

Modèles numériques de simulation de comportements pour un futur transport résilient

Digital models of behavioural simulation for a future resilient transport

VANDERHAEGEN Frédéric
Université Polytechnique Hauts-de-France,
LAMIH UMR CNRS 8201, INSA Hauts-de-
France
Valenciennes
frederic.vanderhaegen@uphf.fr

RICHARD Philippe
IRT Railenium
180 rue Louis-Joseph Lagrange
Famars, France
philippe.richard@railenium.eu

KHELLADI Nassiba
IRT Railenium
180 rue Louis-Joseph Lagrange
Famars, France
nassiba.khelladi@railenium.eu

1 **Résumé** — L'article propose une démarche méthodologique pour déterminer des modèles de comportements humains, techniques ou
2 organisationnels et les simuler afin d'en vérifier la cohérence et de prévenir des risques potentiels en vue d'améliorer la résilience des futurs
3 systèmes sociotechniques en se focalisant sur trois paramètres: les compétences, les disponibilités des ressources ou les possibilités d'action
4 ou d'interaction. Des modèles holistiques et spécifiques sont implémentés avec les réseaux de Petri pour simuler l'implication de facteurs
5 humains, techniques ou organisationnels dans le déroulé de ces comportements, et avec les arbres de défaillances pour déterminer des
6 comportements indésirables. Un modèle holistique correspond à un comportement générique pouvant être associé à différentes entités
7 humaines, techniques ou organisationnelles, un modèle spécifique est propre à une entité donnée et les comportements d'une même entité
8 peuvent impliquer plusieurs modèles. L'analyse de ces modèles permet d'obtenir différents scénarios modélisés à partir d'arbres de causes.
9 La démarche est appliquée au domaine des transports et des modèles numériques prenant en compte différentes entités telles que des
10 automobilistes, des conducteurs de tramway, des piétons ou des systèmes d'aide à la conduite ont pu être identifiés. Certains scénarios issus
11 des arbres de causes obtenus ont été implémentés, simulés et validés avec la plateforme MissRail®.

12 **Mots-clefs** — *human and organizational factors, behavioral model, digital simulation, transport, resilience*

13 **Abstract** — The article proposes a methodological approach to determine models of human, technical or organizational behaviors and
14 simulate them in order to verify their consistency and prevent potential risks with a view to improving the resilience of future socio-technical
15 systems by focusing on three parameters: skills, availability of resources or possibilities for action or interaction. Holistic and specific models
16 are implemented with Petri nets to simulate the involvement of human, technical or organizational factors in the achievement of these
17 behaviors, and with fault trees to determine undesirable behaviors. A holistic model corresponds to a generic behavior that can be associated
18 with different human, technical or organizational entities, a specific model is dedicated to a given entity and the behaviors of the same entity
19 can involve several models. The analysis of these models makes it possible to obtain different scenarios modeled from cause trees. The
20 approach is applied to the field of transport and digital models taking into account different entities such as motorists, tram drivers, pedestrians
21 or driver assistance systems could be identified. Some scenarios resulting from the cause trees obtained by the proposed method were
22 implemented, simulated and validated with the MissRail® platform.

23 **Keywords** — *facteurs humains et organisationnels, modèle comportemental, simulation numérique, transport, résilience*

24 I. INTRODUCTION

25 L'usine du futur est associée aux concepts des quatrième et cinquième révolutions industrielles sous les intitulés « Industrie
26 4.0 » et « Industrie 5.0 » respectivement. L'appellation « usine » sous-entend parfois une connotation péjorative liée à un impact
27 négatif dans l'esprit du grand public. L'effet de cadrage ou le « framing effect » est alors un facteur d'acceptabilité dépendant de
28 la manière d'interagir et de présenter l'information. Par exemple, le terme « technocentre du futur » pourra être préféré au terme
29 « usine du futur » dans le cadre de la validation d'un projet de construction par des autorités compétentes (Vanderhaegen, 2018).
30 Dans la littérature, l'industrie ou l'usine du futur reste souvent employé pour proposer une industrie moderne plus propre et
31 meilleure qu'avant. Les concepts de l'Industrie 4.0 associe ainsi l'industrie de demain à l'ère du numérique et de l'interconnexion,
32 et l'industrie moderne devra être durablement respectueuse de l'environnement, et intégrer des technologies innovantes,
33 autonomes et intelligentes (Wang, Wang, 2016; Gonzalez et al., 2018; Alcácer, Cruz-Machado, 2019 ; Abulibdeh et al., 2024).
34 Même si les principes de l'Industrie 4.0 supposent une dépendance croissante à l'automatisation, les facteurs humains et les
35 interactions humains-machines basés sur des technologies innovantes et l'intelligence artificielle restent un enjeu important, et

36 s'intègrent au travers d'appellations telles que « Opérateur 4.0 », « Humain dans la boucle » ou « Human in the loop » (Romero
37 et al., 2016 ; Peruzzini et al., 2017 ; Ruppert et al., 2018, Merat et al., 2019 ; Li et al., 2021 ; Barcellini et al., 2023). Les
38 interactions entre l'humain et la machine peuvent se faire artificiellement via des avatars, des jumeaux numériques ou des
39 hologrammes pour évaluer l'efficacité d'un poste de travail donné, pour accompagner et assister les opérateurs humains sur le
40 terrain, pour surveiller leurs activités ou pour les former. Les approches de l'industrie 5.0 et de l'Opérateur 5.0 accentuent
41 l'importance du facteur humain et organisationnel en insistant sur le bien-être humain, la symbiose entre humains et systèmes
42 techniques et la résilience des systèmes sociotechniques (Romero, Stahre, 2021 ; Leng et al., 2022, Lu et al., 2022).

43 Le développement de démarches de prise en compte des interactions symbiotiques et environnementales impliquant des
44 facteurs humains, organisationnels ou techniques est un des défis pour la conception de futurs systèmes sociotechniques sûrs,
45 rentables, durables mais aussi respectueux du bien-être humain, de la biodiversité et de l'environnement. Cet article propose un
46 exemple d'une telle approche basée sur l'étude de la combinaison de modèles holistiques de comportement d'entités physiques
47 humaines ou techniques. Les modèles numériques ainsi obtenus, dont certains sont simulés avec la plateforme MissRail[®], dans
48 des scénarios mettant en jeu la sécurité peuvent être identifiés et permettre de mieux appréhender la résilience des futurs systèmes,
49 définie comme la capacité de ces derniers à contrôler avec succès des situations pouvant perturber leur stabilité et affecter des
50 critères comme la sécurité, la productivité, la rentabilité, l'environnement ou la qualité (Vanderhaegen, 2017). La section II est
51 une synthèse des approches de partage d'autonomie entre humains et systèmes techniques pour la résilience des systèmes. La
52 section III propose l'approche basée sur la combinaison de modèles holistiques et est illustrée dans la section IV dans le domaine
53 du transport. La dernière section conclut les travaux menés et présente quelques perspectives.

54 II. PARTAGE D'AUTONOMIE ET TRANSPORT RESILIENT

55 L'étude des facteurs humains et organisationnels des futurs systèmes sociotechniques s'appuie sur des méthodes adaptées
56 d'analyse (Vanderhaegen, 2001, 2010, 2017 ; Hickling, Bowie, 2013 ; Rangra et al., 2017 ; Kandemir, 2020) ou sur l'évaluation
57 de mesures physiques ou physiologiques (Vanderhaegen, Jimenez, 2018 ; de Winter et al., 2019 ; Vanderhaegen et al., 2020,
58 2023a, 2023b) afin de réduire ou de contrôler l'erreur humaine. Comme celle-ci peut être à l'origine d'incidents ou d'accidents
59 graves, une autre approche, plus radicale, consiste à développer des systèmes autonomes afin de l'éliminer. Or des retours
60 d'expérience récents montrent que l'intégration de véhicules autonomes en ville peut générer des problèmes voire des accidents
61 (Prake, 2022 ; Goulard, 2023).

