

CIGI QUALITA MOSIM 2023

Améliorer la décision collaborative grâce à un jumeau numérique du système sociotechnique

QUENTIN LORENTE^{1,2}, ERIC VILLENEUVE², CHRISTOPHE MERLO², GUY ANDRE BOY^{2,3}, FRANÇOIS THERMY¹

¹ SAFRAN HELICOPTER ENGINES
40220 Tarnos, France

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

³ UNIVERSITE PARIS-SACLAY, CENTRALESUPELEC, LABORATOIRE GENIE INDUSTRIEL
91190 Gif-sur-Yvette, France

Résumé – Ce travail de recherche vise à améliorer la prise de décision et l'apprentissage collectif grâce à un jumeau numérique de l'organisation dans le contexte d'une activité industrielle complexe telle que la maintenance des moteurs d'hélicoptères. Des études de terrain et bibliographiques ont permis de déterminer que le jumeau numérique devait être basé sur un modèle de système multi-agents pour des raisons de flexibilité et de modularité nécessaires dans cet environnement en constante évolution. Le jumeau numérique est destiné à s'adapter à l'organisation mais aussi à l'améliorer en incluant les flux d'informations manquants. Cet article présente le modèle multi-agents du système sociotechnique et de son jumeau numérique, le modèle d'agent choisi et inspiré de l'apprentissage par renforcement, et comment il a permis d'identifier ces flux manquants. Il montre l'importance des interfaces dans le jumeau numérique et ce qu'elles doivent contenir pour intégrer les agents, ainsi que les aspects psychosociaux à prendre en compte pour que les humains puissent gérer leur conception.

Abstract – This research work aims to improve collective decision making and learning through a digital twin of the organisation in the context of a complex industrial activity such as helicopter engine maintenance. Through field and literature studies, it was determined that the digital twin should be based on a multi-agent system model for reasons of flexibility and modularity necessary in this constantly changing environment. The digital twin is intended to adapt to the organisation but also to improve it by including missing information flows. This paper presents the multi-agent model of the socio-technical system and its digital twin, the chosen agent model inspired by reinforcement learning, and how it has helped to identify these missing flows. It shows the importance of the interfaces in the digital twin and what they must contain to integrate the agents, as well as the psychosocial aspects to be considered so that humans can manage their design.

Mots clés - Jumeau numérique, Prise de décision collaborative, Système multi-agents, Maintenance des moteurs d'hélicoptères, Organisation apprenante.

Keywords – Digital twin, Collaborative decision-making, Multi-agent system, Helicopter engines maintenance, Learning organization.

1 INTRODUCTION

Le contexte actuel de la quatrième révolution industrielle [Maynard, 2015] est aussi prometteur que source de complexité. Cette notion de complexité, appliquée à un système organisationnel, se caractérise par une variabilité importante des éléments le constituant, par une difficulté à le décomposer et à définir les interactions entre les éléments, ainsi que par une prise de décision décentralisée, rendant son comportement imprévisible et incertain [Gélizé, 2020]. Plus spécifiquement, dans une activité industrielle complexe telle que la maintenance des moteurs d'hélicoptères, chaque acteur ne possède qu'une partie des informations, connaissances, compétences et savoir-faire nécessaires, ce qui induit une vision partielle de la situation, par exemple face à un problème technique à identifier et traiter.

Cependant, ces connaissances et cette conscience de la situation sont nécessaires pour réaliser l'activité en question. Une meilleure connaissance de la situation devrait conduire à une meilleure qualité des décisions [Endsley et Garland, 2000], ce qui est d'une importance stratégique [Laguna Salvado et al., 2022]. Endsley a défini la conscience de la situation comme (1) la perception des éléments d'un environnement situé dans l'espace et dans le temps, (2) la compréhension de leur signification, et (3) la projection de leur état dans le futur [Endsley, 1995]. La conscience de la situation est donc reconnue comme d'une importance centrale dans la prise de décision.

Le processus de prise de décision est basé sur l'expertise, les techniques et les outils personnels, qui sont facilement compris dans leur environnement immédiat (c'est-à-dire des entités telles que le département ou l'équipe). Malheureusement, il

arrive que les objectifs et les repères soient différents au sein des équipes et/ou des départements ; la compréhension mutuelle et la collaboration peuvent donc être difficiles.

De nombreuses techniques sont utilisées pour faciliter les tâches cognitives dans les entreprises, comme la gestion des connaissances [Matta et al., 2002] ou l'apprentissage automatique [Carvalho et al., 2019].

Les techniques déjà proposées semblent répondre aux besoins d'un groupe limité d'acteurs métiers au sein de l'entreprise. Mais qu'en est-il des tâches cognitives collectives de l'entreprise dans son ensemble ? Qu'en est-il des connaissances qui émergent de la combinaison de différentes activités pour améliorer la performance collective ?

