

# Revue de littérature sur les HSI



Étudiants ENSC (1A) : Juliette BOLLINI, Arthur SCHNEIDER, Thiméo TONON, Yann  
DESFARGES

Encadrante académique : Noémie CHANIAUD

Encadrants industriels : Allan ARMOUGUM / Marc SANGO

Janvier 2025

**Sujet : Intégration de l'approche de HSI dans la définition de gestes métiers pour les conducteurs en situation de sous-charge mentale.**

<b>Introduction</b>	<b>3</b>
1. Définition des concepts clés	4
1.1. Définition de la charge cognitive	4
1.2. Définition d'un système	5
1.2.1. System of System	5
1.3. Définition d'un HSI	5
1.3.1. Aspect historique	5
1.3.2. Modèles théoriques	6
1.4. Définition d'un HCI, HFE	6
1.5. Définition d'un geste métier	7
2. Domaines d'application	7
2.1. Aéronautique	7
2.2. Aérospatial	8
2.3. Automobile	9
2.4. Secteur énergétique	10
2.5. Ferroviaire	10
3. Principes fondamentaux	11
3.1. La conception centrée sur l'utilisateur (CCU)	12
3.2. Human in the loop simulation (HITLS)	12
3.3. Digital twins	13
4. Méthodologie de recherche	14
4.1. PRODEC	14
5. Application aux projet Cognitive Toolkit	16
5.1. Gestes métiers retenus	16
5.1.1. Adaptation de la VACMA	16
5.1.2. Doublage de l'automatisation	16
5.1.4. Personnalisation des gestes métiers	16
5.1.5. Éléments exogènes	17
6. Cycle de développement système ferroviaire	17
7. Conclusion	18
<b>Bibliographie</b>	<b>19</b>

# Introduction

Cet article scientifique s'inscrit dans la continuité de recherches actuellement menées par la SNCF sur un projet nommé Cognitive Toolkit qui s'intéresse à la sous charge cognitive des conducteurs de trains durant leurs trajets. Aujourd'hui suite à la place importante que prennent les technologies dans la vie quotidienne, les transports sont eux aussi de plus en plus automatisés. La SNCF souhaiterait notamment mettre en place une automatisation des postes de conduite de niveau 2 (Goa 2). En ce sens, les conducteurs seraient de moins en moins sollicités cognitivement durant leurs trajets.

Lorsqu'une situation dangereuse ou critique se présente, c'est à ces derniers de prendre une décision. Il est nécessaire que le conducteur puisse reprendre la main le plus rapidement et lucidement possible afin de régler le problème. Or, les phénomènes de sous-charge cognitive et d'hypovigilance sont de plus en plus présents et sont responsables de près de 50% des accidents liés aux facteurs humains.(UIC Safety Report 2024 Significant Accidents 2023). Afin de pallier cela, il est nécessaire de comprendre les démarches adoptées pour les Human Systems Integration (intégration humain système), afin de mieux évaluer les risques pour l'utilisateur et trouver des solutions adaptées.

Actuellement, des systèmes technologiques existent pour essayer de réduire ce problème d'hypovigilance. On peut notamment citer un élément majeur nommé la VACMA (veille automatique à contrôle de maintien d'appui) ou système homme mort. Ce système est présent sous la forme d'une pédale dans la cabine, sur laquelle doit appuyer le conducteurs afin de montrer qu'il est encore vigilant et lui permettant de maintenir un certain niveau de vigilance. Il existe aussi des systèmes qui effectuent des mesures physiologiques afin de mesurer l'état du conducteur et vont réagir en conséquence à l'aide de signaux sonores tels que des alarmes et des signaux sensoriels tels que des vibrations.

Dans une première partie, nous proposons une exploration des concepts fondamentaux, tels que la charge cognitive, les systèmes, et les principes clés des HSI, afin de poser les bases théoriques nécessaires à une meilleure compréhension de cette approche. Ces définitions sont enrichies par des références à des travaux clés issus de la littérature scientifique.

La deuxième partie est consacrée à un tour d'horizon des principaux domaines d'application des HSI, comme l'aéronautique, l'aérospatial, l'automobile ou encore le ferroviaire. Ces exemples visent à mettre en lumière les enseignements tirés de ces secteurs, tout en offrant des pistes pour l'innovation dans le contexte ferroviaire.

Ensuite, une troisième partie s'attache aux principes fondamentaux de la conception HSI, notamment la conception centrée sur l'utilisateur (CCU), l'approche « Human in the Loop Simulation » (HITLS), et l'utilisation des jumeaux numériques (Digital Twins). Ces approches sont détaillées pour montrer leur pertinence dans l'optimisation des performances humaines et systémiques.

Enfin, la dernière partie s'intéresse à la méthodologie de recherche adoptée, en particulier l'utilisation de la méthode PRODEC, qui permet une conception itérative et progressive des solutions pour pallier la sous charge cognitive. Cette approche combine des connaissances théoriques et empiriques issues de divers secteurs pour concevoir des solutions spécifiques et adaptées aux conducteurs de trains.

## 1. Définition des concepts clés

### 1.1. Définition de la charge cognitive

La notion de charge cognitive a été définie et explorée par de nombreux chercheurs, présentée comme un enjeu majeur en ergonomie cognitive. (Leplat, 2003). C'est une notion à la base du projet actuel.

La charge cognitive correspond à l'effort mental imposé à la mémoire de travail lors du traitement de l'information, et elle est influencée par trois composantes : la charge intrinsèque, liée à la complexité de la tâche ; la charge extrinsèque, provoquée par des éléments inutiles ou mal conçus ; et la charge essentielle, dédiée à l'apprentissage profond et à la compréhension (Sweller, 1988). Cette distinction est centrale dans sa théorie.

Mayer définit la charge cognitive dans le cadre de l'apprentissage multimédia comme le traitement mental nécessaire pour sélectionner, organiser et intégrer des informations, en mettant en garde contre la surcharge cognitive qui survient lorsque les exigences excèdent les capacités de la mémoire de travail (Mayer, 2014). Puis Passerini et Granger élargissent cette notion en soulignant qu'elle est influencée non seulement par la tâche, mais aussi par les caractéristiques de l'individu, telles que son expertise ou son état émotionnel (Passerini & Granger, 2000).

Cette charge cognitive peut donc varier en fonction de différents facteurs personnels mais sa source est principalement extérieure. On peut noter comme principale source la difficulté de la tâche. Plus une tâche est complexe, plus elle recrutera des ressources cognitives, et la charge cognitive sera importante. À l'inverse, on parlera de sous charge cognitive dans un contexte où la stimulation ne sera pas suffisante pour maintenir le niveau de vigilance de l'utilisateur.

Pour cela, dans le domaine pédagogique, il est souligné que des présentations d'information mal conçues peuvent augmenter inutilement la charge cognitive (Chandler & Sweller, 2011). On trouve aussi Kirschner, qui, pour sa part, insiste sur l'importance de concevoir des environnements d'apprentissage qui minimisent la charge cognitive (Kirschner, 2002).

Malgré ces nuances, ces définitions s'accordent sur certains points fondamentaux :

- La capacité de l'opérateur. Cette notion renvoie aux limites mentales de l'opérateur, et à sa capacité maximale de traitement de l'information (Wickens et al., 1992), ou encore à la quantité maximale de ressources mobilisables par un sujet (Barrouillet, 1996). Cette capacité représente donc une contrainte majeure à la réalisation d'une tâche.

