

Méthodologie de conception de jumeau numérique pour supporter la conscience de la situation

STELIAN CAMARA DIT PINTO^{1,2}, ERIC VILLENEUVE², DIMITRI MASSON², GUY ANDRE BOY^{1,2},
LAETITIA URFELS³

¹ UNIVERSITE PARIS-SACLAY, CENTRALESUPELEC, LABORATOIRE GENIE INDUSTRIEL
91190 Gif-sur-Yvette, France

² UNIV. BORDEAUX, ESTIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Technopole Izarbel, 90 Allée Fauste d'Elhuyar, 64210 BIDART, FRANCE
s.camaraditpinto@estia.fr

³ TotalEnergies, OneTech, R&D division, R&D Line CO2 and Sustainability
64000 Pau, France

Résumé – Le travail présenté dans cet article interroge l'opportunité d'utiliser le jumeau numérique d'un système complexe comme outil d'aide à la décision. En s'intéressant à la prise de décision humaine, le concept de Conscience de la Situation a été identifié comme central dans l'interaction avec ces systèmes complexes. Sachant la complexité du système à représenter dans le jumeau numérique, la notion d'Ancre de la Réalité est proposée pour caractériser les éléments de la situation étudiée nécessaires pour que l'utilisateur perçoive, comprenne et projette cette situation. La Méthodologie des Ancres de la Réalité est donc définie pour assurer l'élicitation et l'implémentation de ces éléments dans le jumeau numérique. Cette méthodologie vise à (1) éliciter les Ancres de la Réalité via une étude des tâches et activités menées par les opérateurs, (2) concevoir un prototype permettant la réalisation de test « humain-dans-la-boucle » et (3) valider la définition des Ancres de la Réalité. Cette méthodologie a été appliquée à un cas d'étude dans le domaine de l'énergie et a permis de valider l'importance des Ancres de la Réalité définies dans le processus décisionnel.

Abstract –The work presented in this article focuses on the opportunity to use the digital twin of the complex system, a concept popularized in recent years, as a Decision Support System. In studying the phenomenon of human decision making, the concept of situation awareness appears to be of primary importance when dealing with these complex systems. Given the complexity of the system to be represented in the digital twin, the concept of reality anchor is proposed to identify the elements of the studied situation necessary for the user to perceive, understand and project the situation he is facing. A methodology, called the Reality Anchor Methodology, has been defined to ensure the elicitation and the implementation of these elements in a digital twin. This methodology is composed of three steps that aim (1) to elicit the reality anchors through a study of the operators' tasks and activities, (2) to design a prototype for the realization of human-in-the-loop tests and (3) to validate the definition of the reality anchors. This method was applied to a case study in the energy domain and allowed to validate the importance of the defined reality anchors for the decision-making process.

Mots clés –Ancres de la Réalité, Intégration Humain-Systèmes, Jumeau Numérique, Conscience de la situation, Systèmes complexes.

Keywords – Reality Anchors, Human System Integration, Digital Twin, Situation Awareness, Complex systems.

1 INTRODUCTION

La notion d'industrie 4.0 propose de répondre à la complexité croissante de l'ingénierie industrielle en améliorant la gestion des systèmes grâce à l'utilisation de nouvelles technologies. Parmi ces nouvelles technologies permettant la collecte de données et le contrôle des actionneurs, le concept de Jumeau Numérique (JN) représente l'ensemble des capacités de gestion à distance de l'industrie 4.0. Ce concept tend à remplacer les systèmes d'information industriels actuellement utilisés pour fournir une gestion plus détaillée des systèmes. Initialement, les JN ont été définis comme des outils PLM (Product Lifecycle Management) parfaits [Grieves, 2014] composés de trois éléments : (1) un système physique, (2) un système virtuel et (3) un flux de données entre les deux. De nombreuses autres définitions ont depuis été proposées en fonction de différents points de vue [Madni et al., 2019 ; Negri et al., 2019]. Cependant, aucune d'entre elles ne prend en compte l'importance des humains en tant qu'utilisateurs du JN ou en tant que composants du système complexe. Par conséquent, dans [Camara Dit Pinto et al., 2021], le JN est défini comme

« une représentation dynamique d'un système physique utilisant les données, modèles et processus interconnectés donnant accès à des connaissances issues des états passés, présents et futurs pour la gestion du système ».

Dans ce contexte de prise de décision humaines et de systèmes complexes, Endsley a souligné l'importance de la Conscience de la Situation (CS) qui est définie, en tant que phénomène individuel humain, comme « la perception des éléments de l'environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans un avenir proche » [Endsley, 2000]. Cette définition de la CS humaine a été transposée en ingénierie comme un ensemble de données et d'informations collectées dans un système technologique [ESRI, 2008]. Cependant, le concept de CS distribuée [Stanton et al., 2006] propose de considérer les humains et les systèmes comme des agents ayant leur propre CS qui est distribuée entre eux. En suivant cette vision coopérative de la CS, à travers les concepts d'interaction entre le décideur et le JN pour la gestion à distance, il apparaît qu'il y a un besoin de « tangibiliser » [Boy, 2013] la réalité à travers le JN. Il est donc important de fournir à l'utilisateur des

éléments de la situation pour lui permettre de prendre une décision éclairée [Abi Akle et al., 2019]. Suivant ce principe, le concept d'Ancre de Réalité (AR) est défini comme « *les éléments de la situation nécessaires aux humains pour leur permettre d'appréhender la réalité et d'acquérir une CS significative qui soutient le processus décisionnel* ». Les AR obtenues sont ensuite utilisées comme lignes directrices pour la modélisation de la situation dans le JN.

Tout d'abord, selon [Larrasquet et al., 2016], la mise en œuvre de processus innovants doit être soutenue par une méthodologie centrée sur l'utilisateur pour l'accompagner. Par conséquent, assurer la mise en œuvre correcte et reproductible d'un système complexe tel qu'un JN nécessite d'utiliser une méthodologie spécifique. Une étude des méthodologies de conception de JN disponibles dans la littérature montre une concentration sur les méthodologies orientées vers la mise en œuvre technique d'un JN. Cependant, étant donné qu'un JN est défini pour permettre à un utilisateur de « *gérer des actions sur ce système* », il est important d'assurer la mise en œuvre des AR pour soutenir la prise de conscience de la situation. En raison du manque de méthodologies de conception de JN centrées sur l'utilisateur, une telle méthodologie, appelée Méthodologie des Ancres de la Réalité (Reality Anchor Methodology - RAM), est proposée pour développer un JN validant les exigences de la CS humaine. Enfin, la RAM est appliquée à un cas d'étude dans le domaine de l'énergie pour valider la méthodologie proposée.

2 TRAVAUX CONNEXES

Les JN sont des systèmes complexes composés de multiples éléments [Camara Dit Pinto et al., 2021] dont la conception nécessite une approche méthodologique rigoureuse.