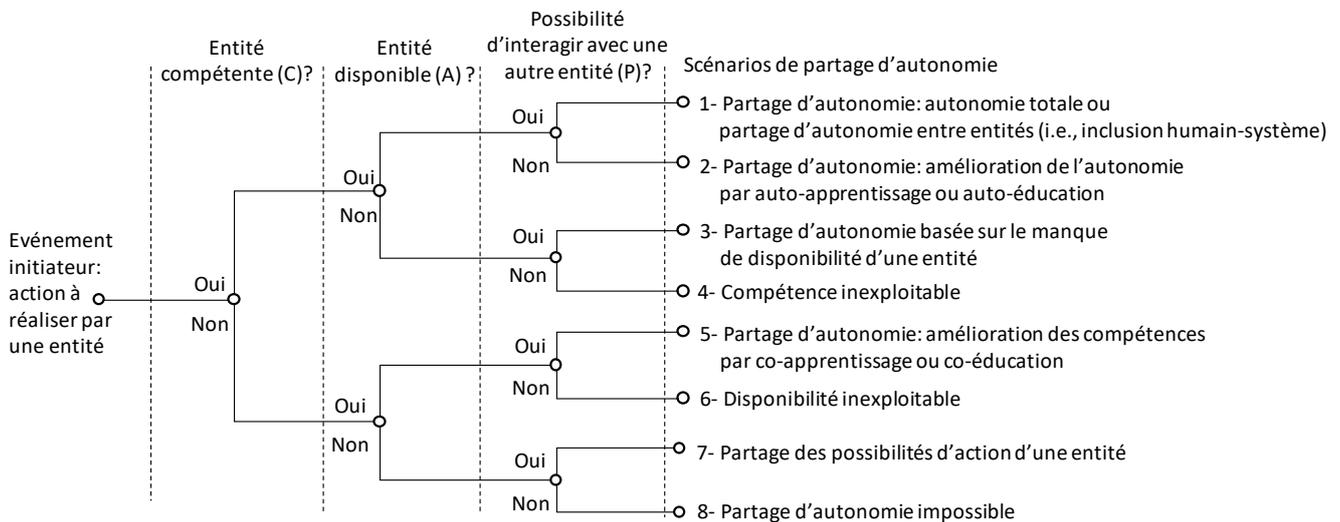
62 Les paradigmes du partage d'autonomie entre humains et systèmes automatisés proposent différents degrés d'autonomie
63 intermédiaires entre le contrôle entièrement manuel jusqu'au pilotage complètement automatique (Sheridan, 1992 ; SAE, 2016 ;
64 Brandenburger, Naumann, 2019 ; Bratic et al., 2019 ; Mallam et al., 2020 ; Vanderhaegen, 2021 ; Gadmer et al., 2022). Les
65 niveaux d'autonomie intermédiaires intègrent dans un premier temps des systèmes d'aide à la conduite ou au pilotage pour
66 assister l'humain et prendre en charge un nombre limité de tâches, et dans un second temps ces systèmes devenant de plus en
67 plus performants et fiables prendront progressivement une majorité de tâches jusqu'à l'automatisation complète. L'humain qui
68 était initialement conducteur ou pilote devient alors superviseur et intervient en cas de défaillance technique. Or plusieurs
69 paradoxes existent. D'une part, moins l'humain intervient sur le système technique, moins il fait d'erreur et sa charge de travail
70 est moins élevée, et ces constats permettent souvent de valider l'intérêt des systèmes d'aide. D'autre part, ces systèmes envoient
71 des alarmes lorsqu'ils sont incapables de résoudre tel ou tel problème en supposant que l'humain sera prêt à réagir, et pour
72 garantir cette intervention, d'autres systèmes sont conçus pour contrôler la vigilance ou l'attention humaine. Des inconsistances
73 et des dangers des systèmes d'aide à la conduite semblent exister (David, 2020) malgré une validation expérimentale ou de terrain
74 de leur impact positif sur le conducteur ! Avant d'arriver à une conduite totalement autonome, des étapes intermédiaires semblent
75 nécessaires tels que l'expérimentation sur site fermé ou maintenir la présence du conducteur dans la boucle de contrôle et de
76 supervision (Legrand, 2018).

77 Deux options peuvent être appliquées pour résoudre ce type de problème. La première est l'application d'approches classiques
78 de la sûreté de fonctionnement humain-système visant à éliminer l'occurrence ou les conséquences de ces incohérences ou
79 dangers. La seconde permet de ne pas les rejeter ni de les éliminer mais de se les approprier afin de mieux les contrôler. Il s'agit
80 d'appliquer les principes de la résilience des systèmes sociotechniques en développant leur capacité de contrôle des états instables
81 générés par ces inconsistances ou dangers imprévus pouvant impacter des critères tels que la sécurité des biens ou des personnes,
82 l'environnement, la production ou la qualité de service (Vanderhaegen, 2017).

83 La résilience est une des voies de recherche relatives à l'Industrie 5.0 ou l'Opérateur 5.0 (Romero, Stahre, 2021 ; Lu et al.,
84 2022, Leng et al., 2022). Différentes approches existent pour la prendre en compte dans le processus de conception ou
85 d'exploitation des systèmes sociotechniques. Certaines permettent de l'évaluer ou de générer des processus d'apprentissage de
86 situations sans précédent (Ouedraogo et al., 2013; Enjalbert, Vanderhaegen, 2017). D'autres contributions proposent le
87 développement de jumeaux ou modèles numériques pour simuler des scénarios de fonctionnement normal et anormal de partage
88 d'autonomie entre humains et systèmes techniques (Ascone, Vanderhaegen, 2022). De récentes recherches s'intéressent à de
89 nouveaux paradigmes tels que la coévolution humain-machine (Lu et al. 2022) ou l'inclusion humain-système (Vanderhaegen,
90 2021a, 2021b, 2021c). Le premier suppose que les interactions humains-systèmes évolueront de la coopération et la collaboration
91 définies comme l'activité entre entités travaillant ensemble pour réaliser les buts de chacun ou un but commun (Vanderhaegen,
92 1993, 1999, 2012) vers la coévolution mettant en œuvre des capacités d'apprentissage mutuel et prenant en compte l'influence
93 ou la dépendance du comportement des uns sur les autres et vice-versa (Li et al., 2023 ; Lu et al., 2022). Le second s'inspire de
94 la conception inclusive permettant de rendre possible toute activité de production par tous et de fabriquer des produits utilisables
95 par tous quel que soit le niveau cognitif, physique, social ou culturel de chacun et respectant des critères économiques,
96 écologiques, sociétaux ou éthiques. Une des clés de l'industrie de demain est donc basée sur des concepts tels que la fabrication
97 inclusive, le transport inclusif, ou la robotique inclusive. Pour faire face à tout changement individuel, organisationnel ou

98 technologique, des capacités d'adaptation sont nécessaires et peuvent se limiter à des compétences en coopération, en
 99 compétition, en apprentissage et en éducation (Vanderhaegen, Jimenez, 2023). Lorsqu'un système d'aide est présenté comme
 100 coopératif avec son utilisateur, cette relation humain-système est généralement acceptable et accepté. Dans le cadre de la
 101 compétition, il s'agit souvent d'un comportement naturel humain face à un système avec lequel les utilisateurs peuvent entrer en
 102 compétition afin d'essayer de mieux faire. Le système d'aide peut alors s'inspirer des résultats issus de cette compétition afin
 103 d'optimiser ses connaissances ou compétences. Cette démarche a déjà été appliquée dans le cadre de l'apprentissage par effet
 104 miroir où un système d'aide à l'écoconduite d'un train récupère tout ou partie du comportement d'un utilisateur afin d'optimiser
 105 les consignes données à l'utilisateur suivant, les utilisateurs étant libres de coopérer ou d'être en compétition avec le système
 106 (Vanderhaegen, 2023c ; Vanderhaegen, Jimenez, 2023). Une autre approche consiste à répartir les bénéfices, les coûts
 107 acceptables ou les dangers potentiels entre les entités dans le cadre d'activités de coopération ou de compétition (Vanderhaegen
 108 et al., 2006). Les capacités d'apprentissage sont évidentes afin de faire évoluer les compétences de chacun. Celles-ci sont donc
 109 dynamiques et variables. Pour un utilisateur donné apprendre sous-entend également comprendre, expliquer, interpréter, former,
 110 etc. L'implémentation d'approches propositionnelles basées sur des comportements humains naturels tels que les raisonnement
 111 déductif, inductif, abductif ou contrefactuel peut permettre à des systèmes techniques de répondre à ces contraintes (Joulet et
 112 al., 2003 ; Vanderhaegen et al., 2004 ; Vanderhaegen, Caulier, 2011, Aguirre et al., 2013 ; Vanderhaegen, 2021a). Les
 113 compétences en termes d'éducation sont donc parfois utiles pour ne pas apprendre sans comprendre ou sans avoir les mécanismes
 114 pour expliquer.

