HAL
open science

Présence d'un schème trompeur dans un atelier d'aéronautique : manifestations et remédiation

Marie Hoarau

To cite this version:

Marie Hoarau. Présence d'un schème trompeur dans un atelier d'aéronautique : manifestations et remédiation. Psychologie. Unversité de Rennes 2, 2016. Français. NNT : . tel-02938135

HAL Id: tel-02938135

https://hal.science/tel-02938135

Submitted on 14 Sep 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE / UNIVERSITÉ RENNES 2
sous le sceau de l'Université Européenne de Bretagne
pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ RENNES 2
Mention : Psychologie cognitive
École doctorale Sciences Humaines et Sociales

présentée par
Marie Hoarau
Préparée à l'Unité Mixte de recherche (n°6597)
Institut de Recherche en Communication et Cybernétiques de Nantes

PRÉSENCE D'UN SCHÈME TROMPEUR DANS UN ATELIER D'AÉRONAUTIQUE : MANIFESTATIONS ET REMÉDIATION

Assistance aux procédés de fabrication dans les ateliers du futur

Thèse soutenue le 22 juin 2016
devant le jury composé de :

Julien CEGARRA
Professeur des universités, Institut National Universitaire Champollion/ *Rapporteur*

Jérôme DINET
Professeur des universités, Université de Lorraine / *Rapporteur*

Franck MARS
Chargé de recherche CNRS, IRCCyN / *Co-directeur de thèse*

Camilo CHARRON
Maitre de conférences, Université Rennes 2 / *Directeur de thèse*

SOUS LE SCEAU DE L'UNIVERSITÉ EUROPEENNE DE BRETAGNE

UNIVERSITÉ RENNES 2

École Doctorale - Sciences Humaines et Sociales

Unité de Recherche : IRCCyN (UMR 6597)

Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes

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

Discipline : Psychologie cognitive

Présentée par Marie HOARAU

Directeur de thèse : Camilo CHARRON

Soutenue le 22 juin 2016

Jury :

Julien CEGARRA, Professeur des universités, Institut National Universitaire Champollion (*rapporteur)*

Jérôme DINET, Professeur des universités, Université de Lorraine (*rapporteur)*

Franck MARS, Chargé de recherche CNRS, IRCCyN (*co-directeur de thèse)*

Camilo CHARRON, Maitre de conférences, Université Rennes 2 (*directeur de thèse)*

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE 5
ASSISTANCE AUX PROCÉDÉS DE FABRICATION DANS UNE SITUATION DYNAMIQUE 9
I. Définition d'une situation dynamique 9
I.1. Caractéristiques d'une situation dynamique et processus cognitifs impliqués 9
I.2. Exemple d'environnement dynamique en situation de travail 12
II. Analyse cognitive du travail et conception d'interface écologique 14
II.1. L'analyse cognitive du travail 14
II.2. La conception d'interfaces écologiques 14
III. Le modèle du contrôle cognitif de Hoc et Amalberti (2007) 20
III.1. Maitrise de la situation 20
III.2. Axes symbolique/subsymbolique et origine des données 21
III.3. Le compromis cognitif 23
III.4. Étude utilisant le contrôle cognitif tel que défini par Hoc et Amalberti 24
IV. Utilisation de la simulation dans la prise de décision 25
DÉVELOPPEMENT DES COMPÉTENCES 28
I. L'expertise 28
I.1. Une définition de l'expertise 28
I.2. Utilisation des études sur l'expertise 31
I.3. Limites et interrogations concernant l'expertise 31
II. Le développement dans la littérature classique : une définition de la compétence 32
II.1. Les ressorts de l'apprentissage et du développement des compétences 32
II.2. Obstacles, schèmes trompeurs et conceptions erronées 37
II.3. Les schèmes dans le support aux procédés de fabrication 39
III. Conclusion 41
QUESTIONS EN SUSPENS ET PRÉSENTATION DES CONTRIBUTIONS EMPIRIQUES 42
I. Synthèse théorique et hypothèse générale 42
I.1. Lien entre les différents modèles 42
I.2. Hypothèse théorique 44
II. Méthodologie 44
II.1. Analyse du domaine de travail et activité des opérateurs 44
II.2. Développement du micromonde et étude du schème trompeur 45
II.3. Test d'une interface dans le micromonde 46
III. Méthodologie statistique 46
IV. Conclusion 48
ÉTUDE 1 : ANALYSE DE L'ACTIVITÉ D'OPÉRATEURS SUR UN POSTE D'ÉTIRAGE DE CADRE DANS UN ATELIER D'AÉRONAUTIQUE 50
I. Position du problème 50
I.1. Objectifs 50
I.2. Présentation du travail dans l'atelier 51
I.3. Hypothèses 54
II. Phase 1 : comprendre le cas d'étude 55
II.1. Méthode 55
II.2. Résultats : hiérarchie d'abstraction 57
II.3. Discussion 60
III. Phase 2 : extraire les schèmes 61
III.1. Méthode 61
III.2. Résultats 62
III.3. Discussion 65
IV. Phase 3 : manifestations comportementales des contenus de représentations 66
IV.1. Méthode 66
IV.2. Résultats 67
IV.3. Discussion 70
V. Discussion générale 73
V.1. Résumé des résultats obtenus 73
V.2. Caractéristiques psychologiques des opérateurs 75
V.3. Conséquences pour l'interface du compagnon virtuel 77

ÉTUDE 2 : ÉTUDE DU SCHÈME TROMPEUR, DE SON ORIGINE ET DE SES LIENS AVEC LES PERFORMANCES AU MOYEN D'UN MICROMONDE 79
I. Introduction 79
II. Méthode 81
II.1. Participants 81
II.2. Micromonde et tâche d'étirage 82
II.3. Procédure 87
III. Hypothèses 92
III.1. Hypothèses concernant l'existence du schème trompeur 92
III.2. Hypothèses concernant la provenance du schème trompeur 93
III.3. Hypothèses concernant le lien entre schème trompeur, entrainement et performances 94
IV. Résultats 95
IV.1. Existence du schème trompeur 95
IV.2. Provenance du schème trompeur 98
IV.3. Lien entre schème trompeur, groupe expérimental et performances 102
V. Discussion 109
V.1. Existence du schème trompeur 109
V.2. Origine du schème trompeur 109
V.3. Lien entre schème trompeur et performances 112
V.4. Groupe expérimental, schème trompeur et performances 113
V.5. Conclusion 114
ÉTUDE 3 : RELATION ENTRE UTILISATION D'UN COMPAGNON VIRTUEL, APPARITION DES SCHÈMES ET PERFORMANCES DANS LE MICROMONDE 115
I. Introduction 115
II. Méthode 116
II.1. Participants 117
II.2. Le compagnon virtuel 118
II.3. Procédure 122
III. Hypothèses 124
IV. Résultats 125
IV.1. Apparition du schème trompeur 125
IV.2. Performances obtenues 127
IV.3. Étude clinique des conduites 135
IV.4. Synthèse des résultats obtenus lors des deux études sur le micromonde 139
V. Discussion 141
VI. Conclusion 145
CONCLUSION GÉNÉRALE 146
I. Synthèse des résultats obtenus 147
II. Apports et limites 149
III. Perspectives 151
BIBLIOGRAPHIE 152
ANNEXES 160
Annexe 1 : grilles d'entretien de l'étude 1 160
Annexe 2 : extraits des analyses en terme de schèmes des entretiens de l'étude 1 163
Annexe 3 : représentation schématique des schèmes relatifs à l'étirage des opérateurs 174
Annexe 4 : tableaux des modèles sélectionnés par les analyses. 175
Annexe 5 : questionnaire administré aux participants à l'étude 2 et 3 176
Annexe 6 : grille d'encadrement des participants à l'étude 2 du groupe « entrainés » 177
Annexe 7 : tableaux des programmes et mesures de l'étude 2 178
Annexe 8 : exemples d'identification de schèmes 184
Annexe 9 : analyses statistiques de l'étude 2 185
Annexe 10 : Analyses PLS de l'étude 2 193
Annexe 11 : tableaux des programmes et mesures de l'étude 3 197
Annexe 12 : méthodologie statistique utilisée dans l'étude 3 202
INDEX DES TABLEAUX 204
INDEX DES FIGURES 205
RÉSUMÉ 206