Une étude de terrain basée sur vingt et un entretiens semi-structurés avec quinze employés de neuf services de l'entreprise, tous impliqués dans les processus de réparation et de maintenance, a été menée. Il s'est avéré que la complexité de la situation, difficile à appréhender, ne provient pas seulement du produit lui-même, le moteur d'hélicoptère, mais aussi dans une large mesure de l'ensemble du système sociotechnique. Ce système sociotechnique est impliqué dans l'activité de maintenance du moteur, et les moteurs en font partie en tant qu'objets. Pour cela, un jumeau numérique de ce système sociotechnique peut permettre à chaque partie prenante d'obtenir une représentation dynamique pour comprendre l'état du système sociotechnique, son évolution et mieux agir en conséquence [Camara Dit Pinto et al., 2021a]. Les composants du système sociotechnique à modéliser, dans notre cas les humains et les machines, impliquent des caractéristiques hétérogènes et évolutives. De plus, un degré d'autonomie est essentiel pour ses composants, car il leur permet de s'exercer et de développer leurs compétences. De nombreux travaux ont montré la modularité et la flexibilité d'un système multi-agents [Ferber et Weiss, 1999] pour modéliser un tel système de systèmes qu'est l'entreprise [Lee et Kim, 2008]. Ce type de système a notamment été utilisé pour modéliser et piloter l'organisation impliquée dans le développement de produits dans un contexte de collaboration multi-entreprises [Merlo et Girard, 2004]. Cette approche systémique, dont découle le terme système sociotechnique, n'est pas nouvelle [Emery et Trist, 1965]. Les notions de décision partagée [Elwyn et al., 2012] ainsi que l'organisation apprenante [Edmonson et Moingeon, 1998] ont été explorées, soulignant l'importance de l'autonomie et de la responsabilité des participants par l'autoréflexion [Edmonson et Moingeon, 1998].

Cette étude s'appuie sur un état de l'art explorant les notions relatives aux sciences cognitives, aux systèmes multi-agents et au concept de jumeau numérique pour proposer un modèle de jumeau destiné à soutenir les décisions en intégrant les connaissances de toute l'entreprise. Ainsi, les travaux évoqués dans cet article sont relatifs à une proposition scientifique visant à adresser la problématique de recherche suivante : « *Le jumeau numérique du système sociotechnique basé sur un modèle multi-agents, permet-il de rendre ce système apprenant et, dans ce contexte, d'améliorer son efficacité grâce à l'intégration des échanges entre ses agents ?* ». Cette proposition est ensuite illustrée au travers d'un cas d'étude issu de la maintenance des hélicoptères.

2 ETAT DE L'ART

Cette section propose un état de l'art sur les thématiques relatives aux sciences cognitives, aux systèmes multi-agents et au concept de jumeau numérique.

2.1 Des sciences cognitives aux systèmes multi-agent

Les sciences cognitives et la cognition s'intéressent à des activités cérébrales de haut niveau, telles que la perception, la mémoire ou le raisonnement abstrait [Vignaux, 1991]. Leur compréhension est cruciale dans l'environnement industriel. La recherche transdisciplinaire pour l'ingénierie cognitive [Boy, 2003] vise à adapter la technologie à l'humain plutôt que l'inverse, pour mieux aider les personnes, en combinant les connaissances sur l'homme, la technologie et les relations entre eux.

Trois grands courants intellectuels des sciences cognitives sont actuellement étudiés :

- le cognitivisme qui est basé sur l'hypothèse que la cognition est une manipulation de symboles permettant d'obtenir des réponses adaptées à la situation rencontrée [Pylyshyn, 1980]. La gestion des connaissances [Matta et al., 2002] est un exemple d'application industrielle de ce courant.
- le connexionnisme qui repose sur l'hypothèse selon laquelle la cognition est l'émergence d'états globaux (réponses attendues) de réseaux d'éléments simples (tels que les neurones) [Hebb, 2005]. L'apprentissage automatique [Carvalho et al., 2019] est un exemple réussi de connexionnisme pour des tâches telles que la reconnaissance d'images ou la reconnaissance du langage naturel.
- la « *société de l'esprit* » [Minsky, 1988] qui correspond à une hybridation du cognitivisme et du connexionnisme. Les différentes fonctions cognitives sont réalisées par différents agents (un agent correspond à une fonction), qui sait résoudre un type de problème à petite échelle. Pour un problème à plus grande échelle, plusieurs agents liés entre eux seront nécessaires, ce groupe d'agents forme une agence. Si l'on considère les différents niveaux, chaque organisation interne des agents peut être considérée comme une agence elle-même. Le fonctionnement de la cognition est donc considéré comme une société. Ce type de fonctionnement donne accès à la résolution de problèmes plus complexes et imprévus.

Cette dernière théorie de Minsky sur la mise en œuvre de la cognition humaine a donné naissance aux systèmes multi-agents qui permettent de modéliser et de simuler l'intelligence collective. Comme une colonie de fourmis, un banc de poissons ou une nuée d'oiseaux, les individus qui interagissent dans leur environnement sont autonomes, du moins partiellement. Mais des règles relativement simples que ces agents suivent individuellement conduisent à des organisations très sophistiquées au niveau collectif. Comme l'entreprise peut être vue comme un système de systèmes [Gorod et al., 2008], une modélisation de ce système complexe par un système multi-agents peut permettre l'intégration des connaissances de l'entreprise [Merlo et Girard, 2004] et améliorer le pilotage d'un tel système [Boussaada et al., 2017].