- Les ressources mobilisables. Ici, le concept de ressources renvoie à l'attention et à l'investissement de l'opérateur dans une tâche bien précise qui va y allouer plus ou moins d'attention et donc plus ou moins de charge mentale (Norman & Bobrow, 1975). Toutes ces définitions nous donnent donc l'enjeu de l'utilisation des HSI.

## 1.2. Définition d'un système

Le terme système est utilisé dans de nombreux domaines qu'ils soient technologiques, environnementaux ... En réalité un système peut être défini comme un ensemble d'éléments interconnectés, en interaction dynamique, qui forment un tout organisé pour atteindre un objectif commun (Boy, 2023a). On pourra utiliser le schéma ci-dessous:

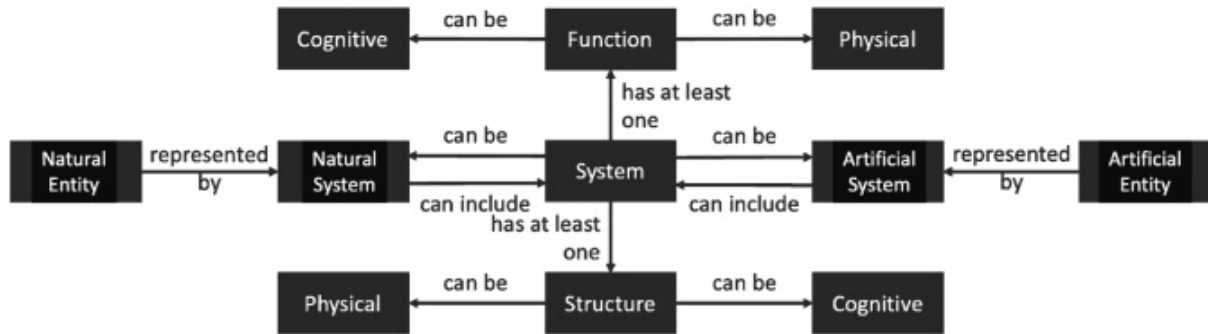


Figure 1: Représentation d'un système et des interactions qu'il a avec d'autres son environnement

Dans le cadre de l'intégration des systèmes humains (HSI), cette définition s'élargit pour inclure explicitement les aspects humains, en considérant l'utilisateur comme une composante essentielle du système.

### 1.2.1. System of System

Le concept de System Of System (SoS) fait référence au fait qu'un système puisse être constitué de plusieurs sous-systèmes identifiés initialement et qui travaillent de pair. Il est parfois utile de présenter un système de cette manière pour identifier les composantes majeures qui agissent sur ce dernier. La notion de SoS est aussi importante car la mise en commun des différents systèmes permet parfois d'identifier des fonctions émergentes, qui résultent de l'interaction de ces différents sous-systèmes. L'identification de ces fonctions émergentes sont souvent un aide pour mieux comprendre le comportement d'un système et de l'anticiper de manière plus efficace (Mennenga et al., 2019).

## 1.3. Définition d'un HSI

### 1.3.1. Aspect historique

Le concept d'Intégration Humain-Système est né pendant la seconde guerre mondiale où les erreurs humaines dans les systèmes militaires ont poussé à repenser l'Interface Homme-Machine. Les premiers travaux en ergonomie et en psychologie cognitive ont mis en lumière l'importance d'adapter les technologies aux capacités humaines. On peut donner comme date clé 1986 où un projet pour l'armée nommé Manpower and Personal Integration a été réalisé afin de maximiser l'efficacité globale des systèmes complexes. Dans ce dernier, l'approche HSI a été utilisée en intégrant les considérations humaines dès les premières étapes de la conception et tout au long du cycle de vie des systèmes (Booher, 2012; *MANPRINT Program Integrates Human Element*, 2014) (Boy, 2023b).

### 1.3.2. Modèles théoriques

Le concept de Human System Integration (HSI) repose sur plusieurs modèles théoriques visant à optimiser l'interaction entre l'humain et la technologie. L'un des plus influents est la théorie des systèmes sociotechniques développée par le Tavistock Institute of Human Relations dans les années 1940 et 1950, qui postule que la performance optimale d'un système ne peut être atteinte que par un équilibre entre ses composantes humaines et technologiques.

Cette approche s'appuie également sur des modèles de traitement de l'information humaine, tels que la psychologie cognitive et le modèle de Broadbent (1958) sur le filtrage des informations, ou le modèle de Miller (Miller, 1956) concernant la capacité limitée de la mémoire humaine, notamment en ce qui concerne le nombre d'items qu'un individu peut retenir. D'autres théories, comme celles de Norman (1986), sur les Interactions Homme-Machine, et de Wickens (1992), sur le traitement de l'information en multitâche, apportent des éclairages supplémentaires sur les capacités et limites humaines en termes d'attention, de mémoire et de prise de décision, tout en représentant chaque étape du traitement de l'information de manière similaire à celle d'un ordinateur.

En définition générale, l'approche HSI peut être décrite comme la recherche d'un équilibre entre les capacités et les limitations humaines d'une part, et les avantages et contraintes technologiques du système d'autre part. L'objectif est d'atteindre les buts du système tout au long de son cycle de vie, en veillant à ce que les deux composantes, humaine et technologique, soient harmonisées. Ce processus est souvent associé au concept de Human-Computer Interaction (HCI), dont le but est d'adapter le système pour répondre aux besoins des utilisateurs, en prenant en compte leur expérience, leurs compétences et leurs limitations.

## 1.4. Définition d'un HCI, HFE

Le domaine des Interactions Humain-Machine (Human Computer Interaction, HCI) est un domaine interdisciplinaire qui étudie la conception, l'évaluation et la mise en œuvre de systèmes informatiques interactifs, en tenant compte des besoins, capacités et comportements des utilisateurs. Émergeant dans les années 1980, l'HCI intègre des concepts des sciences cognitives, de l'ingénierie des facteurs humains et du design, visant à améliorer l'expérience utilisateur et l'utilisabilité des technologies.

L'ingénierie des facteurs humains (Human Factors Engineering, HFE) est une discipline appliquée qui vise à concevoir des systèmes, produits ou environnements en tenant compte des capacités, limites et caractéristiques humaines. Elle s'appuie sur des principes scientifiques pour améliorer la sécurité, la performance, le confort et réduire les erreurs dans l'interaction humain-système. HFE intègre des domaines tels que la psychologie, l'ergonomie et l'ingénierie, favorisant une conception centrée sur l'utilisateur.

L'HFE se caractérise par la prise en compte des caractéristiques physiques, les HCI par l'aspect cognitif, et les HSI par la dimension sociale et organisationnelle. Dans cet ordre, les premiers domaines sont pris en compte dans les suivants, et font donc augmenter la complexité de l'étude (voir figure 2).

