

Effets d'un schème trompeur et de remédiations

Effects of a misleading scheme and remediations

Marie Hoarau, Franck Mars et Camilo Charron

1. Introduction

- 1 Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet pluridisciplinaire visant à concevoir un démonstrateur pour les usines du futur : il s'agit de tester sur un exemple la pertinence de mobiliser la simulation en temps réel dans les usines pour aider à la prise de décision (Hoarau, 2016). En effet, des progrès dans les capacités et les techniques de simulation ont été réalisés, notamment dans le domaine de la physique des matériaux, le projet vise donc à faire collaborer des équipes en psychologie, informatique et physique des matériaux afin de documenter la démarche de conception, de la rendre reproductible et de tester un prototype. Le cas d'usage qui a été étudié dans ce projet est un atelier qui étire et transforme des cadres dans le contexte d'une usine d'aéronautique. Ces cadres sont de longues poutres métalliques rectilignes (une dizaine de mètres) qui sont enroulées pour prendre une forme en arche, et devenir les futurs squelettes d'un avion.
- 2 Ce cas d'usage a été choisi car, dans l'atelier étudié, les opérateurs rencontrent des difficultés pour programmer la machine d'étirage : les cadres en sortie ne sont pas conformes aux tolérances et nécessitent des reprises manuelles longues et coûteuses. Il est à noter que lors de l'analyse de l'activité dans l'atelier, nous avons identifié que l'information était peu disponible et les actions autorisées par les protocoles très limitées : les opérateurs n'ont pas le droit de changer les programmes d'étirage qui sont fixes pour l'ensemble des cadres, mais le font tout de même. Or les cadres entrant dans l'atelier ne sont pas identiques : leurs caractéristiques internes, qui influencent le processus d'étirage, peuvent varier, mais ne sont pas connues des opérateurs. En conséquence, même les opérateurs experts ont développé ce que nous avons considéré comme un schème trompeur : c'est-à-dire une organisation de l'activité qui ne permet

pas de produire les résultats attendus. Nous évoquons ici brièvement les éléments relatifs à l'analyse de l'activité et du travail déjà présentés ailleurs (Hoarau, Charron, & Mars, 2018). En effet, cette étude vise à évaluer deux méthodes de remédiation possibles de ce schème trompeur : une formation à l'inhibition du schème trompeur et le premier prototype de simulation en temps réel conçu dans le cadre du projet de recherche.

- 3 Enfin, les aléas de la collaboration entre les différentes équipes de recherche et l'atelier ne permettent pas de tester les prototypes directement en situation. Nous avons donc choisi de tester ces deux modes de remédiation dans un micromonde. Ainsi, la simulation intervient à deux niveaux dans cette étude. Le premier niveau est le niveau expérimental et de la phase de conception : le micromonde permet de tester nos hypothèses et un premier prototype. Nous reviendrons plus loin sur les arguments justifiant le recours au micromonde. Le second niveau est le niveau de la formation : un simulateur temps réel, appelé compagnon virtuel, vise à former et à aider à la prise de décision les opérateurs dans l'usine réelle.

1.1. Schèmes et schèmes trompeurs

- 4 Les compétences à produire l'étirement recherché sont décrites en termes de schème, car c'est le schème qui rend compte des formes d'organisation de l'activité (Mayen, 2019 ; Vergnaud, 1999). En effet, un schème est une organisation invariante de l'activité dans une classe de situations données (Vergnaud, 1991) : il contient quatre éléments. Ainsi, un schème comporte des règles d'actions qui vont permettre d'agir en situation, mais également des invariants opératoires qui sont des connaissances ou des croyances qui vont guider les actions, les prises d'informations et de décisions sans que cela soit forcément explicité. L'action qui résulte d'un schème n'est jamais stéréotypée : le schème s'adapte en situation notamment par le biais des inférences, autre composant du schème, qui sont des opérations mentales effectuées par l'individu pour adapter finement l'action aux caractéristiques de la situation en cours. Enfin, un dernier composant est le but ou l'anticipation : en agissant, une personne s'attend à un résultat, vise un objectif, l'action mise en œuvre peut donc changer si l'objectif change (par exemple on s'adaptera différemment à une même situation si on vise la sécurité ou la performance).
- 5 Or, certaines situations favorisent la mise en œuvre par l'individu d'invariants opératoires ou de représentations erronées ou partiellement justes (Pascual-Leone, Johnson, & Agostino, 2010). Ainsi, des schèmes trompeurs, activés alors qu'ils ne le devraient pas, mis en œuvre alors qu'ils devraient être inhibés, se retrouvent tout au long du développement, y compris chez l'adulte (Moutier, Angeard, & Houdé, 2002) et induisent des actions contre-productives susceptibles de fortement dégrader les performances. Il s'agit donc d'identifier comment éviter leur mise en œuvre en situation, en particulier pour notre cas d'étude.

1.2. Analyse de l'activité des opérateurs

- 6 Afin de comprendre l'activité des opérateurs dans l'atelier, nous avons procédé à des observations, des observations instrumentées et à des entretiens semi-directifs (pour

identifier les schèmes d'action) avec deux opérateurs travaillant sur cette machine d'étirage des cadres (Hoarau, 2016).

- 7 Pour transformer les cadres rectilignes, les opérateurs utilisent une machine d'étirage. Le processus se déroule en deux phases, séparées par une trempe (traitement thermique réalisé par d'autres opérateurs ailleurs dans l'atelier). Après la trempe, les caractéristiques des cadres changent en fonction du temps, à mesure que le cadre se rigidifie. Les cadres sont donc mis en chambre froide (appelée frigo) pour ralentir très fortement ce processus de rigidification. Les opérateurs doivent utiliser des outils (mors, cales et chenilles) qui vont permettre de garder la géométrie du profilé (forme en H appelée I ou en U appelée U de la section du cadre). La machine étire et enroule les cadres autour d'une forme. L'étirage réalisé doit prendre en compte la tendance des cadres à revenir à leur position initiale une fois désengagés de la forme : il faut étirer plus que la longueur souhaitée, c'est ce qu'on appelle le retour élastique. La relation entre l'étirage réalisé par la machine et l'étirage final du cadre n'est pas linéaire et dépend des caractéristiques internes des cadres. Bien que cela soit interdit, les opérateurs experts peuvent modifier le programme d'étirage (allongement et enroulement). Tous les opérateurs ont le droit de modifier la vitesse de l'étirage et ont accès à un bouton directement pour le faire, mais la vitesse n'a pas d'effet sur le résultat. Les fiches de poste précisent que les opérateurs doivent vérifier le résultat sur le premier cadre d'un lot, ce qui est fait uniquement par un opérateur considéré comme expert, l'autre opérateur ne contrôlant aucun cadre.
- 8 Le schème trompeur de l'homogénéité des lots mis en évidence dans l'analyse de l'activité des opérateurs se compose d'invariants opératoires concernant le processus physique d'étirage des cadres, l'un d'entre eux semble au cœur des difficultés rencontrées : les opérateurs considèrent que tous les cadres au sein d'un même lot devraient être identiques. Ils considèrent également que ce n'est pas forcément le cas. Les opérateurs mentionnent un changement de fournisseur, mais nous ne pouvons pas confirmer que les lots étaient homogènes avant ce changement. Pour autant, cet invariant concernant l'homogénéité des cadres dans un lot est lié à des règles d'action : l'opérateur expert mesure le premier cadre du lot et ajuste le programme d'étirage de la même façon pour tous les cadres suivants appartenant au même lot. Des indicateurs pris sur la table de mesure soutiennent le processus d'inférence de cet opérateur : selon la façon dont le cadre repose sur la table, il peut augmenter ou diminuer, plus ou moins, le taux d'étirage sur la machine, l'objectif étant d'avoir un cadre le plus possible conforme aux tolérances de production à l'issue de la deuxième phase d'étirage. Un schème pertinent serait de vérifier chaque cadre et d'ajuster le programme en fonction du résultat obtenu.

1.3. La formation comme remédiation à l'utilisation d'un schème trompeur

- 9 La formation à l'inhibition du schème trompeur consiste à accompagner les apprenants à le reconnaître et à en éviter l'utilisation. En effet, il semble que ce type de formation peut diminuer l'utilisation faite de certains biais dans certains contextes (Houdé, 2014 ; Moutier, Angeard, & Houdé, 2002). Enfin, pour éviter un schème trompeur, il peut également s'agir de proposer une autre méthode efficace en situation, basée sur le schème pertinent. Il s'agit donc d'attirer l'attention vers les caractéristiques

déterminantes de la situation et de montrer la solution selon les fonctions d'étayage de Bruner (1983). L'activation et le fait de rendre plus facile l'accès à un schème pertinent, en le renforçant par la formation, sont également cohérents avec le modèle théorique des opérateurs constructifs (Im-Bolter *et al.*, 2015 ; Pascual-Leone, Johnson, & Agostino, 2010). D'ailleurs, ce modèle stipule que faciliter l'accessibilité d'un schème pertinent peut se faire en limitant le coût cognitif engendré par son utilisation (Pascual-Leone, 2013). Enfin, cette formation à l'inhibition peut également s'appuyer sur la répétition qui devrait favoriser le développement des aptitudes et des règles (Pastré *et al.*, 2009).

1.4. La simulation en temps réel comme outil de formation

- 10 En référence au modèle du contrôle cognitif (Hoc & Amalberti, 2007), il peut être coûteux pour un individu de devoir anticiper, ou de traiter de façon interne les données sur lesquelles il travaille. En revanche, externaliser certaines informations ou travailler de façon plus réactive est en général moins coûteux. Or, ici, lorsque les opérateurs utilisent le schème trompeur, ils externalisent l'information. En effet, ils n'essayent pas d'anticiper, ou de calculer le résultat de leur action, ils se contentent d'observer le résultat obtenu. En revanche, mettre en œuvre un schème pertinent nécessiterait d'anticiper un résultat potentiel à partir des informations disponibles. Cela peut donc représenter un coût cognitif important, en particulier si les calculs permettant d'anticiper les résultats sont complexes. Dans ce cadre, externaliser les calculs nécessaires devrait diminuer le coût cognitif inhérent à l'utilisation du schème pertinent. Il en résulterait une moindre utilisation du schème trompeur. En effet, lors d'une situation-problème, l'individu doit allouer de l'énergie mentale aux différents schèmes pouvant l'aider à résoudre la situation (Pascual-Leone & Irwin, 1994). Il fait ensuite le tri parmi eux. Il doit parfois également allouer de l'énergie à l'inhibition de certains d'entre eux. Selon ce modèle, diminuer le coût associé à l'utilisation du schème pertinent devrait donc favoriser son utilisation chez les participants et limiter l'utilisation du schème trompeur.
- 11 Dans l'atelier étudié, la simulation en temps réel devrait permettre cette diminution des coûts en externalisant les calculs nécessaires au paramétrage des programmes d'étirage. Ce type de simulation constitue une innovation pour les chercheurs en physique des matériaux : les simulations traditionnelles sur les process, comme ceux rencontrés dans l'atelier d'étirage des cadres, nécessitaient en effet plusieurs jours de calculs, ce qui limitait leur usage en situation. Vu ces avancées, les opérateurs pourraient utiliser cette simulation en temps réel directement dans l'atelier en fonction des évolutions de la situation, comme les mesures prises sur chaque cadre. Dans ce type de simulation, il n'y a pas de scénarios préconçus : les opérateurs conçoivent en quelque sorte leurs propres scénarios en choisissant, dans notre cas, les caractéristiques des cadres et peuvent simuler plusieurs programmes différents pour en tester les résultats.
- 12 La simulation permet également à l'utilisateur de créer des liens entre les informations pertinentes et les actions à mettre en œuvre. En effet, en multipliant les essais et les erreurs sans craindre d'altérer sa performance, l'opérateur devrait avoir des occasions supplémentaires de s'entraîner (Pastré *et al.*, 2009), à condition de mettre en œuvre une pratique réflexive : il doit chercher à comprendre les causes de ses erreurs, un debriefing à la fin d'un exercice est préconisé dans ce but, ce qui ne serait pas le cas lors

de l'utilisation de l'outil en situation de travail. Pour favoriser l'apprentissage, les situations de simulation doivent être construites de façon soignée et progressive afin de favoriser la genèse conceptuelle. Encore une fois, cela ne sera pas le cas ici, car l'outil devrait être utilisé en situation de travail, et l'opérateur pourra lui-même éditer tous les paramètres de la situation. Ce type d'outil a donc potentiellement des limites au regard des objectifs fixés ici, c'est-à-dire la diminution de l'utilisation du schème trompeur.