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Cette thèse de psychologie a été réalisée dans le cadre du projet « ARTUR – les ateliers du futur », grâce à un financement de la région Loire-Atlantique. L'objectif général est de tirer parti des avancées scientifiques et technologiques réalisées par les chercheurs présents dans la région afin de soutenir, développer et moderniser l'industrie. Plusieurs équipes de l'École Centrale de Nantes ont donc été mobilisées sur ce projet : une équipe du GeM (Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique), spécialisée dans l'étude des matériaux physiques et la simulation, une équipe du Cerma (Centre d'Etudes et de Recherches Méthodologiques en Architecture), spécialisée dans la réalité virtuelle et la réalité augmentée, et trois équipes de l'IRCCyN (Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes), MO2P (Modélisation et Optimisation des Processus de Production), IS3P (Ingénierie des Systèmes : Produits, Performances, Perceptions), spécialisée dans la création et la gestion de base de données et PsyCoTec (Psychologie, Cognition, Technologie), spécialisée dans la psychologie cognitive. Une association de réalité virtuelle, Clarté, a mis à disposition son savoir-faire dans le domaine du développement d'outils à destination des industries. Cette thèse est donc la contribution de notre équipe PsyCoTec, qui devait se concentrer sur l'analyse de l'activité et l'ergonomie de l'outil à créer.

L'objectif initial du projet est de créer, dans le cadre des ateliers du futur, un compagnon virtuel utilisant simulation, réalité virtuelle et nouvelles technologies grâce au concours de toutes les compétences disponibles. Dans cette perspective, le projet s'est également donné pour ambition d'élaborer une démarche qui aurait le potentiel de s'adapter à toute entreprise désirant la mettre en œuvre. Dès le projet initial, le compagnon virtuel est défini comme un assistant aux procédés de fabrication mobile, utilisant, simultanément à l'activité, la simulation de processus physiques dynamiques complexes et la réalité augmentée. Le compagnon virtuel a ainsi pour vocation d'être utilisé par des opérateurs de l'industrie intervenant dans le contrôle d'un processus physique dynamique. En particulier, l'objectif de cette thèse est de fournir les éléments d'ergonomie du compagnon virtuel afin qu'il soit capable de maintenir voire de développer les compétences d'un utilisateur dans le cadre

d'une situation dynamique, et ce au travers de la simulation des procédés. Cependant, lors du commencement de la thèse, un tel cas d'usage n'avait pas encore été identifié.

La première année de la thèse a donc été mise à profit pour étudier la littérature concernant différents aspects évoqués par cette problématique générale. Le premier champ de la littérature étudié concerne l'assistance aux procédés de fabrication dans les situations dynamiques et l'effet de la simulation chez les opérateurs, notamment dans le cadre de l'assistance aux procédés de fabrication. En particulier, le contrôle cognitif dans les situations dynamiques nous a permis de comprendre les caractéristiques cognitives d'une situation dynamique et les différents éléments à prendre en compte (Hoc & Amalberti, 2007). L'analyse cognitive du travail a alors été choisie comme méthode d'analyse de l'activité du futur cas d'usage (Vicente, 1999). En effet, cette méthode semble bien se prêter aux situations dynamiques complexes dans la mesure où elle propose des outils permettant l'exploration des différents aspects du travail : la situation et l'opérateur.

Enfin, l'utilisation du compagnon virtuel doit permettre à la fois d'améliorer les performances et de maintenir les compétences des opérateurs à un haut niveau. En effet, si l'utilisation d'un outil, tel que le compagnon virtuel que l'on souhaite créer, permet en général d'améliorer les performances, il arrive qu'elle entraine des biais (Parasuraman & Manzey, 2010), voire une baisse de compétences chez les opérateurs qui se retrouvent alors démunis lors de pannes ou de situations imprévisibles (Hoc, 2000). Nous nous sommes donc intéressés à la littérature sur le développement des compétences afin de comprendre les mécanismes pouvant entrer en jeu lors de l'utilisation d'un tel compagnon virtuel.

L'hypothèse générale de la thèse a alors émergé. Dans le cours du développement, lorsqu'on acquière de nouvelles compétences, de fausses croyances émergent irrémédiablement (Pascual-Leone, 2013). Ces fausses croyances, appelées schèmes trompeurs, sont en réalité des connaissances vraies dans certaines situations mais appliquées à tort dans des situations similaires mais différentes. En particulier, dans un environnement dynamique, où l'incertitude règne, un opérateur doit se construire une représentation de la situation alors qu'il n'a pas forcément toutes les informations nécessaires. De fait, il semble inévitable que de tels schèmes trompeurs existent dans un environnement dynamique, y compris dans des ateliers de fabrication. Si de tels schèmes existent bien, il faudra y prêter particulièrement attention lors du développement de l'interface du compagnon virtuel.

Un an après le début de la thèse, un cas d'usage, permettant de valider notre méthodologie, a été trouvé : il s'agit d'un atelier de fabrication de squelettes d'avion dans une usine d'aéronautique. Il ne permet pas de regrouper l'ensemble des problématiques envisagées lors du projet initial : si l'on peut conserver les aspects concernant la simulation, ceux en lien avec la réalité virtuelle sont abandonnés.

Dans cet atelier, la chaine de production vise à transformer des poutres métalliques rectilignes en poutres métalliques incurvées. Ces poutres, appelées cadres, servent d'ossature à l'avion, c'est-à-dire qu'elles sont utilisées pour fixer les panneaux métalliques qui constituent la paroi externe de l'avion. Plusieurs étapes de production sont nécessaires à cette transformation. Celles qui nous intéressent sont appelées étapes d'étirage. Elles sont réalisées par deux opérateurs sur une machine d'étirage semi-automatique. Les opérateurs doivent installer les cadres sur la machine, mettre en place différents outils indispensables au bon déroulement et procéder à l'étirage. En théorie, les opérateurs ne peuvent pas modifier le programme d'étirage ni les outils nécessaires à l'étirage. Cependant, le poste de travail laisse ces programmes accessibles aux opérateurs. Enfin, les programmes sont réalisés par un technicien d'industrialisation qui utilise pour ce faire un logiciel de simulation.

Le problème rencontré à ce poste est le suivant : les résultats obtenus à l'issue des étapes d'étirage sont mauvais et aléatoires. Ainsi, les cadres obtenus après l'étirage ne correspondent pas aux critères permettant de les utiliser directement : d'autres opérateurs doivent reprendre manuellement chaque cadre. Plusieurs éléments peuvent expliquer les résultats peu satisfaisants. Tout d'abord deux cadres étirés avec un même programme ne réagiront pas de la même façon : le résultat de l'étirage dépend des caractéristiques physiques internes des cadres. Ces caractéristiques physiques internes sont inconnues en début d'étirage. De plus, elles diffèrent d'un cadre à l'autre. Enfin, ces caractéristiques internes changent en fonction du temps à cause d'un traitement thermique obligatoirement appliqué au cadre. Le second élément expliquant les mauvais résultats est le type d'outil utilisé et la géométrie des cadres. En effet, les outils utilisés sont identiques pour tous les cadres d'une même référence. Or, la géométrie, c'est-à-dire la forme, de chaque cadre étant légèrement différente, ces outils devraient être adaptés à chaque cadre pour pouvoir garantir un bon résultat. Il est donc envisagé de fournir un outil aidant les opérateurs à établir des programmes d'étirage permettant d'obtenir de meilleurs résultats.