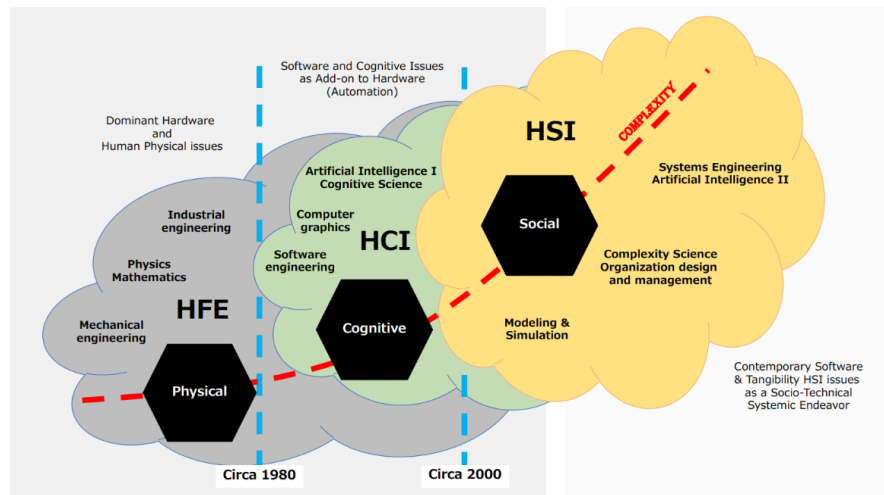


Figure 2: Evolution et composition des concepts de HFE, HCI, HSI

### 1.5. Définition d'un geste métier

Dans le cadre de cette revue, un geste métier est défini comme une action spécifique, technique ou symbolique, propre à un métier ou une activité professionnelle. Ce geste incarne un savoir-faire particulier qui nécessite souvent une expertise, une formation ou une expérience préalable. Dans le domaine ferroviaire, cela englobe des actions standardisées et essentielles pour assurer la sécurité, l'efficacité et la fluidité des opérations. Ces gestes sont conçus pour structurer le travail, réduire la charge cognitive, minimiser les décisions complexes ou improvisées et garantir une conformité stricte avec les procédures et règles de sécurité.

Les gestes métiers visent également à optimiser le niveau de vigilance des conducteurs en limitant les distractions ou les efforts mentaux inutiles. Ces gestes métier sont identifiés et adaptés à travers des analyses de trajets typiques et des échanges collaboratifs, comme des ateliers impliquant conducteurs, formateurs, ingénieurs et chercheurs, afin de limiter les situations d'hypovigilance et de maintenir un niveau de concentration adéquat.

## 2. Domaines d'application

Avec son essor important, de plus en plus de domaines qui nécessitent une charge mentale importante s'intéressent de plus en plus au HSI afin d'optimiser les performances de conducteurs ou pilotes lors de leurs activités. Parmi ces domaines on peut citer: l'aéronautique, l'aérospatial, le ferroviaire, mais aussi le domaine militaire.

### 2.1. Aéronautique

Dans l'aéronautique l'approche HSI a été très vite intégrée afin d'optimiser les performances en vol et de limiter les risques. Dans les années 1970 et 1980, avec l'avènement des avions de ligne modernes tels que le Boeing 747, les équipes de conception ont commencé à s'intéresser de plus près à l'ergonomie et à l'interface homme-machine. Par la suite, l'approche HSI a été institutionnalisée dans le cadre des normes de conception et des réglementations internationales, telles que celles de



l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) et de la Federal Aviation Administration (FAA).

L'application des HSI touche principalement le cockpit des Airbus et Boeing, qui sont conçus avec une philosophie centrée sur l'utilisateur. On peut noter les affichages électroniques tels que: le Before Start checklist affiché sur l'écran multifonction du piédestal du Boeing 777 et les systèmes de gestion des vols (FMS) qui sont des éléments qui permettent de simplifier les tâches des pilotes. (Becquet, 2019)

On peut aussi trouver des systèmes d'alerte avancés, tels que le Terrain Awareness and Warning System (TAWS) et le Air Traffic Management (ATM), qui sont conçus pour fournir des avertissements clairs et des instructions détaillées aux pilotes en cas de situation d'urgence. (Boy, 2020)

## 2.2. Aérospatial

Les HSI ont émergé dans l'aérospatiale en réponse directe à la complexité croissante des systèmes et à la reconnaissance des limites humaines dans des environnements critiques. Leur adoption dans l'aérospatiale découle d'une combinaison de facteurs : le besoin de sécurité, l'automatisation avancée et la nécessité d'optimiser les performances humaines dans des contextes extrêmes.

De plus, la course à l'espace et à l'innovation technologique, amorcée au milieu du XXe siècle, a joué un rôle déterminant dans l'émergence des HSI. Pendant cette période, les avancées rapides en matière de propulsion, de communication et de conception des systèmes ont mis en évidence la nécessité de mieux intégrer les opérateurs humains dans ces technologies. La complexité des missions spatiales, comme les programmes Apollo et les vols habités, a accentué le besoin de systèmes capables de minimiser les erreurs humaines tout en exploitant au maximum les compétences et la capacité de prise de décision des équipages.

Actuellement, les HSI occupent une place importante dans la conception et la planification de missions spatiales, on pourra noter que de nombreuses agences spatiales utilisent cette approche. Notamment la NASA dans son rapport (Rippy, 2021) qui indique des solutions apportées par les HSI telles que la conception d'interfaces visuelles adaptées aux environnements spatiaux, incluant l'utilisation de couleurs et de symboles pour indiquer l'état des systèmes. Par exemple, une lumière rouge clignotante est généralement utilisée pour signaler une urgence ou un dysfonctionnement majeur, tandis qu'une lumière verte peut être employée pour confirmer tout fonctionnement normal. En complément, les codes de couleur sur des écrans sont fréquemment utilisés pour fournir une représentation visuelle claire de l'état des différents systèmes. Ces affichages peuvent adopter une palette de couleurs, telles que le vert, le jaune et le rouge, pour signaler respectivement un fonctionnement optimal, une situation nécessitant une attention modérée, et une défaillance critique qui nécessite une intervention immédiate. Cette approche visuelle permet une interprétation rapide et efficace de l'état des systèmes, ce qui facilite la prise immédiate de décision de l'utilisateur.



L'intégration des principes de HSI peut aussi passer par des systèmes qui permettent la détection proactive des erreurs en surveillant les actions des astronautes et en alertant rapidement sur les anomalies potentielles. Des mécanismes de gestion des pannes incluent des diagnostics automatisés et des instructions détaillées afin de résoudre les problèmes sans nécessiter une expertise approfondie. De plus, des protocoles d'urgence sont intégrés pour guider les astronautes dans leurs interventions. Ces stratégies sont soutenues par des assistants virtuels et des systèmes d'intelligence artificielle. (Boy, 2018)

### 2.3. Automobile

L'Interaction Homme-Système (HSI) joue un rôle central dans la conception des véhicules autonomes, permettant une interaction fluide, sécurisée et intuitive entre l'utilisateur et le système. Historiquement issue de l'aéronautique, l'HSI s'est étendue à l'automobile avec les systèmes avancés d'assistance à la conduite (ADAS), avant de devenir cruciale pour gérer la confiance et le transfert de contrôle dans les véhicules autonomes (Nashashibi et al., 2018). Ces transferts de contrôle entre l'humain et le système ont été analysés (Petermeijer et al., 2017), mettant en évidence le rôle des signaux haptiques et visuels pour faciliter ces transitions. De plus, des solutions quant à la stimulation sensorielle pourraient aussi aider à diminuer l'hypovigilance des conducteurs. Par exemple, des recherches ont révélé que l'exposition à la lumière bleue pouvait atténuer la fatigue chez le conducteur (Taillard et al., 2012).