Dans le contexte de l'utilisation des systèmes multi-agents pour la modélisation de systèmes sociotechniques, plusieurs travaux ont été menés montrant la pertinence de cette approche. Ainsi, dans [Tranier, 2007], l'auteur propose un cadre de modélisation pour concevoir et implémenter des systèmes multi-agents intégrant une dimension sociale forte, qu'il applique pour représenter des systèmes sociotechniques, capables d'interagir avec des agents humains, et de s'adapter à l'arrivée de nouveaux agents ou à leur départ, pour supporter le processus métier de ces humains. Dans [Franchi et Poggi,

2012], les auteurs s'intéressent aux relations unissant un système multi-agents et des réseaux sociaux en vue de supporter les activités de ces réseaux, non pas pour les simuler, mais pour apporter des services ad hoc.

Enfin, les systèmes multi-agents ont également été utilisés pour l'aide à la décision afin d'assurer la coordination et la communication entre des agents machines [Lum et al., 2005] et pour la simulation de systèmes complexes pour prédire le comportement d'acteurs dans le domaine de l'énergie [Oliveira et al., 2013].

En complément, il faut noter que la littérature récente en psychologie organisationnelle confirme la nécessité de la réflexivité des acteurs de l'entreprise dans leur autonomie dans la construction des problèmes, notamment en ingénierie [Vannereau et Lemaitre, 2020]. Il est donc cohérent de proposer que le jumeau numérique, notamment basé sur un modèle multi-agents, soit vu comme un outil de réflexivité qui reproduit numériquement l'organisation multi-agents réelle et les liens en son sein [Rzevski et al., 2022].

2.2 Jumeau numérique

Comme évoqué précédemment, dans l'industrie, de nombreuses tâches cognitives peuvent être prises en charge par différentes techniques et approches. Leur grande diversité peut rendre difficile l'obtention d'une vision exhaustive de l'activité industrielle réelle et des paramètres à considérer dans la prise de décisions visant à maximiser l'efficacité globale.

Le jumeau numérique est reconnu comme un outil permettant de gérer un système aussi complexe [Grievies et Vickers, 2017]. Présenté par la NASA comme « *une simulation probabiliste multi-physique et multi-échelle intégrée d'un véhicule ou d'un système tel qu'il a été construit, qui utilise les meilleurs modèles structurels disponibles, des capteurs mis à jour pour refléter la vie de son jumeau volant correspondant* » [Glaessgen et Stargel, 2012], ses définitions ont évolué de manière plus généraliste vers « *une représentation dynamique d'un système physique utilisant des données, des modèles et des processus interconnectés pour permettre l'accès à la connaissance des états passés, présents et futurs afin de gérer les actions sur ce système* » [Camara Dit Pinto et al., 2021a]. C'est cette dernière définition qui est retenue dans cette étude pour ne pas limiter le rôle du jumeau numérique à la seule simulation du système.

De plus, différents niveaux d'intégration des données ont été identifiés dans [Kritzinger et al., 2018]. Pour réaliser un jumeau numérique dynamique et en temps réel, les flux de données entre les jumeaux numérique et physique doivent être automatiques.

2.3 Synthèse de l'état de l'art

Cet état de l'art permet de mettre en évidence le fait que le jumeau numérique apporte une intelligence collective à l'activité industrielle au niveau organisationnel. L'approche cognitive permet de gérer des problèmes de haut niveau mais manque de flexibilité. Des données inattendues ou une règle manquante font échouer les implémentations [Searle, 1980]. L'approche connexionniste permet de réaliser un grand nombre de tâches cognitives telles que la reconnaissance d'images, de textes ou de tendances statistiques, mais elle est très spécialisée. Une tâche qui s'écarte un peu de ce pour quoi le programme a été conçu et dimensionné le mettra en échec [Minsky et Papert, 1988]. Ces deux approches sont efficaces, chacune dans les cadres précis pour lesquels elles ont été mises en œuvre. Cependant, il apparaît qu'une matrice les articulant serait bénéfique. Matrice au sens biologique du terme, c'est-à-

dire le tissu dans lequel sont incorporées des structures plus spécialisées. A cet effet, l'approche retenue est celle proposée par Minsky autour de la notion de « société de l'esprit » [Minsky, 1988]. Elle se situe à la croisée du cognitivisme et du connexionnisme et présente deux avantages.

Plus souple, cette approche permet d'appréhender un contexte industriel complexe impliquant l'activité de nombreux acteurs, humains ou machines, pour construire un système multi-agents. Ceci constitue une base pour la conception d'un jumeau numérique qui les reflète. En modélisant ces acteurs, malgré leur diversité et leur complexité, il est possible d'établir des prédictions selon la situation connue et les décisions prises, et de prescrire des recommandations. Ces recommandations s'appuient sur une conscience de la situation inaccessible aux parties jusqu'ici isolées sans l'aide d'un jumeau numérique, pour ainsi tendre vers l'omniscience.

Cependant, cette volonté de représentation fidèle et identique à l'existant implique que l'on considère ce système comme complet. En effet, on peut s'interroger sur l'utilité de créer une entité numérique exactement identique à l'existant [Jones et al., 2020]. Cette limitation peut être remise en cause. Le jumeau numérique ne doit pas se contenter d'agglomérer les caractéristiques et les composants existants de l'organisation, mais doit les compléter en ajoutant de nouveaux composants, par exemple un nouvel agent ou un nouveau flux d'information dans le réseau.

La suite de cet article propose une nouvelle approche en exposant comment un jumeau numérique de l'organisation basé sur un modèle multi-agents devrait permettre de l'améliorer en intégrant les données inter-agents et les flux d'information manquants dans le jumeau physique.