Ainsi les auteurs de [Negri et al., 2019] ont proposé une méthodologie en six étapes pour la mise en œuvre d'un JN basé sur les états. La première étape de cette approche vise à identifier les états et les variables à mettre en œuvre dans le JN. Ensuite, le modèle du système est développé équipement par équipement. Ensuite, les modèles sont connectés aux sources de données du système réel. Enfin, le flux de données est analysé et adapté pour correspondre au comportement du système réel. A ce stade, le JN peut être finalisé et connecté à un modèle de simulation.

Dans [Qamsane et al., 2021], les auteurs proposent une méthodologie d'implémentation de JN en cinq étapes en s'appuyant sur le cycle de vie de développement du système. La première étape se concentre sur la planification. Des indicateurs de performance sont ensuite définis pour garantir la capacité du JN à répondre au besoin qui a été identifié. Dans la deuxième étape, les exigences du JN sont définies et évaluées pour identifier les alternatives de solution et sélectionner la meilleure. Au cours de la troisième étape, le JN est conçu suivant une approche orientée-objet en considérant la cohérence du modèle. La quatrième étape a pour objectif la mise en œuvre du JN et la cinquième concerne les tests permettant de valider le JN en relation avec les exigences préalablement définies.

Les auteurs de [Pérez et al., 2020] proposent une méthodologie en quatre étapes avec des boucles de rétroaction pour créer un JN pour la collaboration entre humains et robots dans un processus de fabrication. La première étape de conception vise à analyser les besoins et à définir le processus de fabrication concerné. Sur la base de ce processus, un modèle de réalité virtuelle intégrant les robots, les actions humaines et les événements est développé et simulé pour valider le processus virtuel (i.e., le JN). Une fois validé, le processus défini est mis

en œuvre et le JN est mis à jour en installant des capteurs et en les visualisant les données générées en temps réel.

La méthodologie proposée dans [Aivaliotis et al., 2019] s'appuie sur une modélisation basée sur la physique pour produire un JN. Cette méthodologie débute par la modélisation du comportement dynamique du système physique. Le modèle résultant est basé sur la cinématique et la structure. Ensuite, la méthodologie se concentre sur la modélisation des capteurs virtuels utilisés pour récupérer les données du système physique et les intégrer dans le système virtuel. Enfin, la troisième étape définit les paramètres du système qui permettent d'ajuster les systèmes physiques et virtuels. Cette méthodologie permet d'implémenter de multiples composants d'un JN en assurant la concordance du modèle avec la réalité.

Ces exemples de méthodologie de mise en œuvre de jumeaux numériques mettent en évidence un processus de conception général. Tout d'abord, le système est étudié pour identifier les exigences du JN. Ensuite, le modèle virtuel est mis en œuvre, composant après composant, pour créer un modèle de système complet. Une fois le modèle créé, les données du système réel sont utilisées dans le modèle virtuel et la qualité de ce flux de données est validée. Dans certains cas [Pérez et al., 2020 ; Qamsane et al., 2021], une attention particulière est accordée à l'étude du système pour définir correctement les exigences techniques du JN. Dans d'autres cas [Aivaliotis et al., 2019], l'accent est mis sur le type de modèles différents utilisés pour composer le système complet. Idéalement, l'ensemble des activités dans ces étapes devrait être personnalisées selon le problème industriel par le concepteur.

Cependant, aucune de ces méthodologies ne prend en compte le rôle des agents humains dans leur interaction avec le JN ce qui peut aboutir à une implémentation qui ne répond pas aux besoins des utilisateurs [Boy, 2013]. De plus, l'interaction entre le modèle physique et son environnement n'est généralement pas prise en considération. Ce constat va à l'encontre de l'acquisition de la conscience de la situation qui prévaut dans le contexte de la prise de décision dans les systèmes complexes. Enfin, les JN sont des systèmes interactifs et devraient suivre les recommandations de la conception centrée sur l'utilisateur [Boy, 2013].

Par conséquent, cette étude propose de définir une méthodologie pour la mise en œuvre des JN qui place les utilisateurs au centre du processus de conception en s'assurant de la bonne identification et implémentation des AR. La méthodologie proposée doit permettre d'identifier les exigences de la CS pour identifier les AR, d'utiliser une simulation de JN pour valider la pertinence des AR retenues, et d'itérer jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante.

3 METHODOLOGIE PROPOSEE

La RAM (Figure 1) propose d'éliciter les éléments de la situation nécessaires aux humains pour leur permettre d'appréhender la réalité et d'acquérir une CS significative qui soutient le processus de prise de décision via un JN afin d'aider les concepteurs de ce système (ingénieurs systèmes, spécialistes des facteurs humains...).

La méthodologie proposée se compose de trois étapes principales qui sont (1) l'analyse des tâches de l'utilisateur pour identifier les AR, (2) la mise en œuvre d'un prototype, et (3) la validation des développements par des tests humains-dans-la-boucle. Ces tests permettent d'analyser les activités réalisées et d'identifier les AR utilisées dans le processus décisionnel ou celles manquantes dans le JN. Cette analyse permet d'itérer si nécessaire pour améliorer la CS.

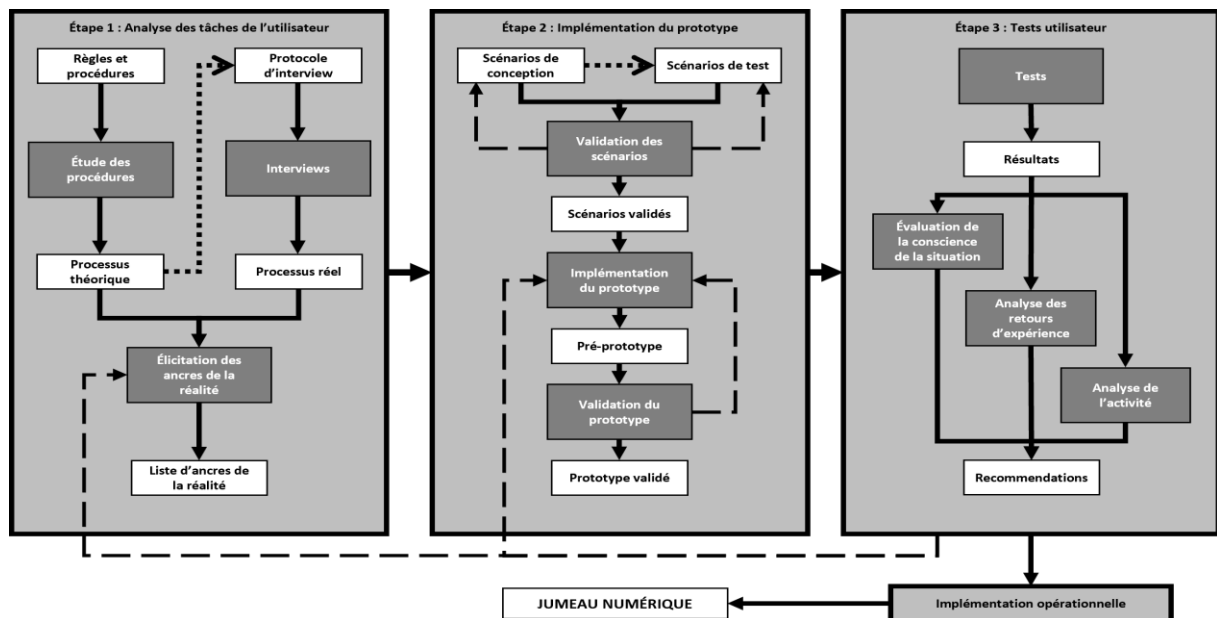


Figure 1. Processus de mise en œuvre de la Méthodologie des Ancres de la Réalité (RAM).