Aussi, la communication externe des véhicules autonomes est un aspect central de l'HSI. Une recherche de (Dey & Terken, 2017) a montré que des interfaces homme-machine externes améliorent la compréhension des intentions des véhicules par les piétons, renforçant leur confiance dans les systèmes automatisés. Ces avancées, combinées à l'intégration croissante de technologies adaptatives, permettent de personnaliser les interactions tout en garantissant la sécurité des usagers dans des environnements variés.

Malgré ses avantages, l'intégration de l'HSI dans les véhicules autonomes présente des défis. Trouver le juste milieu entre la délégation complète au système autonome et l'intervention humaine reste une problématique majeure. Les systèmes doivent être capables de déterminer quand et comment solliciter l'humain, notamment dans des situations critiques, tout en évitant la surcharge cognitive (Wang et al., 2020).

Les interactions HSI doivent être évaluées dans des environnements variés et imprévisibles pour garantir leur robustesse. Les études ont mis en évidence la nécessité d'un cadre de validation extensif qui inclut des scénarios réels et simulés où des décisions rapides et fiables doivent être prises dans des conditions de conduite imprévisibles.

Les véhicules autonomes doivent prendre des décisions conformes aux valeurs humaines. L'un des grands défis est de concevoir des systèmes capables de faire des choix éthiques en situations de dilemmes (par exemple, choisir de causer un accident pour en éviter un autre). Il est crucial que les décisions de l'intelligence artificielle soient transparentes et alignées avec des principes éthiques préétablis, comme l'a souligné dans sa recherche sur les enjeux éthiques de l'automatisation (Lin, 2016).

## 2.4. Secteur énergétique

Les HSI ont été aussi utilisées dans le secteur des systèmes de gestion des énergies. En effet, la prise en compte des demandes différentes parties prenantes comme les besoins sociaux et environnementaux, face à l'apparition d'innovations et de nouvelles technologies, est un enjeu des plus importants pour ce qui concerne ce secteur. Les accords de Paris (N. Unies, 2015), imposant une neutralité carbone en 2050, demandent donc des réajustements dans la gestion des systèmes de production et de distribution énergétiques et même de l'organisation du réseau dont ils font partie

Des travaux récents (Baltzer et al., 2022) ont été réalisés et montrent que l'approche des HSI a été utilisée afin de mieux comprendre la façon dont interagit le réseau énergétique européen sous la forme d'un SoS ([décrit précédemment](#)). Afin de faire face au caractère incertain de l'utilisation croissante des énergies renouvelables (ces dernières étant fortement dépendantes des conditions environnementales), l'utilisation d'un système dynamique intégrant l'humain comme un élément clé de ce dernier permet une modélisation plus flexible et complexe.

Le système développé par leur équipe, basé sur des données issues de bases de données européennes EUROSTAT, a permis de prévoir la production électrique et l'émission de CO<sub>2</sub>, ainsi que la flexibilité de l'offre et de la demande en fonction de multiples scénarios jusqu'à 2050. Ces scénarios peuvent prendre en compte le passage complet de l'ensemble des véhicules à l'électrique, ou bien la transformation du secteur énergétique pour joindre les objectifs des accords de Paris.

D'importants travaux ont aussi été réalisés afin de prendre en compte les erreurs humaines dans le design des processus que les agents doivent exécuter (Mashio & Ito, 2021). Ils sont d'une importance capitale pour pouvoir gérer les erreurs humaines dans la réalisation d'opérations dans des cadres aussi sensibles tels que des réacteurs nucléaires. Ces travaux se basent d'ailleurs sur ceux effectués initialement dans le domaine de l'aérospatial.

## 2.5. Ferroviaire

De nombreuses études sur la charge mentale ont été réalisées dans le secteur ferroviaire. L'identification de l'état cognitif des conducteurs est un enjeu majeur pour les compagnies ferroviaires en Europe. Elles doivent répondre aux défis posés par l'automatisation croissante des cabines de conduite. En effet, la conduite ferroviaire exige des opérateurs une vigilance et une attention constantes sur de longues périodes, de manière à ce qu'ils puissent réagir rapidement face à des signaux critiques ou des événements inhabituels. Bien avant l'introduction de l'automatisation, les déficits d'attention étaient déjà la cause la plus fréquente, parmi les facteurs humains, d'incidents de tous types (Edkins & Pollock, 1997).

L'état de lassitude mentale n'a pas seulement pour conséquence l'ennui ou de la fatigue mentale mais aussi un désintéressement des conducteurs pour leur tâche et un besoin de changement régulier (Brandt et al., 2004). La monotonie liée à des tâches peu

exigeantes sur le plan cognitif réduit également la capacité de l'opérateur à réagir rapidement et de manière optimale face à un imprévu (Straussberger et al., 2004). Comme introduit précédemment, certains systèmes sont déjà présents dans les cabines afin d'essayer de maintenir le conducteur dans un état de vigilance: la VACMA.

La VACMA (Veille Automatique à Contrôle de Maintien d'Appui) est un dispositif de sécurité ferroviaire conçu pour assurer la présence et la vigilance du conducteur en cabine. Introduite dans les années 1980, la VACMA requiert que le conducteur effectue périodiquement (toutes les 45 secondes) une action sur un dispositif spécifique, tel qu'une pédale ou un bouton (voir figure ci-contre), pour confirmer sa présence et son attention. En cas de non-réponse, le système déclenche un freinage d'urgence afin de garantir la sécurité des circulations.



Figure 3: Photographie d'une pédale VACMA

Un incident survenu le 24 décembre 2024 a illustré l'efficacité de la VACMA. Ce jour-là, grâce au système VACMA, le train concerné a pu être arrêté en toute sécurité, évitant ainsi des conséquences dramatiques pour les passagers.

Malheureusement ce système n'étant pas suffisant afin d'identifier ces situations d'hypovigilance (Foot, 2013), de nombreuses études ont été réalisées pour concevoir des outils qui ajouteraient des tâches secondaires qui permettent de garder la charge cognitive à un degré minimal. Une de ces dernières (Dunn & Williamson, 2012) a introduit une légère charge cognitive supplémentaire dans une tâche de conduite autonome en incorporant un exercice de calcul mental. Les opérateurs devaient déterminer la vitesse requise sur la ligne en résolvant une addition ou une soustraction affichée sur des panneaux, qui remplaçaient les panneaux traditionnels indiquant directement la vitesse. Ainsi, au lieu d'une simple lecture, les conducteurs étaient sollicités cognitivement pour calculer la vitesse à adopter. Les résultats ont montré que cette méthode permettait de maintenir une meilleure vigilance tout en atténuant les effets de la monotonie et de la fatigue.

Un rapport de la RSSB de 2019 a recensé toutes les techniques essayées par les conducteurs pour limiter l'hypovigilance et expose le manque de connaissance scientifique et d'étude sur le sujet, ce qui a initié le début de nombreuses recherches sur les HSI dans le ferroviaire.

### 3. Principes fondamentaux

Après avoir évoqué les aspects expérimentaux de l'Human System Integration (HSI), il est essentiel de comprendre les principes fondamentaux sur lesquels repose cette approche. Ces principes servent de base à l'élaboration de systèmes qui tiennent compte des capacités humaines tout en intégrant efficacement les technologies.

### 3.1. La conception centrée sur l'utilisateur (CCU)

L'un des principes clés de l'approche HSI est la Conception Centrée Utilisateur (CCU). Ce principe repose sur l'idée que les systèmes doivent être conçus en prenant en compte les besoins, les attentes et les capacités des utilisateurs finaux.