- 13 Une attention particulière est donc portée à la conception de l'interface de simulation en temps réel. Une interface écologique, en présentant la situation de travail de manière complète et efficace (Bennett & Flach, 2011), devrait encourager l'émergence du schème pertinent et, par conséquent, réduire l'utilisation du schème trompeur.

2. Conception des simulateurs

2.1. L'analyse du travail pour la conception d'une interface du compagnon virtuel

- 14 Afin de concevoir l'interface de l'outil d'aide à la prise de décision, qui prendra ici la forme d'une simulation en temps réel, nous avons mobilisé le cadre théorique de la conception d'interfaces écologiques, ou EID (ecological interface design) (Bennett & Flach, 2011). En effet, les interfaces écologiques peuvent favoriser le développement des compétences en fournissant un retour d'information utile à l'utilisateur (Jamieson & Vicente, 2001). Toutefois, l'utilisateur doit être motivé à apprendre et exécuter la tâche en profondeur, c'est-à-dire qu'il doit réfléchir activement aux informations présentées par l'interface (Christoffersen, Hunter, & Vicente, 1996, 1998). De cette manière, il devrait développer ses aptitudes, mais aussi acquérir des connaissances.
- 15 Bien que la conception d'interface écologique soit le plus souvent mobilisée pour concevoir des interfaces de conduite de machine, ces principes ont également été repris pour la conception de simulations, en particulier pour faire le lien entre des représentations abstraites d'un domaine de travail et les représentations fonctionnelles ou pragmatiques en formation (Boucheix, 2003). Selon les principes de l'EID, il ne suffit donc pas de représenter les éléments du programme ; il faut également représenter les liens entre les caractéristiques des cadres (niveau abstrait du processus physique) et le programme de la machine (niveau concret des éléments physiques du système) pour faciliter la prise de décision des opérateurs.
- 16 Ici, l'analyse du domaine du travail a été réalisée en croisant les éléments apportés par les opérateurs lors de la phase d'analyse de l'activité aux éléments apportés par des entretiens avec le technicien d'industrialisation et un chercheur en physique des matériaux. Elle nous a permis de comprendre les processus physiques en jeu dans l'atelier, notamment les caractéristiques internes des cadres et leurs liens avec les programmes de commande de la machine-outil. Le détail de cette analyse peut être retrouvé dans nos travaux précédents (Hoarau, 2016). Le plus souvent, ils sont cohérents avec les éléments rapportés par les opérateurs, sauf en ce qui concerne l'homogénéité des lots : le manque d'homogénéité peut produire certains des défauts observés dans les cadres étirés.

2.2. Description des deux niveaux de simulation

- 17 Nous nous sommes appuyés sur les éléments issus de ces deux analyses, l'analyse de l'activité des opérateurs et l'analyse du travail, pour proposer une interface au logiciel de simulation en temps réel qui serait utilisée dans l'atelier par les opérateurs. Cependant, il était difficile de tester les effets de ce premier prototype sur la persistance du schème trompeur dans l'atelier : il n'est pas possible de contrôler les cadres entrants, les opérateurs pouvant intervenir sur la machine d'étirage ne sont que deux, et l'entreprise est réticente à ce que les programmes soient changés pour l'expérience. Enfin, les calculs nécessaires à la conception de la simulation ne sont pas encore aboutis au moment de l'étude. Nous avons donc choisi de tester les effets de la simulation en temps réel sur le schème trompeur dans un micromonde dans un premier temps.
- 18 Notre micromonde est donc un micromonde dédié à la recherche et non à la formation (Rasmussen, Laumann, & Boring, 2019). Ce paradigme est utilisé, notamment dans la recherche sur les interfaces hommes-machines, quand le monde réel est difficile d'accès et difficilement contrôlable et que le nombre d'opérateurs réels est réduit pour tester les risques d'erreurs liés aux nouvelles interfaces (Boring *et al.*, 2019). Dans ce type de contexte, l'utilisation de micromondes semble donc pertinente bien que les auteurs relèvent des limites : les coûts et temps de développement restent élevés bien que moindres par rapport à des simulations pleine échelle ; les recherches sont souvent conduites sur des étudiants (Ragsdale *et al.*, 2012). La question de la validité des résultats sur cette population se pose. Pour certains, ils restent intéressants pour les recherches sur des processus précis, par exemple la mesure de l'attention en réponse à des signaux d'alarme, mais à valider auprès d'opérateurs experts. Ulrich, Boring et Lew (2019) ont, par exemple, testé un même micromonde sur les deux publics et ont montré que, dans leur cas, les étudiants avaient de moins bonnes performances que les experts, mais que ces derniers considéraient le micromonde comme représentatif du système réel. Les auteurs considèrent ainsi que le paradigme du micromonde, même avec des participants étudiants, est un intermédiaire entre le laboratoire et le monde réel pertinent pour la recherche sur le facteur humain, mais que les résultats obtenus doivent tout de même être validés ensuite dans le réel (Rasmussen, Laumann, & Boring, 2019 ; Ulrich, Boring, & Lew, 2019).

2.2.1. Un simulateur dédié à la recherche et à la conception : le micromonde

- 19 Dans le micromonde, comme dans l'atelier réel, les opérateurs doivent incurver et étirer des poutres métalliques rectilignes au départ. Ils doivent pour cela utiliser une machine d'étirage (Figure 1) dont ils peuvent modifier plusieurs paramètres : la vitesse, l'allongement, l'enroulement. Comme dans l'atelier, l'étirage se déroule en deux temps (les première et deuxième passes) séparés par une étape de modification thermique : la trempe. Les paramètres d'allongement et d'enroulement choisis auront un effet sur la longueur et l'angle du cadre obtenu.

Figure 1 : Poste de contrôle et machine d'étirage dans le micromonde.
Figure 1: Control station and stretching machine in the microworld



- 20 Les éléments communs à l'atelier réel et au micromonde sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques du micromonde.
Table 1: Characteristics of the microworld

	Éléments extraits de l'analyse de l'activité en atelier	Caractéristiques du micromonde
<i>Tâche</i>	Étirage de cadre en deux passes séparées par une trempe	Étirage de cadre en deux passes séparées par une trempe
<i>Prescrit</i>	Mesures sur le premier cadre du lot Interdiction de modifier les programmes Nécessité de mettre en place les outils et de manœuvrer finement la machine en début d'étirage Frigo après la trempe	Mesures sur chaque cadre Modification des programmes préconisée Nécessité de mettre en place les outils tout le reste est automatisé Frigo après la trempe
<i>Caractéristiques de la situation</i>	Caractéristiques internes des cadres inconnues des opérateurs et des chercheurs (données fournisseurs non transmises) Les différences de caractéristiques internes ont probablement un effet sur le résultat de l'activité. Les caractéristiques internes des cadres changent après la trempe (modélisation en cours par les chercheurs en physique) Les aléas causés par la variabilité dans l'écartement des branches sont difficiles à traiter par les opérateurs, à simuler pour les chercheurs en physique et sources d'erreurs La vitesse n'a pas d'effet	Caractéristiques internes des cadres inconnus des participants mais connus et modifiables par les chercheurs Les différences de caractéristiques internes ont un effet sur le résultat Les caractéristiques internes des cadres changent après la trempe : ce changement est connu des chercheurs Les aléas causés par la variabilité restent dans les tolérances sauf en cas d'erreur ou d'oubli dans les outils. Les difficultés liées à ce domaine ne sont pas étudiées dans la situation simulée. La vitesse n'a pas d'effet sauf si trop élevée en deuxième passe
<i>Informations disponibles sur le résultat de l'action</i>	L'opérateur a des outils de mesure, principalement pour la géométrie Pour l'allongement et l'enroulement, le cadre est posé sur la table de mesure et des indicateurs visuels (se soulève au centre ou aux extrémités) sont utilisés pour régler les programmes	Les mêmes outils sont disponibles pour la géométrie. Les indices visuels étant difficile à transmettre, des outils de mesure (mètre et rapporteur) permettent d'obtenir l'allongement et l'angle

- 21 À l'issue de chaque phase d'étirage, les participants doivent contrôler l'angle d'enroulement, la longueur du cadre, la rectitude et la planéité (cela est précisé dans la fiche de poste). Les deux derniers éléments sont relatifs à la forme du cadre vu en coupe : il a une forme de I ou de U, il doit garder cette forme en fin d'étirage. Pour ce faire, les opérateurs doivent utiliser des outils (chenilles et cales) qui, dans le micromonde, sont adaptés aux cadres : les résultats seront bons sauf si le participant se trompe de référence ou les oublie.
- 22 Le Tableau 2 résume les effets de chaque élément sur les résultats.

Tableau 2 : Actions, effets sur les performances et mesures possibles.
Table 2: Possible actions, effects on performances, and measures

Éléments du programme	Caractéristiques du cadre liées	Mesures / Critères d'évaluation	Actions et effets sur les résultats
Cales Chenilles	Écartement des branches	Rectitude Planéité	Oublis, erreurs provoquent un rebut pour rectitude et planéité
Programme d'allongement	Module de Young Limite d'élasticité Temps après trempe	Longueur	Trop grands ou petits provoquent le rebut pour la longueur
Programme d'enroulement	Module de Young Limite d'élasticité Temps après trempe	Angle	Trop grands ou petits provoquent le rebut pour l'angle
Vitesse	Défauts internes	Aucune	Vitesse trop grande en deuxième passe peut provoquer une rupture du cadre

- 23 Six scénarios ont été développés sur le micromonde. Les scénarios 1, 2, 3 et 5 sont simples : les caractéristiques internes des cadres sont homogènes dans un lot, bien que des modifications de programme soient nécessaires pour réussir ces scénarios. Les

scénarios 4 et 6, en revanche, s'articulent autour de lots de cadres dont les caractéristiques internes sont hétérogènes. Dans chaque scénario, les participants doivent étirer huit cadres.