Cet atelier constitue bien un environnement dynamique pour lequel la simulation peut apporter une aide à l'opérateur. En effet, le cas d'étude sélectionné constitue un environnement changeant : les tâches mises en œuvre dans l'atelier sont multiples, avec des contraintes physiques et temporelles importantes. Dans cet environnement, l'information étant difficile d'accès, le recours à la simulation semble opportune étant données nos connaissances actuelles du procédé. Un compagnon virtuel tel que défini à l'origine dans le projet ARTUR pourrait donc aider le technicien d'industrialisation et les opérateurs compétents à mieux régler la machine d'étirage. Cependant, comme nous l'avons déjà mentionné, l'utilisation de la réalité augmentée ne semble pas nécessaire, cet aspect a donc été abandonné. Il s'agit plutôt d'établir un logiciel de simulation, utilisable en cours d'activité, représentant le processus physique réel ainsi que son évolution. Dans ce cadre, l'utilisation d'une interface écologique, établie à partir d'une analyse cognitive du travail, devrait permettre de réaliser une telle simulation. En effet, cette approche permet de représenter un système complexe dans son intégralité tout en permettant à l'utilisateur d'en tirer parti au mieux.

Ainsi, nous présentons dans un premier chapitre la littérature en lien avec l'assistance aux procédés de fabrication dans une situation dynamique. Dans un second chapitre, nous présenterons les éléments de littérature en lien avec le développement des compétences et les apprentissages. Un troisième chapitre synthétisera ces deux chapitres et présentera les éléments statistiques et méthodologiques qui ont guidés les trois études empiriques présentées aux chapitres quatre à six.

ASSISTANCE AUX PROCÉDÉS DE FABRICATION DANS UNE SITUATION DYNAMIQUE

I. DÉFINITION D'UNE SITUATION DYNAMIQUE

I.1. Caractéristiques d'une situation dynamique et processus cognitifs impliqués

Nous avons présenté en introduction notre cas d'usage comme un environnement dynamique : c'est un environnement changeant, dans lequel l'information est peu accessible. Cependant, ce cas étant assez difficile d'accès, le choix d'un exemple plus accessible, mais aussi plus révélateur, s'impose.

Un exemple familier de situation dynamique : la conduite automobile

Bien qu'elle s'éloigne de notre sujet d'étude, nous prenons l'exemple bien connu de la conduite automobile pour illustrer nos modèles théoriques sur les situations dynamiques. En effet, la conduite automobile est largement étudiée dans le cadre des aides à la conduite, mais elle est également vécue quotidiennement par un grand nombre de personnes.

Conduire un véhicule est, en effet, plus complexe que de simplement amener un objet d'un point A à un point B : il faut prendre en compte plusieurs éléments qui représentent autant de contraintes sur l'action en cours. Ces éléments peuvent aller des plus évidents, tels que l'état de la route, la circulation autour du véhicule, le code de la route, aux plus complexes ou imperceptibles, tels que les conditions climatiques, les lois de la mécanique qui régissent

le moteur. Le conducteur ne contrôle pas l'ensemble de la situation, dans le sens où il ne peut pas agir sur tous les éléments de la situation : il ne peut pas directement influer sur ce que font les autres conducteurs, par exemple.

La situation de conduite correspond donc bien à la définition d'une situation dynamique donnée par Hoc et Amalberti (2007). Pour ces auteurs, dans un contexte de travail, une situation dynamique renvoie à des tâches complexes dont les paramètres évoluent dans le temps de façon incertaine, comme dans notre cas d'usage lorsque les caractéristiques internes des cadres évoluent après la trempe. Il en résulte un certain nombre de processus cognitifs à mettre en œuvre pour pouvoir gérer la situation.

Caractéristiques d'une situation dynamique

Contrôle partiel de la situation

Dans une situation dynamique, comme les différents éléments à contrôler changent régulièrement, un opérateur ne peut pas tout connaitre de la situation, il ne peut pas non plus la maîtriser totalement (Hoc, 2005). En conséquence, l'opérateur aura un contrôle partiel de la situation.

Pour avoir conscience de la situation, l'opérateur doit sans arrêt vérifier l'état du processus. Il est guidé, mais aussi limité, dans cette action de prise de conscience de la situation, par ses méta-connaissances (procédurales, déclarative, charge de travail et motivation).

Par exemple, lors de la conduite, le conducteur vérifie sans arrêt les positions des autres véhicules mais également l'état de leurs clignotants par exemple. Lors d'un dépassement, il doit connaître ses capacités et celles de son véhicule à accélérer. Cependant, certaines méta-connaissances peuvent provoquer des situations à risques : surestimer ses capacités à gérer la vitesse par exemple. Certaines attentes peuvent également provoquer des accidents : par exemple, on s'attend à ce que les autres conducteurs mettent leurs clignotants avant de déboîter. Quand ce n'est pas le cas, il est impossible d'anticiper les déplacements des autres véhicules : le conducteur a besoin d'un certain temps pour anticiper les déplacements des autres véhicules, et le clignotant sert de signal, attirant son attention, et lui permettant de mettre à jour sa représentation de la situation. En effet, la gestion des dynamiques temporelles est importante dans les situations dynamiques.

Dynamique temporelle

Une situation dynamique se caractérise également par une dynamique temporelle : il faut, pour l'opérateur, synchroniser les dynamiques des processus cognitif et technique. En effet, le processus évoluant même en l'absence d'action de sa part, l'opérateur devra constamment mettre à jour sa représentation de la situation et adapter les stratégies qu'il utilise à la vitesse du processus (Hoc & Moulin, 1994).

Représentations et traitements multiples

De plus, une situation dynamique nécessite la mise en œuvre de représentations et de systèmes de traitement multiples (Morineau, Hoc, & Denecker, 2003). Ainsi, on ne peut pas se contenter de représenter la situation par des successions d'états que l'opérateur modifie et qui aboutissent à un nouvel état. Pour assister l'opérateur, on ne peut pas se contenter d'une représentation centrée sur l'opérateur et sur ce qu'il fait. Pour prendre en compte l'évolution exogène de la situation, il faut un point de vue plus externe (par exemple inclure les lois de la physique dans le cas d'une centrale thermique).

En ce qui concerne l'exemple de la conduite, les systèmes d'aide à la navigation évoluent pour inclure, en plus de la route et des directions, qui évoluent en fonction des actions du conducteur, des informations sur l'état du trafic, sur les incidents et l'état de la route.

Risque et incertitude

Une situation dynamique inclut également la gestion de l'incertitude et des risques : l'incertitude met l'opérateur dans le doute quant aux événements à venir et, notamment, des situations inhabituelles. Il doit donc évaluer l'effet potentiel de chaque éventualité. L'opérateur va donc mettre en œuvre une activité de surveillance afin de diminuer cette incertitude (Osman, 2010).

Dans le cadre de la conduite, l'individu est souvent amené à arbitrer entre code de la route, sécurité et ponctualité. Par exemple, un conducteur peut être amené à ne pas respecter un feu rouge dans un carrefour d'une route de campagne qu'il pense peu fréquentée et contrôlée pour arriver à l'heure à un rendez-vous important, ce qu'il ne ferait peut-être pas dans un carrefour très fréquenté ou dans lequel il s'est déjà fait contrôlé.

Exécution de plusieurs tâches concurrentes

Enfin, une situation dynamique se caractérise par l'exécution de plusieurs tâches concurrentes. Des tâches concurrentes sont des tâches dont l'exécution peut entraver ou empêcher l'exécution d'une autre tâche. Il s'agit alors de partager son attention entre elles (Hoc, Amalberti, & Plee, 2000).