La CCU est une méthodologie qui consiste à concevoir des interfaces et des systèmes qui permettent une interaction fluide, intuitive et efficace entre les humains et la technologie. Cela implique de comprendre en profondeur les utilisateurs, leurs contextes, leurs comportements et leurs limitations, afin de créer des solutions qui maximisent la performance tout en réduisant la charge cognitive et les erreurs humaines.

Ce principe est souvent appliqué à travers des processus de design participatif, où les utilisateurs sont impliqués dès les premières étapes de conception. Cela garantit que le système ne répond pas uniquement à des critères techniques, mais aussi aux besoins réels des utilisateurs. Des normes telles que (*ISO 9241-210*, s. d.) soulignent l'importance de cette approche dans la création de systèmes interactifs adaptés aux utilisateurs .

En HSI, la CCU est particulièrement importante car elle garantit que l'humain n'est pas simplement un « élément » du système, mais un acteur central qui interagit avec les technologies de manière optimale. Cette approche est essentielle pour améliorer les performances, réduire les risques d'erreurs humaines et renforcer l'acceptation des technologies (Shneiderman & Plaisant, 2004). La CCU met en lumière les principes de conception pour l'ergonomie et la facilité d'utilisation.

### 3.2. Human in the loop simulation (HITLS)

Le concept de *Human in the Loop* (HITL) est fondamental dans l'interaction homme-système (HSI), mettant en avant l'importance de l'intervention humaine dans les processus décisionnels et opérationnels des systèmes complexes. Cette approche assure une collaboration efficace entre l'automatisation et la prise de décision humaine, garantissant que les systèmes automatisés restent sous contrôle humain tout en bénéficiant des capacités technologiques pour accomplir des tâches complexes et répétitives.

#### **Rôle de l'humain dans la boucle:**

L'intégration de l'humain dans la boucle décisionnelle permet de compenser les limitations des systèmes automatisés, notamment en matière de jugement contextuel et de flexibilité. Selon une étude de (Ou et al., 2022), l'implication humaine est essentielle pour traiter les incohérences et contradictions dans les jugements, aspects que les systèmes automatisés peinent à gérer efficacement.

#### **Transparence et contrôlabilité:**

Pour que les systèmes adaptatifs avec HITL soient efficaces, ils doivent offrir transparence et contrôlabilité. Yigitbas et al. suggèrent l'utilisation de [jumeaux numériques](#) et d'interfaces de réalité virtuelle pour représenter fidèlement le système et son contexte, permettant ainsi à l'utilisateur humain de participer de manière immersive et proactive au processus d'adaptation (Yigitbas et al., 2021) .

## Coévolution homme-machine

L'approche de l'enaction (concept principalement développé dans *The Embodied Mind* (Varela et al., 2017) issu des sciences cognitives et de la philosophie, qui propose une approche spécifique pour comprendre la cognition humaine et artificielle ) en intelligence artificielle propose une coévolution entre l'humain et la machine, où l'interaction continue permet une adaptation mutuelle et une amélioration des performances du système. Loor et al. suggèrent que cette coévolution nécessite une intégration explicite de l'évolution de l'environnement, afin de raffiner l'ontogenèse du système artificiel et de comparer cette évolution avec le paradigme de l'enaction (Loor et al., 2009). ( voir figure 4)

Malgré ses avantages, le concept de HITL présente des défis, notamment en ce qui concerne la conception d'interactions éthiques et durables entre l'humain et les systèmes d'intelligence artificielle. Lahoual et Fréjus soulignent l'importance de considérer les contextes d'utilisation et les perspectives des utilisateurs pour favoriser l'acceptabilité et l'appropriation des systèmes d'IA (Lahoual & Fréjus, 2018).

En conclusion, le concept de *Human in the Loop* est essentiel pour le développement de systèmes où l'humain et l'automatisation collaborent efficacement. L'intégration proactive de l'humain dans la boucle décisionnelle permet de créer des systèmes plus robustes, adaptatifs et éthiques, répondant aux besoins complexes des environnements modernes.

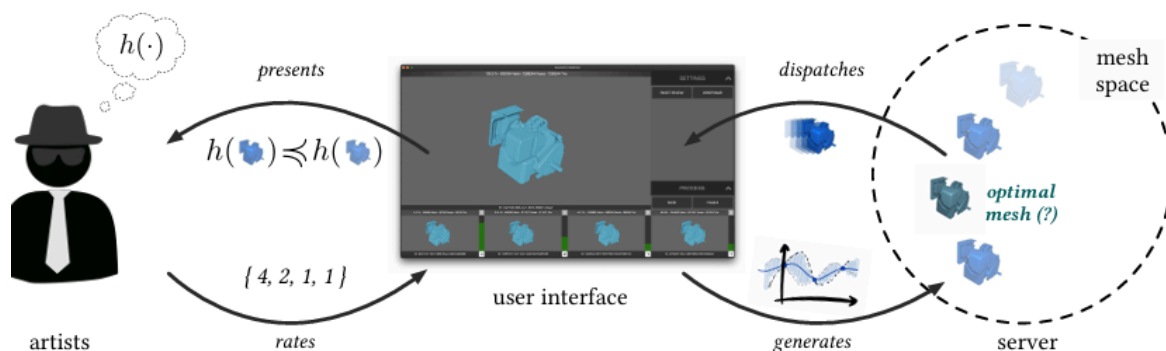


Figure 4: Processus d'Human In The Loop

### 3.3. Digital twins

Les Digital Twins (ou jumeaux numériques) représentent un autre principe fondamental dans l'intégration des systèmes humains et technologiques. Un jumeau numérique est une réplique virtuelle d'un système physique, qui permet de simuler son comportement en temps réel. Cette technologie permet de surveiller, analyser et prédire les performances d'un système physique grâce à des modèles numériques alimentés par des données en temps réel, souvent récoltées via des capteurs. ( voir figure 5)

En HSI, l'utilisation des Digital Twins permet de tester et d'optimiser des systèmes avant même qu'ils ne soient déployés dans le monde réel. Par exemple, dans le cadre de la maintenance préventive ou de la formation des opérateurs, un jumeau numérique peut simuler différentes situations pour évaluer la réponse humaine face à divers scénarios. Cette

approche permet d'améliorer la fiabilité des systèmes, tout en minimisant les risques associés à des interventions humaines dans des environnements complexes.

Des recherches sur l'utilisation des jumeaux numériques dans des secteurs comme l'aviation (Glaessgen & Stargel, 2012) montrent que ces derniers jouent un rôle essentiel dans l'optimisation des performances des systèmes tout au long de leur cycle de vie.