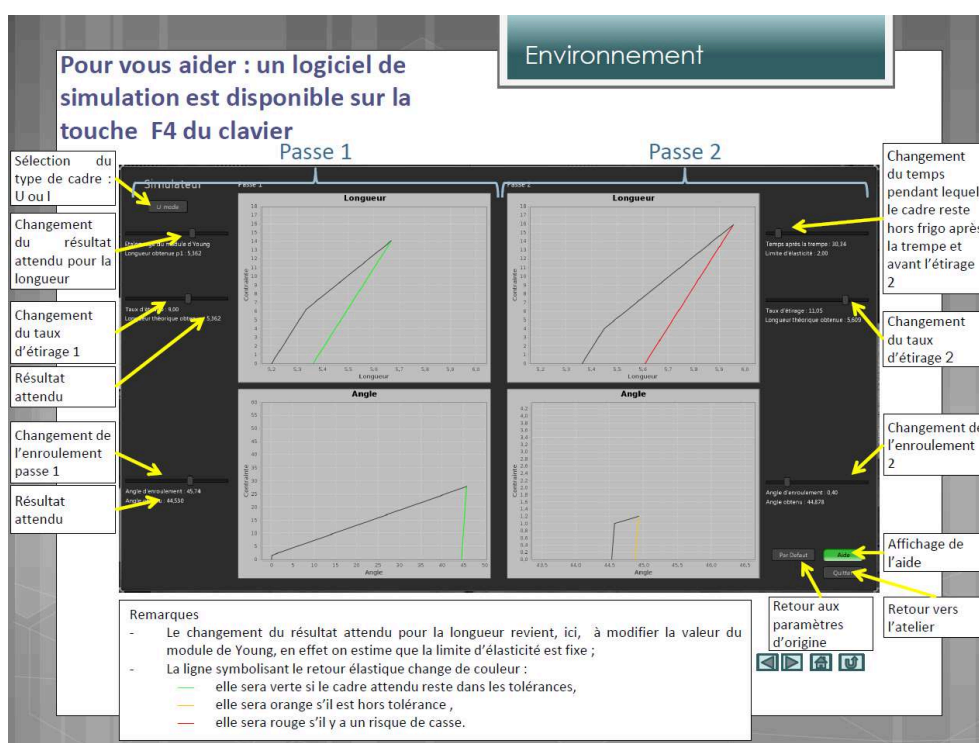
- 24 Ce micromonde n'a été considéré comme valide pour tester le simulateur en temps réel que dans la mesure où le schème trompeur est bien apparu dans l'activité des participants – opérateurs virtuels dans ce micromonde – comme il est apparu dans l'activité des opérateurs réels de l'atelier.

2.2.2. Un simulateur temps réel pour la remédiation au schème trompeur : le compagnon virtuel

- 25 Le compagnon virtuel est le logiciel de simulation temps réel, conçu pour aider les opérateurs dans leur prise de décision (voir Figure 2). Il a été conçu en partie selon les principes de la conception d'interface écologique, à l'exception de deux points : il ne représente qu'une partie du processus d'étirage et ne permet pas d'agir directement sur le processus d'étirage.

Figure 2 : Compagnon virtuel, présentation faite aux participants et présente dans l'aide du compagnon virtuel.

Figure 2: Virtual companion, presentation given to the participants before entering the microworld and accessible through the help menu in the microworld



- 26 En effet, trois principes sous-tendent la conception de ce type d'interface : 1) celle-ci doit permettre la manipulation directe du système, 2) elle doit permettre une représentation directe du système, c'est-à-dire que l'interface doit utiliser des formes ou graphiques qui correspondent aux contraintes du domaine de travail, l'interface est ainsi accessible, et 3) l'interface représente l'intégralité du domaine de travail (Vicente, 2002). Ainsi, l'interface ne doit pas se contenter de représenter les niveaux les plus concrets (les capteurs et les éléments physiques du système) comme c'est souvent

le cas, elle doit aussi représenter les niveaux plus abstraits comme les processus physiques qui contraignent le système ou les objectifs visés (Christoffersen, Hunter, & Vicente, 1996).

27 En ce qui concerne la manipulation directe avec le système, dans le compagnon virtuel, les participants peuvent manipuler directement tous les curseurs représentant les éléments de la machine à étirer et les phénomènes physiques associés. Ainsi, les participants peuvent choisir le type de cadre (U ou I), calibrer les caractéristiques internes du cadre, changer les valeurs d'allongement et d'enroulement du programme pour la première et la deuxième passe. Ils peuvent également modifier le temps passé par le cadre hors du réfrigérateur après la trempe. Enfin, les participants ont accès à trois boutons :

- Réinitialiser le compagnon virtuel aux paramètres par défaut, correspondant au programme d'étirage de base ;
- Une aide de deux pages, la première expliquant le retour élastique et la seconde présentant les différents éléments du compagnon virtuel ;
- Quitter le compagnon virtuel et retourner dans le micromonde.

28 Ils peuvent également visualiser directement leurs résultats. Cela leur permet de faire correspondre la représentation offerte par le compagnon virtuel à l'état actuel du système et d'envisager différents types d'actions. En revanche, le compagnon virtuel ne fait que simuler le processus mais ne contrôle pas la machine d'étirage. En effet, dans l'atelier réel, il sera impossible de contrôler la machine à partir du compagnon virtuel, car les systèmes de contrôle de la machine sont sous licence d'un autre fabricant. De plus, nous souhaitons travailler sur les possibilités offertes par la simulation, ce qui n'est pas forcément compatible avec le contrôle direct de la machine.

Une interface écologique représente l'intégralité du domaine de travail. Nous avons donc représenté dans le compagnon virtuel tous les éléments concernant le phénomène physique par une courbe classiquement utilisée pour l'enseignement de ce phénomène en physique des matériaux. Lors des deux passes d'étirage (voir Figure 2), cette courbe est reproduite pour les deux éléments qu'il affecte, soit la longueur et l'angle. Elle a pour but de rendre visibles les contraintes existant sur le système. Cependant, dans le compagnon virtuel, les éléments en lien avec les contraintes aux bords qui affectent la géométrie des pièces, c'est-à-dire la rectitude et la planéité, ne sont pas représentés, car ils ont peu d'effet dans le micromonde, seules les erreurs de références provoquent un défaut. Le compagnon virtuel n'est donc pas exhaustif comme le préconiserait le cadre de la conception d'interface écologique (Bennett & Flach, 2011).

29 Enfin, une interface écologique doit donner une représentation directe du système. L'interface du compagnon virtuel fournit des informations à différents niveaux de la taxonomie SRK (Rasmussen, 1983) qui distingue les comportements basés sur les habiletés (*skills*), sur les règles (*rules*) ou sur les connaissances (*knowledge*). Les couleurs, en tant que signaux, permettent aux participants d'identifier immédiatement un problème avec les paramètres choisis : le rouge est traditionnellement associé au danger ou à l'interdiction dans notre société, tandis que le vert est lié à ce qui est autorisé ou à ce qui se passe bien, et l'orange est un intermédiaire qui permet également d'attirer l'attention. Le participant peut également travailler au niveau des comportements guidés par des connaissances, car les symboles numériques sont utilisés pour permettre les calculs. Par la pratique et l'entraînement, les compétences devraient se développer : plus le participant manipule ces symboles, plus il peut les transformer en signes et donc travailler sur les règles. En effet, l'utilisation de symboles

comme base de comportement est fréquente lorsqu'il s'agit de nouveaux problèmes, de nouvelles situations, et donc lors de l'apprentissage. Au contraire, dans les situations déjà rencontrées régulièrement, les comportements sont plutôt guidés par des règles, déclenchées par des signes, ou par des aptitudes, déclenchées par des signaux (Flach, 2017 ; Rasmussen, 1983).

- 30 En revanche, le compagnon virtuel qui sera développé pour l'atelier réel devrait représenter les différents éléments identifiés lors des analyses du travail et de l'activité : à la fois les informations concernant le processus physique en jeu dans l'allongement et l'enroulement, les contraintes internes (non implémentées dans le micromonde) et celles concernant la géométrie.

2.3. Hypothèses

- 31 Ici, nous nous attendons à observer le schème trompeur dans l'activité des participants sur le micromonde, en effet, celui-ci nous semble suffisamment général pour apparaître dans une population naïve. Nous pensons également trouver un effet négatif du schème trompeur sur les performances dans le micromonde. Une formation à l'inhibition du schème trompeur devrait diminuer l'usage de celui-ci et améliorer les performances à la tâche d'étirage de cadres. Enfin, le compagnon virtuel devrait également faire diminuer l'usage du schème trompeur et améliorer les performances.

3. Évaluation de deux méthodes de remédiation au schème trompeur sur micromonde

3.1. Protocole expérimental

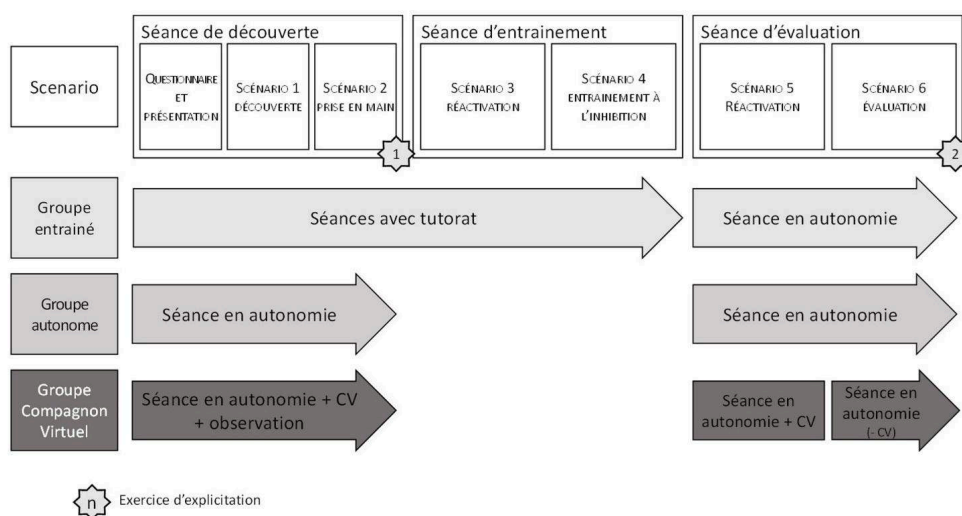
- 32 Les participants sont séparés en trois groupes appelés respectivement « autonome », « entraîné » et « compagnon virtuel », qui diffèrent tant en fonction des scénarios qu'ils rencontrent sur le micromonde que par l'accompagnement dont ils bénéficient.
- 33 Les participants du groupe « autonome » sont laissés seuls dans le micromonde après une présentation de l'environnement et de la tâche (y compris les consignes concernant les vérifications de chaque cadre) par un diaporama. Ils réalisent les scénarios 1, 2, 5 et 6.
- 34 Les participants du groupe « entraîné » réalisent tous les scénarios. Ils sont, de plus, accompagnés par l'expérimentateur lors des quatre premiers scénarios. En plus de recevoir un retour expliquant les résultats qu'ils obtiennent lors de l'exécution de la tâche, ils sont sensibilisés aux différences qui existent entre les cadres et au fait qu'il est trompeur de se fier au résultat du cadre précédent pour régler la machine. En particulier, le scénario 4 doit leur permettre d'éprouver les limites du schème trompeur. Cependant, ils restent libres de leurs actions, ils ne reçoivent pas d'injonctions. Lors des scénarios 5 et 6, ces participants ne sont plus accompagnés ni observés, comme les participants des autres groupes.
- 35 Les participants du groupe « compagnon virtuel » suivent le même protocole que les participants du groupe « autonome », à la différence qu'ils ont accès au compagnon virtuel durant les séances 1, 2 et 5. La séance 6 se réalise sans compagnon virtuel. Il est à noter que ces participants, au contraire des participants du groupe « autonome »,