Lorsque l'on conduit, on doit à la fois contrôler sa vitesse, les voitures devant et derrière soi, le code de la route etc… ces différentes tâches sont parfois difficiles à gérer simultanément. Et, si elles sont faciles à mettre en œuvre dans des situations standards de circulation, par exemple sur une route bien connue avec peu de circulation, elles peuvent entrer en concurrence dans des situations plus atypiques : dans un nouveau lieu, lorsqu'il faut lire les panneaux, lorsque les conditions climatiques sont difficiles et que la visibilité diminue. On va alors accorder plus d'importance à une tâche plutôt qu'à l'autre et réduire par exemple sa vitesse.

Processus cognitifs mis en œuvre par un individu dans une situation dynamique

Ces différentes caractéristiques ne seront pas sans conséquences sur les processus cognitifs qu'un individu devra mobiliser pour faire face à la situation (Hoc, 2001) : il devra traiter les dynamiques temporelles, à la fois celles du système dynamique et celles de son propre fonctionnement cognitif ; il devra élaborer de multiples représentations de la situation, en adoptant différents points de vue et en considérant les différents résultats possibles ; il devra également gérer l'incertitude et les différentes tâches simultanées ayant parfois des buts incompatibles. L'opérateur doit donc choisir ses actions en fonction de ses buts, de ses connaissances et de sa représentation de la situation actuelle.

I.2. Exemple d'environnement dynamique en situation de travail

Les environnements dynamiques sont courants dans les situations de travail actuelles durant lesquelles les opérateurs ont souvent le contrôle d'un processus complexe *via* des interfaces supposées représenter ces processus.

En ce qui concerne, par exemple, la gestion de trafic aérien (Morineau et al., 2003), les contrôleurs aériens doivent gérer les trajectoires de plusieurs avions pouvant, si certaines trajectoires se croisent, entrer en collision. Ainsi, l'opérateur au sol, grâce à différents instruments tels que des radars et équipements de communication, suit ces différentes trajectoires. Ces trajectoires évoluent au cours du temps même lorsque le contrôleur ne fait rien. De plus, chaque avion représente un objectif à atteindre : atterrir en toute sécurité. Ces différents objectifs peuvent être contradictoires : ainsi, si deux avions souhaitent atterrir en même temps en suivant des trajectoires qui se croisent, la sécurité de chacun des avions est remise en cause. De plus, différentes contraintes s'appliquent à chaque avion : les contraintes météorologiques, de carburants, de gestions des horaires par exemple.

Dans cette situation, le contrôleur aérien au sol doit, à chaque instant, avoir une représentation de la situation en cours. Cette représentation occurrente se construit à partir des informations qu'il reçoit de son environnement, mais également à partir de sa représentation symbolique qui préexiste au déroulement de la situation en cours. Ainsi, il a certaines attentes quant au comportement des pilotes, des connaissances sur les règles en rigueur dans l'aviation, sur les lois physiques qui s'appliquent à la situation. De plus, il n'a pas un contrôle total de la situation car il ne peut pas piloter lui-même à distance les différents avions ou modifier à loisir les conditions climatiques ou autres contraintes qui s'exerce sur l'environnement dont il a la charge.

Dans les situations dynamiques, l'opérateur va donc avoir tendance à se représenter la situation qu'il doit contrôler en fonction de ses connaissances et des informations qu'il reçoit de l'environnement. La conception d'une interface lui permettant d'élaborer une représentation occurrente correcte est donc un élément clé permettant à l'opérateur de bien se représenter la situation et d'y agir en toute sécurité. C'est le point de vue partagé par les tenants de la conception d'interfaces écologiques qui ont développé des outils méthodologiques permettant de mieux concevoir les interactions homme-machine.

II. ANALYSE COGNITIVE DU TRAVAIL ET CONCEPTION D'INTERFACE ÉCOLOGIQUE

II.1. L'analyse cognitive du travail

L'analyse cognitive du travail est un cadre théorique regroupant modèles théoriques et méthodes d'analyse du travail afin de faire des recommandations pour la conception (Vicente, 1999). D'après Rasmussen (1986), afin de concevoir un outil capable de soutenir l'activité des opérateurs dans les situations dynamiques et complexes, il est nécessaire d'avoir des modèles concernant le processus physique et des modèles cognitifs de l'opérateur. D'après les auteurs, cinq éléments sont à prendre en compte pour obtenir les informations nécessaires au soutien de l'opérateur durant son activité (Vicente, 1999). Il faut bien entendu étudier à la fois le domaine de travail, c'est-à-dire les contraintes physiques ou légales s'exerçant sur le domaine étudié, et les compétences nécessaires à l'opérateur. Toutefois, il faut également étudier les actions à effectuer pour exécuter la tâche, les stratégies mises en œuvre et l'organisation sociale, c'est-à-dire la distribution des actions à accomplir entre les différents acteurs et leurs liens entre eux. Ces cinq éléments doivent donner une description complète du système à étudier. Cependant, l'étude des cinq composants est rarement mise en œuvre. Le plus souvent, seules les deux premières citées, l'analyse du domaine de travail et l'analyse des compétences nécessaires, sont réalisées (McIlroy & Stanton, 2015). En effet, ces deux analyses sont celles préconisées par la conception d'interfaces écologiques (EID) (Vicente & Rasmussen, 1992) : l'analyse du domaine de travail se réalise via un outil : la hiérarchie d'abstraction et l'analyse des compétences via la taxonomie SRK (présentées dans le paragraphe suivant).

II.2. La conception d'interfaces écologiques

Le cadre théorique de la conception d'interface écologique (EID, Ecological Interface Design) est donc très lié au cadre précédent. En effet, il mobilise la hiérarchie d'abstraction et la taxonomie SRK, deux des outils développés dans le cadre de l'analyse cognitive du travail.

Les tenants de l'EID considèrent que la capacité des individus à utiliser les traitements perceptifs est une force sur laquelle les interfaces doivent se reposer afin de soutenir la prise de décision (Vicente & Rasmussen, 1992). Ainsi, les interfaces doivent être « affordantes », c'est-à-dire qu'elles doivent rendre visibles les actions possibles à réaliser. Afin de donner à l'utilisateur la bonne affordance (Bennett & Flach, 2011), autrement dit celle sur laquelle le traitement perceptif pourra se reposer tout en étant efficace, l'interface doit représenter le système dans toute sa complexité (Vicente, 1999) et elle doit également rendre saillants les raccourcis utilisés par les experts (Vicente & Rasmussen, 1992).

Afin de parvenir à représenter la complexité du système, tout en rendant saillants les liens entre les différentes informations nécessaires à la prise de décision, l'EID utilise les deux outils développés dans le cadre de l'analyse cognitive du travail : la hiérarchie d'abstraction qui permet de décrire le domaine de travail, et la taxonomie SRK, qui ordonne les compétences nécessaires à l'opérateur.

Les cinq niveaux de la hiérarchie d'abstraction

Selon le cadre théorique de l'EID, afin de prendre la complexité du système en considération, une vision globale du problème est nécessaire : la hiérarchie d'abstraction ou hiérarchie fin-moyen est l'outil utilisé afin de représenter la complexité du système en tant qu'unité. Cette structure relie les buts aux moyens nécessaires pour les atteindre et ce sur cinq niveaux hiérarchisés (Bennett & Flach, 2011 ; Vicente, 1999).

Les **buts fonctionnels** sont les objectifs généraux que l'on cherche à atteindre. Ce niveau décrit les raisons, les intentions et les valeurs sous-jacentes à l'activité, il explique pourquoi l'activité est réalisée, par exemple, dans le cadre de la conduite il peut s'agir d'arriver à destination.