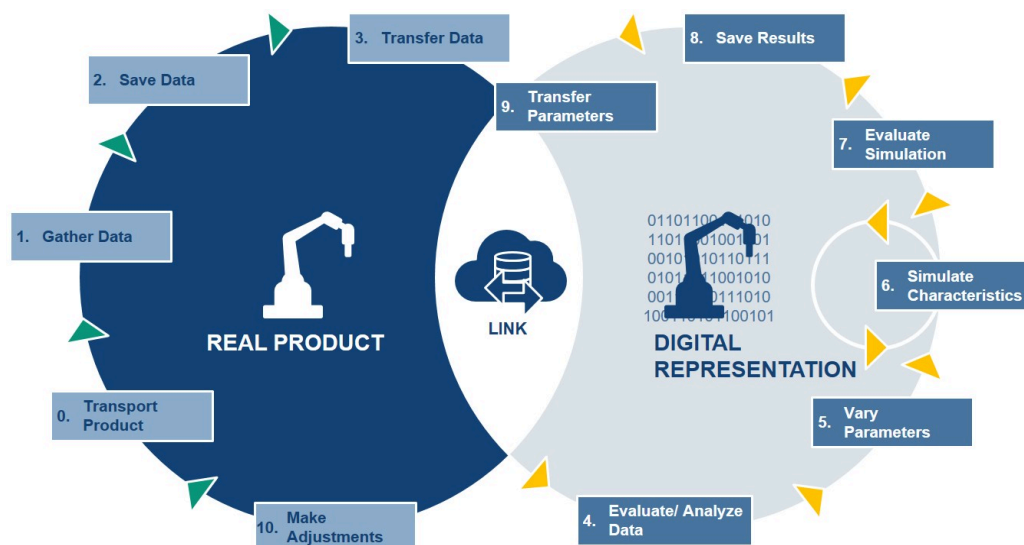


Figure 5: Représentation de Digital Twins en lien avec le système réel

## 4. Méthodologie de recherche

La SNCF a choisi pour son projet Cognitive Toolkit la méthode PRODEC afin de répondre au mieux à la demande et à la problématique.

### 4.1. PRODEC

D'un point de vue historique, la méthode PRODEC est apparue en 1980 avec EDF qui l'a utilisé pour structurer et rationaliser les prises de décision dans le cadre de projets industriels complexes.

La méthode PRODEC est une méthode basée sur les scenario-based design (SBD) amélioré avec des HITLS. Elle permet d'acquérir de nouvelles connaissances vis-à-vis du système. Pour cela, elle va permettre d'associer les connaissances des experts du système étudié (cela peut être un pilote, un constructeur d'avion de chasse), avec les connaissances acquises grâce aux scénarios et HITLS. Les nouvelles connaissances peuvent être des fonctions ou des structures, le but étant de les découvrir durant la conception du projet pour pouvoir les implémenter au fur et à mesure. Les connaissances peuvent être séparées en deux parties : les connaissances procédurales (PRO) et les connaissances déclaratives (DEC). Les connaissances procédurales sont celles qui correspondent à "comment" le système réalise une tâche et les connaissances déclaratives correspondent à "quoi", c'est-à-dire les fonctions et la structure. (Sun et al., 2023).



La méthode PRODEC est particulièrement utile dans les situations où il est nécessaire d'analyser une situation actuelle (AS-IS) et de définir une situation cible ou future (TO-BE), elle est cyclique et peut être séparée en différentes étapes ( voir figure 6):

- La première étape est une analyse de la tâche. Cette étape permet de connaître les différentes tâches et sous tâches, mais aussi quels sont les agents qui doivent les réaliser, quelles sont les ressources nécessaires ainsi que les fonctions cognitives utiles pour le système. Ces connaissances sont récupérées auprès d'experts du système( ex: gestes métiers).
- La deuxième étape consiste à expliciter les fonctions et les structures. Le but va être de décrire et expliquer le rôle de chaque fonction, dans quel contexte elle va être utilisée et avec quelles ressources.
- La troisième est celle de la création du support de simulation en adéquation avec les différentes connaissances.
- La quatrième étape est une étape intégrant le concept de HITLS dans la méthode.
- L'étape 5 consiste à observer et à analyser les données récoltées lors de l'étape 4, elle permet de détecter les fonctions et structures émergentes.
- L'étape 6 permet de rajouter les structures et fonctions émergentes.
- Si on estime que les résultats sont satisfaisants, c'est l'étape 7, sinon on retourne à l'étape 1 ou 2. Cette boucle continue jusqu'à ce que l'on soit satisfait du résultat.

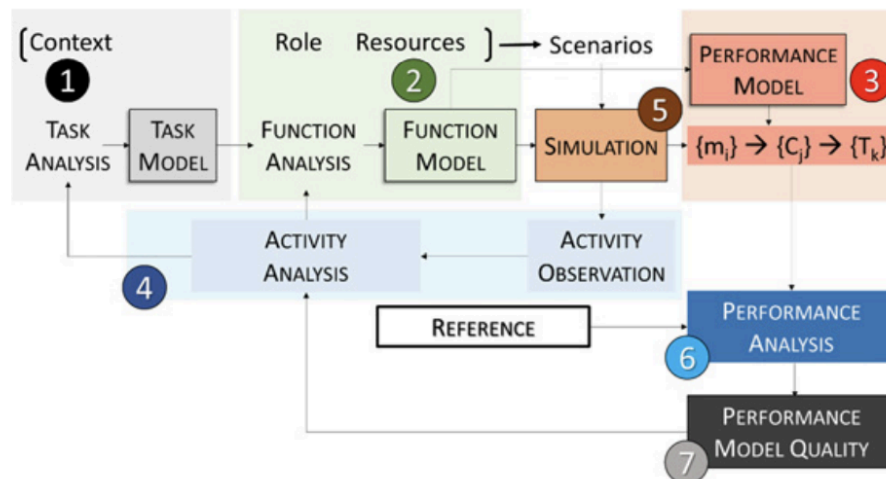


Figure 6: Etapes de la méthode PRODEC

Dans le cadre ferroviaire, la méthode PRODEC peut permettre l'émergence de nouveaux moyens pour éviter aux conducteurs des situations de sous charges cognitives. Cela passe par la recherche de connaissances pour lutter contre l'hypovigilance (que ce soit dans l'automobile, l'aéronautique ou d'autres domaines) dans la littérature existante mais aussi par la recherche de connaissances auprès de conducteurs de trains et de leurs habitudes et préférences. Grâce à l'acquisition de connaissances des conducteurs, des



scénarios réalistes pourront être mis en place afin de tester et affiner les différentes solutions jusqu'à l'obtention d'un système permettant au conducteur de train de ne plus être en sous charge cognitive et ayant un niveau de vigilance satisfaisant pour une conduite dans des conditions réelles sur des postes automatisés.

## 5. Application aux projet Cognitive Toolkit

Cette revue de littérature a eu pour objet de rendre compte de l'application des HSI dans différents milieux, mais aussi de donner les stratégies qui sont utilisées en intégrant cette approche. Pour la suite du projet Transdisciplinaire qui s'inscrit dans le projet d'étude Cognitive Toolkit, notre démarche se concentrera sur la manière dont le projet d'automatisation des postes de conduite actuel met en place cette Intégration Humain-Système.

Le projet de fin d'étude ( PFE) de deux étudiantes à l'École Nationale Supérieure de Cognitique ( ENSC) de l'année 2024 a permis à travers la recherche de gestes métier ([défini précédemment](#)) de proposer des solutions adaptées pour limiter la sous charge cognitive.

La problématique principale pour identifier ces gestes était de faire en sorte de répondre au mieux à la demande en étant le moins intrusif possible. Cette aspect a pu être possible à l'aide de visionnage de vidéos de conduite, et d'un atelier FlexTech avec des conducteurs, formateurs, encadrants, chercheurs et ingénieurs qui ont pu réfléchir ensembles aux gestes métiers adaptés pour limiter la sous vigilance chez les conducteurs. L'objectif étant à la fin de les tester sur un simulateur.