A la fin de ce processus, le JN peut être implémenté avec toutes les AR correspondant à la tâche à réaliser et donc fournir une CS aux utilisateurs. Cette méthodologie peut servir à améliorer un JN existant ou à concevoir un nouveau JN.

3.1 Analyse des tâches de l'utilisateur

L'étape d'analyse des tâches de l'utilisateur (Étape 1 dans la Figure 1), doit permettre au concepteur de comprendre les besoins de l'utilisateur en termes de CS pour fournir les éléments nécessaires à la perception, à la compréhension et à la projection de la réalité dans le JN.

Elle débute par la formalisation du processus théorique (analyse des règlements et procédures de l'entreprise pour en extraire le processus décisionnel recommandé). Les entreprises mettent généralement en place des règles et des procédures pour standardiser les pratiques et réduire les erreurs. Elles sont mises en œuvre sur la base de l'expérience et sont censées être connues et suivies par l'ensemble des acteurs de l'entreprise. L'examen de ces procédures vise à identifier les documents relatifs à la situation décisionnelle assistée par le JN.

Cette étape permet l'acquisition des connaissances sur les tâches à accomplir et l'identification des sources d'information recommandées. Le processus décisionnel extrait de ces documents peut être formalisé en utilisant le langage BPMN [White, 2004] pour représenter les agents, les événements, les tâches et les sources d'information.

Puisqu'aucun document ne peut décrire complètement et spécifiquement les situations de travail réelles et puisque la littérature relève des différences entre les tâches du processus décisionnel recommandé et le processus de décision basé sur l'expérience de l'utilisateur [Hollnagel, 2015], des entretiens avec des décideurs actuels ou futurs permettent d'extraire un processus décisionnel plus proche de la réalité opérationnelle. Ces entretiens peuvent se concentrer sur le processus décisionnel réel grâce aux connaissances acquises sur le processus théorique recommandé. Il est recommandé de réaliser ces entretiens en suivant un protocole d'entretien semi-structuré. Les entretiens semi-structurés sont composés de questions ouvertes. Les principales catégories d'intérêts dans le domaine doivent être identifiées, mais l'utilisation de questions ouvertes donne aux utilisateurs la liberté d'affiner leurs réponses grâce à leurs connaissances du domaine. D'autres questions, qui sont improvisées à partir des réponses fournies, peuvent être posées pour faire avancer l'entretien. Ce modèle d'entretien suppose une connaissance modérée du domaine

pour identifier les catégories de questions et permet d'explorer le domaine en maintenant des objectifs de réponse spécifiques. Enfin, une analyse des fonctions cognitives est menée sur le processus réel extrait des entretiens. Les fonctions cognitives [Boy, 1998] sont définies à partir des tâches identifiées de ce processus décisionnel et sont, par définition, composées d'un rôle, d'un contexte et de ressources physiques et cognitives utilisées pour transformer une tâche (i.e. ce qui est prescrit) en activité (i.e. ce qui est effectivement réalisé). Les ressources liées à la réalisation réelle de ces tâches permettent de définir les AR relatives à ce processus décisionnel.

Rendre ces éléments de la situation accessibles à l'utilisateur doit permettre l'acquisition de la CS par le biais du JN. Les prochaines étapes visent à mettre en œuvre un prototype et à le tester afin d'évaluer la capacité du JN à soutenir la CS.

3.2 Implémentation du prototype

Dans l'étape d'implémentation du prototype (voir l'étape 2 de la Figure 1), le concepteur se concentre sur la conception d'un prototype de JN qui contient les AR précédemment identifiées. Cette mise en œuvre est réalisée à l'aide d'un processus de conception itératif anthropocentré qui s'inspire de pratiques bien connues de la conception centrée-utilisateur et de l'interaction homme-machine (IHM), telles que la conception basée sur des scénarios et la méthode du « Magicien d'Oz ». Ce processus est utilisé pour s'assurer que le JN est simple d'utilisation et affiche les AR identifiées à l'étape précédente. Cette mise en œuvre comporte six étapes.

Premièrement, la définition des scénarios de conception est basée sur le concept de « Scenario-Based Design » [Carroll, 1997]. Des scénarios décrivant les interactions possibles entre l'utilisateur et le système sont élaborés et affinés par un processus itératif pour assurer leur mise en œuvre dans le prototype.

Des scénarios de test spécifiques sont définis pour être implémentés dans le prototype afin d'assurer une concordance avec les scénarios de conception. Ces scénarios de test sont également revus et affinés par un processus itératif. Ils ont pour objectif de mettre en évidence les comportements à étudier dans l'utilisation du prototype. Ils doivent donc se concentrer sur l'accessibilité, la quantité et la validité des informations. En plus de ces scénarios, un scénario de formation doit être défini, différent du scénario de test, pour s'assurer que le testeur « maîtrise » l'utilisation du prototype.

Enfin, le prototype est implémenté sur la base des interactions identifiées dans les scénarios de conception qui intègrent les

AR identifiées au préalable et qui seront validées via les scénarios de test. Pour effectuer des tests réalistes avec des utilisateurs sans avoir à mettre en œuvre toute la complexité d'un JN, une adaptation du concept du « *Magicien d'Oz* » peut être utilisée [Dahlbäck et al., 1993]. Le « *Magicien d'Oz* » vient du domaine des IHM dans lequel des fonctions avancées sont exécutées par un humain invisible pour le participant. Ce concept peut être élargi pour développer un outil pour deux personnes dont l'une peut contrôler le système à l'insu de l'autre. Cela permet de faire croire à l'utilisateur qui effectue les tests que le système complexe fonctionne réellement sans pour autant l'implémenter complètement.

Le prototype mis en œuvre est lui-même revu et affiné en fonction des commentaires des utilisateurs afin d'améliorer la convivialité de l'interface et d'assurer le réalisme de l'outil.

À la fin de cette deuxième étape, le prototype contient tous les éléments critiques extraits nécessaires à l'acquisition de la CS et est prêt à être évalué en ce sens.

3.3 Tests utilisateur

L'étape de test utilisateur (voir l'étape 3 de la Figure 1) a pour objectif la validation des AR qui affectent la CS dans le prototype. La validation est effectuée à l'aide de trois analyses : (1) l'évaluation de la CS, (2) l'analyse des retours d'expérience et (3) l'analyse des activités.