sont observés pendant les deux premiers scénarios. L'observateur est en retrait en dehors du champ de vision du participant, mais il voit l'écran du participant, ce qui permet de rappeler l'existence du compagnon virtuel si le participant ne le déclenche pas. Le compagnon virtuel leur est présenté lors de la première session, dans le diaporama présentant le micromonde. Pendant l'activité, il est ensuite accessible en appuyant sur la touche F4. La Figure 2 montre la diapositive de présentation du compagnon virtuel. Afin de ne pas influencer l'utilisation que les participants pourraient faire du compagnon virtuel, aucune autre démonstration n'est faite aux participants.

- 36 Enfin les trois groupes remplissent un questionnaire avant le premier scénario et voient le même diaporama de présentation, modulo la diapositive présentant le compagnon virtuel. Ils réalisent tous un exercice visant à déterminer de quelle façon ils procèdent à l'issue des scénarios 2 et 6. Enfin, comme les scénarios sont assez longs à réaliser (environ une heure chacun), les passations sont divisées en séances de deux scénarios chacune. Une semaine sépare la passation de deux séances. Les groupes « autonome » et « compagnon virtuel » réalisent donc deux séances de deux scénarios, soit environ 4 h, alors que le groupe « entraîné » en réalise trois, soit environ 6 h. La Figure 3 résume le déroulement des séances et le protocole expérimental.

Figure 3 : Représentation schématique du protocole expérimental.

Figure 3: Schematic representation of the experimental protocol



3.2. Participants

- 37 Un total de 26 participants a été recruté pour cette étude. Trois ont dû arrêter l'expérience à cause du mal des simulateurs, trois autres, appartenant au groupe « compagnon virtuel », ont été exclus des données, car ils n'ont jamais ouvert l'outil. Au final, les analyses portent sur 20 participants, étudiants et jeunes actifs, recrutés via les listes de diffusions de l'École centrale de Nantes ou autres listes de diffusion. Ils ont entre 20 et 40 ans (moyenne d'âge 26,4 ans, écart-type 4,5 ans).
- 38 Les trois groupes, « autonome » (le groupe témoin), « entraîné » (formé à l'inhibition) et « compagnon virtuel », comportent respectivement six, six et huit participants. En outre, nous avons contrôlé deux facteurs pouvant avoir un effet sur les résultats

obtenus : les habitudes de jeux vidéo et les connaissances antérieures concernant la physique des poutres des participants. En grande majorité, les participants sont de jeunes ingénieurs en cours de doctorat, certains d'entre eux ont donc déjà connaissance des processus physiques en jeu dans le simulateur, c'est pourquoi nous avons testé leurs connaissances préalables sur le sujet. Le Tableau 3 présente la répartition des participants au regard de ces trois éléments, mais l'effet de ces dimensions sur les performances n'est pas traité ici (Hoarau, 2016).

Tableau 3 : Distribution des participants en fonction de leurs connaissances en physiques et de leurs habitudes en jeux vidéo.

Table 3: Distribution of participants based on their physics knowledge and video game habits

Niveau en physique	Pas de connaissances en physique					Sous-total : pas de connaissances en physique	Connaissances en physique					Sous-total : connaissances en physique	Total
	Habitude de jeux vidéo	Jamais	Annuel	Mensuel	Hebdomadaire		Quotidien	Jamais	Annuel	Mensuel	Hebdomadaire		
Autonome	1	1			1	3	2	1				3	6
Entraînés			2		1	3	1			1	1	3	6
CV			2	1	1	5		1		1	1	3	8
Total	1	5	1	1	3	11	3	2	0	2	2	9	20

- 39 Les participants à l'étude sont donc différents des opérateurs de l'atelier étudié : ils n'ont ni la même formation initiale ni la même expérience du domaine. Nos résultats seront donc à valider auprès de la population cible. Cependant, il ne nous a pas semblé pertinent de réaliser les tests sur micromonde auprès de cette population cible : en effet, si le micromonde peut paraître vraisemblable à une personne extérieure au domaine, les dimensions des cadres et les modalités des programmes sont basées sur des approximations et non sur les valeurs réelles. Les opérateurs de l'atelier réel risqueraient de trouver ces valeurs aberrantes, de projeter leurs connaissances et compétences réelles dans l'atelier. De la même façon, former des apprenants novices sur ce micromonde risquerait d'induire des idées infondées sur l'atelier.

3.3. Méthodologie statistique et détection du schème trompeur dans le micromonde

3.3.1. Génération de modèle GLM et comparaison par BIC

- 40 Le détail de la méthode statistique est donné dans Hoarau (2016). Cette méthode consiste à modéliser les données avec des modèles linéaires généralisés (GLM) : construits à partir de nos hypothèses expérimentales, ils permettent de décrire nos données en fonction de nos variables. Les modèles utilisés pour chaque hypothèse sont présentés au fur et à mesure des résultats. Ensuite, nous comparons chacun des modèles ainsi construits en regardant la vraisemblance de chaque modèle au vu des données. Le critère de sélection choisi pour cette comparaison est le BIC (*bayesian information criterion*), un critère conservateur : il est plus susceptible de choisir l'hypothèse nulle que les hypothèses alternatives comparées à d'autres critères

statistiques (Wagenmakers, 2007). Ce critère est adapté pour les petits échantillons comme c'est le cas ici. Au final, le modèle choisi est celui dont le BIC est le plus petit.

3.3.2. Détection statistique du schème trompeur

- 41 Deux méthodes ont été mises en œuvre et croisées pour identifier les schèmes utilisés pour étirer chaque cadre.
- 42 Dans un premier temps, nous déterminons pour chaque participant, grâce à la construction de modèles et à la comparaison avec les BIC, le schème utilisé globalement dans le scénario 6. Pour chaque participant, le micromonde génère automatiquement un tableur Excel regroupant les données du scénario. Pour les huit cadres étirés durant le scénario 6, quatre éléments issus de ce tableur sont utilisés pour identifier le schème mobilisé : le programme utilisé en passe 1, le programme en passe 2, la dernière mesure prise sur le même cadre et la dernière mesure prise sur le cadre précédent. Pour chaque participant, quatre modèles linéaires généralisés (GLM) différents sont établis à partir de ces quatre éléments : le modèle nul, le modèle du schème trompeur, le modèle du schème pertinent et le modèle des deux schèmes. La loi utilisée pour ces modèles est une loi gamma. Pour chaque participant, les modèles sont déterminés avec les huit cadres du scénario 6, soit huit individus statistiques. Ici, nous ne présentons que les éléments liés à la longueur.
- 43 Lorsqu'il est mis en œuvre, le schème trompeur se manifeste de la façon suivante : le participant étire un premier cadre, vérifie le résultat et modifie le programme d'étirage pour le cadre suivant. Statistiquement, il est représenté par un modèle permettant de prédire les paramètres d'étirage en deuxième passe en fonction de la dernière mesure prise sur un autre cadre, en général le cadre précédent.
- 44 S'il ne met pas en œuvre le schème trompeur, le participant peut utiliser un schème pertinent. Celui-ci consiste à modifier les paramètres d'étirage en deuxième passe en fonction des résultats obtenus lors de la première passe pour le même cadre. Statistiquement, ce schème est représenté par un modèle liant les paramètres d'étirage en deuxième passe aux résultats obtenus pour le même cadre à l'issue de la première passe.
- 45 Parfois, certains participants mettent en œuvre les deux schèmes lors du scénario : statistiquement, ces stratégies sont représentées par des modèles qui prédisent le programme d'étirage de deuxième passe en fonction du résultat du cadre précédent et du résultat du premier étirage.
- 46 Enfin, le participant peut ne pas réguler son activité, ou la réguler à partir d'éléments non identifiés : par exemple, un participant a tenté d'étirer les cadres petit à petit, ce qui l'a conduit à de multiples étirages en phase 2 ; nous avons nommé cette procédure « stratégie réactive ». Statistiquement, cela correspond au modèle nul qui ne considère aucun paramètre permettant de prédire le programme d'étirage.
- 47 Dans un second temps, nous avons regardé de façon détaillée les tableaux de chaque participant afin d'attribuer un schème à chaque cadre.
- 48 Lorsque le schème du participant correspond aux modèles schème pertinent ou schème trompeur, les huit cadres étirés par ces participants sont catégorisés avec le schème correspondant, respectivement « schème pertinent » et « schème trompeur ».

- 49 Lorsque les deux schèmes sont apparus, deux possibilités ont été identifiées et codées : soit ils commencent avec le schème trompeur et terminent avec le schème pertinent quand le premier devient inefficace, soit ils regroupent les cadres en fonction du résultat du premier étirage. Ils peuvent ainsi ajuster le programme en fonction du résultat du premier étirage et en fonction du résultat du cadre précédent ayant des caractéristiques proches. Dans le premier cas, nous attribuons à chaque cadre le schème correspondant, soit schème trompeur, jusqu'au changement, puis schème pertinent. Dans le second cas, nous avons appelé la stratégie mise en œuvre stratégie du regroupement et avons codé les cadres avec le code « stratégie regroupement ».
- 50 Enfin, le participant pour qui le modèle nul est apparu a procédé de façon réactive : il a étiré chaque cadre petit à petit jusqu'au résultat désiré ou la rupture du cadre. Nous avons codé les cadres étirés ainsi « stratégie réactive ».
- 51 Au final, quatre façons de procéder ou stratégies sont identifiées : schème pertinent, schème trompeur, stratégie regroupement et stratégie réactive.