### 5.1. Gestes métiers retenus

#### 5.1.1. Adaptation de la VACMA

Une potentielle adaptation de la VACMA: appelée VACMA dynamique. La VACMA étant déjà un système très largement utilisé dans [le domaine ferroviaire](#). Le but serait de d'adapter la fréquence de celle-ci. La VACMA ne va donc pas être "en rythme", c'est à dire totalement prédictive, mais au contraire "aléatoire" en imposant un délai non-régulier. Suivre la fréquence de la VACMA devient donc plus compliqué pour le conducteur et c'est cette charge cognitive supplémentaire qui lui permet alors d'augmenter sa vigilance.

#### 5.1.2. Doublage de l'automatisation

En cas d'hypovigilance détectée, le système demande au conducteur d'intervenir activement malgré l'automatisation (par exemple: prise de contrôle partielle ou validation d'actions). Ainsi le conducteur serait impliqué dans la conduite.

#### 5.1.3. Verbalisation

Encourager la verbalisation des risques, des actions ou des annonces pour activer le système verbal et renforcer l'attention.

#### 5.1.4. Personnalisation des gestes métiers

Utiliser un algorithme pour proposer des gestes métiers basés sur les données de conduite (habitudes, zones à risque), ainsi qu'une interface personnalisable sur le modèle de celle modélisée par les PFE de l'année précédente et ainsi permettre aux conducteurs de sélectionner ou créer des gestes qu'ils préfèrent via une tablette.

#### 5.1.5. Éléments exogènes

Maintenir une température (20-23°C) et une humidité relative (30-50%) propices à la concentration. Installer des spots activables pour stimuler l'attention, par exemple des lumières bleues pour stimuler les conducteurs.

De plus, il peut être intéressant d'identifier les zones à risque et prévenir le conducteur via l'interface de suivi du trajet notamment avec un effet stroboscopique.

## 6. Cycle de développement système ferroviaire

En dernier lieu il est primordial de replacer cette démarche dans un cycle de conception et de développement, ainsi nous avons pris comme support le cycle en V suivant:

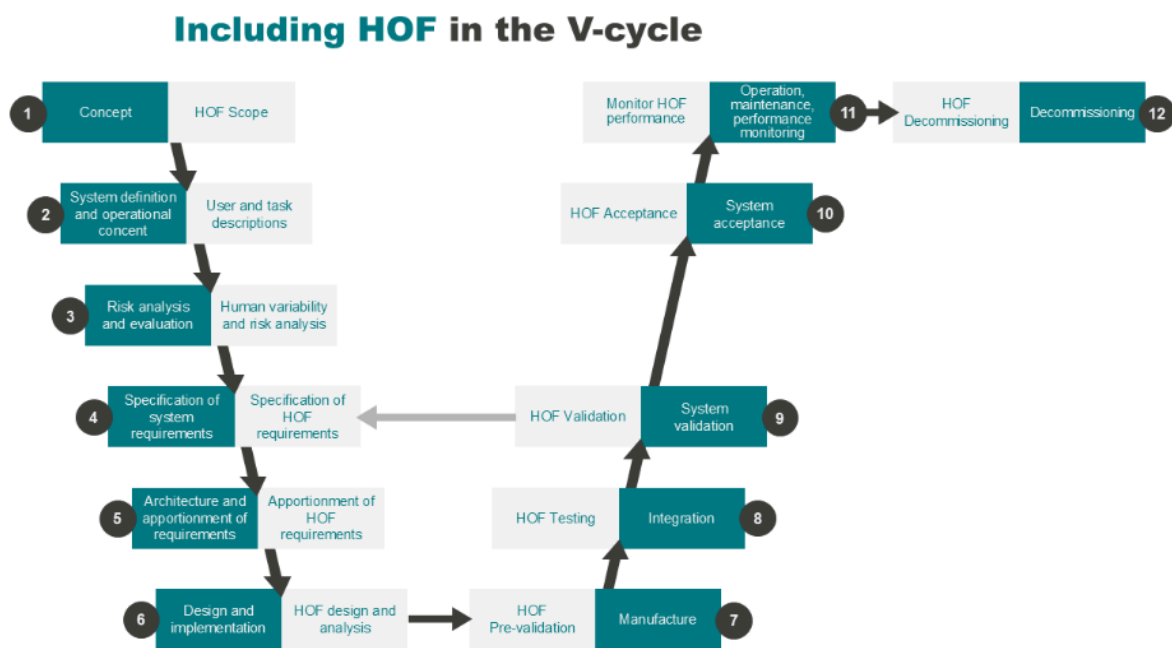


Figure 3 : HOF steps of the V-cycle

Après réflexion, nous avons convenu que l'état de l'art se positionne principalement à l'étape 2, lors de la définition des concepts, des limites et des préexistants dans les domaines concernés.

Cependant, son rôle peut également être pertinent aux étapes 1 et 3 :

Au niveau de l'étape 1, l'état de l'art serait présent dès le début de la conception en limitant l'étude au cadre considéré et étudié.

Pour l'étape 3 on peut dire que les résultats de l'état de l'art peuvent aider à identifier les risques liés aux FOH et à la variabilité humaine.

## 7. Conclusion

L'Intégration Humain Système (HSI) est une discipline essentielle visant à optimiser l'interaction entre les opérateurs et les systèmes techniques. À travers cette étude, nous avons exploré les aspects historiques et théoriques du HSI, ainsi que ses liens avec l'ergonomie et les Interfaces Homme-Machine (HCI, HFE).

Les domaines d'application étudiés, tels que l'aéronautique, l'automobile ou encore le secteur ferroviaire, soulignent la diversité des secteurs où l'HSI joue un rôle clé, allant d'un protocole de réalisation à une adaptation de l'interface pour l'humain. La réussite de l'approche HSI repose sur des principes fondamentaux, notamment la conception centrée sur l'utilisateur (CCU), la simulation Human in the loop (HITLS) et l'utilisation des jumeaux numériques (digital twins). Ces approches permettent d'anticiper les interactions entre l'homme et la machine afin d'optimiser la performance et la sécurité des systèmes.

La méthodologie de recherche appliquée dans le cadre du projet Cognitive Toolkit et de l'approche HSI met en évidence l'importance des gestes métiers, notamment en lien avec l'adaptation des systèmes, l'automatisation et la personnalisation des interactions et des interfaces. En prenant en compte les éléments exogènes influençant ces processus, cette approche favorise une intégration efficace du facteur humain dans les systèmes complexes.