Pour permettre à chaque agent de faire partie du système, l'objectif est de connecter les agents, y compris les agents humains, via des interfaces. Ces IHM (Interfaces Homme-Machine) sont apparues ces dernières années comme une des dimensions essentielles dans la définition d'un jumeau numérique [van der Valk et al., 2022] en vue de faciliter sa manipulation par les acteurs humains. Ainsi, une attention particulière est portée dans cet article sur la modélisation de ces agents et sur l'identification des problèmes liés aux interfaces.

3 PROPOSITION DE MODELE

L'état de l'art a permis de mettre en évidence que, dans le domaine des sciences cognitives, le cognitivisme et le connexionnisme ont conduit à des solutions industrielles efficaces telles que la gestion des connaissances ou l'apprentissage profond respectivement. Mais ces solutions correspondent à des tâches très spécialisées. Le concept de « *société de l'esprit* », conduisant à des solutions telles que les systèmes multi-agents, ouvre la possibilité de modéliser des systèmes d'une grande complexité. Cette section propose donc une modélisation multi-agents du système sociotechnique et de son jumeau numérique et détaille les modèles d'agent et d'agence associés en s'intéressant particulièrement aux flux d'informations qui sont essentiels à la collaboration.

3.1 Modélisation multi-agents

L'activité industrielle, comme n'importe quel système sociotechnique, implique la coordination de nombreuses ressources, humaines ou technologiques, et des expertises très diverses. Si chaque ressource est considérée comme un agent, alors l'entreprise dans son ensemble peut être considérée comme un système multi-agents. Autrement dit, comme ces agents sont une forme de système et peuvent donc être ainsi

nommés, l'activité qu'ils mènent et l'entreprise qu'ils composent peuvent être considérés comme un système de systèmes [Boy, 2019]. Ainsi, si le jumeau physique (l'activité industrielle considérée) est un système de système, alors il en va de même pour son homologue numérique. Les systèmes qui constituent les parties humaines de ce système de systèmes ont bien sûr des capacités cognitives qui leur permettent de mener à bien leur activité, mais on peut aussi définir des systèmes cognitifs non humains notamment issus de l'intelligence artificielle.

Le jumeau numérique doit générer une cognition multi-agents, qui implique des processus décisionnels holistiques ou holoniques (c'est-à-dire prenant en compte tous les états et informations disponibles du système) [Indriago et al., 2016]. Tous les agents ont un objectif commun. Il est actuellement impossible pour chaque agent d'être conscient de ce que font les autres agents en temps réel. Une structure multi-agents est proposée ici pour représenter cette cognition multi-agents, une supra-cognition. Si l'on combine le modèle de système de systèmes [Boy, 2019] avec le concept de niveaux d'intégration de données évoqué précédemment [Kritzinger et al., 2018], on obtient un système numérique de systèmes représentant le système physique de systèmes. Ce système multi-agents numérique et ses flux de données reliant les agents numériques aux agents physiques dépendent du niveau de maturité et/ou du niveau d'automatisation acceptable dans l'activité industrielle représentée. Des liens inexistantes ou invisibles dans le jumeau physique peuvent être établis ou mis en évidence dans le jumeau numérique pour être exploités (Figure 1).

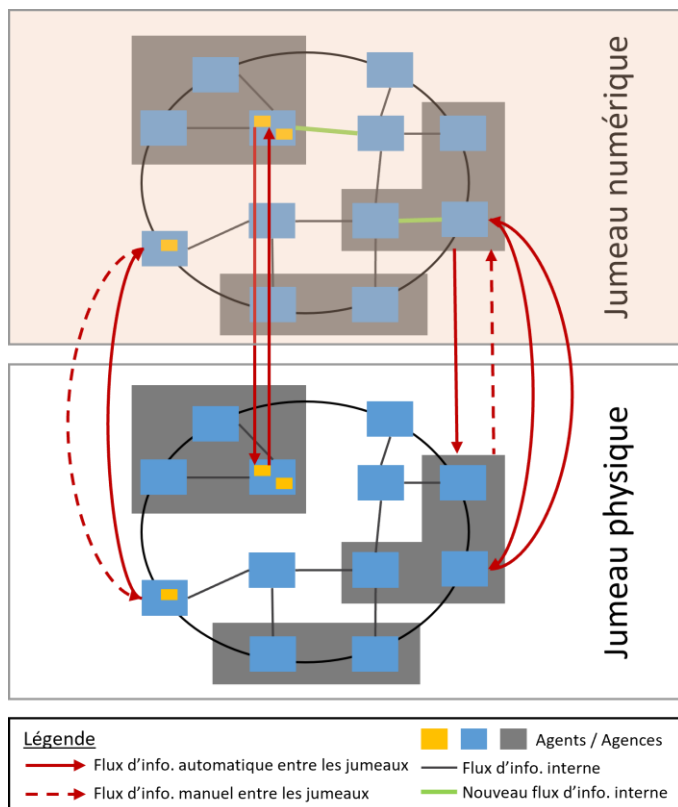


Figure 1. Représentation des systèmes de systèmes jumelés et des flux d'information associés inspirée de [Kritzinger et al., 2018] et [Boy, 2019].