3.4. Hypothèses expérimentales et modèles statistiques

- 52 Le schème trompeur observé dans l'atelier devrait se manifester dans le micromonde. En effet, nous retrouvons les mêmes éléments qui peuvent le provoquer : les cadres sont présentés par lot, il n'y a qu'un seul programme de base par type de cadre.
- 53 La formation proposée aux participants du groupe « entraîné » devrait leur permettre de ne pas mettre en œuvre le schème trompeur.
- 54 Enfin, le schème trompeur devrait avoir un effet négatif sur les performances dans le micromonde lors du scénario 6.

4. Résultats

- 55 Les résultats présentés concernent uniquement le scénario 6 pour lequel les participants sont tous en autonomie : leur activité est donc comparable. De plus, le scénario 6 permet de voir se manifester le schème trompeur. En effet, dans les autres scénarios, les cadres étant très proches, le schème trompeur ne devrait pas provoquer de différence de comportement ou de résultats chez les participants le mettant en œuvre et chez ceux qui ne le mettent pas en œuvre. En revanche, les cadres étant différents dans le scénario 6, le schème trompeur devrait se manifester par une façon particulière de régler la machine.

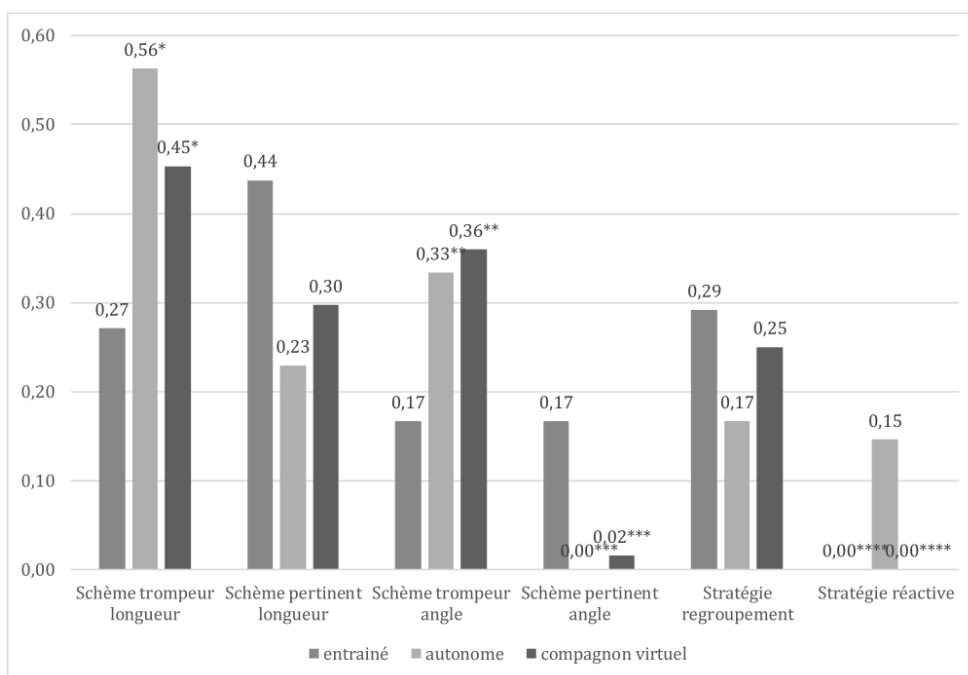
4.1. Différence d'apparition du schème trompeur dans les groupes expérimentaux

- 56 Afin de déterminer si le schème trompeur apparaît de façon différente dans les groupes expérimentaux, nous avons créé de nouveaux modèles statistiques. Ceux-ci visent à déterminer si oui ou non le schème trompeur apparaît différemment dans chacun des groupes expérimentaux, la loi utilisée pour ces modèles linéaires généralisés est donc une loi binomiale. Ici, le modèle « nul » (M0) considère que l'on ne peut pas prédire

l'apparition du schème trompeur en fonction du groupe expérimental. Plusieurs modèles alternatifs sont testés :

- Le modèle alternatif M1 considère que chacun des trois groupes est différent ;
 - Le modèle M2 considère que les groupes compagnon virtuel et autonome sont équivalents mais différent du groupe entraîné,
 - Le modèle M3 considère que les groupes compagnon virtuel et entraîné sont équivalents, mais différent du groupe autonome.
- 57 Un modèle M4, considérant que les groupes autonome et entraîné sont équivalents, avait été testé sur les données de ces deux groupes sans résultat (Hoarau, 2016). Il n'a pas été de nouveau testé ici.
- 58 La comparaison des modèles avec le BIC sélectionne le M2 ($BIC_{M0} = 223,85$, $BIC_{M1} = 225,25$, $BIC_{M2} = 221,49$ et $BIC_{M3} = 224,13$). Nous pouvons donc conclure qu'au vu des données, le schème trompeur apparaît de façon équivalente dans les groupes « compagnon virtuel » et « autonome », mais pas dans le groupe « entraîné ». Ainsi, le schème trompeur apparaît plus fréquemment dans les groupes « autonome » et « compagnon virtuel » (les fréquences respectives sont 0,56 et 0,45) que dans le groupe entraîné ($f = 0,27$). La Figure 4 montre la fréquence d'apparition de chaque schème de chaque catégorie par groupe expérimental, pour les différents critères, notamment le critère de « longueur ».

Figure 4 : Distribution des fréquences pour chaque schème par groupe expérimental.
Figure 4: Frequency distribution for each scheme by experimental group



* et ** sont des valeurs identiques au vu des données d'après les comparaisons des modèles par BIC.
* and ** represent identical values based on data according to model comparisons by BIC

- 59 Cependant, on ne peut pas conclure à la disparition du schème trompeur dans le groupe entraîné. En effet, il existe encore chez ces participants. Il est parfois utilisé de façon simultanée au schème pertinent. Le modèle des deux schèmes apparaît chez deux participants de ce groupe, ceux-ci ont donc soit commencé à l'utiliser puis ils ont

changé de schème, soit ils ont regroupé les cadres afin de pouvoir appliquer le schème trompeur tout en prenant en compte le résultat du premier étirage. On ne peut pas distinguer les trois groupes quant à l'utilisation de cette dernière stratégie d'après nos données.

- 60 En conclusion, les différents schèmes identifiés n'apparaissent pas de façon équivalente dans les différents groupes. Contrairement à ce qui était attendu, le compagnon virtuel ne permet pas de faire disparaître le schème trompeur, les participants de ce groupe le mobilisent de façon équivalente aux participants du groupe autonome. En revanche, comme attendu, les participants du groupe entraîné l'utilisent moins, sans qu'il ait disparu de leur répertoire de schèmes pour autant. On ne note pas de différence entre les trois groupes en ce qui concerne l'utilisation du schème pertinent, notamment du fait de la stratégie de regroupement des cadres.

4.2. Lien entre performances et schème trompeur

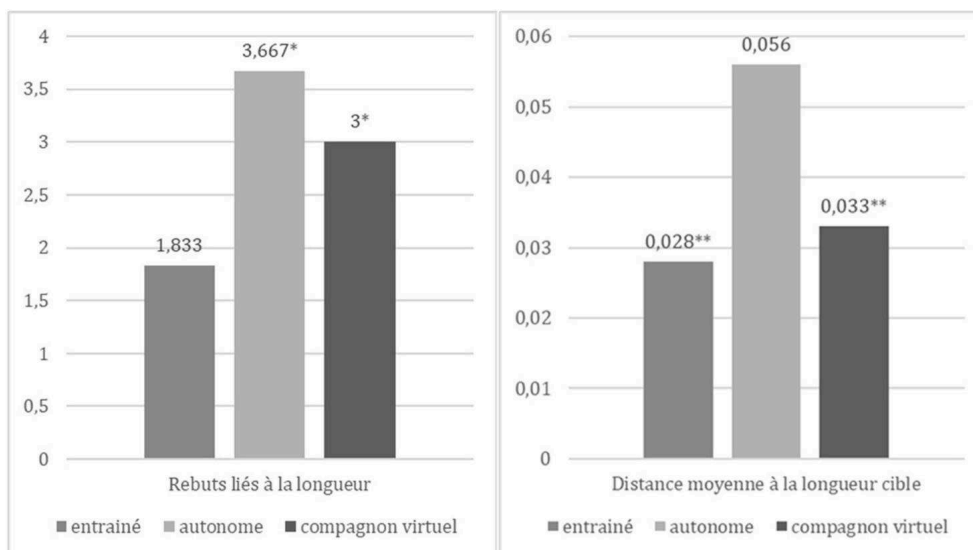
- 61 Nous souhaitons également identifier si le schème trompeur a un effet sur les performances. Or, chaque groupe utilise le schème trompeur. Nous avons donc croisé l'effet du schème trompeur et du groupe expérimental. Comme précisé avant, nous avons déterminé pour chaque cadre s'il était étiré avec le schème pertinent ou avec le schème trompeur, en particulier pour les participants utilisant les deux schèmes. Cela nous permet d'établir un lien entre schème utilisé et performance : pour chaque cadre, nous pouvons dire avec quel schème il a été étiré et quels résultats sont obtenus.
- 62 Nous présentons ici les résultats obtenus en ce qui concerne la longueur comme motif de rebut et en termes de distance à la longueur cible. Ce dernier critère correspond à la précision des participants dans la tâche.

4.2.1. Longueur comme motif de rebut

- 63 Plusieurs modèles linéaires généralisés ont été établis afin de déterminer le ou les facteurs permettant de prédire le résultat pour ce critère. De la même façon que précédemment, le modèle ayant le plus petit BIC est conservé.
- 64 En ce qui concerne la longueur comme motif de rebut, les modèles comparés sont des modèles binomiaux. Le modèle ayant le plus petit BIC est le modèle 2 ($BIC_{M2} = 82,43$, $BIC_{M0} = 82,82$, $BIC_{M1} = 84,87$, et $BIC_{M3} = 83,90$), il est donc le plus ajusté aux données. Ce modèle considère que les groupes « autonome » et « compagnon virtuel » sont semblables au vu des données, mais que le groupe « entraîné » se distingue. Ainsi, les participants des groupes « autonomes » et « compagnon virtuel » échouent plus souvent à cause de la longueur que les participants du groupe entraînés (cf. Figure 5).

Figure 5 : Nombre moyen de cadres mis au rebut par groupe expérimental (à gauche) et distance moyenne à la valeur cible par groupe expérimental (à droite).

Figure 5: Mean number of discarded frames per experimental group (left) and mean distance to targeted value per experimental group (right)



*, ** sont des valeurs identiques au vu des données d'après les comparaisons des modèles par BIC.
*, ** represent identical values based on data according to model comparisons by BIC

4.2.2. Distance à la longueur cible

- 65 En revanche, en ce qui concerne la précision, le groupe « compagnon virtuel » a des performances équivalentes au groupe « entraîné » (cf. Figure 5). Ici, les modèles comparés sont des modèles suivant une loi gamma. En effet, la distance à la longueur cible est une valeur continue. Des modèles suivant une loi gaussienne ont également été vérifiés, mais avec des BIC systématiquement plus élevés. Ici, le modèle ayant le plus petit BIC est le modèle M3 ($BIC_{M3} = -92,71$, $BIC_{M0} = -91,53$, $BIC_{M1} = -89,98$, et $BIC_{M2} = -90,32$). Ainsi, s'ils échouent, les participants du groupe compagnon virtuel échouent de peu. Ils sont aussi précis que les participants du groupe entraîné. Ces deux groupes sont plus performants en termes de précision pour la longueur que ceux du groupe autonome.