## Bibliographie

- Baltzer, M., Usai, M., & Flemisch, F. (2022). Balanced HSI for Energy—A System Dynamics Model for Energy Systems. *Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2022): Integrating People and Intelligent Systems*, 22(22).
- Barrouillet, P. (1996). Ressources, capacités cognitives et mémoire de travail : Postulats, métaphores et modèles : La charge mentale. *Psychologie française*, 41(4), 319-338.
- Becquet, V. (2019). *Conception d'une représentation graphique des gestes numériques pour le cockpit tactile fondée sur les dimensions participant à la conscience mutuelle entre les pilotes* [Phdthesis, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace].  
<https://hal.science/tel-02492163>
- Booher, H. R. (2012). *Manprint : An Approach to Systems Integration*. Springer Science & Business Media.
- Boy, G. A. (2018). Human-centered design of upcoming human missions to Mars. *Journal of Space Safety Engineering*, 5(1), 9-13. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2018.01.001>
- Boy, G. A. (2020). Aerospace Human Systems Integration. In *A Framework of Human Systems Engineering* (p. 113-128). John Wiley & Sons, Ltd.  
<https://doi.org/10.1002/9781119698821.ch7>
- Boy, G. A. (2023a). *An epistemological approach to human systems integration—ScienceDirect*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X23001033>
- Boy, G. A. (2023b). Model-Based Human Systems Integration. In A. M. Madni, N. Augustine, & M. Sievers (Éds.), *Handbook of Model-Based Systems Engineering* (p. 471-499). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-93582-5\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93582-5_28)
- Brandt, T., Stemmer, R., & Rakotonirainy, A. (2004). Affordable visual driver monitoring system for fatigue and monotony. *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583)*, 7, 6451-6456 vol.7.  
<https://doi.org/10.1109/ICSMC.2004.1401415>

- Chandler, P., & Sweller, J. (2011). *Cognitive Load Theory and the Format of Instruction : Cognition and Instruction : Vol 8, No 4*.  
[https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s1532690xc0804\\_2](https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s1532690xc0804_2)
- Dey, D., & Terken, J. (2017). Pedestrian Interaction with Vehicles : Roles of Explicit and Implicit Communication. *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 109-113.  
<https://doi.org/10.1145/3122986.3123009>
- Dunn, N., & Williamson, A. (2012). Driving monotonous routes in a train simulator : The effect of task demand on driving performance and subjective experience.  
*Ergonomics*, 55(9), 997-1008. <https://doi.org/10.1080/00140139.2012.691994>
- Edkins, G. D., & Pollock, C. M. (1997). The influence of sustained attention on Railway accidents. *Accident Analysis & Prevention*, 29(4), 533-539.  
[https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(97\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(97)00033-X)
- Foot, R. (2013, février 1). *La Vacma : Un dispositif de sécurité qui met en cause la santé des conducteurs et la sécurité de conduite sans " raison "*.  
<https://shs.hal.science/halshs-00818413>
- ISO 9241-210:2019. (s. d.). ISO. Consulté 14 janvier 2025, à l'adresse  
<https://www.iso.org/standard/77520.html>
- Kirschner, P. A. (2002). Cognitive load theory : Implications of cognitive load theory on the design of learning. *Learning and Instruction*, 12(1), 1-10.  
[https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(01\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(01)00014-7)
- Lahoual, D., & Fréjus, M. (2018). Conception d'interactions éthiques et durables entre l'humain et les systèmes d'intelligence artificielle. Le cas de l'expérience vécue des usagers de l'IA vocale. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 32(4), 417.
- Leplat, J. (2003). La modélisation en ergonomie à travers son histoire. *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie*, 1-26.
- Lin, P. (2016). Why ethics matters for autonomous cars. *Autonomous driving: Technical*,

*legal and social aspects*, 69-85.

Loor, P. D., Manach, K., & Tisseau, J. (2009). Enaction-Based Artificial Intelligence : Toward Coevolution with Humans in the Loop. *Minds and Machines*, 19(3), 319-343.

<https://doi.org/10.1007/s11023-009-9165-3>

*MANPRINT program integrates human element*. (2014, mai 9). Wwww.Army.Mil.

[https://www.army.mil/article/125592/manprint\\_program\\_integrates\\_human\\_element](https://www.army.mil/article/125592/manprint_program_integrates_human_element)

Mashio, K., & Ito, K. (2021). Application of Integrated Human Error Management in Human Factors Engineering Process to Nuclear Power Plant Design. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 6(4), 1186-1198.

<https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2021.6.4.071>

Mayer, R. E. (2014). Introduction to Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Éd.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2<sup>e</sup> éd., p. 1-24). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.002>

Mennenga, M., Cerdas, F., Thiede, S., & Herrmann, C. (2019). Exploring the Opportunities of System of Systems Engineering to Complement Sustainable Manufacturing and Life Cycle Engineering. *Procedia CIRP*, 80, 637-642.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.026>

Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81-97.

<https://doi.org/10.1037/h0043158>

Nashashibi, F., Trebucq, O., Goatin, P., Issarny, V., & Simonin, O. (2018). *Véhicules autonomes et connectés, les défis actuels et les voies de recherche*. Paris.

Norman, D. A., & Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processes.

*Cognitive Psychology*, 7(1), 44-64. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(75\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0010-0285(75)90004-3)

Ou, C., Buschek, D., Mayer, S., & Butz, A. (2022). The Human in the Infinite Loop : A Case Study on Revealing and Explaining Human-AI Interaction Loop Failures. *Mensch und Computer 2022*, 158-168. <https://doi.org/10.1145/3543758.3543761>

- Passerini, K., & Granger, M. J. (2000). A developmental model for distance learning using the Internet. *Computers & Education*, 34(1), 1-15.  
[https://doi.org/10.1016/S0360-1315\(99\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1315(99)00024-X)
- Petermeijer, S. M., Cieler, S., & de Winter, J. C. F. (2017). Comparing spatially static and dynamic vibrotactile take-over requests in the driver seat. *Accident Analysis & Prevention*, 99, 218-227. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.12.001>
- Rippy, L. O. (2021, novembre 1). *NASA Human Systems Integration Handbook*.  
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20210010952>
- Shneiderman, B., & Plaisant, C. (2004). *Designing the user interface : Strategies for effective human-computer interaction* (4th ed). Pearson/Addison Wesley.
- Straussberger, S., Schaefer, D., & Kallus, K. (2004). *A psychophysiological investigation of the concept of monotony in ATC: effects of traffic repetitiveness and traffic density*.  
<https://www.semanticscholar.org/paper/A-PSYCHOPHYSIOLOGICAL-INVESTIGATION-OF-THE-CONCEPT-Straussberger-Schaefer/531e129a411a3d4c3fc13962ac0ae0767c391b11>
- Sun, Y., Boy, G. A., Sango, M., & Barros, A. (2023). PRODEC-Based Task Analysis for the Design of Semi-Automated Trains. In D. Krob, L. Li, X. Zhang, J. Yao, & M. Guo (Éds.), *Complex Systems Design & Management* (p. 220-230). Springer Nature.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-99-6511-3\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-99-6511-3_20)
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving : Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. [https://doi.org/10.1016/0364-0213\(88\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0364-0213(88)90023-7)
- Taillard, J., Capelli, A., Sagaspe, P., Anund, A., Akerstedt, T., & Philip, P. (2012). In-Car Nocturnal Blue Light Exposure Improves Motorway Driving : A Randomized Controlled Trial. *PLOS ONE*, 7(10), e46750.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046750>
- Unies, N. (2015). Accord de paris. *21ème Conférence des Parties*, 1-18.
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (2017). *The Embodied Mind, revised edition* :



*Cognitive Science and Human Experience*. MIT Press.

Wang, W., Na, X., Cao, D., Gong, J., Xi, J., Xing, Y., & Wang, F.-Y. (2020). Decision-making in driver-automation shared control : A review and perspectives. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 7(5), 1289-1307. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica.  
<https://doi.org/10.1109/JAS.2020.1003294>

Wickens, C. D., Helton, W. S., Hollands, J. G., & Banbury, S. (1992). *Engineering Psychology and Human Performance* (5<sup>e</sup> éd.). Routledge.  
<https://doi.org/10.4324/9781003177616>

Yigitbas, E., Karakaya, K., Jovanovikj, I., & Engels, G. (2021). *Enhancing Human-in-the-Loop Adaptive Systems through Digital Twins and VR Interfaces* (No. arXiv:2103.10804). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.10804>