Le protocole de test utilisé vise à rendre les tests répétables mais aussi flexibles en raison de la nature des systèmes complexes. Cette flexibilité est assurée par l'utilisation de la méthode du « *Magicien d'Oz* ». L'utilisation de cette méthode permet au concepteur (qui joue le rôle du Magicien) d'adapter l'interaction du système complexe si nécessaire et de jouer le rôle d'un collègue en cas de besoin d'une nouvelle interaction.

Après une phase de jeu de rôle pour assurer l'immersion de l'utilisateur dans la situation, un scénario de formation est utilisé pour familiariser l'utilisateur avec le prototype. Pour garantir une expérience d'apprentissage complète, un ensemble de questions spécifiques peut être utilisé pour encourager l'utilisateur à effectuer les interactions possibles. Au cours de cette phase, toutes les questions de l'utilisateur concernant les interactions avec le prototype sont traitées. Une fois que l'utilisateur est familier avec l'outil, les scénarios de test sont joués. Chaque scénario se termine par une évaluation personnelle de la CS et la soumission d'un formulaire de retour d'expérience. Pendant les tests, l'activité doit être enregistrée soit par une évaluation par un expert, soit par l'enregistrement des interactions réalisées sur l'interface utilisateur, soit grâce à un système de type « *eye-tracking* ». A la fin des tests, une analyse des résultats est effectuée afin de formuler des recommandations.

3.3.1 Évaluation de la conscience de la situation

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la CS [Hogg et al., 1995 ; Endsley, 2000] qui utilisent une liste des éléments utiles à la CS comme référence de comparaison. Cependant comme la RAM vise à assurer la bonne élicitation de ces éléments (i.e., des AR), il n'est pas possible d'utiliser ces méthodes. C'est pour cette raison que la SART (Situation Awareness Rating Technique – Technique d'Évaluation de la Conscience de la Situation) est préconisée. En effet, la SART [Taylor, 1990] fournit une image subjective de la CS dans les différents scénarios en s'appuyant sur des utilisateurs experts mais ne permet pas une évaluation objective de la qualité de la CS. Pour utiliser la SART, il est important de comparer les critères relativement aux valeurs attendues. D'une part, les critères concernant la situation doivent être liés au scénario défini. Par exemple, un scénario supposé être complexe doit être évalué comme plus complexe qu'un scénario simple. D'autre part, les critères concernant l'utilisateur doivent être évalués sur la base

des réponses attendues. Si les résultats ne correspondent pas aux résultats attendus, des entretiens post-test peuvent permettre de comprendre les raisons de cette différence.

3.3.2 Analyse des retours d'expérience

L'analyse des retours d'expérience est effectuée à l'aide de trois types de formulaires de retour d'expérience qui fourniront différents niveaux de détails dans la description de la situation. Le premier type de retour d'expérience s'inspire des « *cahiers de quart* » utilisés dans les domaines de la production continue. Il s'agit d'un support d'expression libre dont le but est d'enregistrer la situation vécue et de la partager avec d'autres utilisateurs notamment pour faire passer des consignes lors du changement de l'équipe en charge de piloter le système industriel. Il contient généralement un vocabulaire expert et se concentre sur les informations les plus importantes nécessaires à la compréhension de la situation sans partager des informations et des raisonnements détaillés. Ce retour d'expérience contient les AR nécessaires à la compréhension de base de la situation et est donc considéré comme une préoccupation majeure pour définir la CS de l'utilisateur.

Le deuxième type de retour d'expérience est plus directif et comporte trois catégories de renseignements demandés.

(1) L'utilisateur est invité à décrire la situation. L'objectif est d'identifier les principales AR utilisées pour la perception de la CS. (2) L'utilisateur est invité à analyser la situation. L'objectif est d'encourager l'utilisateur à fournir des informations relatives à sa compréhension de la situation. (3) L'utilisateur est invité à expliquer l'action entreprise pour résoudre la situation. L'objectif est d'encourager l'utilisateur à fournir des informations relatives à sa projection de la situation. Ce retour d'expérience dirigé vise à recueillir des connaissances sur le rôle des AR dans les trois niveaux du processus de CS.

Le troisième type de retour d'expérience est basé sur des questions précises pour valider la capacité de l'utilisateur à trouver des informations dans le prototype. Ce questionnaire demande à l'utilisateur de fournir des informations relatives aux AR et à la CS. Le fait de fournir ces informations correctement garantit la capacité de l'utilisateur à trouver des informations dans l'outil et à générer des connaissances sur la situation. Cela indique sa capacité à atteindre les trois niveaux de CS et la qualité de sa CS.

3.3.3 Analyse de l'activité

L'analyse de l'activité permet de capitaliser sur les informations consultées par l'utilisateur au cours du processus décisionnel. Ainsi, les AR utilisées pendant les tests sont élicitées et les AR manquantes sont identifiées grâce aux enregistrements vocaux et à la phase de débriefing. Le processus d'acquisition de la CS est comparé aux résultats des entretiens. Ce processus d'activité, une fois comparé, met en évidence les AR manquantes et permet de définir un processus de décision final pour les tâches utilisateur. Le processus montre également les comportements émergents et la division en sous-tâches permettant une meilleure compréhension du processus décisionnel humain. De plus, il indique les AR inutiles à supprimer pour éviter de surcharger l'interface utilisateur.

Des recommandations sont formulées sur la base des résultats de ces trois analyses. Ces recommandations peuvent être associées à la mise en œuvre des AR (quelles sont les AR manquantes ou inutiles), à la conception de l'interface utilisateur (quelles AR doivent être mises en évidence ou au contraire cachées) ou liées aux évolutions futures de la forme des informations utilisées pour représenter au mieux les AR. Ces recommandations sont ensuite mises en œuvre dans les itérations futures du prototype.

4 APPLICATION AU CAS D'ETUDE

Le cas d'étude choisi est basé sur une des activités industrielles de TotalEnergies (<https://totalenergies.com/>). Pour définir un cas industriel cohérent, trois facteurs ont été pris en compte : (1) le site sur lequel la décision sera prise, (2) la configuration du site, et (3) la situation dégradée sur laquelle la décision doit être prise car la politique de l'entreprise est de réduire au plus vite les risques de ces situations par des actions immédiates.

Le site sélectionné pour cette étude est une installation flottante de production, de stockage et de déchargement (Floating Production, Storage and Offloading - FPSO) fictive basée sur un navire FPSO existant de la compagnie TotalEnergies. Le procédé choisi est un procédé de séparation du pétrole et du gaz en deux étapes. Ce procédé est standard sur les sites de l'entreprise et est donc bien connu des opérateurs. De plus, ce procédé utilise des réservoirs de séparation (Figure 2) équipés de brides dont les joints sont connus pour être de potentielles sources de fuite de gaz.