115 L'application du paradigme de l'inclusion humain-système doit ainsi permettre le développement de systèmes
 116 sociotechniques « tout inclus » ou « all-inclusive » (Vanderhaegen, Jimenez, 2023). Elle suppose que chaque entité dispose de
 117 compétences pour percevoir, évaluer, anticiper et intervenir, avoir les ressources disponibles pour mettre en œuvre ces
 118 compétences et avoir à sa disposition des supports permettant d'agir ou d'interagir (Vanderhaegen, 2023a). Ainsi ce modèle
 119 Compétence-Disponibilité-Possibilité d'action ou d'interaction (modèle CAP pour Competence-Availability-Possibility to act or
 120 interact) peut être utilisé pour modéliser les activités de chacun dans le cadre d'un partage d'autonomie entre entités (Fig. 1).



121
 122 Fig. 1. Partage d'autonomie en fonction du modèle CAP, adapté de Vanderhaegen, 2023a)

123 Les possibilités d'action ou d'interaction sont associées aux supports de communication et d'allocation de tâches entre entités
 124 d'une part, et aux supports d'interaction entre le procédé piloté et les entités impliquées dans le contrôle ou la supervision de
 125 celui-ci, d'autre part. Les scénarios 4, 6 et 8 ne permettent pas de mettre en œuvre un partage d'autonomie alors que les autres
 126 correspondent à des modalités différentes de partage en fonction des paramètres CAP. Le scénario 1 est relatif à une autonomie
 127 totale qui peut permettre soit un contrôle manuel, un contrôle automatique ou un partage du contrôle entre entités humaine et
 128 technique. Les capacités de coopération, de compétition, d'apprentissage ou d'éducation peuvent être mises en œuvre pour
 129 implémenter les principes de l'inclusion humain-système et donner la possibilité d'une assistance mutuelle entre entités humaine
 130 et technique (Vanderhaegen, 2021c). Dans les autres scénarios, l'autonomie est partielle et nécessite une connaissance des
 131 paramètres CAP pour un partage optimal des tâches de contrôle ou de supervision.

132 Ce modèle CAP permet de modéliser les comportements d'entités humaines ou techniques mais aussi de détecter les
 133 problèmes de partage d'autonomie (Vanderhaegen, 2021a). La Table 1 présente quelques exemples concernant les aides à la
 134 conduite à savoir : le régulateur de vitesse, le régulateur de vitesse adaptatif, l'afficheur tête-haute et le système de maintien de
 135 voie.

136
 137
 138
 139

TABLE I. EXEMPLES DE RISQUE DE PARTAGE D'AUTONOMIE ENTRE HUMAINS ET SYSTEMES D'AIDE, ADAPTE DE (VANDERHAEGEN, 2021a)

Systèmes d'aide	Risques	Références
Régulateur de vitesse	Disponibilité humaine affectée par l'augmentation des temps de réponse, la baisse de la vigilance, la réduction de l'inter-distance quand le système est utilisé.	(Dufour, 2014 ; Lazarre, 2021)
Régulateur de vitesse, Régulateur de vitesse adaptatif	Possibilité d'interaction risquée en cas de freinage d'urgence du fait de l'utilisation des boutons « + » et « - » du système comme accélérateur et système de freinage plutôt que comme commandes pour augmenter ou diminuer la consigne de vitesse à maintenir.	(Vanderhaegen, 2014, 2016a)
	Conflit de compétences et de possibilités d'action entre le contrôle manuel d'un aquaplaning et les actions du système technique. Une des stratégies humaines est de ne pas freiner en cas d'aquaplaning alors qu'une des actions pour désactiver le système est de freiner.	(Vanderhaegen, 2014, 2016a)
	Conflit de compétences et de possibilités d'action entre les stratégies humaines de gestion d'un aquaplaning avec les actions du système. Deux des stratégies est de ne pas freiner ni accélérer en cas d'aquaplaning alors que le système peut freiner ou accélérer si la vitesse courante est au-dessus ou en-dessous de la consigne de vitesse donnée par le conducteur.	(NSC, 2009 ; Vanderhaegen, 2014, 2016 ; Tan, 2019 ; Lazarre, 2021)
	Conflit de compétences et de possibilités d'action entre les stratégies humaines d'économie de carburant avec les actions du système. Une des stratégies d'économie de carburant est de ne pas freiner ni accélérer en descente et en montée alors que le système peut freiner ou accélérer si la vitesse courante est au-dessus ou en-dessous de la consigne de vitesse donnée par le conducteur.	(Vanderhaegen, 2016a ; Johnson, 2018)
Afficheur tête-haute	Disponibilité humaine affectée par l'attention focalisée sur l'avant du véhicule. Des événements imprévus peuvent ne pas être perçus lorsqu'ils se produisent en dehors du champ de vision qui est focalisé sur les informations données par l'afficheur et à l'avant du véhicule.	(Prinzel, Risser, 2004; JTSB, 2008; Sun et al., 2015)
Système de maintien de voie	Conflit de compétences et de possibilités d'action entre le conducteur et le système lors du dépassement d'un tiers. En cours de procédure de dépassement effectuée par le conducteur, le système peut automatiquement rabattre le véhicule sur le centre de la voie initiale et cela peut provoquer une collision entre le véhicule et l'objet du dépassement.	(Vanderhaegen, 2021a, 2021b)

