur est précisément susceptible d'être dans un état différent de celui dans lequel le modèle a été entraîné.

Le confort et l'acceptabilité sont également des freins concrets. Porter un casque EEG avec du gel conducteur pendant plusieurs heures reste contraignant, et l'idée que son activité cérébrale soit mesurée en permanence peut générer des résistances légitimes de la part des travailleurs. Ces aspects humains sont souvent sous-estimés dans les projets technologiques.

Enfin, les données EEG sont rares et difficiles à collecter. Les protocoles expérimentaux sont fatigants, et ces données sont soumises à des réglementations strictes car elles constituent des données de santé sensibles. Cela ralentit le développement de modèles robustes et généralisables.

### 3.3) Les conditions nécessaires pour franchir le cap

Pour que les ICM deviennent opérationnelles dans des environnements exigeants, plusieurs conditions semblent nécessaires. La première est de progresser par étapes : commencer par des applications à faible risque – monitoring passif, neurofeedback, formation – avant d'envisager des applications critiques. C'est une approche plus réaliste que de vouloir tout déployer immédiatement.

La deuxième condition est d'améliorer la robustesse des modèles face à la variabilité inter et intra-individuelle. Les techniques de transfer learning et de domain adaptation sont des pistes prometteuses, mais elles nécessitent encore des travaux de recherche importants avant d'être utilisables en production.

Enfin, il semble indispensable d'associer dès le départ les utilisateurs finaux à la conception des systèmes, et d'établir un cadre éthique clair sur l'utilisation des données cérébrales en milieu professionnel. Sans ces deux éléments, même une technologie mature risque de se heurter à des blocages humains et réglementaires difficiles à surmonter.

# 4) Recommandations

À l'issue de cette analyse, quelques recommandations me semblent importantes pour les organisations qui souhaiteraient intégrer les ICM dans leurs pratiques. Elles s'appuient sur les limites identifiées et visent une approche progressive et responsable.

---

## **Commencer par le monitoring passif**

Plutôt que de viser immédiatement des applications de contrôle actif – piloter un robot par la pensée, par exemple – il semble plus réaliste de commencer par des systèmes de monitoring passif : détecter la fatigue ou la surcharge cognitive d'un opérateur sans qu'il ait à faire quoi que ce soit. Ces applications sont techniquement plus matures, moins risquées en cas d'erreur, et plus faciles à accepter par les utilisateurs.

---

## **Investir dans la qualité des données**

L'un des freins majeurs au développement des ICM est le manque de données de qualité collectées en conditions réelles. Les organisations qui souhaitent avancer sur le sujet auraient intérêt à mettre en place dès maintenant des protocoles de collecte rigoureux, dans leurs propres environnements et avec leurs propres utilisateurs, tout en respectant le cadre réglementaire RGPD.

---

## **Impliquer les utilisateurs dès la conception**

Une technologie qui ne tient pas compte des besoins et des craintes des personnes qui vont l'utiliser a peu de chances de réussir son déploiement. Associer les opérateurs ou techniciens dès les premières phases de conception – recueillir leurs retours, répondre à leurs questions sur la confidentialité des données – est une étape souvent négligée mais essentielle.

---

## **Maintenir une veille active sur le domaine**

Le domaine des ICM évolue très rapidement. De nouvelles architectures de deep learning, de nouveaux matériaux d'électrodes et de nouvelles réglementations émergent régulièrement. Maintenir une veille structurée semble indispensable pour ne pas prendre de retard sur un sujet qui pourrait devenir stratégique dans les prochaines années.

# 5) Glossaire

**Artefact** – perturbation parasite dans un signal EEG, d’origine non cérébrale. Les artefacts les plus courants sont les mouvements oculaires (clignements), la tension des muscles faciaux, ou les interférences électromagnétiques des équipements environnants.

**AIT (Assemblage, Intégration et Tests)** – phase de fabrication d’un engin spatial durant laquelle tous les composants développés séparément sont assemblés, connectés et testés ensemble avant le lancement. Les techniciens AIT travaillent en salle blanche dans des conditions de manipulation très strictes.

**Backpropagation** – algorithme d’entraînement des réseaux de neurones artificiels. Il calcule l’erreur produite par le modèle et la propage en sens inverse à travers les couches du réseau pour ajuster les poids.

**BCI (Brain-Computer Interface)** – terme anglais pour Interface Cerveau-Machine (ICM).

**CNN (Convolutional Neural Network)** – architecture de réseau de neurones spécialisée dans la détection de patterns locaux. Très utilisée pour le traitement d’images, mais aussi pour les signaux EEG en version 1D.