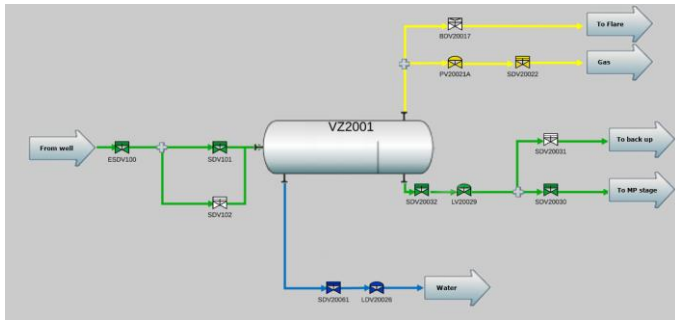


Figure 2. Vue du séparateur haute pression et de la vanne de contrôle associée sélectionnés comme cas d'étude.

Le processus étudié est situé dans une section du navire FPSO comportant trois ponts : le pont de process inférieur, le pont mezzanine et le pont de process supérieur. Outre les équipements de suivi du processus, ces ponts sont équipés de capteurs acoustiques, de capteurs de concentration de gaz et de caméras de surveillance. Dans le cadre des projets de recherche et développement de TotalEnergies visant à améliorer la gestion des fuites de gaz, la situation dégradée étudiée est une fuite de gaz CH₄. Des facteurs supplémentaires de la situation, tels que la présence de personnes à proximité ou des conditions météorologiques changeantes, permettent de créer une situation dégradée complexe réaliste.

Les sous-sections suivantes décrivent la mise en œuvre de la RAM pour concevoir un JN pour le pilotage en salle de contrôle intégrant l'ensemble de ces caractéristiques.

4.1 Analyse des tâches humaines

L'étude des règlements et procédure porte sur l'analyse des règles de sécurité de l'entreprise afin d'en extraire un processus décisionnel théorique ainsi que les supports et outils recommandés pour l'acquisition d'informations. Cette étude a

débuté par l'identification de trois types de documents, décrivant la philosophie commune à adopter pour la gestion des situations dégradées selon le référentiel de TotalEnergies, et concernant la gestion des risques, les procédures en cas de fuite de gaz et les personnels recommandés dans ces procédures. Le processus et les ressources identifiées associées ont été modélisés en utilisant le format BPMN (Figure 3).

Ce processus recommandé de gestion des situations dégradées permet d'identifier les connaissances acquises relatives à la gestion générale des risques et à la logique de détection des gaz. Il donne également un aperçu du travail effectué par les opérateurs de salle de contrôle. Cependant, l'étape suivante vise à s'assurer une compréhension détaillée des tâches à effectuer par les opérateurs au travers d'entretiens semi-dirigés. En effet, le travail tel qu'il est imaginé est connu pour différer du travail tel qu'il est fait [Hollnagel, 2015]. Le protocole semi-structuré a été défini pour enregistrer l'expérience des utilisateurs sur des sujets spécifiques au domaine (tâche effectuée, outil utilisé, informations accessibles, interactions avec les personnes et connaissances acquises). Les transcriptions de ces entretiens ont ensuite été étudiées pour extraire un processus décisionnel et les ressources associées qui ont été modélisés grâce au format BPMN (Figure 4).

En comparant les deux processus, des différences dues à la situation de travail peuvent être identifiées. Tout d'abord, en raison des différences de contraintes de temps, les sources d'information utilisées sont différentes. Ces différences pourraient être réduites grâce à la capacité des JN à contenir les informations et les connaissances dans un outil global. Les différences apparaissent également dans l'ordre et la forme dans lesquels l'action de signalement est effectuée. Comme une anomalie doit être traitée rapidement pour éviter une éventuelle escalade, les opérateurs de la salle de contrôle doivent réagir en moins de 10 minutes et sont chargés des premières actions correctives. Par conséquent, le processus de gestion des anomalies en salle de contrôle est plus court et les activités de reporting sont effectuées à la fin du processus. De plus, les retours d'expérience sont rédigés sous forme libre, contrairement aux rapports dirigés du processus de gestion globale, qui sont effectués en parallèle des activités.

D'autre part, des similitudes sont apparues dans la forme des principales activités réalisées montrant une logique de gestion globale avec une vérification des informations, des actions pour résoudre le problème et un rapport pour informer les autres. Ceci confirme le choix d'utiliser un JN pour permettre un processus décisionnel plus complet car plus orienté vers la situation à traiter. Pour identifier les AR utilisées par les opérateurs pour acquérir la CS, une analyse des fonctions cognitives [Boy, 1998] est effectuée sur le processus décisionnel réellement mis en œuvre dans la salle de contrôle. Les AR seront ensuite implémentées dans le JN afin d'assurer la capacité de cet outil à fournir les éléments nécessaires aux

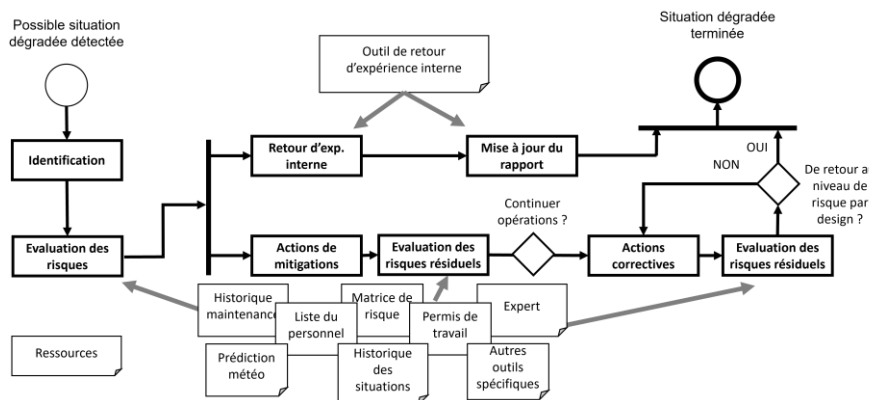


Figure 3. Processus de gestion des situations dégradées.

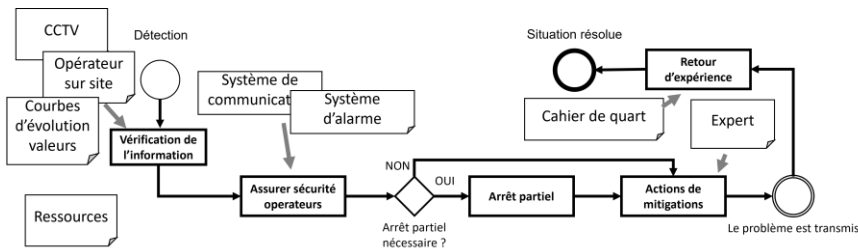


Figure 4. Processus de gestion des situations dégradées selon les opérateurs de salle de contrôle.

utilisateurs pour acquérir la CS. L'analyse des fonctions cognitives vise à identifier les fonctions cognitives utilisées par les humains pour effectuer des tâches. Ces fonctions sont définies à l'aide d'un nom, d'un contexte et de ressources à la fois physiques et cognitives.