4.2.3. Effet croisé du schème utilisé et du groupe expérimental sur la longueur

- 66 Afin d'identifier l'existence d'un potentiel effet croisé entre le schème utilisé et le groupe expérimental utilisé, nous avons comparé 13 modèles (GLM) pour chaque critère d'évaluation. Nous avons gardé le modèle ayant le plus petit BIC.
- 67 Il y a un effet croisé du schème et du groupe expérimental pour les deux critères de longueur. En effet, les modèles ayant le plus petit BIC, pour les critères longueur comme motif de rebut et distance à la longueur cible, sont les modèles qui stipulent que les groupes « compagnon virtuel » et « entraînés » sont équivalents, avec un effet du schème trompeur (voir Tableau 4).

Tableau 4 : BIC des différents modèles pour les deux critères de performances de longueur.
Table 4: BIC of the different models for the two performance criteria

Modèle	M0	MG1	MG2	MG3	MG4	MA1	MA2	MA3	MA4	ME1	ME2	ME3	ME4
Critère de performance													
Rebut lié à la longueur	213,47	218,91	228,51	221,31	221,84	213,47	219,22	217,23	218,07	211,19**	221,81	215,64	219,54
Distance à la longueur cible	-714,19	-719,69	-711,29	-718,29	-711,73	-713,82	-713,44	-716,77	-709,11	-727,43*	-715,78	-720,46	-716,15

Légende : M0 est le modèle nul, les MG sont les modèles qui considèrent les trois groupes comme différents, les MA sont les modèles qui considèrent les groupes compagnon virtuel et autonome comme équivalents, les ME considèrent les groupes compagnon virtuel et entraîné comme équivalents. Le numéro indique le schème avec lequel le groupe est croisé : les M1 croisent groupe et schème trompeur, M2 avec le schème pertinent, M3 avec le regroupement et le M4 avec la stratégie dite réactive. Ainsi, pour le rebut lié à la longueur et la distance à la longueur cible, le modèle ayant le plus petit BIC est le ME1 qui considère que les groupes compagnon virtuel et entraîné sont équivalents et qui croise ce groupe avec le schème trompeur.

*Modèle ayant le plus petit BIC et respectant le critère des deux points de différences avec le BIC du modèle le plus proche.

**Modèle ayant le plus petit BIC mais ne respectant pas le critère des deux points de différence avec le BIC du modèle le plus proche.

M0 is the null model, MGs are the models that consider the three groups to be different, MAs are the models that consider the virtual companion and the autonomous groups as equivalent and MEs are the models that consider virtual companion and trained groups to be equivalent. The number indicates the scheme tested (group and scheme are crossed variables): M1 refers to the misleading scheme, M2 refers to pertinent scheme, M3 to grouping and M4 to reactive. Here, considering length as a motive for discarding the frame and distance to the targeted length, the models with the smallest BIC are the ME1 models which consider the virtual companion and trained groups crossed with thm misleading scheme to be the best model regarding data.

**Model with the smallest BIC and respecting the criterion of two points of difference with the closest BIC.*

***Model with the smallest BIC but not respecting this criterion.*

- 68 Les participants des groupes « compagnon virtuel » et « entraîné » réussissent mieux en l'absence de schème trompeur, pour les critères « longueur comme motif de rebut » et « distance à la longueur cible ». En revanche, les participants du groupe « autonome » n'obtiennent pas de bons résultats en termes de nombre de cadres rebutés à cause de la longueur, que le schème trompeur soit présent ou non (Figure 6). Ils réussissent même mieux lorsque le schème trompeur est présent en termes de distance par rapport à la longueur cible (Figure 7).

Figure 6 : Fréquence des cadres rebutés à cause de la longueur en fonction du groupe expérimental et de la présence du schème trompeur

Figure 6: Frequency of discarded frames due to length as a function of experimental group and misleading scheme presence

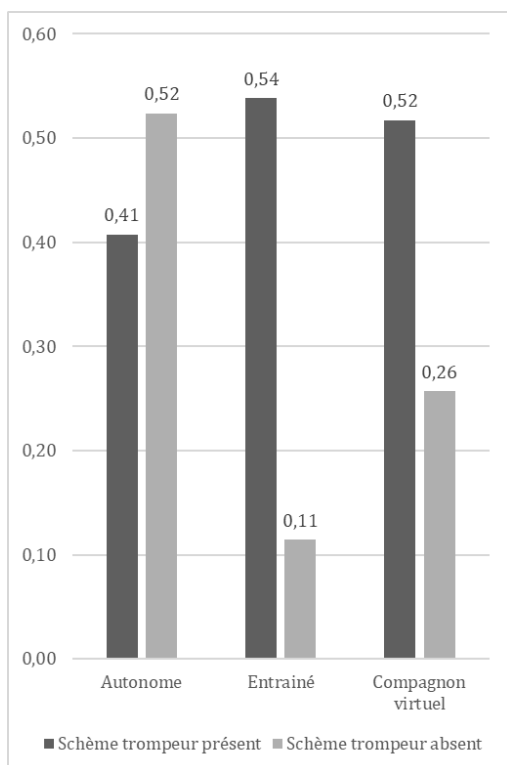
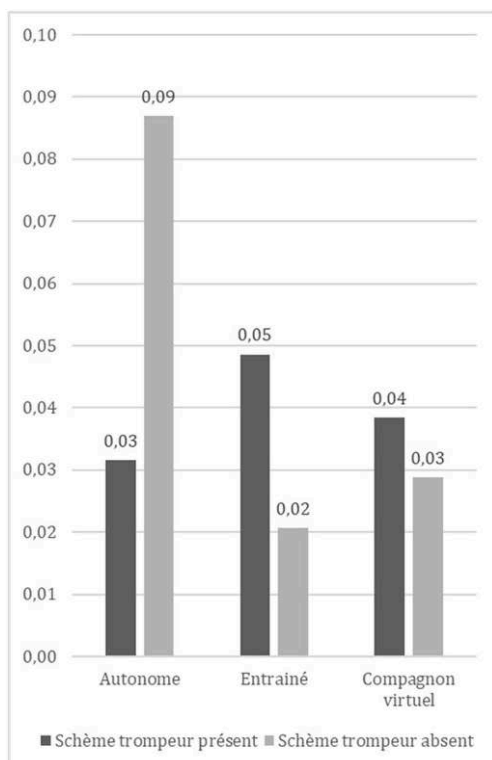


Figure 7 : Moyenne de la distance à la longueur cible en fonction du groupe expérimental et de la présence du schème trompeur.

Figure 7 : Mean distance to the target length as a function of experimental group and misleading scheme presence



4.2.4. Constat concernant les facteurs affectant la performance

- 69 Notre troisième hypothèse, selon laquelle le schème trompeur diminue la performance, est validée, mais uniquement en ce qui concerne la longueur. En effet, on s'attendait à ce que les participants utilisant le compagnon virtuel sans le schème trompeur soient plus précis que les autres. C'est effectivement ce que nous avons constaté.
- 70 Ces participants ont des performances similaires à celles des participants ayant bénéficié d'une formation, c'est-à-dire les participants du groupe « entraîné ». Par ailleurs, les participants qui ont utilisé le compagnon virtuel lors des premières sessions et qui n'ont pas utilisé le schème trompeur sont également comparables aux participants du groupe « entraîné » en termes de longueur comme motif de rebut. Leurs performances sur ces deux critères sont donc meilleures que celles des participants du groupe « autonome ». En revanche, en présence du schème trompeur, ils sont moins performants. Ils se rapprochent alors des participants du groupe « entraîné » utilisant le schème trompeur et des participants du groupe « autonome ».
- 71 Il est à noter que d'autres critères d'évaluation ne sont pas présentés ici, comme les critères relatifs à l'angle ou la réussite globale du cadre. Pour ces critères, les mêmes méthodes statistiques ont été utilisées et ont montré que l'utilisation de la stratégie de regroupement est la plus efficace. Ce résultat est vrai quel que soit le groupe de participants. Il n'y a donc pas ici d'effet du compagnon virtuel. Notre hypothèse n'est donc pas validée en ce qui concerne l'angle ou la réussite du cadre. Il est à noter que l'angle était plus difficile à traiter que la longueur : il était nécessaire de modifier le

programme dès la première passe et donc d'anticiper les problèmes éventuels. Les échecs imputables à l'angle sont donc plus nombreux et affectent la réussite globale du cadre (Hoarau, 2016).

5. Discussion

- 72 Le schème trompeur apparaît bien chez les participants du micromonde lors du scénario 6, ce qui laisse entendre que ce micromonde permet une comparaison de l'activité des opérateurs réels et des participants à cette étude. En particulier, le micromonde tel qu'il a été conçu permet d'étudier l'effet théorique du schème trompeur sur les performances : c'est bien la mise en œuvre de ce schème trompeur qui provoque des erreurs dans le micromonde. Cela interroge également la genèse du schème trompeur : le fait qu'il apparaisse rapidement dans le micromonde (en quatre heures) semble indiquer une origine ontogénétique et non une origine purement intrinsèque à l'atelier. En effet, on peut lier le schème trompeur au biais d'appariement : la situation favoriserait son activation et les participants le mobiliseraient dans cette situation pour résoudre la tâche. De plus, dans l'atelier, la prescription pouvait induire ce schème trompeur. En effet, dans l'atelier, il était demandé de ne mesurer qu'un seul cadre et les modifications de programme étaient interdites : les opérateurs avaient donc peu d'occasions d'expérimenter et de développer ainsi leur compréhension du process d'étirage. On aurait donc pu attribuer à cette organisation contrainte l'apparition du schème trompeur. Or, dans le micromonde, le prescrit insiste sur le fait de traiter les cadres individuellement et les modifications sont autorisées. De plus, les participants appartenant aux groupes « entraîné » ou « compagnon virtuel » bénéficient d'opportunités pour expérimenter sans que le schème trompeur disparaisse chez eux pour autant. Il serait donc intéressant d'étudier plus en détail l'origine de ce schème trompeur. De futures études pourraient donc s'intéresser aux caractéristiques de la situation qui favorisent sa mise en œuvre en lien avec la théorie des champs conceptuels (Vergnaud, 1991).
- 73 Un second résultat intéressant est celui de l'effet de l'entraînement que nous avons élaboré sur le schème trompeur. Cette formation succincte permet de limiter l'apparition de ce schème trompeur ; cependant, on ne peut pas considérer qu'elle l'élimine totalement. En effet, certains des participants qui ont été sensibilisés au schème trompeur le mettent en œuvre sur quelques cadres avant de constater son inefficacité et de changer de stratégie. D'autres le mobilisent de façon détournée, en regroupant les cadres, ce qui leur permet de réussir la tâche.
- 74 Deux hypothèses peuvent apporter des éléments de réponse expliquant ce phénomène.
- 75 La première hypothèse concerne le coût cognitif engagé lors de l'utilisation de ce schème trompeur. En effet, si les participants mobilisent ce schème trompeur alors qu'ils devraient avoir développé des invariants opératoires concernant son efficacité limitée, il est fort probable que ce schème trompeur soit peu coûteux à mettre en œuvre pour ces participants. Le simulateur, en externalisant les calculs à mettre en œuvre, ne semble pas non plus suffisant pour faire diminuer le coût cognitif lié au schème pertinent.
- 76 La seconde hypothèse est que le schème trompeur, tout comme une heuristique de décision, permet dans certaines situations de résoudre le problème posé, comme le

montrent les meilleurs résultats des participants du groupe autonome pour l'écart à la longueur cible lorsqu'ils utilisent ce schème trompeur. Il est donc valide de l'utiliser le plus souvent sans que cela ait d'effets négatifs sur les résultats, et chaque utilisation fructueuse de ce schème trompeur va le renforcer. Dans ce cas, la simple présentation d'une simulation permettant d'anticiper les résultats à moindre coût, même si elle est cohérente avec le schème pertinent, risque de ne pas suffire. Il faudra donc travailler explicitement l'inhibition du schème trompeur (Moutier, Angeard, & Houdé, 2002).