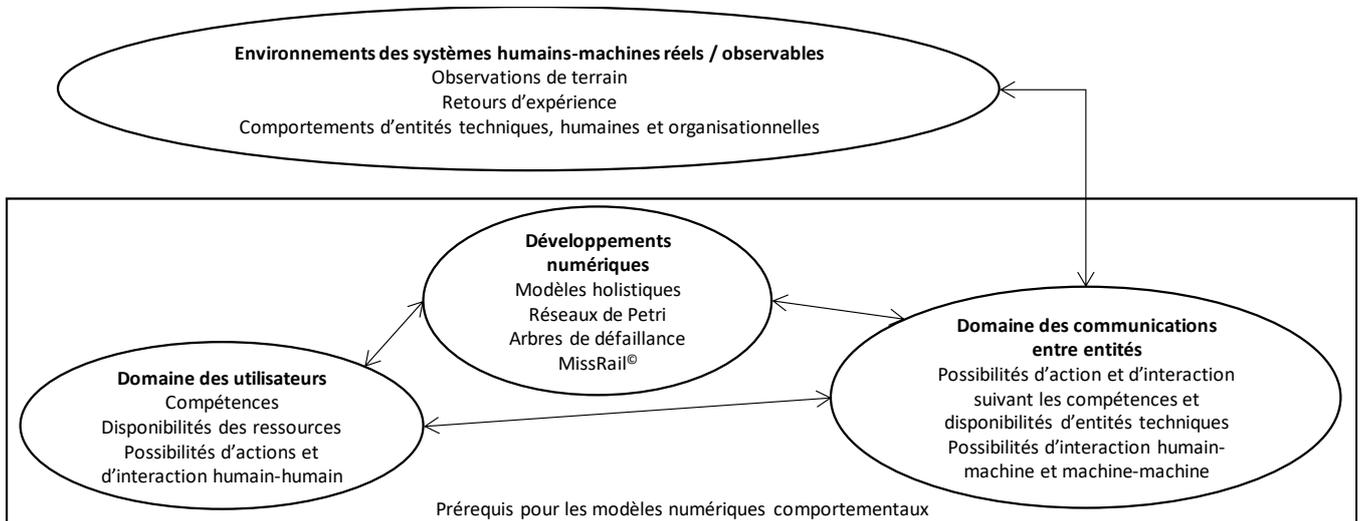
141

142 La section suivante propose une nouvelle approche pour détecter des situations conflictuelles entre entités humaines et
 143 techniques en se basant sur les concepts des jumeaux numériques et le modèle CAP. Cette démarche doit permettre d'identifier
 144 de nouveaux risques potentiels, et ce dans des conditions normales de fonctionnement et d'améliorer ainsi la résilience des futurs
 145 systèmes en s'appuyant sur le paradigme de l'inclusion humain-système.

146

III. METHODOLOGIE

147 Les jumeaux numériques comportent principalement quatre niveaux : niveau réel/observable, niveau numérique, niveau des
 148 communications et niveau des utilisateurs (ISO 23247-2, 2021). Cependant, leur mise en œuvre présente des enjeux
 149 d'interopérabilité au niveau sémantique, technique, organisationnel et juridique sur trois différents types d'interaction :
 150 interaction humain-humain, interaction humain-machine, et interaction machine-machine (Turk, 2020). Sur la base de ces
 151 principes, une démarche de conception de modèle numérique de comportement d'entités humaines et techniques est proposée
 152 (Fig. 2).



153

154 Fig. 2. Démarche d'élaboration de modèles numériques de comportement d'entités humaines, techniques ou organisationnelles

155 Les environnements des systèmes sociotechniques réels et observables permettent à partir de différents capteurs et actionneurs
 156 techniques mais aussi d'opérateurs humains intégrés dans une ou plusieurs organisations d'identifier des scénarios de conflits
 157 potentiels entre entités physiques, humaines ou organisationnelles. Celles-ci sont modélisées en fonction de leurs compétences,
 158 leurs caractéristiques de disponibilités et les possibilités d'action et d'interaction de chacune dans les domaines des
 159 communications et des utilisateurs. Les modèles holistiques de comportements sont élaborés à partir d'arbres de défaillances ou
 160 de réseaux de Petri. Ils sont ensuite étudiés en les implémentant et les simulant dans des plateformes de simulation comme
 161 MissRail® (Vanderhaegen, Richard, 2014). Les modèles holistiques sont des modèles globaux pouvant représenter les

162 comportements d'une même entité ou différentes entités. Différentes entités peuvent être associées à un même modèle ou à
 163 plusieurs modèles holistiques. Ce sont, par exemple, des entités physiques comme un piéton, un cycliste, un motard, un
 164 conducteur de train, d'automobile ou de tramway, des systèmes d'aide ou autonomes pour lesquels les paramètres C, A et P
 165 peuvent être identifiées. Ceux-ci servent également à modéliser des entités organisationnelles telles que la disponibilité ou les
 166 possibilités d'interaction dans une infrastructure donnée ou des compétences dans la gestion des flux de trafic.

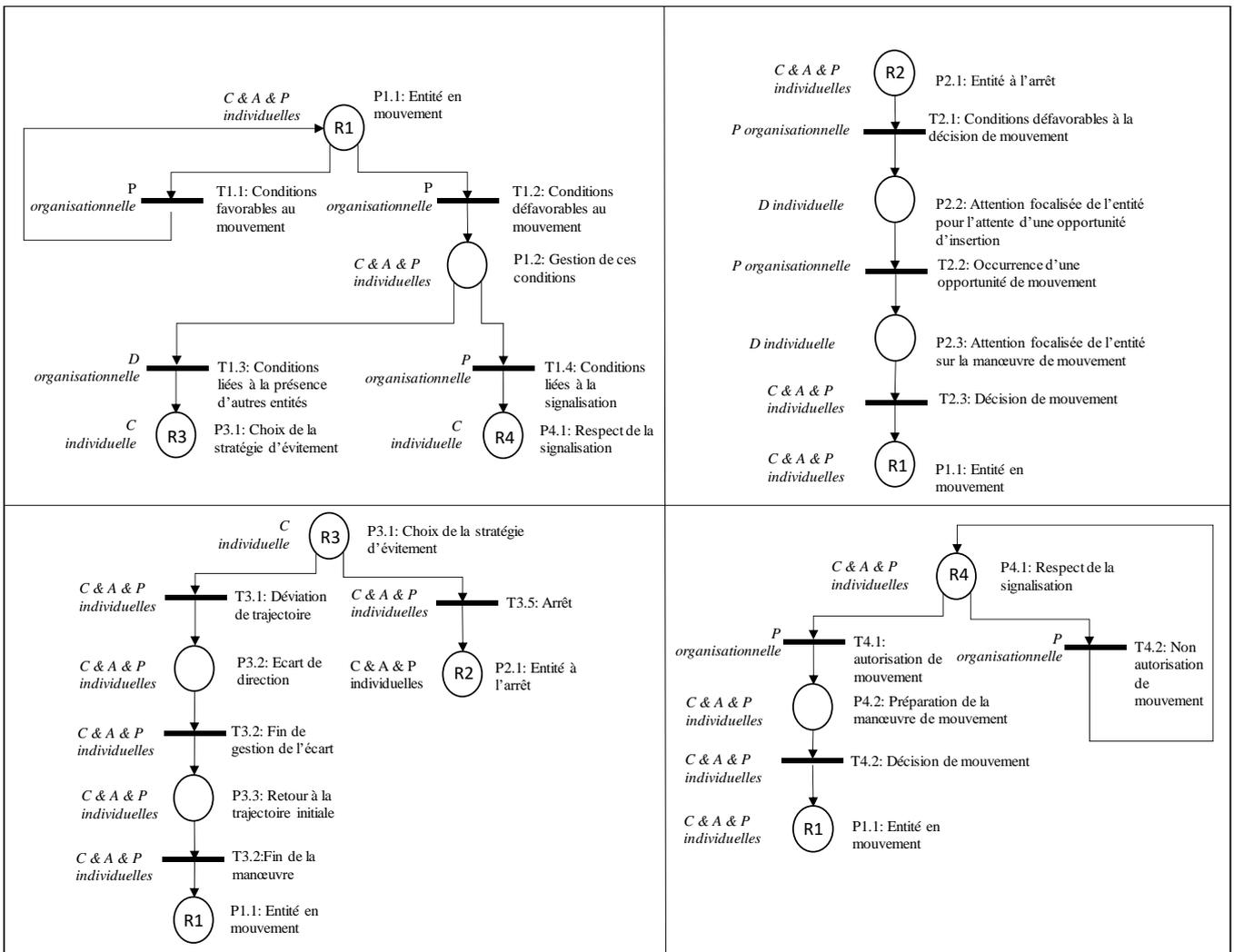
167 L'approche consiste à déterminer les modèles holistiques en fonctionnement normal à partir de réseaux de Petri et en
 168 fonctionnement anormal avec des arbres de défaillances. Des modèles spécifiques propres à des entités peuvent aussi être intégrés
 169 dans l'étude. La démarche d'analyse consiste à générer toutes les combinaisons possibles d'actions et d'interaction d'une même
 170 entité ou entre entités dans des conditions normales de fonctionnement pouvant faire l'objet d'événements indésirables identifiés,
 171 à représenter les scénarios obtenus par des arbres de causes et à les étudier en les simulant avec MissRail®.