Par exemple, il existe la tâche nommée « identifier le signal d'alarme » dans le contexte d'une détection de fuite de gaz dans une salle de contrôle. Pour transformer cette tâche en activité, l'utilisateur utilise des ressources physiques (signal audio d'alarme, variation dans les affichages) et des ressources cognitives (« mémorisation des types de signaux d'alarme », « écouter des signaux audio », « voir un signal visuel »).

Ce processus doit être effectué pour chaque tâche afin d'identifier toutes les ressources dont l'utilisateur a besoin pour exécuter ses tâches et ainsi extraire les AR pertinentes. Dans l'exemple précédent, deux AR peuvent être identifiées : un signal d'alarme sonore et un signal d'alarme visuel. En tant que AR, ces signaux permettent à l'utilisateur d'identifier qu'un ou plusieurs capteurs ont changé d'état et ont détecté une anomalie dans la situation. A l'issue de l'analyse des fonctions cognitives précédemment identifiées, un total de 29 AR a été découvert dans ce processus décisionnel étudié.

4.2 Implémentation du prototype

Selon les principes de la conception basée sur des scénarios [Carroll, 1997], des scénarios d'utilisation ont été définis de manière itérative pour décrire les utilisations possibles du prototype. Douze scénarios ont été exprimés sous forme de récits d'utilisateurs pour illustrer différentes réactions des opérateurs aux situations proposées, que ce soit en salle de contrôle, comme une alarme provenant d'un capteur, ou sur le terrain, comme la présence d'un vent fort. Ces douze scénarios ont été validés par un ancien opérateur de salle de contrôle ayant une expérience des activités de formation.

À partir de ces douze scénarios de conception, des paramètres décrivant la situation ont été définis et un ensemble de cinq scénarios a été proposé et exécuté pendant les essais. Chacun des scénarios définis a été utilisé pour illustrer différentes situations et déclencher différentes réactions des opérateurs :

- Scénario 1 : fuite à faible risque et multiple détection supposée conduire à prendre des mesures pour résoudre la fuite sans arrêter le processus,
- Scénario 2 : alarme unique sans validation supposée conduire à une demande d'informations complémentaires et à une évacuation des personnels
- Scénario 3 : détection répétitive sans confirmation supposée conduire à une demande d'informations complémentaires,
- Scénario 4 : Fuite à haut risque avec détection multiple supposée conduire à un arrêt immédiat et une évacuation du personnel,
- Scénario 5 : détection d'une fuite avec validation tardive supposée conduire une évacuation du personnel avant une deuxième alarme.

L'ensemble de ces scénarios a également été validé par le même opérateur expert que pour les scénarios de conception.

Après la définition des scénarios, le prototype est mis en œuvre en considérant chaque AR définie dans les étapes précédentes pour le prototype de JN. Pour des raisons de sécurité, la modification d'une salle de contrôle d'un navire FPSO en exploitation n'est pas possible. Il a donc été choisi de mettre en œuvre une simulation de JN (c'est-à-dire une représentation d'un navire FPSO en temps réel mais sans lien à un jumeau physique) ce qui présente l'avantage d'apporter de la flexibilité lors de l'implémentation du prototype. Cependant, l'utilisation d'une simulation a créé des limitations pour la représentation des AR dans le prototype et trois AR n'ont pas pu être mises en œuvre : (1) les images des caméras de surveillance ont été remplacées par des images statiques du site, (2) les images infrarouges et (3) les tendances des indicateurs de performance du processus n'ont pas pu être mises en œuvre. En dehors de ces trois AR, toutes les autres AR ont été implémentées.

Cette étude vise à améliorer la CS sur la base des données mises en œuvre dans le JN. Par conséquent, aucune étude n'a été menée sur l'organisation de l'interface utilisateur. Cependant, pour s'assurer que l'interface utilisateur mise en œuvre n'a pas d'impact négatif sur les performances de l'utilisateur, elle a été conçue sur la base des exigences de conception anthropocentrée et affinée de manière itérative avec un opérateur. Une société spécialisée dans le conseil en conception d'expérience utilisateur a effectué un test basé sur la conception précédente de l'interface utilisateur de la salle de contrôle afin de générer des recommandations préliminaires pour la future mise en œuvre de l'interface utilisateur qui ont été mises en œuvre dans le prototype.

Pour mettre en œuvre le principe du « Magicien d'Oz », le prototype a été conçu comme un jeu en ligne à deux joueurs utilisant le logiciel UNITY (<https://unity.com/>). Les deux joueurs disposent des mêmes interfaces, l'une pour les informations relatives au processus et l'autre pour les informations contextuelles. Toutefois, le « Magicien d'Oz » a la possibilité de modifier les valeurs dans l'interface du processus et pour simuler les effets de fuites de gaz.

Comme pour les étapes précédentes, l'implémentation et le réalisme du prototype ont été validés avec un expert du domaine. Lors de la validation, les commentaires relatifs à l'interface utilisateur ainsi que ceux concernant la couleur utilisée, les icônes sélectionnées, le taux d'évolution des valeurs du processus ou encore le comportement du système d'alarme ont été abordés afin de garantir une expérience utilisateur réaliste tout au long des tests.

4.3 Tests utilisateur

Le protocole permet de définir la manière dont la phase de test utilisateur a été menée et assurer la validité de l'évaluation. Dans ce protocole, le choix a été fait de définir cinq scénarios pour immerger l'opérateur dans différentes situations réalistes. Les techniques d'évaluation utilisées pour quantifier l'impact du prototype ont également été définies.

Cinq opérateurs, considérés comme des experts (avec plus de 15 ans d'expérience dans le domaine), ont participé aux tests.

Une phase de formation, permettant de familiariser l'utilisateur avec le prototype et d'identifier les éléments manquants, a été réalisée à l'aide d'une liste de contrôle divisée en trois sections axées sur les deux interfaces utilisateur (une pour le processus et une pour le contexte) et sur le lien entre elles. Pour garantir l'apprentissage, chaque type d'interaction avec le prototype a été demandé à l'utilisateur par le biais de la liste de contrôle. Ces actions ont permis de montrer à l'utilisateur où et quelles informations lui étaient accessibles et comment y accéder.

Les scénarios de test sont ensuite présentés à l'opérateur. A la fin de chaque scénario, l'opérateur était invité à compléter un formulaire de retour d'expérience. Trois types de formulaires ont été utilisés : un formulaire d'expression libre, un formulaire de retour d'expérience dirigé et un questionnaire. Ces scénarios et les formulaires correspondants ont été proposés dans un ordre précis (Figure 6) pour s'assurer que chaque testeur faisait tous les scénarios et pour récupérer deux formulaires d'expression libre et deux formulaires dirigés pour chaque scénario. Le questionnaire étant très descriptif et risquant de biaiser la mémorisation des informations par l'opérateur, il était toujours le dernier à être utilisé.

| Ordre des tests | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------|
| | Cahier de quart | Cahier de quart | Retour d'expérience dirigé | Retour d'expérience dirigé | Questionnaire |
| Opérateur 1 | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 |
| Opérateur 2 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 1 |
| Opérateur 3 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 1 | Scénario 2 |
| Opérateur 4 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 |
| Opérateur 5 | Scénario 5 | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 |

Figure 6. Ordre des scénarios et des retours d'expérience pour chaque testeur.