- 77 Le dernier résultat intéressant obtenu concerne les effets du schème trompeur en lui-même. En effet, dans le micromonde, il a un effet négatif sur les performances, mais uniquement chez les participants des groupes « entraîné » et « compagnon virtuel ». On peut expliquer ce résultat car les participants du groupe « autonome » ont des résultats faibles quel que soit le schème qu'ils utilisent. En revanche, les participants des groupes « entraîné » et « compagnon virtuel » sont capables d'obtenir de bons résultats lorsqu'ils ne mobilisent pas le schème trompeur. En effet, il semble que ces derniers aient réussi à développer des règles, d'après la définition de la taxonomie SRK, c'est-à-dire qu'ils sont capables d'associer une mesure obtenue à un réglage précis de la machine. En effet, ces participants rebutent moins de cadres à cause de la longueur, mais ils sont également plus précis, c'est-à-dire plus proches de la longueur cible. Les participants du groupe « autonome », vu le temps limité de l'expérimentation, n'ont pas eu le temps ni les occasions nécessaires pour développer de telles règles, contrairement au groupe « entraîné » grâce à l'accompagnement et à la séance supplémentaire, ou au groupe « compagnon virtuel » grâce aux possibilités d'expérimentation portées par celui-ci.
- 78 Cependant, si les participants des groupes « entraîné » et « compagnon virtuel » possèdent ces règles, l'utilisation du schème trompeur empêche de les utiliser correctement. En effet, le paramètre d'ajustement qu'ils utilisent, i.e. le résultat du cadre précédent, rend caduque l'application de la bonne règle en présence du schème trompeur. Au contraire, utiliser la même règle à partir des résultats du cadre en cours est la seule façon d'obtenir un bon résultat dans le scénario 6.
- 79 Trois éléments concernant le compagnon virtuel émergent également.
- 80 Le premier élément concerne l'utilisation du compagnon virtuel. Deux participants n'ont pas pu l'utiliser et un troisième ne l'a même pas essayé. Cela donne une indication sur la facilité d'utilisation du compagnon virtuel, en référence à la notion d'utilisabilité (Tricot *et al.*, 2003 ; Tricot & Tricot, 2000).
- 81 Le second élément d'interrogation soulevé par cette étude est que l'interface de notre compagnon virtuel ne fait pas disparaître le schème trompeur. Ainsi, donner une représentation correcte, inspirée d'une représentation de la physique du procédé contrôlé, comme préconisé pour la conception d'interface écologique (Bennett & Flach, 2011), n'est pas suffisant dans notre cas d'étude. Il serait intéressant d'approfondir cet aspect pour pouvoir le généraliser : en effet, les interfaces écologiques sont conçues pour pouvoir être utilisées de façon plus ou moins intuitive ou automatisée, le problème rencontré ici pourrait donc potentiellement se retrouver dans d'autres situations. Les participants ayant mis en œuvre le schème trompeur utilisent en général le compagnon pour le premier cadre et appliquent ensuite le réglage obtenu aux cadres suivants appartenant au même lot. Notre hypothèse, stipulant que la représentation dans le compagnon virtuel d'un cadre indépendamment des autres devrait favoriser l'apparition du schème pertinent et par conséquent diminuer le

schème trompeur, n'est pas vérifiée. Une formation à l'inhibition du schème trompeur, inspirée de l'inhibition aux biais de raisonnement (Moutier, Angeard, & Houdé, 2002), semble donc indispensable à la bonne utilisation du compagnon virtuel. Dans l'atelier réel, des temps d'échanges autour des problèmes rencontrés sont préconisés.

- 82 Malgré ces éléments négatifs, le troisième élément est encourageant. En effet, lorsqu'il est utilisé sans le schème trompeur, le compagnon virtuel améliore la performance en ce qui concerne la précision. Il semble donc que le compagnon virtuel facilite l'apprentissage des règles au sens de Rasmussen (1983) : les participants, pour obtenir une bonne performance sur ce critère, ont besoin de déterminer une valeur précise à entrer dans le programme et qui corresponde à la mesure effectuée. Ils pourraient l'obtenir soit en faisant des calculs, et donc en se basant leurs comportements sur des symboles, soit en utilisant des règles prédéterminées, basées sur des signes préalablement identifiés et consolidés par répétitions (Hoc, 2005). Cependant, les calculs à réaliser ici sont complexes et peu envisageables en l'absence d'outils, ce que les participants n'ont pas à disposition. Il semble donc probable que les participants aient développé des règles leur permettant de réaliser la tâche sans outils tout en restant performants. En effet, les participants qui n'ont pas appliqué le schème trompeur et n'ont pas fait d'erreurs dans le protocole ont de très bons résultats durant le scénario 6. Ces résultats montrent que l'utilisation du compagnon virtuel permet à ces participants d'apprendre rapidement à maîtriser la machine d'étirage : ils sont plus performants, que ce soit dans la réussite des cadres ou dans la précision, même lorsque le compagnon n'est plus disponible. On peut donc en déduire que l'interface du compagnon virtuel favorise l'élaboration par les participants de règles précises concernant les liens entre mesures prises au premier étirage et programme de la machine, règles toujours mobilisables en l'absence du compagnon virtuel. Cependant, ces règles restent à consolider. En effet, certains participants ayant utilisé le compagnon virtuel utilisent encore la stratégie qui consiste à regrouper les cadres en fonction du résultat du premier étirage. Cette stratégie doit leur permettre d'ajuster plus finement les programmes. De plus, certains des participants ayant utilisé le compagnon virtuel sont également capables de mettre en place des actions correctrices appropriées dès le premier cadre étiré. Enfin, nous n'avons pas évalué la compréhension du processus physique sous-jacent à l'étirage des cadres lors de notre étude. Il serait intéressant d'évaluer si le compagnon virtuel permet un apprentissage à ce niveau également.

6. Conclusions

- 83 L'utilisation du micromonde nous a permis d'étudier de façon plus détaillée le schème trompeur que l'étude de l'atelier réel et plusieurs conclusions peuvent dépasser le cas particulier de l'atelier évoqué dans cet article.
- 84 L'étude présentée dans cet article a consolidé des recommandations, issues de l'observation du terrain d'étude, quant au développement d'une interface graphique d'assistance au procédé de fabrication à mettre en œuvre dans l'atelier. En effet, au vu des résultats obtenus, il semble important de limiter l'utilisation du schème trompeur. Pour ce faire, l'interface de l'assistant devra transmettre une représentation complète de l'activité, comme soutenu dans le cadre de la conception d'interface écologique (Flach *et al.*, 1998). Elle soutiendrait ainsi différents niveaux d'activité chez l'opérateur,

tant au niveau des règles qu'il utilise que de sa représentation de la tâche. Cependant, une formation initiale, intégrant un volet visant à inhiber le schème trompeur (Moutier, Angeard, & Houdé, 2002), devra être mise en œuvre avant l'utilisation d'une telle interface. De façon générale, la recommandation visant à intégrer la simulation dans un protocole de formation et à accompagner la réflexivité des apprenants, notamment par un débriefing approprié (Pastré, 2005), semble se vérifier ici. Ainsi, nous avons proposé d'intégrer un dispositif d'échanges autour des problèmes rencontrés dans le processus de production et lors de l'utilisation du simulateur. Celui-ci devrait donner la possibilité aux opérateurs de partager les résultats du simulateur, mais aussi de filmer ou photographier le processus de production pour transmettre au technicien d'industrialisation des traces de leur activité et ainsi initier ou alimenter des temps d'échanges entre les différents acteurs impliqués dans la production.

- 85 Enfin, le micromonde pourrait à nouveau être utilisé afin de tester virtuellement les effets d'une telle interface sur le schème trompeur avant les tests et le déploiement effectif dans l'atelier.
- 86 Ainsi, l'utilisation du micromonde s'est ici inscrite dans notre démarche de conception. Le micromonde apporte des éléments intéressants qui rendent sa mobilisation avantageuse dans notre étude. Ainsi, bien que son déploiement ait été long et coûteux, ce qui ne rend pas cet outil accessible pour des études devant être menées rapidement, il pourrait être de nouveau mobilisé pour des études ultérieures en recherche ou en conception. L'utilisation du micromonde permet de contrôler les différentes caractéristiques de la tâche d'étirage de cadre, et de nouveaux scénarios, situations ou protocoles expérimentaux pourraient facilement y être implémentés. Le micromonde permet de récolter des traces de l'activité, et il nous a permis de caractériser des schèmes d'action, ce qui en fait un outil intéressant dans la recherche sur les activités en situation : intermédiaire entre le laboratoire et le terrain, il permet d'aller au-delà de l'évaluation des connaissances ou des fonctions cognitives pour mesurer les stratégies de résolution de problème des participants. Ici, nous avons notamment contribué à montrer l'existence d'un schème trompeur chez des adultes. Bien entendu, dans notre cas, il serait intéressant d'élargir le public participant à l'étude pour avoir des résultats plus généralisables. Enfin, les résultats restent également à être confirmés auprès des opérateurs de l'atelier réel.
- 87 En ce qui concerne le compagnon virtuel, bien que certains éléments de son interface puissent être encore améliorés et approfondis, elle semble prometteuse. Cependant, au vu des résultats obtenus dans cette étude, l'utilisation du compagnon virtuel ne remplacera pas l'accompagnement visant à inhiber le schème trompeur. De plus, le compagnon présenté ici n'est pas exhaustif. Le compagnon virtuel qui sera introduit dans l'atelier prendra également en compte la géométrie de la pièce, en relation avec les outils disponibles et les contraintes internes créées dans le matériau lors du processus d'étirage. Un soin particulier devra être apporté au respect des liens entre les différents éléments entrant en jeu pour les intégrer dans une même interface (Mazaeva & Bisantz, 2014). Cependant, la représentation simultanée de ces éléments sur un même écran peut s'avérer complexe. La taille de l'écran, celle d'une tablette tactile, sera une contrainte majeure.
- 88 D'autre part, le véritable compagnon virtuel s'adressera à des opérateurs confirmés déjà sensibilisés aux problèmes liés à la non-homogénéité des cadres dans un lot. Parmi ces opérateurs, les deux schèmes semblent être en concurrence, mais le schème

pertinent est difficile à mettre en œuvre en raison du manque d'informations. L'utilisation du compagnon virtuel peut ne pas avoir le même effet sur eux. Par conséquent, l'introduction d'un véritable compagnon virtuel devrait être accompagnée et testée. Il faudra en particulier interroger l'usage de la simulation en temps réel et documenter la genèse instrumentale qu'elle provoquera (Rabardel, 1995).