172 Soient R l'ensemble des réseaux de Petri, AdD l'ensemble des arbres de défaillances identifiés et AdC les caractéristiques
 173 initiales d'arbres de causes issus de R et de AdD. La genèse de l'ensemble AdC est le résultat de l'application des algorithmes
 174 (1) et (2). L'algorithme (1) permet de comparer les transitions T de tous les réseaux de Petri afin de déterminer les liens éventuels
 175 entre les comportements d'une même entité ou d'entités différentes. Cette étape permet d'établir une première version de
 176 l'ensemble AdC mettant en jeu des couples de transition, le premier chiffre de la transition faisant référence au réseau
 177 correspondant. L'algorithme (2) met alors en relation ces couples de transitions avec les arbres de défaillance en prenant en
 178 compte tous les événements E de chaque arbre. Les liens des algorithmes (1) et (2) sont déterminés à partir des énoncés des
 179 transitions des réseaux de Petri et des événements des arbres de défaillance. L'ensemble AdC contient donc des paires ou des
 180 triplets. Les scénarios pour simuler les comportements et les risques potentiels concernent les triplets.

181
$$\{\forall R_i \in R \forall T_{i,k} \in R_i, \forall R_j \in R, i \neq j, \forall T_{j,l} \in R_j, (T_{i,k} = T_{j,l} \rightarrow (AdC \leftarrow AdC \cup (T_{i,k}, T_{j,l})))\} \quad (1)$$

182
$$\{\forall AdD_i \in AdD, \forall E \in AdD_i, \forall T \in AdC, (E \cap T(1) \neq \{\emptyset\} \rightarrow (T \leftarrow T \cup E))\} \quad (2)$$

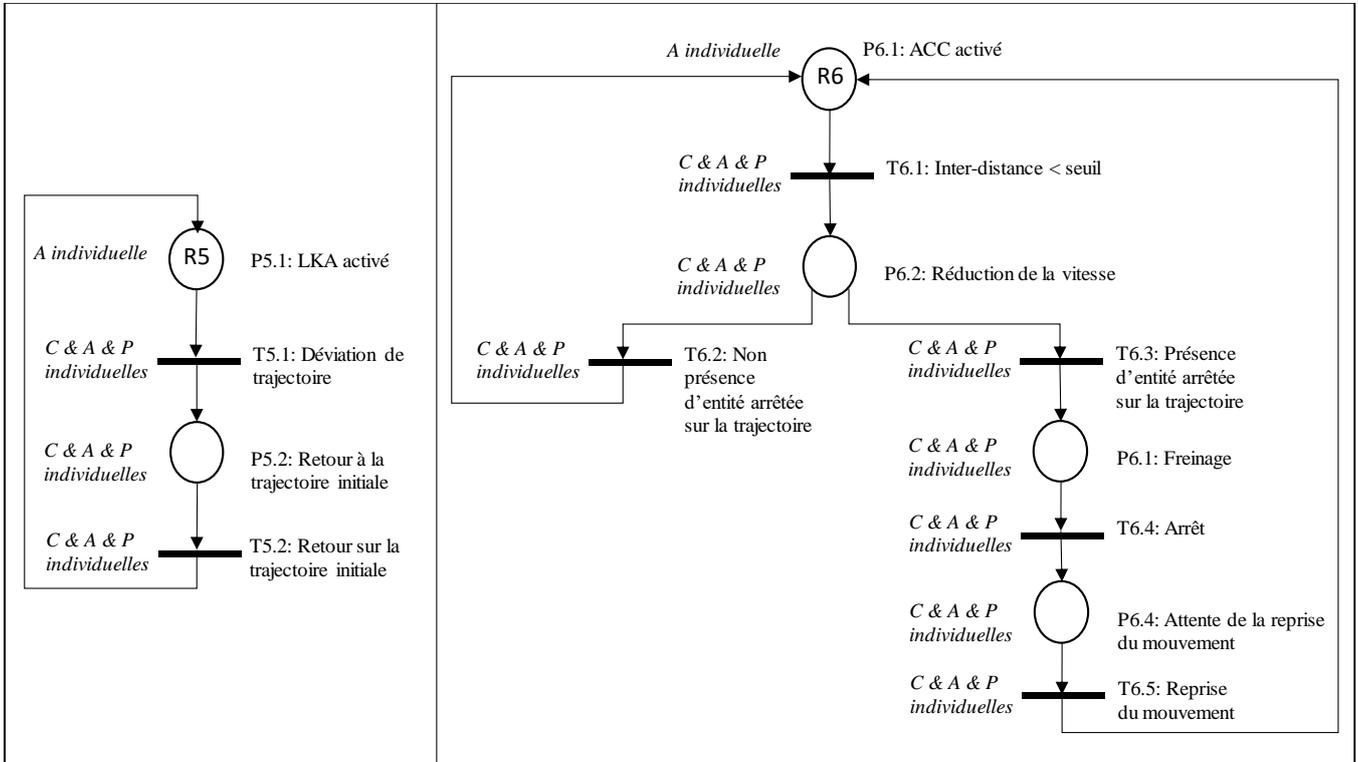
183 À partir des exemples des Fig. 3, 4 et 5, R = {R1, R2, R3, R4, R5, R6} et AdD = {AdD1, AdD2}.



184
 185 Fig. 3. Exemples de modèles holistiques avec les réseaux de Petri pour une entité donnée

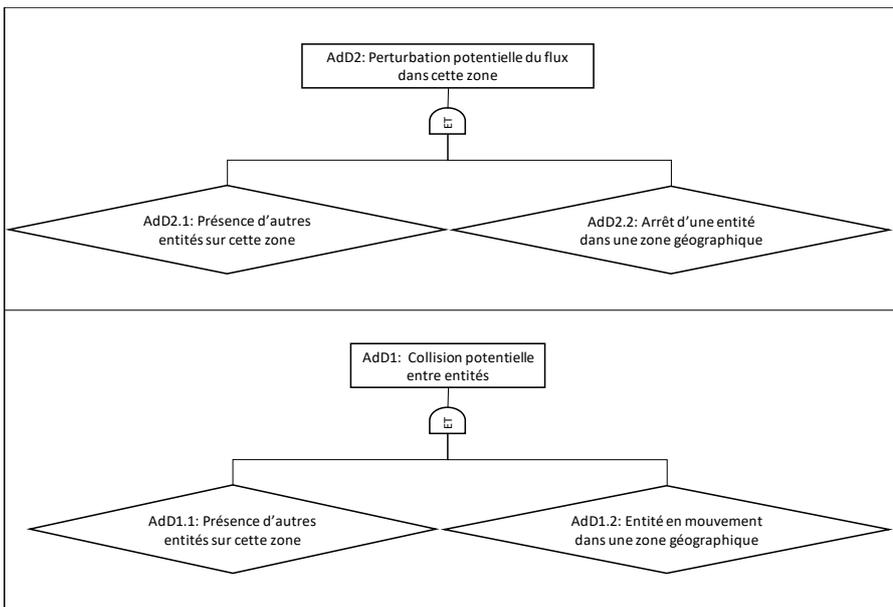
186 Lorsqu'une partie d'un réseau de R est connectée à un autre réseau, ce lien est identifié dans la place par le numéro du réseau
 187 correspondant. Les places et les transitions des réseaux sont associées aux paramètres C, A ou P organisationnels ou individuels
 188 relatifs à une entité donnée. L'intégration de ces paramètres permet de déterminer les facteurs sur lesquels il sera possible d'agir
 189 pour prévenir ou réduire les risques potentiels et améliorer ainsi la résilience de systèmes sociotechniques (Vanderhaegen,
 190 2016b).

191 Les modèles holistiques basés sur le formalisme des réseaux de Petri sont présentés en Fig. 3. Les réseaux R1, R2, R3 et R4
 192 modélisent respectivement une entité en mouvement, une entité à l'arrêt, la gestion d'évitement d'une collision, et le respect de
 193 la signalisation en situation normale.