Les **fonctions abstraites** sont le champ des façons possibles de réaliser le but fonctionnel. Ce niveau inclut les limites physiques ou légales, les contraintes qui s'exercent sur n'importe quel système. Dans l'exemple de la conduite, il s'agirait des routes existantes, des lois règlementant la circulation, des contraintes physiques s'exerçant sur le moteur et le véhicule etc.

Les **fonctions générales** décrivent les opérations à réaliser pour passer d'un état initial à un état final. Dans notre exemple, il s'agira d'accélérer, de ralentir, de changer de direction, etc.

Les **processus physiques** sont les éléments du système qui permettent de réaliser les fonctions générales. Ainsi, pour changer de direction, il faut tourner le volant, pour accélérer, il faut appuyer sur l'accélérateur.

Les **formes physiques** sont les éléments de détails des processus physiques, les mesures et capteurs concrets existants. Dans le cadre de l'exemple de la conduite, plusieurs capteurs permettent de connaitre la vitesse, information transmise au conducteur par le compteur de vitesse.

Alors que les interfaces traditionnelles ne représentent en général que les niveaux les plus concrets, c'est-à-dire les processus et les formes physiques (les capteurs présents et les éléments physiques du système), les interfaces écologiques cherchent également à représenter les niveaux les plus élevés ainsi que les liens entre les différents niveaux et les différents éléments de la hiérarchie (Christoffersen, Hunter, & Vicente, 1996). Une interface écologique va donc représenter les liens entre les éléments les plus concrets et les éléments plus abstraits du processus, c'est-à-dire comment atteindre les buts et les contraintes du système global.

La taxonomie SRK décrit les compétences des opérateurs sur trois niveaux

De plus, afin de présenter au mieux l'ensemble de ces informations, les auteurs veulent tirer parti de ce qu'ils considèrent comme une force : les capacités de traitement perceptif de la situation. En effet, les opérateurs ne font pas toujours reposer leurs actions sur une analyse détaillée de la situation, ils peuvent avoir recours à des traitements plus superficiels mais tout autant efficaces.

Les auteurs distinguent ainsi trois niveaux de comportements (Vicente & Rasmussen, 1992) : les comportements basés sur les habiletés, ceux basés sur les règles et enfin ceux basés sur les connaissances.

Le niveau le moins symbolique, c'est-à-dire le niveau des habiletés relie directement la perception et l'action. Celui des règles est un niveau intermédiaire dans lequel les

perceptions et les actions sont liées *via* des règles. Le niveau le plus élevé, celui des comportement basés sur des connaissances, est celui qui nécessite le plus de ressources cognitives (Rasmussen, 1983). Cette taxonomie permet entre autre de distinguer les compétences d'un opérateur : un expert aura élaboré plus de règles et d'habiletés, il n'aura besoin de guider son activité par ses connaissances qu'en cas de problème. Au contraire, un novice aura besoin de ce plus haut niveau constamment et basera son activité sur ses connaissances (Vicente, 1999). Il est donc important dans une interface de représenter l'information à ces trois niveaux d'interaction : les niveaux « habiletés » et « règles » sont les niveaux favorisés lors de l'activité de routine d'une personne entrainée, les informations doivent donc être rendues saillantes pour soutenir ces niveaux. Cependant, dans les cas de situations problématiques ou nouvelles, l'utilisateur d'une interface aura besoin d'informations afin de traiter en profondeur le problème : il faut donc mettre à disposition les informations traitées à un niveau plus complexe, le niveau des « connaissances ». Afin de soutenir l'activité à ces différents niveaux, l'interface doit fournir des signaux, des signes ou des symboles adéquats.

Si la hiérarchie d'abstraction et la taxonomie SRK sont les deux éléments principaux de l'analyse, afin de mieux communiquer l'information ainsi recensée à l'utilisateur, un dernier outil est encore mobilisé dans l'EID : l'échelle de décision. Construite en coopération avec un expert, principalement grâce à des entretiens, cet outil révèle l'activité cognitive de l'opérateur durant le contrôle de l'activité et le processus de prise de décision. En effet, les auteurs ont remarqué une tendance des novices à inspecter de façon séquentielle chaque élément d'information à leur disposition afin de diagnostiquer le problème avant d'agir. Au contraire, ils ont découvert chez les experts des règles leur permettant de lier directement ce qu'ils perçoivent à ce qu'ils doivent faire. Ce sont ces règles qu'ils souhaitent rendre facilement identifiables dans les interfaces d'aide au contrôle de procédé industriel.

Méthodologie de conception d'interface

Afin de déterminer les deux éléments principaux, les auteurs procèdent classiquement à des revues de littérature et à des analyses de documents. Afin de décrire notamment le domaine de travail et construire la hiérarchie d'abstraction, ils procèdent à des entretiens et à des observations qui permettent de déterminer les éléments importants de l'activité pour les

utilisateurs. Par exemple, Drivalou et Marmara (2009) ont effectué un recueil de données intensif afin d'avoir les informations permettant d'effectuer une analyse cognitive du travail (les cinq étapes citées ci-avant). Ils ont notamment observé et mené des entretiens sur une période d'un an afin de développer une interface écologique pour l'industrie de distribution d'électricité.

Exemples d'études sur les interfaces écologiques

Le paradigme classique des études sur les interfaces écologiques consiste à étudier les performances, ou un critère de performance en particulier, d'opérateurs utilisant soit une interface traditionnelle ou déjà existante, soit une interface écologique. Les résultats montrent, en général, de meilleures performances chez les opérateurs utilisant l'interface écologique. On peut se référer à Vicente (2002) pour une revue de littérature. Ces études sont en général réalisées sur simulateur (Reising & Sanderson, 2002). Par exemple, Ham et Yoon (2001) comparent, dans une simulation d'un circuit de refroidissement de centrale nucléaire, trois interfaces ayant des représentations plus ou moins abstraites selon la définition de la hiérarchie d'abstraction. Ils montrent ainsi qu'une interface représentant les niveaux d'abstraction les plus élevés de la hiérarchie d'abstraction permet de meilleurs performances dans des tâches de diagnostique d'erreurs.

En parallèles, les études sur le terrain sont plus souvent centrées sur la méthodologie utilisée afin d'aboutir à une interface. Dans une revue de la littérature faite à partir des termes de conception d'interface écologique[1], McIlroy et Stanton (2011) dénombrent ainsi soixante-quinze interfaces différentes réalisées et présentées à l'issue d'une présentation des concepts théoriques et méthodologique de l'EID. La méthodologie de conception est ainsi décrite dans l'étude sur la conception d'une interface pour une installation électrique réalisée par Drivalou et Marmara (2009) ou dans celle pour un processus de production pétrochimique (Jamieson, Miller, Ho, & Vicente, 2007). Dans ces deux études, la ou les méthodes utilisées sont décrites avant de présenter les interfaces obtenues et leur fonctionnement.

[1] Les termes exacts de recherche utilisés sont *Ecological Interface Design* en anglais dans des moteurs de recherches scientifiques tels que Google Scholar, Taylor et Francis par exemple.

Limites de l'EID et questions en suspens

Ainsi, l'EID a été appliquée à différents champs de l'industrie (Drivalou & Marmaras, 2009; Jamieson & Vicente, 2001) bien que certaines limites lui ont été reprochées : par exemple tous les utilisateurs ne semblent pas capables de tirer profit d'une interface écologique, ce qui pousse les auteurs à proposer des critères de recrutement des opérateurs basés sur leur mode d'analyse de l'information séquentiel ou global (Torenvliet, Jamieson, & Vicente, 2000). De même, la motivation semble être un facteur déterminant pour tirer au mieux profit de ce type d'interface et développer des compétences sur le long terme (Christoffersen et al., 1996).