5 RESULTATS

Pour recueillir les résultats des testeurs, le protocole défini précédemment a été utilisé avec le prototype mis en œuvre. Trois sources de résultats sont examinées. (1) Les résultats de la SART (*Situation Awareness Rating Technique*) donnent un aperçu de l'effet du prototype sur la CS de l'utilisateur grâce à la capacité du JN à donner accès aux AR pour chaque scénario. (2) Les résultats des retours d'expérience permettent d'identifier les AR utilisés par les opérateurs pour décrire une situation à partir de différents niveaux de détails. (3) L'analyse des activités permet d'identifier le processus utilisé par les opérateurs pour accéder aux informations de l'outil lorsqu'ils sont confrontés à la nécessité d'évaluer une situation.

5.1 Évaluation de la conscience de la situation

L'utilisation de la SART visait à identifier la capacité des opérateurs à percevoir la complexité de la situation et à maintenir leur attention sur les deux interfaces. Elle visait également à identifier une éventuelle surcharge cognitive et à évaluer le réalisme des scénarios utilisés. Les résultats du SART ont été implémentés dans des graphiques radar qui représentent les évaluations des opérateurs liées à un scénario spécifique. La Figure 5 montre un exemple du graphique radar obtenu pour le premier scénario.

La synthèse des résultats de l'ensemble des tests effectués montre que les opérateurs gardent une part d'attention constante sur l'ensemble des informations. Il est donc important de soutenir cette capacité. Il était prévu que la familiarité avec la situation soit plus élevée pour chaque scénario car elle a été extraite de situations réelles passées exprimées par les opérateurs mais l'utilisation de nouveaux capteurs et l'utilisation d'un site opérationnel non connu ont amené les opérateurs à diminuer leurs notes dans cette catégorie. Cela montre l'importance pour les opérateurs de connaître la configuration du site et pas seulement la situation en cours. En ce qui concerne la quantité d'informations et la

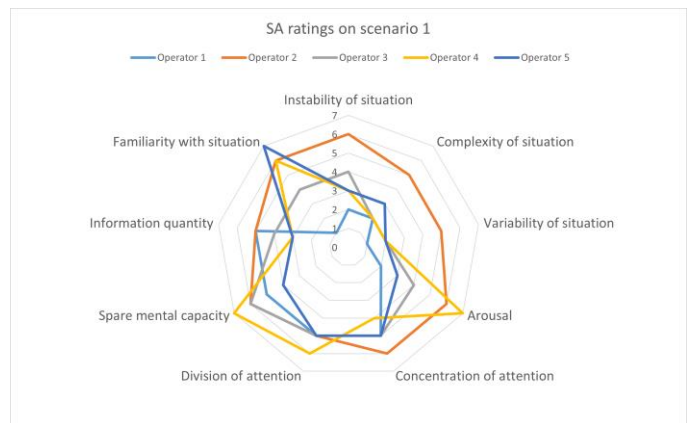


Figure 5. Graphique radar représentant les résultats de la SART des cinq opérateurs pour le scénario 1.

capacité mentale disponible, les résultats montrent que l'outil peut être utilisé dans une situation réelle pour soutenir les utilisateurs. D'autre part une évaluation plus élevée de l'instabilité, de la complexité et de la variabilité apparaît lorsqu'il s'agit de faire face à une situation à risque évoluant rapidement et impliquant la sécurité des personnes.

5.2 Analyse des retours d'expérience

Pour analyser les résultats des formulaires de retour d'expérience, des tableaux synthétisant le nombre d'occurrences des concepts associés à chaque AR ont été définis pour chaque scénario. Ces tableaux montrent trois grands types de résultats. (1) L'identification des concepts utilisés dans les formulaires dirigés montre les AR permettant de décrire des détails de la situation. (2) L'identification des concepts utilisés uniquement dans les formulaires d'expression libre montre les AR qui disparaissent avec un niveau de détail plus élevé. Cela peut s'expliquer par l'utilisation de différents concepts ou éléments qui sont spécifiques à une courte description de la situation. (3) L'identification des concepts qui n'ont jamais été utilisés dans les retours d'expérience montre que certaines AR sont inutiles pour décrire une situation.

Les résultats des questionnaires permettent de valider que l'utilisateur savait accéder aux informations dans l'outil.

L'ensemble des résultats des formulaires de retour d'expérience a fait ressortir les concepts liés au système de détection d'alarme dans la description de la situation. Ces résultats ont également montré que ces concepts sont utilisés par les opérateurs pour percevoir la situation et se concentrer sur les informations à acquérir plus en détail. Les informations secondaires sont identifiées comme étant relatives à l'équipement impacté et aux personnes à proximité.

Ces résultats valident également les AR identifiées lors de l'étape d'élicitation et leur utilisation dans l'acquisition de la conscience de la situation. En effet, tous les éléments utiles à la description d'une situation figurent dans la liste des AR. Trois types d'AR n'ont pas été utilisés dans les formulaires : (1) les concepts rarement utilisés par les opérateurs (notamment la maintenance des équipements), (2) les concepts qui se rapportent à la fuite de gaz mais qui sont difficiles à identifier (taille du trou, position du nuage de gaz...) et (3) les concepts qui illustrent le fonctionnement du processus mais sont inutiles pour gérer la fuite (capteurs de pression).

5.3 Analyse de l'activité

Dans cette expérience, l'enregistrement de l'activité a été réalisé à l'aide d'une caméra pointée sur les deux écrans. Cette méthode combine l'enregistrement de la voix de l'utilisateur pour la technique du « *think-out-loud* » [Olson et al., 2018] et l'enregistrement des mouvements de la souris sur l'écran.