194
 195 Fig. 4. Exemples de modèles spécifiques pour une entité donnée

196 Des modèles spécifiques associés par exemple aux comportements de systèmes d'aide à la conduite comme le régulateur de
 197 vitesse adaptatif (Adaptive Cruise Control – ACC) ou le système de maintien de voie (Lane Keeping Assist – LKA) sont aussi
 198 identifiés, Fig. 4. Les réseaux de Petri R5 et R6 donnent un exemple de leur comportement face à différents événements sur
 199 l'infrastructure, le trafic ou une entité donnée. Les modèles holistiques relatifs à des événements indésirables sont proposés en
 200 Fig. 5 avec le formalisme des arbres de défaillances. Ils correspondent à la perturbation du flux de trafic et à la collision entre.



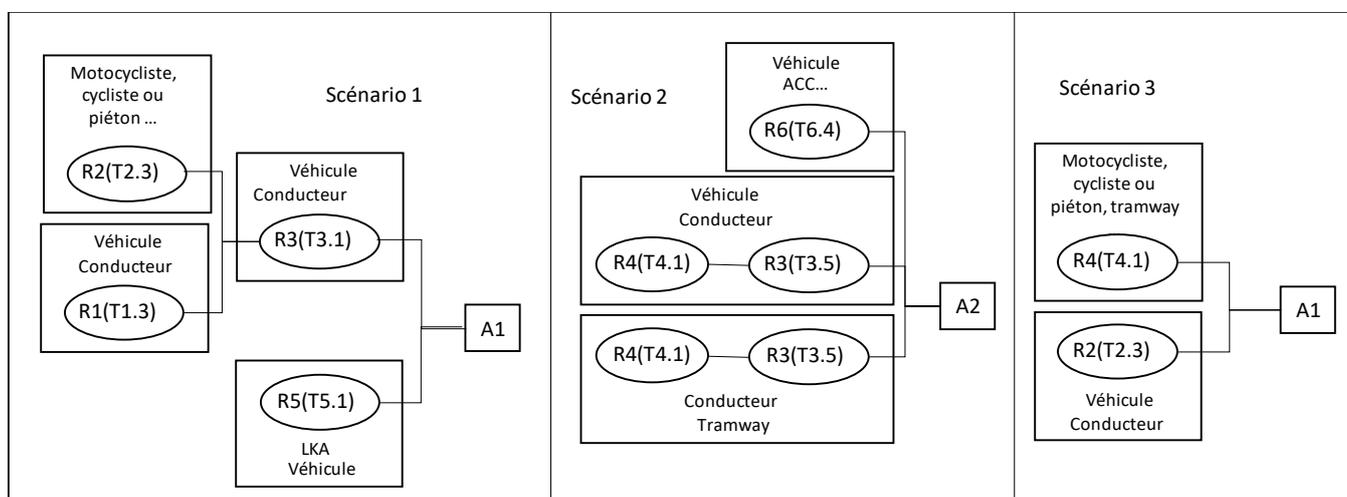
201
 202 Fig. 5. Exemples de modèles holistiques avec les arbres de défaillances pour une entité donnée

203 L'application des algorithmes (1) et (2) permet d'obtenir l'ensemble AdC suivant : $AdC = \{(T3.1, T5.1, AdD1), (T3.5, T6.4,$
 204 $AdD2), (T4.1, T2.3, AdD1)\}$. La dernière étape consiste à établir les scénarios intégrant une séquence possible d'événements en
 205 liens avec chaque triplet de C.

206 **IV. SIMULATION DE COMPORTEMENTS**

207 Les scénarios simulés ont été identifiés en prenant en compte les dépendances causales des réseaux de Petri de l'ensemble R,
 208 et ce pour une même entité ou pour des entités différentes, Fig. 6 :

- 209 • Le scénario 1 est une collision potentielle entre un véhicule et une autre entité due à des intentions contradictoires entre
 210 un automobiliste et le LKA. Par exemple, le conducteur peut décider de laisser passer un motocycliste par courtoisie en
 211 restant sur la même voie alors que le LKA diagnostique un écart de voie et remet automatiquement le véhicule à sa position
 212 initiale. Une collision entre le conducteur et le motocycliste est alors possible.
- 213 • Le scénario 2 correspond à un respect de la signalisation par un automobiliste et un tramway, par un arrêt du conducteur
 214 ou de l'ACC pour éviter une collision frontale avec une autre entité, et l'arrêt du tramway pour éviter la collision avec le
 215 véhicule arrêté sur la voie ferrée. L'événement indésirable concerne ici la perturbation du flux de trafic.
- 216 • Enfin, le scénario 3 concerne un manque de disponibilité de la part du conducteur dans une situation de trafic dense et
 217 une manœuvre, par exemple, d'insertion dans une file à un croisement, ce qui monopolise toute l'attention d'un côté de la
 218 voie. Lors de la décision de mouvement, une collision peut avoir lieu avec une autre entité si le conducteur maintient son
 219 attention sur la manœuvre d'insertion dans la file.



220
 221 Fig. 6. Genèse d'événements indésirables dans des conditions normales de fonctionnement

222 La plateforme MissRail® a été développée à l'Université Polytechnique Hauts-de-France et permet de simuler plusieurs
 223 entités telles que des piétons, des véhicules, des trains ou des tramways dans une infrastructure donnée (Vanderhaegen, Richard,
 224 2014). Les scénarios identifiés ont pu être implémentés et testés. Dans la Fig. 7 représentant un exemple du scénario 2, le véhicule
 225 passe au vert et s'arrête pour éviter la collision avec un autre véhicule, cet arrêt étant géré soit par le conducteur soit par l'ACC
 226 activé.



227
 228 Fig. 7. Exemple de simulation du scénarios 2 pour une perturbation du flux entre entités.

229 L'arrêt s'effectue sur la voie ferrée sur laquelle un tramway peut arriver. Cette situation génère alors une perturbation du flux.
230 Les Fig. 8 et 9 donnent un autre exemple de l'implémentation du scénario 3. Deux entités sont considérées pour le même
231 scénario : un véhicule pouvant entrer en collision avec un piéton (Fig. 8) ou un tramway (Fig. 9). Cette simulation permet de
232 déterminer des risques potentiels liés à l'attention focalisée d'une entité sur une manœuvre d'insertion sans éventuellement prêter
233 attention au reste de la scène.

234



235

236 Fig. 8. Simulation du scénario 3 pour une collision potentielle d'un véhicule en cours d'insertion dans une file avec un piéton

237 L'avantage de cette démarche est double. Elle permet d'une part d'étudier des distracteurs d'attention pouvant perturber la
238 sécurité du trafic, et d'autre part, de déterminer des conflits d'intention entre entités dans des situations où chacune d'elles se
239 comporte normalement. Elle est un support complémentaire aux méthodes classiques d'évaluation de risques. En effet, dans le
240 cadre de la conception de système d'aide à la conduite ou autonomes, elle permet de combiner des modèles holistiques et
241 spécifiques et de les étudier par simulation issue de l'identification de liens entre comportements normaux et anormaux à partir
242 de modélisation par réseaux de Petri ou arbres de défaillance respectivement.