**Classification** – tâche d’apprentissage automatique consistant à attribuer une étiquette (une catégorie) à une donnée d’entrée. En ICM : identifier l’intention ou l’état mental de l’utilisateur à partir de son signal EEG.

**Dataset** – ensemble de données structurées utilisées pour entraîner et évaluer un modèle de machine learning.

**Deep Learning (DL)** – sous-branche du machine learning utilisant des réseaux de neurones artificiels à plusieurs couches. Particulièrement efficace sur des données complexes et volumineuses.

**Domain Adaptation** – technique de machine learning permettant d’adapter un modèle entraîné dans un contexte (une personne, une session) à un contexte différent, sans réentraînement complet.

**ECoG (Électrocorticographie)** – technique d’enregistrement de l’activité cérébrale par des électrodes placées directement sur la surface du cortex, après ouverture chirurgicale du crâne. Signal de très haute qualité, mais invasif.

**EEG (Électroencéphalographie)** – technique de mesure de l’activité électrique du cerveau via des électrodes posées sur le cuir chevelu. Non-invasive, portable, à haute résolution temporelle mais faible résolution spatiale. Modalité de référence pour les ICM non-invasives.

**EEGNet** – architecture de réseau de neurones légère et généraliste, développée spécifiquement pour la classification de signaux EEG. Conçue pour fonctionner avec peu de données et se généraliser à différents utilisateurs.

**Epoch** – en deep learning, une passe complète sur l'ensemble des données d'entraînement lors de l'entraînement d'un modèle.

**ERD (Event-Related Desynchronization)** – diminution caractéristique de la puissance des rythmes alpha et bêta observée dans le signal EEG lorsqu'un utilisateur imagine un mouvement. Phénomène central exploité par les ICM d'imagerie motrice.

**Extraction de features** – processus consistant à calculer des caractéristiques pertinentes à partir d'un signal brut (moyenne, variance, puissance par bande de fréquence, etc.) afin de les fournir en entrée à un algorithme de machine learning.

**Feature** – caractéristique mesurable extraite d'une donnée brute et utilisée comme entrée d'un modèle de machine learning.

**fNIRS (Spectroscopie proche infrarouge fonctionnelle)** – technique de mesure de l'oxygénation du sang dans le cerveau via la lumière infrarouge. Portable mais lente, souvent utilisée en complément de l'EEG.

**Fonction d'activation** – fonction mathématique appliquée à la sortie d'un neurone artificiel pour introduire de la non-linéarité dans le réseau. Les plus courantes sont ReLU, Sigmoid et Softmax.

**fMRI (Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle) (IRMf en anglais)** – technique de mesure de l'activité cérébrale par variation du flux sanguin. Excellente résolution spatiale mais trop lente pour les applications ICM temps réel.

**Gradient Descent** – algorithme d'optimisation utilisé pour entraîner les modèles de machine learning. Il ajuste les paramètres du modèle dans la direction qui réduit l'erreur de prédiction.

**ICM (Interface Cerveau-Machine)** – système permettant une communication directe entre le cerveau humain et un dispositif externe, sans passer par les voies nerveuses et musculaires habituelles.

**Imagerie motrice** – paradigme ICM dans lequel l'utilisateur imagine mentalement un mouvement (sans l'exécuter) pour générer un signal EEG caractéristique utilisé comme commande.

**Keras** – bibliothèque Python de haut niveau pour la construction de réseaux de neurones. Interface intuitive, tourne sur TensorFlow. Particulièrement adaptée à l'apprentissage du deep learning.

**Locked-in syndrome** – état neurologique dans lequel un patient est totalement paralysé mais conserve une conscience intacte. Les ICM constituent pour ces patients l'un des rares moyens de communication disponibles.

**LSTM (Long Short-Term Memory)** – architecture de réseau de neurones récurrent, spécialisée dans le traitement de données séquentielles et temporelles. Particulièrement adaptée aux signaux EEG qui évoluent dans le temps.

**Machine Learning (ML)** – branche de l'intelligence artificielle dans laquelle les algorithmes apprennent des règles à partir de données, sans être explicitement programmés.

**MEG (Magnétoencéphalographie)** – technique de mesure des champs magnétiques produits par l'activité neuronale. Bonne résolution temporelle et spatiale, mais équipement très coûteux et encombrant.

**Microgravité** – état dans lequel les effets de la gravité sont quasi imperceptibles, créant une sensation de flottement. Ce n'est pas une absence de gravité, mais le résultat d'une chute libre permanente autour de la Terre.