3.2 Modèles d'agent et d'agence

Pour modéliser les agents (et, par extension, les agences), l'approche proposée est basée sur le concept d'apprentissage par renforcement. Ce domaine de l'intelligence artificielle résulte d'études sur l'intelligence collective et sur les principes

de stigmergie (coordination indirecte entre les agents), par exemple, pour l'apprentissage et la répartition des tâches dans le cerveau humain [Xu et al., 2019]. L'apprentissage par renforcement propose un modèle d'agent qui répond aux objectifs d'apprentissage et de collaboration de l'organisation énoncés précédemment tout en maintenant l'autonomie des experts en son sein.

En effet, comme représenté sur la Figure 2, un agent nécessite trois types de canaux de communication avec son environnement : les actions, les récompenses et les observations. Les actions permettent à l'agent d'agir en fonction d'une évaluation de l'environnement permise par l'observation. L'agent doit être récompensé par une récompense positive ou négative en fonction des objectifs du système multi-agents afin d'apprendre par l'expérience.

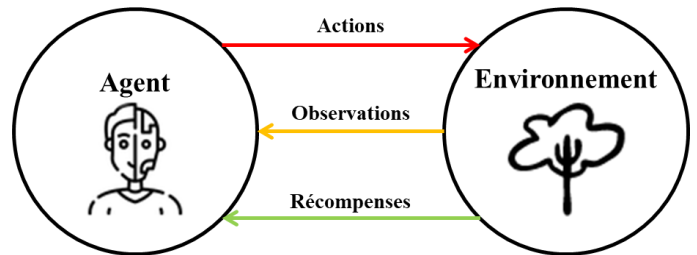


Figure 2. Modèle d'agent et ses flux d'informations avec son environnement.

Un aspect important de la flexibilité d'un système multi-agents est sa dimension multi-niveau. Dans notre modèle inspiré des sciences cognitives, les agents qui assurent ensemble une fonction peuvent être appelés une agence [Miller et Brewer, 2013]. Cette agence est elle-même un agent.

La Figure 3 montre que deux agents peuvent se compléter en se transférant l'un l'autre les flux d'informations nécessaires. Par exemple, un agent humain peut être complété par son homologue numérique (c'est-à-dire son jumeau numérique). Ainsi, chacun possède au moins un flux de chaque type (action, observation et récompense) pour respecter les caractéristiques de la définition d'un agent. Les trois flux sont nécessaires à la bonne performance d'un agent, c'est-à-dire à sa capacité d'apprendre et d'améliorer la qualité de ses décisions.

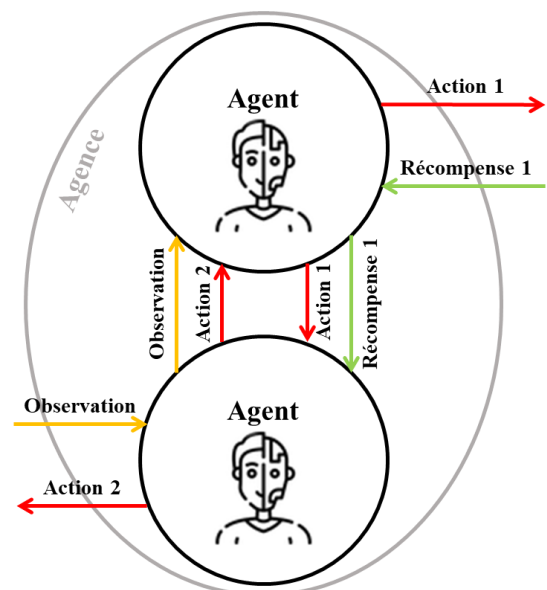


Figure 3. Modèle d'agence et ses flux d'informations internes et externes.

reçoit qu'un et l'agent *HM* en contact avec le *SE* n'en reçoit aucun.

Ces résultats fournissent des informations cruciales sur les aspects à prendre en compte et les éléments nécessaires à la conception d'un environnement collaboratif facilitant les interactions des agents et permettant l'intégration de ces derniers.

Les lacunes en matière d'information et les sources possibles pour les combler sont facilement mises en évidence par l'observation de l'activité à différents niveaux de granularité. En d'autres termes, il semble nécessaire d'observer l'activité non seulement au niveau de l'agent individuel mais aussi au niveau collectif, c'est-à-dire au niveau du système de systèmes [Boy, 2019]. Ainsi, si la problématique de l'humain augmenté a été abordée au cours des dernières décennies [Savulescu et Bostrom, 2009], nous devons maintenant faire face à l'extension de cette problématique à un niveau collectif, c'est-à-dire l'organisation augmentée, ou système sociotechnique augmenté. En effet, de même qu'une technologie intégrée à l'être humain peut lui permettre de faire face à des situations qui jusqu'à présent auraient dépassé ses limites physiques ou cognitives, il s'agit de développer un jumeau numérique intégré à l'organisation, pour l'augmenter en la complétant pour des tâches qui étaient auparavant inaccessibles.

5 PERSPECTIVES

L'implémentation d'un jumeau numérique tel que décrit dans les sections précédentes et son déploiement dans une entreprise nécessite de considérer l'acceptabilité, l'adhésion des utilisateurs et la confiance dans l'outil proposé et donc d'explorer les champs de la psychologie sociale [Vasiljevic et Oberlé, 2016].