Enfin, la méthodologie employée reste difficile à mettre en œuvre. Ainsi, il est intéressant de noter que, dans leur revue de la littérature sur les interfaces écologique, McIllroy et Stanton (2015) constate que 40% des articles présentant l'EID ne mentionnent pas l'analyse SRK ou une autre méthode d'étude des compétences. Cette phase de l'analyse est donc peu détaillée méthodologiquement. De même, même lorsqu'elle est bien mise en œuvre, l'EID reste une méthode d'analyse de l'activité. La conception de l'interface est plus complexe car elle tombe dans le domaine de compétences du designer. Pour finir, la mise en œuvre d'une interface écologique nécessite le plus souvent un nombre important de capteurs afin de connaitre l'état du système à superviser. En effet, pour pouvoir représenter l'ensemble d'un système selon les principes de l'EID, il faut collecter un nombre important d'informations, il faut donc être en mesure de les récolter, via des caméras, systèmes de mesure de pression, de température, par exemple. Cela n'est pas toujours possible à mettre en œuvre : en effet, ces capteurs peuvent s'avérer très onéreux. Dans d'autres cas, ces prises d'informations peuvent même s'avérer impossibles, comme nous le montrerons pour notre cas d'usage dans le chapitre expérimental 1.

Pour pallier à ce manque d'informations, le recours à la simulation, non en tant qu'outil expérimental, mais en tant qu'aide à la prise de décision peut s'avérer nécessaire : par exemple, en architecture, il peut être intéressant de connaitre la consommation énergétique d'un bâtiment d'habitation, en fonction des conditions climatiques, et ce, avant qu'il n'existe (Attia, Gratia, De Herde, & Hensen, 2012).

III. LE MODÈLE DU CONTRÔLE COGNITIF DE HOC ET AMALBERTI (2007)

Le modèle du contrôle cognitif proposé par Hoc et Amalberti (2007) complète le modèle de l'architecture cognitive utilisé dans le cadre de l'EID.

On peut définir le contrôle cognitif « comme toute activité de supervision, interne à la cognition, dont l'objectif est d'assurer et de vérifier le bon usage des capacités cognitives aussi bien en terme d'intensité, que d'ordonnancement dans le temps, afin d'atteindre le ou les objectifs visés par le sujet » (Amalberti, 2001, p. 2). Il s'agirait donc d'un méta-processus qui contrôlerait les différents processus cognitifs impliqués lors d'une activité.

Alors que les cadres théoriques qui précèdent, c'est-à-dire l'analyse cognitive du travail et l'EID, considèrent l'architecture cognitive sur une dimension symbolique/sub-symbolique, qui correspond à la taxonomie SRK, le modèle du contrôle cognitif de Hoc et Amalberti distingue un second aspect : l'origine des données. En effet, selon Hoc et Amalberti, le contrôle cognitif est l'articulation entre le niveau d'abstraction des données utilisées pour le contrôle et l'origine de ces données.

Dans leur article de 2007, Hoc et Amalberti présentent les dynamiques du contrôle cognitif. Ils en relèvent ainsi trois éléments : la maitrise de la situation, le contrôle cognitif et le compromis cognitif.

III.1. Maitrise de la situation

Le sentiment de maitrise de la situation survient quand l'individu parvient à obtenir une performance qu'il considère comme satisfaisante par rapport aux ressources qu'il a engagées pour l'atteindre et ce qu'il se sait capable de réaliser (Hoc & Amalberti, 2007). Ainsi, un expert se fixera des critères de performances plus élevé qu'un novice. Il considèrera donc qu'il a perdu la maitrise de la situation si ces critères ne sont pas atteints. Afin de remédier à la perte de maitrise, l'individu peut soit revoir ses critères de performances à la baisse, soit allouer plus de ressources à la tâche.

La maitrise de la situation n'est pas un évènement ponctuel, elle s'inscrit plutôt dans la durée. Ainsi, l'individu peut choisir à un moment donné de la tâche de diminuer les ressources qu'il y investit pour être capable de maintenir un effort de longue durée (Amalberti, 2001).

Afin de modifier l'effort qu'il alloue à la tâche, l'individu peut changer la modalité de contrôle cognitif dans laquelle il se trouve. Dans une situation simple, l'individu peut utiliser une modalité peu couteuse alors qu'il utilisera une modalité couteuse dans une situation complexe. C'est le cas, par exemple, des entraineurs de handball (Debanne & Chauvin, 2013). Ces modalités du contrôle cognitif sont définies par le croisement de la dimension symboliques/subsymbolique des données utilisées et de la dimension déterminée par l'origine de ces données.

III.2. Axes symbolique/subsymbolique et origine des données

Le premier axe, c'est-à-dire le niveau d'abstraction des données, rejoint la taxonomie SRK décrite plus haut en la décrivant comme un continuum entre des données de type symbolique et des données de type subsymbolique. Le second axe, l'origine des données distingue, également sur un continuum, les données d'origine externe, les acteurs sont alors plus réactifs, et les données d'origine interne, les acteurs sont alors plus anticipatifs.

Ainsi, le contrôle cognitif, lors d'une tâche donnée, peut se répartir selon quatre modes définis par le croisement des deux dimensions, l'abstraction des données et l'origine des données, qui sont considérées comme indépendantes entre elles (cf. Figure 1).

Le premier mode est le mode **symbolique-externe**, par exemple lors du suivi d'instruction dans une situation de résolution de problème : ce mode est couteux. Le mode **symbolique-interne**, dans lequel l'abstraction est importante et l'origine des données est interne, peut par exemple être rencontré lors de la démonstration d'un théorème. Le mode **subsymbolique-externe** correspond aux affordances, qu'elles soient expertes ou basiques : les données sont traitées de façon subsymboliques à partir de l'environnement. Enfin, le mode **subsymbolique-interne**, qui est peu couteux, correspond aux aptitudes sensorimotrices.

Un individu peut en général réaliser plusieurs tâches en parallèle, les modes du contrôle cognitif pourront alors être activés en parallèle. Comme le montre la Figure 1, deux processus, la supervision et l'émergence, permettent alors aux différents modes du contrôle cognitif de travailler ensemble. La supervision, processus descendant, calibre les routines en fonction des buts, l'émergence, processus ascendant, permet aux routines de renvoyer un feedback aux activités symboliques.