**Modalité** – type de capteur ou de technologie utilisé pour mesurer l'activité cérébrale (EEG, fMRI, fNIRS, MEG, ECoG).

**Modèle** – en machine learning, algorithme entraîné sur des données pour effectuer des prédictions ou des classifications sur de nouvelles données.

**Neurofeedback** – technique thérapeutique dans laquelle un patient visualise en temps réel son propre signal cérébral et apprend à le moduler consciemment. Utilisé dans le traitement de l'épilepsie, du TDAH et des troubles anxieux.

**Neurone artificiel** – unité de base d'un réseau de neurones artificiel. Reçoit des entrées, les pondère, applique une fonction d'activation et produit une sortie.

**Neurone biologique** – cellule du système nerveux assurant la transmission de l'information électrique et chimique. Le cerveau humain en contient environ 86 milliards.

**Overfitting** – phénomène dans lequel un modèle de machine learning apprend trop précisément les données d'entraînement et perd sa capacité à généraliser sur de nouvelles données.

**P300** – réponse cérébrale électrique caractéristique, générée environ 300 millisecondes après l'apparition d'un stimulus rare et attendu. Exploitée dans les paradigmes ICM de sélection et d'épellation.

**Paradigme ICM** – protocole d'interaction définissant ce que l'utilisateur doit faire mentalement pour envoyer une commande à l'interface (imagerie motrice, P300, SSVEP).

**Pipeline** – séquence d'étapes de traitement appliquées successivement à des données, de l'acquisition brute jusqu'à la décision finale.

**PyTorch** – bibliothèque Python de deep learning, très utilisée en recherche académique. Plus flexible que Keras mais plus verbeux. Standard dans les laboratoires scientifiques.

**Random Forest** – algorithme de machine learning combinant plusieurs arbres de décision qui "votent" ensemble pour produire une prédiction. Robuste et peu sensible au bruit.

**RGPD** – Règlement Général sur la Protection des Données. Cadre réglementaire européen encadrant la collecte, le traitement et le stockage des données personnelles, dont les données de santé comme les signaux EEG.

**Scikit-learn** – bibliothèque Python de machine learning classique (SVM, Random Forest, KNN, prétraitement, évaluation). Simple d'accès et bien documentée.

**Signal EEG** – enregistrement de l'activité électrique du cerveau capté par des électrodes posées sur le cuir chevelu. Signal bruité, de faible amplitude (ordre du microvolt), à haute résolution temporelle.

**SSVEP (Steady-State Visual Evoked Potential)** – paradigme ICM dans lequel l'utilisateur fixe une cible clignotant à une fréquence précise. Le cerveau se synchronise sur cette fréquence, détectable dans l'EEG.

**SVM (Support Vector Machine)** – algorithme de machine learning cherchant la frontière optimale entre deux classes de données. Très utilisé en ICM pour sa bonne performance sur des datasets de petite taille.

**Synapse** – zone de communication entre deux neurones, permettant la transmission du signal nerveux par voie électrique ou chimique (via des neurotransmetteurs).

**Transfer Learning** – technique de machine learning consistant à réutiliser un modèle entraîné sur un contexte pour l'adapter à un contexte différent, en limitant le besoin de nouvelles données.

**Train/test split** – division d'un dataset en deux parties : une pour entraîner le modèle, une pour évaluer ses performances sur des données qu'il n'a jamais vues.

**Variabilité inter-individuelle** – différences de signal EEG observées entre différents individus pour une même tâche. Constitue l'un des principaux défis de la généralisation des modèles ICM.

**Variabilité intra-individuelle** – différences de signal EEG observées chez un même individu selon les sessions, l'état de fatigue ou le niveau de stress. Rend nécessaire une recalibration régulière des modèles.

# 6) Sources

Information préalable :

**NCBI** (*National Center for Biotechnology Information*) est le centre américain d'information en biotechnologie, géré par les National Institutes of Health (NIH) – l'équivalent américain de l'INSERM. C'est une institution publique fédérale.

**PMC** (*PubMed Central*) est leur base de données d'articles scientifiques en accès libre. C'est l'une des plus grandes archives mondiales de publications biomédicales et scientifiques – des milliers de revues du monde entier y déposent leurs articles gratuitement.