- 89 Enfin, dans l'atelier, les différents niveaux hiérarchiques rencontrés, de l'opérateur au chef de ligne en passant par le technicien d'industrialisation, semblent convaincus que le respect des normes de sécurité passe par la mise en place d'un protocole de production standardisé et figé, conformément au schème trompeur. Si les conséquences du schème trompeur sur les résultats d'étirage et d'enroulement n'ont pas été démontrées en conditions réelles, une plus grande flexibilité pourrait être bénéfique au processus tant pour le critère d'allongement que géométrique.

BIBLIOGRAPHIE

- Bennett, K. B., & Flach, J. M. (2011). *Display and interface design: Subtle science, exact art*. CRC Press.
- Boring, R., Ulrich, T., Lew, R., & Skogstad, M. R. (2019). Human reliability studies with microworld simulators. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 63(1), 1829-1833. <https://doi.org/10.1177/1071181319631314>
- Boucheix, J.-M. (2003). Simulation et compréhension de documents techniques : le cas de la formation des grutiers. *Le travail humain*, 66(3), 253-282. <https://doi.org/10.3917/th.663.0253>
- Bruner, J. S. (1983). *Le développement de l'enfant : Savoir faire, savoir dire*. Paris:PUF.
- Christoffersen, K., Hunter, C. N., & Vicente, K. J. (1996). A longitudinal study of the effects of ecological interface design on skill acquisition. *Human Factors*, 38(3), 523-541. <https://doi.org/10.1518/001872096778701917>
- Christoffersen, K., Hunter, C. N., & Vicente, K. J. (1998). A longitudinal study of the effects of ecological interface design on deep knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies*, 48(6), 729-762.
- Flach, J. (2017). Supporting productive thinking: The semiotic context for Cognitive Systems Engineering (CSE). *Applied Ergonomics*, 59, 612-624.
- Flach, J. M., Tanabe, F., Monta, K., Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1998). An ecological approach to interface design. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 42(3), 295-299. Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Hoarau, M. (2016). *Présence d'un schème trompeur dans un atelier d'aéronautique : manifestations et remédiation - Assistance aux procédés de fabrication dans les ateliers du futur*. Thèse de doctorat de l'Université de Rennes 2.
- Hoarau, M., Charron, C., & Mars, F. (2018). Revealing misleading schemes through operator activity analysis: A factory case study. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 28(6), 360-371.

- Hoc, J.-M. (2005). Cooperation between human cognition and technology in dynamic situations. In *Intelligence and Technology : The Impact of Tools on the Nature and Levels of Human Ability* (pp. 135-157). Routledge.
- Hoc, J.-M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(1), 22-55.
- Houdé, O. (2014). Inhiber pour raisonner : Le système 3 (exécutif). In *Le raisonnement* (pp. 73-111). Paris : PUF, coll. Que sais-je ?.
- Im-Bolter, N., Johnson, J., Ling, D., & Pascual-Leone, J. (2015). Inhibition: mental control process or mental resource ? *Journal of Cognition and Development*, 16(4), 666-681. <https://doi.org/10.1080/15248372.2014.930743>
- Jamieson, G. A., & Vicente, K. J. (2001). Ecological interface design for petrochemical applications : Supporting operator adaptation, continuous learning, and distributed, collaborative work. *Computers & Chemical Engineering*, 25(7-8), 1055-1074. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(01\)00678-0](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(01)00678-0)
- Mayen, P. (2019). Chapitre 12. Gérard Vergnaud et la conceptualisation dans l'action. In C. Philippe & P. Mayen (dir.), *Psychologies pour la formation* (pp. 207-221). Paris : Dunod. <https://doi.org/10.3917/dunod.carre.2019.02.0207>
- Mazaeva, N., & Bisantz, A. M. (2014). Ecological Displays, information integration, and display format. An empirical evaluation across multiple small displays. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 8(2), 137-161.
- Moutier, S., Angeard, N., & Houdé, O. (2002). Deductive reasoning and matching-bias inhibition training: Evidence from a debiasing paradigm. *Thinking & Reasoning*, 8(3), 205-224.
- Pascual-Leone, J. (2013). Can we model organismic causes of working memory, efficiency and fluid intelligence? A meta-subjective perspective. *Intelligence*, 41(5), 738-743. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2013.06.001>
- Pascual-Leone, J., & Irwin, R. R. (1994). Noncognitive factors in high-road/low-road learning: I. Modes of abstraction in adulthood. *Journal of Adult Development*, 1(2), 73-89.
- Pascual-Leone, J., Johnson, J., & Agostino, A. (2010). Mental Attention, Multiplicative Structures, and the Causal Problems of Cognitive Development. In M. Ferrari & L. Vuletic (Eds.), *The Developmental Relations among Mind, Brain and Education* (pp. 49-82). Springer Netherlands.
- Pastré, P. (dir.). (2005). *Apprendre par la simulation. De l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. Toulouse : Octarès.
- Pastré, P., Parage, P., Richard, J.-F., Sander, E., Labat, J.-M., & Fattersack, M. (2009). La résolution de problèmes professionnels sur simulateur. *Activités*, 6(1), 3-28.
- Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies ; approche cognitive des instruments contemporains*. Paris : Armand Colin.
- Ragsdale, A., Lew, R., Dyre, B. P., & Boring, R. L. (2012). Fault diagnosis with multi-state alarms in a nuclear power control simulator. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 56(1), 2167-2171. Los Angeles, CA: Sage Publications.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics*, 13, 257-266.

- Rasmussen, M., Laumann, K., & Boring, R. (2019). Looking for Additional Data Sources for HRA: Microworlds and Beyond. In *AHFE 2018 International Conference on Human Error, Reliability, Resilience, and Performance* (pp. 310-318). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94391-6_29
- Tricot, A., Plegat-Soutjis, F., Camps, J.-F., Amiel, A., Lutz, G., & Morcillo, A. (2003). Utilité, utilisabilité, acceptabilité : Interpréter les relations entre trois dimensions de l'évaluation des EIAH. In *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain 2003* (pp. 391-402).
- Tricot, A., & Tricot, M. (2000). Un cadre formel pour interpréter les liens entre utilisabilité et utilité des systèmes d'information. In *Ergo-IHM 2000*. Association Francophone d'Interaction Homme-Machine.
- Ulrich, T., Boring, R., & Lew, R. (2019). Extrapolating nuclear process control microworld simulation performance data from novices to experts—A preliminary analysis. In *AHFE 2018 International Conference on Human Error, Reliability, Resilience, and Performance* (pp. 283-291). https://doi.org/10.1007/978-3-319-94391-6_26
- Vergnaud, G. (1991). La théorie des champs conceptuels. *Recherche en Didactique des Mathématiques*, 10(2.3), 135-170.
- Vergnaud, G. (1999). Le développement cognitif de l'adulte. In P. Carré & P. Caspar (Eds.), *Traité des Sciences et des techniques de la formation* (pp. 189-199). Paris : Dunod.
- Vicente, K. J. (2002). Ecological interface design: Progress and challenges. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44(1), 62-78.
- Wagenmakers, E.-J. (2007). A practical solution to the pervasive problems of *p* values. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14(5), 779-804. <https://doi.org/10.3758/BF03194105>

RÉSUMÉS

Cette étude cherche à investiguer un schème trompeur, apparu dans un atelier d'aéronautique, elle cherche également à tester des formes de remédiations possibles. Un schème trompeur est un schème activé par des caractéristiques trompeuses de la situation et qui peut diminuer la performance. Un tel schème avait été identifié chez des opérateurs dans un atelier d'étirage de cadres métalliques. Il se manifestait par l'utilisation des résultats obtenus sur un cadre afin de paramétrer une machine d'étirage pour les cadres suivants. L'étude de ce schème trompeur s'étant révélée difficile dans l'atelier réel, le paradigme du micromonde est utilisé afin d'évaluer deux formes de remédiation : une formation succincte à l'inhibition du schème trompeur et une simulation en temps réel. Le schème trompeur apparaît chez les participants « tout venant » dans l'étude sur le micromonde comme il apparaissait chez les opérateurs de l'atelier. De plus, dans le micromonde, le schème trompeur provoque une diminution des performances. L'outil de simulation en temps réel ne permet pas de faire disparaître le schème trompeur même s'il semble permettre aux utilisateurs d'apprendre à affiner les règles guidant le réglage de la machine-outil. L'article pose ainsi la question de la persistance d'un schème trompeur et de la pertinence de l'utilisation de la simulation en temps réel sans accompagnement pour éviter son utilisation dans une situation où il n'est pas pertinent.

This study aims to investigate a misleading scheme that occurred in an aeronautic workshop, and to test possible forms of remediation. A misleading scheme is a scheme activated by deceptive characteristics of the situation which might reduce performance. Such a scheme had been identified among operators in a metal frame stretching workshop: they used the results obtained

on one frame to program a stretching machine for subsequent frames. As it proved difficult to study this misleading scheme in the real workshop, the microworld paradigm was used for this research to evaluate two forms of remediation: a brief training course in the inhibition of the misleading scheme and a real-time simulation program. The misleading scheme appeared among the “naïve” participants in the same way it had appeared among the operators in the real workshop. Moreover, in the microworld the misleading scheme led to a decrease in performance. The real-time simulation tool did not lead to the disappearance of the misleading scheme, even though it seemed to allow users to learn how to refine the rules guiding the machine tool settings. The article thus raises the question of the persistence of a misleading scheme and the relevance of using real-time simulation without support to avoid its use in a situation where it is not relevant.

INDEX

Mots-clés : industrie, simulation en temps réel, schèmes trompeurs

Keywords : industry, real-time simulation, misleading schemes

AUTEURS

MARIE HOARAU

Université de Lille, CIREL (UR 4354)

marie.hoarau_AT_univ-lille.fr

FRANCK MARS

Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, LS2N, UMR 6004, Nantes, France

CAMILO CHARRON

Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, LS2N, UMR 6004, Nantes, France

Université de Rennes 2, Rennes, France