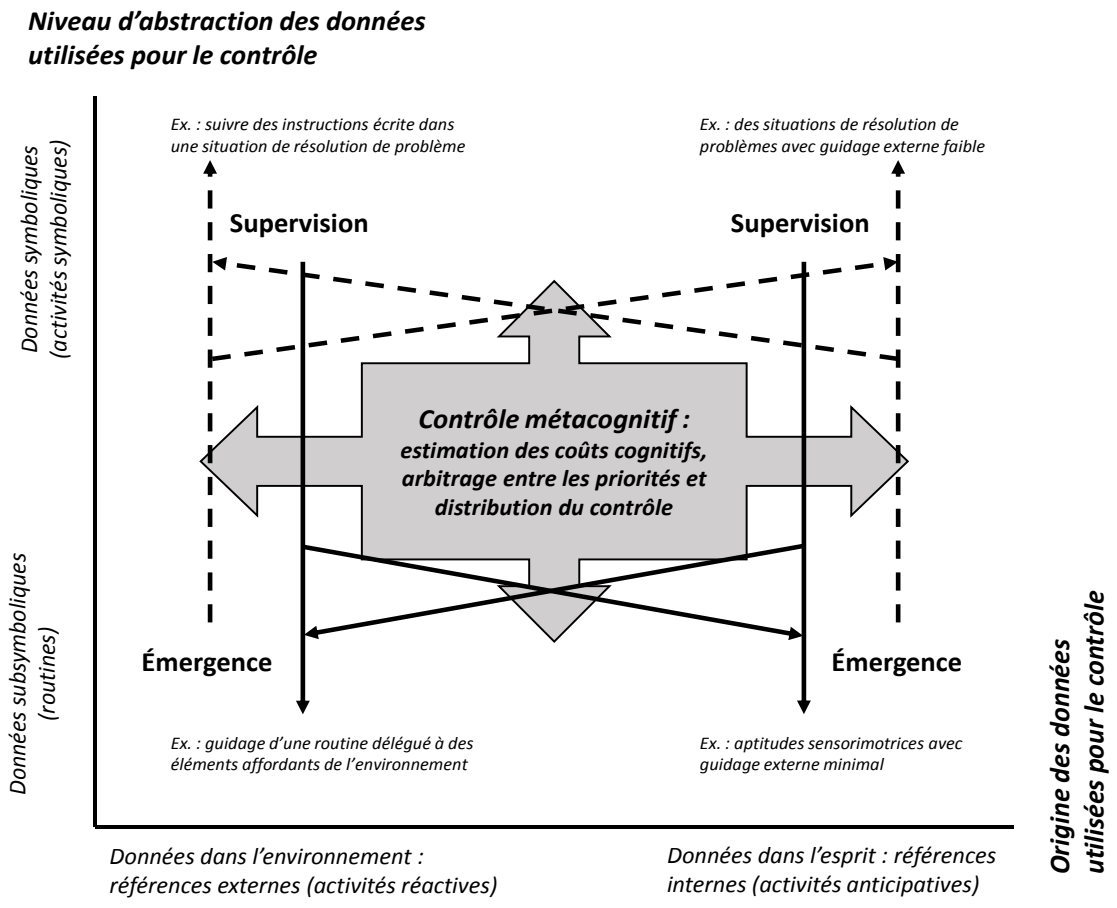


Figure 1 : le contrôle cognitif selon Hoc et Amalberti (2007) (traduction personnelle)

III.3. Le compromis cognitif

À chaque moment de son activité, un opérateur doit garder un équilibre entre les coûts cognitifs et un niveau de performance acceptable afin de conserver la maitrise de la situation (Charron, Hoc, & Milleville-Pennel, 2010). Le compromis cognitif, mené par les méta-connaissances, est l'instance qui alloue les ressources nécessaires à la performance souhaitable. C'est en se positionnant dans l'un des quatre modes du contrôle cognitif que l'individu va pouvoir gérer le cout cognitif, donc les ressources internes, qu'il alloue à la tâche : les données symboliques et internes seront plus couteuses à traiter alors que des ressources externes et subsymboliques seront peu couteuses cognitivement parlant. Ainsi, en fonction des objectifs qu'il se donne, l'individu aura intérêt à allouer plus ou moins de ressources à une tâche donnée. En effet, « l'adaptation dépend de façon critique de l'ajustement satisfaisant d'un compromis cognitif, grâce à la distribution du contrôle cognitif à travers des modes variés »[2] (Hoc & Amalberti, 2007, p. 26).

Dans notre exemple de la conduite, l'individu doit réaliser plusieurs tâches concurrentes. Il peut, par exemple, devoir à la fois ajuster sa trajectoire, maintenir sa vitesse et discuter avec ses passagers. Lorsque la route est droite et peu encombrée, il allouera alors peu de ressources aux deux premières tâches, qui seront effectuées de façon subsymbolique, externe ou interne, il peut en effet, soit contrôler la route et sa vitesse sans arrêt, soit, lorsqu'il connait bien son véhicule et la route, se fier à ses représentations internes et regarder ses interlocuteurs, ou seulement la route. En revanche, lorsque la route est encombrée, il peut changer l'allocation des ressources en discutant moins avec ses passagers et en se concentrant uniquement sur la gestion de la trajectoire.

[2]"[...] adaptation is critically dependent upon the satisfactory adjustment of a cognitive compromise, thanks to a distribution of cognitive control among various modes."

III.4. Étude utilisant le contrôle cognitif tel que défini par Hoc et Amalberti

Étude du compromis cognitif de contrôleurs aériens lors d'une tâche d'évitement de collision

Ce modèle permet notamment de déterminer les éléments sur lesquels un opérateur s'appuie lors du processus de prise de décision. Il redonne en particulier une place aux données d'origine interne qui pourraient être négligées (Hoc & Amalberti, 2007). Par exemple, Morineau, Hoc et Denecker (2003) ont utilisé un protocole expérimental soutenu par des analyses statistiques afin de déterminer l'importance de l'anticipation, telle que définie par le modèle, dans une tâche d'évitement de collision chez des contrôleurs aériens. Les opérateurs, alors sur simulateur, devaient arrêter leur activité et dessiner les positions des avions qu'ils avaient en mémoire. Les auteurs ont alors montré que les avions dans des situations de collision potentielle étaient toujours dessinés et que les opérateurs avaient tendance à anticiper le danger potentiel (les avions étaient dessinés plus proches de la collision qu'ils ne l'étaient réellement lors de l'arrêt du simulateur). L'objectif final de l'étude est de développer un outil de soutien aux contrôleurs aériens qui respectera leur mode de fonctionnement cognitif.

Enfin, de façon générale, le modèle doit permettre, en pratique, de concevoir des assistances à des opérateurs en situation dynamique qui évitent de retourner systématiquement aux niveaux de contrôle symboliques et qui sont intégrées à l'architecture du contrôle cognitif humain. Les objectifs sont donc proches de ceux recherchés dans les cadres théoriques de l'analyse cognitive du travail et de l'EID, cadres présentés précédemment.

Limites du compromis cognitif et questions en suspens

Les études sur le modèle du contrôle cognitif de Hoc et Amalberti (2007) visent à atteindre trois objectifs : élaborer des interfaces de soutien aux opérateurs dans des conditions de travail variées, faire des préconisations sur les méthodologies à mettre en œuvre dans ce but, mais également mieux comprendre les mécanismes du contrôle cognitif. En particulier,

dans l'article cité, trois questions restent en suspens. La première concerne les mécanismes d'inhibition volontaire mis en œuvre dans le compromis cognitif. Les auteurs s'interrogent, ici, sur l'effet des émotions sur les changements de modalité de contrôle cognitif et ils se demandent si les processus qui guident ces changements sont plus ou moins conscient. La seconde renvoie à la vision traditionnelle donnée aux biais cognitif. À la lumière du modèle présenté, ils seraient en fait des raccourcis nécessaires à un fonctionnement pérenne du système cognitif car leur utilisation limiterait les coûts cognitifs engagés dans une activité. De fait, au lieu de les considérer comme des biais, il faudrait réussir à les intégrer dans l'analyse, en particulier dans le cadre de la conception d'assistant à l'opérateur. Enfin, la troisième question interroge la place à accorder aux processus symboliques dans la conception d'interfaces écologiques. Les auteurs rejoignent ici, à nouveau, les auteurs du cadre de la conception d'interface écologique : il faut pouvoir soutenir l'activité de l'opérateur, et ce, quelle que soit la modalité de contrôle cognitif dans laquelle il est engagé.

A ces questions, il faut encore en rajouter une, soulevée dans le cadre de la problématique rencontrée dans notre étude. En effet, la compréhension des mécanismes en jeux dans le contrôle cognitif est importante. Cependant, comment soutenir un opérateur dans un environnement dynamique alors que les ressources externes, notamment les informations concernant l'évolution du système, sont limitées ?

IV. UTILISATION DE LA SIMULATION DANS LA PRISE DE DÉCISION

En effet, dans notre cas d'étude, il est difficile de donner des informations sur le processus en cours aux opérateurs : il n'existe pas de capteurs permettant de déterminer pour chaque pièce à produire qu'elles sont ses caractéristiques internes qui sont pourtant déterminantes pour la réussite du processus. Les opérateurs ne peuvent donc pas adapter le processus en fonction de son état réel, mais seulement à partir d'un état générique présumé.