Les travaux de recherche présentés dans cet article se concentrent sur un cadre collaboratif. L'intégration réussie d'individus, notamment d'un groupe tiers, dans une activité collaborative est conditionnée par l'accès à des informations les concernant. Cela permet de les considérer comme des individus, en faisant abstraction des préjugés liés à leur groupe ou des transpositions de distinctions hiérarchiques non adaptées au contexte pour favoriser la collaboration [Miller et Brewer, 2013]. Cependant, ces informations doivent être gérées avec prudence lors de tâches réalisées en groupe car la présence de tiers joue un rôle sur la motivation de chacun [Vasiljevic et Oberlé, 2016].

La démotivation, ou paresse sociale, est induite chez les participants lorsqu'ils ne peuvent pas identifier leur contribution individuelle [Harkins, 1987] et pensent qu'elle n'est pas évaluable [Harkins et Jackson, 1985].

Les facteurs possibles sont la perception qu'ont les membres de la contribution de chacun au travail du groupe, par exemple :

- Elle peut sembler inutile [Weber et al., 2001].
- La suspicion que les autres en profitent pour fournir moins d'efforts [Kerr, 1983].
- La « *norme de freinage* » du groupe pour éviter un management abusif [Roethlisberger et Dickson, 2003].

Tous ces constats sont à considérer pour déterminer quelles données doivent être visibles ou non entre les différents acteurs pour éviter les effets contre-productifs. Cette paresse sociale peut être vaincue par un système qui permet d'évaluer les contributions individuelles à l'effort collectif.

Cependant, il apparaît que l'identification individuelle des acteurs industriels par d'autres, en ce qui concerne leurs retours, peut poser un problème d'organisation. En raison du

risque que l'information donnée par l'individu soit utilisée pour d'autres raisons par des tiers, comme l'évaluation de son travail, il peut s'autocensurer. L'anonymat pourrait donc contribuer à une information plus réaliste [Weber et al., 2001]. En général, les facteurs responsables de la paresse sociale sont générés lors du travail en groupe. Ainsi, même si le dispositif mentionné ci-dessus est suffisant pour éliminer la paresse sociale, des solutions ont également été étudiées concernant la motivation dans le travail de groupe. Les efforts doivent être rentables, c'est-à-dire conduire à une évaluation positive, qu'il s'agisse d'une auto-évaluation ou d'une évaluation par les autres.

- Le désir de ne pas être identifié comme le moins productif du groupe motive à se dépasser (effet Köhler), à condition que la comparaison entre sa propre performance et celle des autres ne semble pas montrer une trop grande différence [Köhler, 1927].
- La tâche doit représenter un défi intéressant qui valorise l'image de soi. Dans ce cas, la « *norme de freinage* » peut être remplacée par un processus de compensation sociale dans lequel ceux qui se sentent meilleurs fournissent plus d'efforts pour compenser les lacunes des moins performants et assurer de bons résultats au groupe [Huguet et al., 1999].
- La compétition intergroupe peut motiver un groupe à gagner lorsque le jeu consiste à battre d'autres groupes par rapport à des groupes travaillant seuls. L'appartenance à un groupe valorisé fait partie de l'identité sociale positive d'un individu [Tajfel et Turner, 2004]. Cette motivation générée par l'appartenance à un groupe a été démontrée dans des expériences impliquant des groupes en compétition. Les groupes portant des T-shirts de la même couleur étaient les plus performants [Worchel et al., 1998].

La conception du jumeau numérique comme un système multi-agents et multi-niveaux (agences) permet de moduler ces paramètres via les interfaces en fonction du contexte. En effet, la visibilité des contributions des agents semble assurer une participation correcte aux activités de l'agence à laquelle ils appartiennent. Cependant, les connexions de cette agence avec les autres agences ou avec le niveau supérieur auquel elle appartient ne seront pas nécessairement de même nature. Elles peuvent être d'un niveau de granularité supérieur, par exemple (agglomérées et donc anonymisés). Cette souplesse permet de se prémunir contre des effets pervers tels que l'autocensure et la surveillance, qui s'engendreraient mutuellement et nuiraient tant au bien-être qu'à la performance et à l'amélioration collectives.

6 CONCLUSION

Cet article a introduit la modélisation d'un jumeau numérique s'appuyant sur un système multi-agents pour augmenter une organisation industrielle et supporter une activité industrielle complexe. Conjointement, un modèle d'agent (et donc d'agence) basé sur l'apprentissage par renforcement a été proposé. Il a été validé avec des cas passés dans le domaine de la maintenance des moteurs d'hélicoptère afin d'identifier les points critiques de ce système sociotechnique à améliorer dans un environnement numérique collaboratif. Cet environnement collaboratif pourrait améliorer les flux d'information et la qualité des décisions en favorisant la collaboration. De plus, la flexibilité d'un tel jumeau numérique permet de considérer les contraintes relatives à la psychologie de groupe pour en favoriser l'acceptabilité et en améliorer la performance.

La suite des travaux va maintenant s'orienter vers la conception des interfaces de manière itérative avec des tests utilisateurs. Pour cela, au-delà des principes classiques de l'ergonomie des interfaces [Scapin et Bastien, 1997], les premiers résultats décrits dans cet article permettent d'identifier les éléments à tester en s'appuyant sur une approche itérative « intégration humain-système » [Camara Dit Pinto et al., 2021b].