Les enregistrements obtenus ont été analysés à l'aide du logiciel « *The Observer XT* » (logiciel d'analyse de

comportement). Ce logiciel permet de marquer les événements et les états en fonction du temps dans une vidéo pour en extraire une liste d'activités horodatées. Les activités et états enregistrés ont ensuite été convertis en un état de disponibilité à l'écran de chaque AR. Le calcul du ratio de disponibilité de chaque AR pour chaque utilisateur et pour chaque scénario a permis de conclure sur son rôle dans le processus décisionnel. En examinant les résultats, il est possible de tirer quelques conclusions générales concernant la disponibilité des AR. En ce qui concerne les capteurs, les informations détaillées comme le nom du capteur sont très rarement utilisées par les utilisateurs pour prendre une décision. Cependant, les autres informations connexes, disponibles sur la carte où la détection a eu lieu, montrent un taux de disponibilité élevé, ce qui signifie que l'utilisateur passe la plupart de son temps sur l'interface contextuelle où ces informations sont disponibles. Ce résultat est validé par le fait que les opérateurs ont accès aux informations concernant le point de fuite au moins 50% du temps. Les autres AR relatives à la détection de fuites (auxquelles il faut accéder) ont été disponibles pour l'utilisateur au moins une fois et affichent même plus de 20% de disponibilité dans certains cas, soulignant leur importance. Les AR liées aux permis de travail s'avèrent être disponibles au moins une fois pour la plupart des utilisateurs, même si aucun permis n'est en cours d'exécution sur le site. Cela montre l'importance de ces AR. Il faudrait donc rendre constamment disponible pour l'utilisateur le nombre de permis actuellement réalisés sur le site pour permettre aux utilisateurs de savoir s'ils ont besoin d'accéder à des informations complémentaires. Les AR liées à l'équipement présentent un faible taux de disponibilité. Ces résultats montrent que les détails de l'équipement et la maintenance ont peu d'importance sur l'interface contextuelle. De plus, des informations météorologiques détaillées (température, pression, humidité) étaient accessibles dans l'interface mais peu d'opérateurs les avaient à l'écran lors de la décision ce qui questionne leur utilité. Les AR relatives aux caméras de sécurité étaient simulées et donc pas assez réalistes pour décider dans la situation. Cependant, il a été demandé à l'utilisateur d'accéder à ces informations s'il souhaitait les avoir à sa disposition. Les résultats montrent que l'utilisateur aurait eu besoin de cette information. Enfin, le ratio de disponibilité des AR décrivant le processus étudié montre son utilité pour le pilotage industriel.

6 DISCUSSION ET PERSPECTIVES

En conclusion, la RAM vise à pallier l'absence de méthodologie centrée sur l'humain pour la conception de JN. Cette méthodologie vise à proposer un processus détaillé pour la mise en œuvre d'un JN par l'élicitation, la mise en œuvre et la validation des AR dans un prototype. L'application de la méthodologie au cas d'étude a fourni des résultats prometteurs mais a aussi montré des limites. Ces limites résident dans l'incertitude qui accompagne les tests sur les humains et dans le support utilisé pour enregistrer les résultats. La difficulté d'accéder à des profils d'opérateurs experts qui plus est en dehors de l'environnement opérationnel de la salle de contrôle, où les opérateurs doivent être entièrement concentrés, a fortement limité la taille du panel de testeurs.

En ce qui concerne les outils utilisés pour capturer les résultats, l'absence d'un dispositif de suivi oculaire nous a obligé à travailler sur la disponibilité des AR et non sur leur perception par l'utilisateur. Les résultats reposent donc sur l'hypothèse majeure que le testeur a utilisé les AR mises à sa disposition. Les résultats donnent une image des AR utilisées mais ne reflètent pas directement l'activité réalisée par l'utilisateur. En dehors de ces limites, les résultats obtenus dans cette étude ont permis de montrer l'impact de l'outil sur l'acquisition de la

conscience de la situation et de donner un aperçu de la manière d'améliorer le prototype pour développer un outil répondant aux besoins des utilisateurs.

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé avec l'aide des ressources et des services de TotalEnergies (<https://totalenergies.com/>).

RÉFÉRENCES

- Abi Akle, A., Yannou, B., & Minel, S. (2019). Information visualisation for efficient knowledge discovery and informed decision in design by shopping. *Journal of Engineering Design*, 30, 227–253.
- Aivaliotis, P., Georgoulas, K., Arkouli, Z., & Makris, S. (2019). Methodology for enabling digital twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance. *Procedia CIRP*, 81, 417–422.
- Boy, G. A. (1998). Cognitive function analysis for human-centered automation of safety-critical systems. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 265–272.
- Boy, G. A. (2013). *Orchestrating human-centered design*. Springer.
- Camara Dit Pinto, S., Villeneuve, É., Masson, D., Boy, G. A., Barron, T., & Urfels, L. (2021). Digital twin design requirements in downgraded situations management. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), pp 869-873.
- Carroll, J. M. (1997). Scenario-Based Design. *Handbook of Human-Computer Interaction*, 383–406.
- Dahlbäck, N., Jönsson, A., & Ahrenberg, L. (1993). Wizard of Oz studies — why and how. *Knowledge-Based Systems*, 6, 258–266.
- Endsley, M. R. (2000). Direct Measurement of Situation Awareness: Validity and Use of SAGAT. *Situation Awareness Analysis and Measurement*, 1–21.
- ESRI. (2008). Public safety and homeland security situational awareness.
- Grieves, M. (2014). Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication. *Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication*, 95, 6–15.
- Hogg, D. N., Follesø, K., Strand-Volden, F., & Torralba, B. (1995). Development of a situation awareness measure to evaluate advanced alarm systems in nuclear power plant control rooms. *Ergonomics*, 38, 2394–2413.
- Hollnagel, E. (2015). Why is work-as-imagined different from work-as-done? *The resilience of every day clinical work*, 249–264.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022.
- Larrasquet, J. M., Pilnière, V., & Jayaratna, N. (2016). Discovering the nature of complexity involved in the innovation processes. *International Journal of Technology Management and Sustainable Development*, 15, 133–144.
- Madni, A., Madni, C., & Lucero, S. (2019). Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, 7.
- Negri, E., Assiro, G., Caioli, L., & Fumagalli, L. (2019). A machine state-based digital twin development methodology. *Proceedings of the Summer School Francesco Turco*, 1, 34–40.
- Olson, G. M., Duffy, S. A., Mack, R. L. (2018). Thinking-Out-Loud as a Method for Studying Real-Time Comprehension Processes. *New Methods in Reading Comprehension Research*, 253–286.
- Pérez, L., Rodríguez-Jiménez, S., Rodríguez, N., Usamentiaga, R., & García, D. F. (2020). Digital twin and virtual reality based methodology for multi-robot manufacturing cell commissioning. *Applied Sciences*, 10.
- Qamsane, Y., Moyne, J., Toothman, M., Kovalenko, I., Balta, E. C., Faris, J., & Barton, K. (2021). A Methodology to Develop and Implement Digital Twin Solutions for Manufacturing Systems. *IEEE Access*, 9, 44247–44265.
- Stanton, N. A., Stewart, R., Harris, D., Houghton, R. J., Baber, C., McMaster, R., Green, D. (2006). Distributed situation awareness in dynamic systems: Theoretical development and application of an ergonomics methodology. *Ergonomics*, 49, 1288–1311.
- Taylor, R. M. (1990). Situational awareness rating technique (SART): The development of a tool for aircrew systems design. *Situational Awareness in Aerospace Operations*, 2013–2015.
- White, S. (2004). Introduction to BPMN. *IBM Cooperation*, 2, 1–11.