243

244 Fig. 9. Simulation du scénario 3 pour une collision potentielle d'un véhicule en cours d'insertion dans une file avec un tramway

245

V. CONCLUSION

246 Cet article a présenté une nouvelle approche d'analyse de risques basée sur la genèse de scénarios à partir de comportements
247 normaux d'entités humaines, techniques ou organisationnelles. Cette démarche permet de déterminer des modèles holistiques
248 représentant des comportements communs à des entités dans un contexte donné et des modèles spécifiques propres à une entité.
249 La modélisation est réalisée avec les formalismes des réseaux de Petri pour les comportements normaux et des arbres de
250 défaillances pour les comportements indésirables. L'analyse des combinaisons de comportements normaux d'une même entité
251 ou de plusieurs entités pouvant générer des comportements indésirables permet de produire des arbres de causes qui sont
252 implémentés, testés et validés avec la plateforme numérique MissRail®. L'approche a été appliquée au domaine des transports
253 terrestres en milieu urbain avec la genèse de scénarios de simulation impliquant une entité humaine (i.e., un automobiliste)
254 interagissant avec une autre entité humaine (e.g., un piéton, un cycliste, un conducteur de tramway) ou avec des entités techniques
255 d'aide à la conduite (e.g., l'ACC ou le LKA).

256 Les comportements étudiés sont associés à trois paramètres : les compétences, les disponibilités des ressources ou les
257 possibilités d'action ou d'interaction. Ainsi, par exemple, la prise en compte de la disponibilité d'un automobiliste qui concentre
258 son attention sur une manœuvre délicate (e.g., insertion sous forte contrainte temporelle dans une file à forte trafic), permet de
259 produire différents scénarios de simulation de collision potentielle avec un tiers (e.g., une collision avec un piéton ou une collision
260 avec un tramway en fonction des caractéristiques de l'infrastructure). Les modèles numériques issus des arbres de causes obtenus
261 par la méthode proposée dans l'article permettent donc de simuler l'impact d'un manque de disponibilité d'une entité. Ils
262 démontrent également que la combinaison de comportements normaux d'une même entité ou de différentes entités peut affecter
263 la sécurité ou le flux de trafic. Ainsi, en termes de perspectives de recherche, leur étude permettra d'améliorer la résilience des
264 futurs systèmes sociotechniques par la prise en compte d'un manque de compétences, de disponibilité ou de possibilité d'action
265 ou d'interaction pour une entité donnée ou plusieurs entités qui interagissent.

267 REMERCIEMENTS

268 Ce travail a été réalisé dans le cadre des activités du GIS GRAISyHM en partenariat avec la région Hauts-de-France. Les
269 auteurs remercient ces organismes pour leur soutien.

270 REFERENCES

- Abulibdeh, A., Zaidan, E., Abulibdeh, R. (2024). Navigating the confluence of artificial intelligence and education for sustainable development in the era of industry 4.0: Challenges, opportunities, and ethical dimensions. *Journal of Cleaner Production*, 437, 140527, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140527>
- Aguirre, F., Sallak, M., Vanderhaegen, F., Berdjag, D. (2013). An evidential network approach to support uncertain multiviewpoint abductive reasoning. *Information Sciences*, 253, 110-125.
- Akácser, V., Cruz-Machado, V. C. (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22, 899-919.
- Ascone, C., Vanderhaegen, F. (2022). Towards a holistic framework for digital twins of human-machine systems. *IFAC-PapersOnLine*, 55(29), 67-72.
- Barcellini, F., Béarée, R., Benchekroun, T-H., Bounouar, M., Buchmann, W., Dubey, G., Lafeuillade, A.-C., Moricot, C., Rosselin-Bareille, C., Saraceno, M. & Siadat, A. (2023). Promises of industry 4.0 under the magnifying glass of interdisciplinarity: revealing operators and managers work and challenging collaborative robot design. *Cognition Technology & Work*, 25, 251-271.
- Brandenburger, N., Naumann, A. (2019). On Track: A Series of Research about the Effects of Increasing Railway Automation on the Train Driver. *IFAC PapersOnLine* 52-19 (2019) 288-293
- Bratić, K., Pavić, I., Vukša, S., Stazić, L. (2019). Review of Autonomous and Remotely Controlled Ships in Maritime Sector. *Transactions on Maritime Sciences*, 2, 253-265.
- David W. (2020). Advanced driver assistance systems 'inconsistent and dangerous' – repor, August 17, 2020. Consulté le 27/02/2024, <https://www.drive.com.au/news/advanced-driver-assistance-systems-inconsistent-and-dangerous-report/>
- de Winter, J.C.F., Eisma, Y.B., Cabrall, C.D.D., Hancock, P. A., Stanton, N. A. (2019). Situation awareness based on eye movements in relation to the task environment. *Cognition Technology & Work* 21, 99-111.
- Dufour, A. (2014). Driving assistance technologies and vigilance: impact of speed limiters and cruise control on drivers' vigilance. *Seminar on the Impact of Distracted Driving and Sleepiness on Road Safety*, April. Paris La Défense, 2014.
- Enjalbert, S., Vanderhaegen, F. (2017). A hybrid reinforced learning system to estimate resilience indicators. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 64, 295-301
- Gadmer, Q., Richard, P., Popieul, J.-C., Sentouh, C. (2022). Railway Automation: A framework for authority transfers in a remote environment. *IFAC-PapersOnLine*, 55(29), 85-90.-
- Gonzalez, A. G. C. , Alves, M. V. S. , Viana, G. S., Carvalho, L. K., Basilio, J. C. (2018). Supervisory control-based navigation architecture: a new framework for autonomous robots in industry 4.0 environments. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(4), 1732-1743.
- Goulard, H. (2023). Voiture autonome : cette série noire qui paralyse Cruise et General Motors. *Les Echos*, 08/11/2023, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/automobile/voiture-autonome-cette-serie-noire-qui-paralyse-cruise-et-general-motors-2027442>
- Hickling, E.M., Bowie, J.E. (2013). Applicability of human reliability assessment methods to human-computer interfaces. *Cognition Technology & Work* 15, 19-27.
- ISO 23247-2 (2021). Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 2: Reference architecture. ISO, 08/12/2024, <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:23247:-2:ed-1:v1:en>
- Johnston, S. (2018). Does cruise control save fuel? *Autrader*, March 19, 2018. Consulté le 27/02/2024, <https://www.autotrader.co.za/cars/news-and-advice/automotive-news/does-cruise-control-save-fuel/1460>
- Joulet, D., Piechowiak, S., Vanderhaegen, F. (2003). A shared workspace to support man-machine reasoning: application to cooperative distant diagnosis. *Cognition, Technology and Work*, 5, 127-139 (2003)
- JTSB (2008). Aircraft serious incident – Investigation report. Report # AI2008-01, November 28, 2008.
- Kandemir, C., Celik, M. (2020). A human reliability assessment of marine auxiliary machinery maintenance operations under ship PMS and maintenance 4.0 concepts. *Cognition Technology & Work*, 22(3), 473-487.
- Lazarre, D. (2021). Régulateur de vitesse : pourquoi il peut poser problème. *Le Dauphiné Libéré*, 15 juillet 2021. Consulté le 27/02/2024, <https://www.ledauphine.com/magazine-automobile/2021/07/15/regulateur-de-vitesse-pourquoi-il-peut-poser-probleme>
- Legrand, B. (2018). Faut-il avoir peur du train sans conducteur ? *L'obs*, 12 septembre 2018. Consulté le 27/02/2024, <https://www.nouvelobs.com/economie/20180912.OBS2237/faut-il-avoir-peur-du-train-sans-conducteur.html>
- Leng, J., Sha, W., Wang, B., Zheng, P., Zhuang, C., Liu, Q., Wuest, T., Mourtzis, D., Wang, L. (2022). Industry 5.0: Prospect and retrospect. *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 279-295.
- Li, S., Abel, M.-H. & Negre, E. A (2021). Collaboration context ontology to enhance human-related collaboration into Industry 4.0. *Cognition Technology & Work*, 24, 75-91.
- Li, X., Nassehi, A., Wang, B., Hu, S. J., Epureanu, B. I. (2023). Human-centric manufacturing for human-system coevolution in Industry 5.0. *CIRP Annals*, 72(1), 393-396.