Ainsi, il sera nécessaire de concevoir simultanément les agents logiciels et les interfaces entre ces agents logiciels et les agents humains. Ces interfaces devront disposer de sections dédiées aux actions, avec des principes de prise de décision partagée [Elwyn et al., 2012], aux observations, en tenant compte des informations qui favorisent la motivation selon la psychologie de groupe [Vasiljevic et Oberlé, 2016], et aux récompenses, alimentées par un système d'évaluation, qu'il soit automatique, par les pairs ou par soi-même [Akash et al., 2019]. A la fin de chaque épisode de tâche collective, des questions simples et binaires comme « *la sollicitation de vos/leurs compétences était-elle pertinente dans ce cas ?* » généreront des récompenses pour alimenter le processus d'apprentissage en mettant par exemple en relation les bons experts dans de futurs cas similaires. Ces mécaniques pourront s'inspirer de travaux existants combinant systèmes multi-agents et raisonnement à base de cas pour la capitalisation et l'exploitation des retours d'expérience [Oliveira et al., 2013].

L'intégration de ces éléments dans les interfaces pour rendre tangible un jumeau numérique amélioré de l'organisation sont en cours d'étude. Les conséquences sur la résolution collaborative des problèmes seront étudiées et des tests itératifs avec des prototypes avec différentes caractéristiques seront effectués. La question de savoir quelles caractéristiques doivent être communes à tous les agents, et lesquelles doivent être variables en fonction des situations, des rôles ou des types d'agents sera explorée. La question de l'ajout de flux d'informations mais aussi d'agents supplémentaires dans le jumeau numérique qui n'existent pas dans le jumeau physique pour remplir les fonctions manquantes sera également explorée.

L'objectif final est d'élaborer une approche globale, dans une vision systémique du problème de la prise de décision collaborative et de l'intégration des connaissances, qui aboutira à une solution élégante au sens mathématique [Poincaré, 1910], c'est-à-dire efficace et précise dans une grande variété de situations tout en étant concise et facilement compréhensible.

REMERCIEMENTS

Cet article a été réalisé grâce au soutien de Safran Helicopter Engines et de l'ANRT (Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie).

RÉFÉRENCES

Akash, K., Polson, K., Reid, T., & Jain, N. (2019). Improving human-machine collaboration through transparency-based feedback—part I: Human trust and workload model. *IFAC-PapersOnLine*, 51(34), 315-321.

Aries, S., Le Blanc, B., & Ermine, J. L. (2008). MASK : une méthode d'ingénierie des connaissances pour l'analyse et la structuration des connaissances.

Boussaada, Z., Remaci, A., Curea, O., Driss, O. B., Camblong, H., & Bellaaj, N. M. (2017). Management Approach for Microgrid Operation Using Multi Agent System (MAS) Technique. In *SMART INTERFACES 2017, The Symposium for Empowering and Smart Interfaces in Engineering*.

Boy, G. (2003). Ingénierie cognitive : IHM et cognition. Hermès science publications.

Boy, G. A. (2019). FlexTech: From Rigid to Flexible Human-Systems Integration. *Systems Engineering in the Fourth Industrial Revolution*, 465-481.

Camara Dit Pinto, S., Villeneuve, E., Masson, D., Boy, G., Baron, T., & Urfels, L. (2021a). Digital twin design requirements in downgraded situations management. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), 869-873.

Camara Dit Pinto, S., Masson, D., Villeneuve, E., Boy, G., & Urfels, L. (2021b). From requirements to prototyping: Application of human-system integration methodology to digital twin design. *Proceedings of the Design Society*, 1, 1617-1626.

Carvalho, T. P., Soares, F. A., Vita, R., Francisco, R. D. P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024.

Elwyn, G., Frosch, D., Thomson, R., Joseph-Williams, N., Lloyd, A., Kinnersley, P., ... & Barry, M. (2012). Shared decision making: a model for clinical practice. *Journal of general internal medicine*, 27(10), 1361-1367.

Edmondson, A., & Moingeon, B. (1998). From organizational learning to the learning organization. *Management learning*, 29(1), 5-20.

Emery, F. E., & Trist, E. L. (1965). The causal texture of organizational environments. *Human relations*, 18(1), 21-32.

Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human factors*, 37, 85-104.

Endsley, M. R., & Garland, D. J. (Eds.). (2000). Situation awareness analysis and measurement. CRC Press.

Ferber, J., & Weiss, G. (1999). *Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence* (Vol. 1). Reading: Addison-wesley.

Franchi, E., & Poggi, A. (2012). Multi-agent systems and social networks. In *Handbook of Research on Business Social Networking: Organizational, Managerial, and Technological Dimensions* (pp. 84-97). IGI Global.

Gélizé, M. (2020). *Pour la performance de projet : Un apprentissage de la pensée complexe au service de l'accompagnement. Cas d'un pôle d'établissements de santé*, (Doctoral dissertation, Pau).

Geum, Y., & Park, Y. (2011). Designing the sustainable product-service integration: a product-service blueprint approach. *Journal of cleaner production*, 19(14), 1601-1614.

Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012, April). The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics, and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA* (p. 1818).

Gorod, A., Sauser, B., & Boardman, J. (2008). System-of-systems engineering management: A review of modern history and a path forward. *IEEE Systems Journal*, 2(4), 484-499.

Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85-113). Springer, Cham.