## Général

<https://www.inserm.fr/dossier/interface-cerveau-machine-icm/>

<https://www.frcneurodon.org/informer-sur-la-recherche/actus/de-nouveaux-progres-dans-le-developpement-des-interfaces-cerveau-machine/>

<https://share.google/AAc0Qqz6qCno3bzVX>

## Contrôle d'outils robotisés

<https://www.nature.com/articles/s41467-025-61064-x>

<https://www.frontiersin.org/journals/neurorobotics/articles/10.3389/fnbot.2020.583641/full>

[knowablemagazine.org/content/article/mind/2023/brain-computer-interface-locked-in-syndrome](https://knowablemagazine.org/content/article/mind/2023/brain-computer-interface-locked-in-syndrome)

## Pipeline ICM

[frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2021.728178/full](https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2021.728178/full)

## Deux famille d'ICM (invasives et non invasives)

<https://synapse.patsnap.com/article/how-does-invasive-vs-non-invasive-bci-compare>

## Différentes modalités de capture du signal (EEG, IRMf, fNIRS, MEG, ECoG...)

<https://www.frontiersin.org/journals/neurorobotics/articles/10.3389/fnbot.2020.00025/full>

<https://www.mdpi.com/2673-8430/4/4/41>

## Paradigme

[https://www.researchgate.net/publication/266174512\\_Interfaces\\_Cerveau-Machine](https://www.researchgate.net/publication/266174512_Interfaces_Cerveau-Machine)

## **ICM motrices**

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6471241/>

## **ICM de monitoring cognitif**

<https://www.frontiersin.org/journals/human-neuroscience/articles/10.3389/fnhum.2021.785562/full>

## **ICM émotionnelles**

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-024-18259-z>

## **ICM passives vs actives**

[https://en.wikipedia.org/wiki/Brain%E2%80%93computer\\_interface#Passive\\_BCI](https://en.wikipedia.org/wiki/Brain%E2%80%93computer_interface#Passive_BCI)

## **Rôle central du Machine Learning dans les ICM**

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8615531/>

[frontiersin.org/journals/computational-neuroscience/articles/10.3389/fncom.2022.1006763/full](https://www.frontiersin.org/journals/computational-neuroscience/articles/10.3389/fncom.2022.1006763/full)

## **Analyse des besoins métier :**

### **Médecine**

#### **Communication pour les patients paralysés (locked-in syndrome)**

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4437925/>

#### **Contrôle de membres bioniques / rééducation motrice**

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12383906/>

#### **Neurofeedback thérapeutique**

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/brx2.70024>

### **Spatial**

#### **Vue d'ensemble des ICM dans le spatial**

[neuroscirn.org/2021v3i5no68/](https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnecog.2021v3i5no68/)

#### **Monitoring cognitif des astronautes**

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9387435/>

#### **Contrôle d'outils et interfaces spatiales**

<http://cortivision.com/photograv-pioneering-bci-in-space/>

#### **Contrôle mental d'un simulateur spatial**

<https://www.space.com/20156-astronauts-spaceship-mind-control.html>

## **Industrie**

### **Monitoring de la vigilance et fatigue des opérateurs**

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010482525008121>

### **Fatigue dans les environnements critiques (nucléaire, aviation)**

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00295450.2025.2454104>

### **Contrôle d'équipements en zone dangereuse**

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8414547/>

## **Défense**

### **Contrôle de drones par la pensée**

<https://spectrum.ieee.org/darpa-funds-ambitious-neurotech-program>

### **Monitoring des soldats et enjeux éthiques**

<http://international-review.icrc.org/articles/merging-man-and-machine-a-legal-assessment-of-brain-computer-interfaces-in-armed-conflict-928>

### **Vue d'ensemble des applications militaires**

<https://skulshrestha.net/2024/09/20/military-applications-of-brain-machine-interface-bmi-technology/>

## **Divertissement**

### **ICM grand public et neurogaming**

<https://imotions.com/blog/insights/trend/neurogaming-bridging-the-mind-and-machine-in-the-gaming-universe/>

### **Casques EEG grand public (Emotiv, Muse, OpenBCI)**

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10917334/>

### **Jeux sérieux et EEG**

<https://www.mdpi.com/2076-3417/15/4/1946>

## **Autres :**

### **Dispositifs utilisables en dehors d'un laboratoire**

<https://medicalxpress.com/news/2024-01-highlights-advances-wearable-brain-interfaces.html>

**Architectures comme EEGNet, conçues spécifiquement pour les signaux cérébraux**

<https://arxiv.org/abs/1611.08024>

**Données soumises à des réglementations strictes car données de santé sensibles**

[linc.cnil.fr/article-22-des-neurodonnees-personnelles-pas-comme-les-autres](http://linc.cnil.fr/article-22-des-neurodonnees-personnelles-pas-comme-les-autres)

**Techniques de transfer learning et de domain adaptation en développement**

<https://www.intechopen.com/chapters/89562>