- Lu, Y., Zheng, H., Chand, S., Xia, W., Liu, Z., Xu, X., Wang, L., Qin, Z., Bao, J. (2022). Outlook on human-centric manufacturing towards Industry 5.0. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 612–627.
- Mallam, S. C., Nazir, S. & Sharma, A. (2020). The human element in future Maritime Operations – perceived impact of autonomous shipping, *Ergonomics*, 63(3), 334-345.
- Merat, N., Seppelt, B., Louw, T., Engström, J., Lee, J. D., Johansson, E., Green, C. A., Satoshi Katasaki, Monk, C., Itoh, M., McGehee, D., Sunda, T., Unoura, K., Victor, T., Schieben, A. & Keinath, A. (2019). The “Out-of-the-Loop” concept in automated driving: proposed definition, measures and implications. *Cognition Technology & Work*, 21, 87-98.
- NSC (2009). Hazards of driving in the rain with cruise control. National Safety Commission, March 3, 2009. Consulté le 27/02/2024, <http://alerts.nationalsafetycommission.com/2009/03/hazards-of-driving-in-rain-with-cruise.php>
- Ouedraogo, A., Enjalbert, S., Vanderhaegen, F. (2013). How to learn from the resilience of Human–Machine Systems? *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(1), 24-34.
- Prake, S. (2022). Aux États-Unis, six véhicules autonomes ont bloqué les rues de San Francisco pendant plusieurs heures, avant que des techniciens viennent les déplacer manuellement. *Capitale*, 01/07/2022. Consulté le 26/02/2024, <https://www.capital.fr/auto/etats-unis-des-taxis-autonomes-tombent-en-pannee-et-bloquent-la-circulation-1440645>
- Prinzel, L. J., Risser, M. (2004). Head-up displays and attention capture. National Aeronautics and Space Administration report n°NASA/TM-2004-213000 (Corrected copy).
- Rangra, S., Sallak, M., Schön, W., Vanderhaegen, F. (2017). A Graphical Model Based on Performance Shaping Factors for Assessing Human Reliability. *IEEE Transactions on Reliability*, 66 (4), 1120-1143.
- Romero, D. Stahre, J. (2021). Towards The Resilient Operator 5.0: The Future of Work in Smart Resilient Manufacturing Systems . *Procedia CIRP*, 104, 1089-1094.
- SAE (2016). Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles. Society of Automotive Engineers International report n°: SAE J3016_201609, September
- Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. MIT Press, USA.
- Sun, Y., Wu, S., Spence, I. (2015). The commingled division of visual attention. *PLoS ONE*, 10(6): e0130611. doi:10.1371/journal.pone.0130611
- Tan, W. (2019). Driving in the rain with cruise control: good or bad idea? *Carmudi Philippines*, August 8, 2019. Consulté le 27/02/2024, <https://www.carmudi.com.ph/journal/driving-in-the-rain-with-cruise-control-good-or-bad-idea/>
- Turk, Z. (2020). Interoperability in construction – Mission impossible? *Developments in the Built Environment*, 4, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100018>
- Vanderhaegen, F. (1993). *Coopération homme-machine multineveau entre une équipe d’opérateurs humains et des outils d’assistance : Application au contrôle du trafic aérien*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France, Décembre 21.
- Vanderhaegen, F. (1999). Cooperative system organisation and task allocation: illustration of task allocation in air traffic control. *Le Travail Humain*, 63(3), 197-222
- Vanderhaegen, F. (2001). A non-probabilistic prospective and retrospective human reliability analysis method — application to railway system. *Reliability Engineering & Safety Systems*, 71(1), 1-13.
- Vanderhaegen, F. (2010). Human-error-based design of barriers and analysis of their uses. *Cognition Technology & Work*, 12(2), 133-142.
- Vanderhaegen, F. (2012). Cooperation and learning to increase the autonomy of ADAS. *Cognition Technology & Work*, 14(1), 61-69
- Vanderhaegen, F. (2014). Dissonance engineering: a new challenge to analyse risky knowledge when using a system. *International Journal of Computers, Communications and Control*, 9(6), 776-785.
- Vanderhaegen, F. (2016a). A rule-based support system for dissonance discovery and control applied to car driving. *Expert Systems With Applications*, 65, 361–371.
- Vanderhaegen, F. (2016b). Toward a Petri net based model to control conflicts of autonomy between Cyber-Physical&Human-Systems. *IFAC-PapersOnLine* 49(32), 36-41.
- Vanderhaegen, F. (2017). Towards increased systems resilience: New challenges based on dissonance control for human reliability in Cyber-Physical&Human Systems », *Annual Review in Control*, 44, 316-322.
- Vanderhaegen, F. (2018). Dissonances d’usages, opportunités et menaces : vers une démarche d’ingénierie cognitive de leur analyse. *Proceedings of the ErgoIA 2018 conference*, NY : ACM, Biarritz-Biarritz, France, october.
- Vanderhaegen, F. (2021). Heuristic-based method for conflict discovery of shared control between humans and autonomous systems - A driving automation case study. *Robotics and Autonomous Systems*, 146, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103867>
- Vanderhaegen, F. (2021). Pedagogical learning supports based on human–systems inclusion applied to rail flow control. *Cognition Technology & Work*, 23, 193-202.
- Vanderhaegen, F. (2021a). Heuristic-based method for conflict discovery of shared control between humans and autonomous systems - A driving automation case study. *Robotics and Autonomous Systems*, 146, doi: 10.1016/j.robot.2021.103867
- Vanderhaegen, F. (2021b). Weak Signal-Oriented Investigation of Ethical Dissonance Applied to Unsuccessful Mobility Experiences Linked to Human–Machine Interactions », *Science and Engineering Ethics*, 27, doi: 10.1007/s11948-021-00284-y
- Vanderhaegen, F. (2021c). Pedagogical learning supports based on human–systems inclusion applied to rail flow control. *Cognition Technology & Work*, 23, 193-202.ez
- Vanderhaegen, F., Caulier, P. (2011). A multi-viewpoint system to support abductive reasoning. *Information Sciences*, 181, 5349-5363.
- Vanderhaegen, F., Chalmé, S., Anceaux, F., Millot, P. (2006). Principles of cooperation and competition: application to car driver behavior analysis. *Cognition Technology & Work*, 8, 183–192.
- Vanderhaegen, F., Jimenez, V. (2018). The amazing human factors and their dissonances for autonomous Cyber-Physical&Human Systems. *First IEEE Conference on Industrial Cyber-Physical Systems*, Saint-Petersbourg, Russia, 14-18 May, 2018, pp. 597-602.
- Vanderhaegen, F., Jimenez, V. (2023). Opportunities and Threats of Interactions Between Humans and Cyber–Physical Systems – Integration and Inclusion Approaches for CPHS. In: A. M. Annaswamy, P. P. Khargonekar, F. Lamnabhi-Lagarrigue, S. K. Spurgeon (Eds), *Cyber–Physical–Human Systems: Fundamentals and Applications*, Wiley, pp. 71-90.
- Vanderhaegen, F., Jouget, D., Piechowiak, S. (2004). Human-reliability analysis of cooperative redundancy to support diagnosis. *IEEE Transactions on Reliability*, 53, 458-464.
- Vanderhaegen, F., Richard, P. (2014). MissRail: a platform dedicated to training and research in railway systems. *Proceedings of the international conference HCII*, 22 - 27 June 2014, Creta Maris, Heraklion, Crete, Greece, pp. 544-549.

Vanderhaegen, F., Wolff, M., Mollard, R. (2020). Non-conscious errors in the control of dynamic events synchronized with heartbeats: A new challenge for human reliability study. *Safety Science*, 129, 104814.

Vanderhaegen, F., Wolff, M., Mollard, R. (2023). Repeatable effects of synchronizing perceptual tasks with heartbeat on perception-driven situation awareness. *Cognitive Systems Research*, 81, 80-92.

Wang, L., Wang, G. (2016). Big Data in Cyber-Physical Systems, Digital Manufacturing and Industry 4.0. *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 4, 1-8, DOI: 10.5815/ijem.2016.04.01.

271

272