Harkins, S. G., & Jackson, J. M. (1985). The role of evaluation in eliminating social loafing. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 11(4), 457-465.

Harkins, S. G. (1987). Social loafing and social facilitation. *Journal of experimental social psychology*, 23(1), 1-18.

Hebb, D. O. (2005). The organization of behavior: A neuropsychological theory. Psychology Press.

Huguet, P., Galvaing, M. P., Monteil, J. M., & Dumas, F. (1999). Social presence effects in the Stroop task: further evidence for an attentional view of social facilitation. *Journal of personality and social psychology*, 77(5), 1011.

Indriago, C., Cardin, O., Rakoto, N., Castagna, P., & Chacòn, E. (2016). H2CM: A holonic architecture for flexible hybrid control systems. *Computers in industry*, 77, 15-28.

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature

- review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36-52.
- Kerr, N. L. (1983). Motivation losses in small groups: A social dilemma analysis. *Journal of personality and social psychology*, 45(4), 819.
- Köhler, O. (1927). On group efficiency of physical labor and the conditions of optimal collective performance. *Industrielle Psychotechnik*, 4, 209-226.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihm, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022.
- Laguna Salvado, L., Villeneuve, E., Masson, D., Abi Akle, A., & Bur, N. (2022). Decision Support System for technology selection based on multi-criteria ranking: Application to NZEB refurbishment. *Building and Environment*, 212, 108786.
- Lee, J. H., & Kim, C. O. (2008). Multi-agent systems applications in manufacturing systems and supply chain management: a review paper. *International Journal of Production Research*, 46(1), 233-265.
- Lum, R., Kotak, D. B., & Gruver, W. A. (2005). Multi-agent coordination of distributed energy systems. In *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 3, pp. 2584-2589.
- Matta, N., Ermine, J. L., Aubertin, G., & Trivin, J. Y. (2002). Knowledge Capitalization with a knowledge engineering approach: the MASK method. In *Knowledge management and organizational memories* (pp. 17-28). Springer, Boston, MA.
- Maynard, A. D. (2015). Navigating the fourth industrial revolution. *Nature nanotechnology*, 10(12), 1005-1006.
- Merlo, C., & Girard, P. (2004). Information system modelling for engineering design co-ordination. *Computers in industry*, 55(3), 317-334.
- Miller, N. S., & Brewer, M. B. (Eds.). (2013). *Groups in contact: The psychology of desegregation*. Academic Press.
- Minsky, M. (1988). *Society of mind*. Simon and Schuster.
- Minsky, M. L., & Papert, S. A. (1988). *Perceptrons: expanded edition*.
- Oliveira, P., Pinto, T., Praça, I., Vale, Z., & Morais, H. (2013). Intelligent micro grid management using a multi-agent approach. In *2013 IEEE Grenoble Conference* (pp. 1-6).
- Poincaré, H. (1910). Mathematical creation. *The Monist*, 321-335.
- Pylyshyn, Z. W. (1980). Computation and cognition: Issues in the foundations of cognitive science. *Behavioral and Brain sciences*, 3(1), 111-132.
- Roethlisberger, F. J., & Dickson, W. J. (2003). *Management and the Worker* (Vol. 5). Psychology press.
- Rzevski, G., Skobelev, P., & Zhilyaev, A. (2022). Emergent Intelligence in Smart Ecosystems: Conflicts Resolution by Reaching Consensus in Resource Management. *Mathematics*, 10(11), 1923.
- Savulescu, J., & Bostrom, N. (Eds.). (2009). *Human enhancement*. OUP Oxford.
- Scapin, D. L., & Bastien, J. C. (1997). Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems. *Behaviour & information technology*, 16(4-5), 220-231.
- Searle, J. R. (1980). Minds, brains, and programs. *Behavioral and brain sciences*, 3(3), 417-424.
- Tajfel, H., & Turner, J. C. (2004). The social identity theory of intergroup behavior. In *Political psychology* (pp. 276-293). Psychology Press.
- Tranier, J. (2007). *Vers une vision intégrale des systèmes multi-agents: Contribution à l'intégration des concepts d'agent, d'environnement, d'organisation et d'institution* (Doctoral dissertation, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc).
- van der Valk, H., Haße, H., Möller, F., & Otto, B. (2022). Archetypes of digital twins. *Business & Information Systems Engineering*, 64(3), 375-391.
- Vannereau, J., & Lemaître, D. (2020). La problématisation dans l'apprentissage du management en filière d'ingénieur. *Revue internationale de pédagogie de l'enseignement supérieur*, 36(36 (1)).
- Vasiljevic, D., & Oberlé, D. (2016). *Conduites et émotions dans les groupes*. Presses universitaires de Grenoble.
- Vignaux, G. (1991). *Les sciences cognitives : une introduction*. FeniXX.
- Weber, R., Aha, D. W., & Bécerra-Fernandez, I. (2001). Intelligent lessons learned systems. *Expert systems with applications*, 20(1), 17-34.
- Worchel, S., Rothgerber, H., Day, E. A., Hart, D., & Butemeyer, J. (1998). Social identity and individual productivity within groups. *British Journal of Social Psychology*, 37(4), 389-413.
- Xu, X., Zhao, Z., Li, R., & Zhang, H. (2019). Brain-inspired stigmergy learning. *IEEE Access*, 7, 54410-54424.