Une des solutions possibles serait la simulation. En effet, si l'on ne peut pas connaitre l'état d'un cadre en particulier, on peut en revanche simuler les résultats que l'on obtiendrait avec l'ensemble des combinaisons de paramètres possibles, sur une plage de valeurs donnée et

avec une marge d'erreur limitée. Les équipes du Gem pensent qu'il serait alors possible de proposer un assistant qui simulerait le processus en ayant un nombre limité d'informations en entrée. Cet assistant permettrait alors d'identifier, à partir d'indices limités, les réactions probables du système.

Cependant, les effets cognitifs de la simulation sur le processus de prise de décision semblent peu étudiés dans la littérature. Des études sur le développement et l'utilisation de la simulation existent dans les revues spécialisées, par exemple en architecture ou en physique (Attia et al., 2012; Høseggen, Wachenfeldt, & Hanssen, 2008), dans la gestion, notamment en ce qui concerne les chaînes d'approvisionnement (Terzi & Cavalieri, 2004). Toutefois, leur visée principale est en général de faire la démonstration de l'efficacité du logiciel de simulation développé. Il a été démontré que l'utilisation de la simulation pouvait, dans certains cas, entrainer des confusions : par exemple, il peut être difficile de distinguer entre réalité et simulation (Becu, Neef, Schreinemachers, & Sangkapitux, 2008). De la même façon, il est important que la simulation soit transparente, en évitant notamment de masquer certaines décisions ou règles sous-jacente (Van Der Zee & Van Der Vorst, 2005).

En revanche, les processus cognitifs entrant en jeu lors de l'utilisation de la simulation ont été largement étudiés dans le cadre des apprentissages et de la formation. Ainsi Pastré (Pastré, 2005 ; Pastré et al., 2009) a mis en œuvre plusieurs études sur la simulation dans différents champs professionnels : de la conduite de réacteur nucléaire à la coupe des vignes. Il en conclut que la simulation peut être un outil puissant pour l'apprentissage car il permet la répétition, les essais et les erreurs. Il souligne également, qu'il est important de mettre en place des retours sur les exercices de simulation qui permettent aux apprenants d'avoir une analyse réflexive sur leur activité.

De plus, l'utilisation de la simulation n'est pas incompatible avec les cadres théoriques déjà présentés. Par exemple, une simulation écologique a déjà été développée pour des conducteurs de grue (Boucheix, 2003) : la simulation, utilisée pour la formation, reprenait les éléments présents dans la situation de travail des grutiers et les éléments à mettre en œuvre lors de tests d'évaluation. Elle a permis d'aider des grutiers, notamment ceux ayant des difficultés en lecture, à réaliser des tests assez complexes concernant les charges pouvant être soulevées par une grue.

L'utilisation de la simulation dans le compagnon virtuel que nous souhaitons développer pourrait donc être un élément doublement intéressant dans notre cas d'étude. Nous utiliserions alors un outil de simulation pour l'assistance à un procédé de fabrication et pas exclusivement pour de la formation. Son interface serait conçue de manière écologique, c'est-à-dire en prenant en compte les dynamiques du contrôle cognitif des futurs utilisateurs. En plus d'aider les opérateurs à réaliser leur activité, la simulation pourrait représenter un élément de réponse à la deuxième problématique que nous avons posée dans le cadre de cette thèse : il est important de maintenir ou de développer les compétences des futurs utilisateurs du compagnon virtuel. Afin d'apporter des éléments de réponse à cette deuxième partie de notre problématique, une description de la littérature sur le développement des compétences, qui a guidé ce travail de thèse, sera présentée dans le second chapitre.

DÉVELOPPEMENT DES COMPÉTENCES

Le premier chapitre théorique nous a permis de comprendre comment un opérateur peut prendre des décisions et agir dans une situation dynamique. Les éléments importants à prendre en compte lors de la conception d'une interface étant circonscrits, il reste la question des mécanismes d'apprentissage qui seront en œuvre lors de l'utilisation de cette interface. En effet, l'utilisation d'aide à la prise de décision, si elle permet en général d'améliorer les performances, provoque parfois une perte de compétences chez les opérateurs qui ne peuvent plus ensuite faire face aux situations de travail jusqu'alors maitrisées et qui sont parfois incapables de détecter des erreurs commises par l'outil (Bahner, Hüper, & Manzey, 2008 ; Parasuraman, Molloy, & Singh, 1993 ; Parasuraman & Manzey, 2010).

Ainsi, pour comprendre les mécanismes pouvant provoquer ou éviter cette perte de compétences, deux versants de la littérature peuvent être pris en compte : celui sur l'expertise et celui sur le développement des compétences.

I. L'EXPERTISE

Pour les tenants de la conception d'interface écologique, il est important de déterminer les informations et les raccourcis utilisés par les experts. Cependant, bien que la notion d'expertise reste largement répandue dans la littérature, il ne semble pas y avoir de consensus autour d'une définition précise : de nombreuses définitions coexistent.

I.1. Une définition de l'expertise

En effet, dans leur revue de la littérature, Farrington et Darby (2006) concluent que l'on ne sait pas définir unanimement l'expertise. Pour ces auteurs, l'expertise est étudiée dans trois grands domaines : en intelligence artificielle, en statistiques et économie (avec notamment

les théories de la prise de décision) et en sciences cognitives. D'un côté les cognitivistes et les spécialistes de l'intelligence artificielle considèrent que l'expert est celui qui est plus capable ou compétent que le novice. Ainsi, l'objectif des seconds est d'étudier le fonctionnement cognitif de l'expert afin de pouvoir extraire les règles qu'il utilise et les reproduire dans des systèmes experts ou des intelligences artificielles. Pour les sciences cognitives, l'objectif est de comprendre comment l'humain fonctionne, comment il devient intelligent dans l'objectif de soutenir ses apprentissages ou ses activités. En revanche, dans la littérature sur la prise de décision, telle qu'on la rencontre en statistique ou en économie, l'objectif est de trouver la prise de décision la plus objective. De fait, l'expert n'est pas forcément le meilleur modèle car il base son raisonnement sur des heuristiques qu'il ne vérifie pas toujours et qui peuvent être fausses.

De plus, il est souvent difficile de catégoriser une personne en ce qui concerne son expertise : doit-on regarder son nombre d'années d'expérience, ses performances, sa position d'enseignant, la reconnaissance de ses pairs ? Parmi les définitions de l'expertise, certaines (Dreyfus & Dreyfus, 1980) distinguent le novice de l'expert en se basant sur l'automatisation de l'activité. Ainsi, un novice, bien que connaissant les règles de base, doit décomposer les différentes informations qui ne sont pas pour lui intrinsèques à la situation. Il procède de façon analytique tout en surveillant la tâche. En revanche, l'expert est capable de traiter une situation dans son ensemble et d'attribuer une réponse « intuitive » au problème posé. Le seul cout cognitif engagé est celui de la surveillance du processus, autrement dit, de la supervision.

Ainsi, une des caractéristiques de l'expertise, qui semble partagée dans la littérature, est qu'elle se construit avec l'expérience, en partie par automatisation et développement d'heuristiques de décision.

Par exemple, pour Hoc (2005), l'expertise est susceptible de transformer des processus symboliques en processus subsymboliques bien qu'un minimum de contrôle symbolique puisse entrer en jeu pour superviser les processus automatisés.

Ainsi, comme le montre la Figure 2, l'expertise se fait par internalisation du guidage externe, les personnes ont moins besoin d'utiliser des supports externes pour contrôler leur activité (même s'ils restent toujours capable de le faire). Dans le même temps, les activités symboliques sont transformées en routines qui restent, néanmoins, surveillées ou

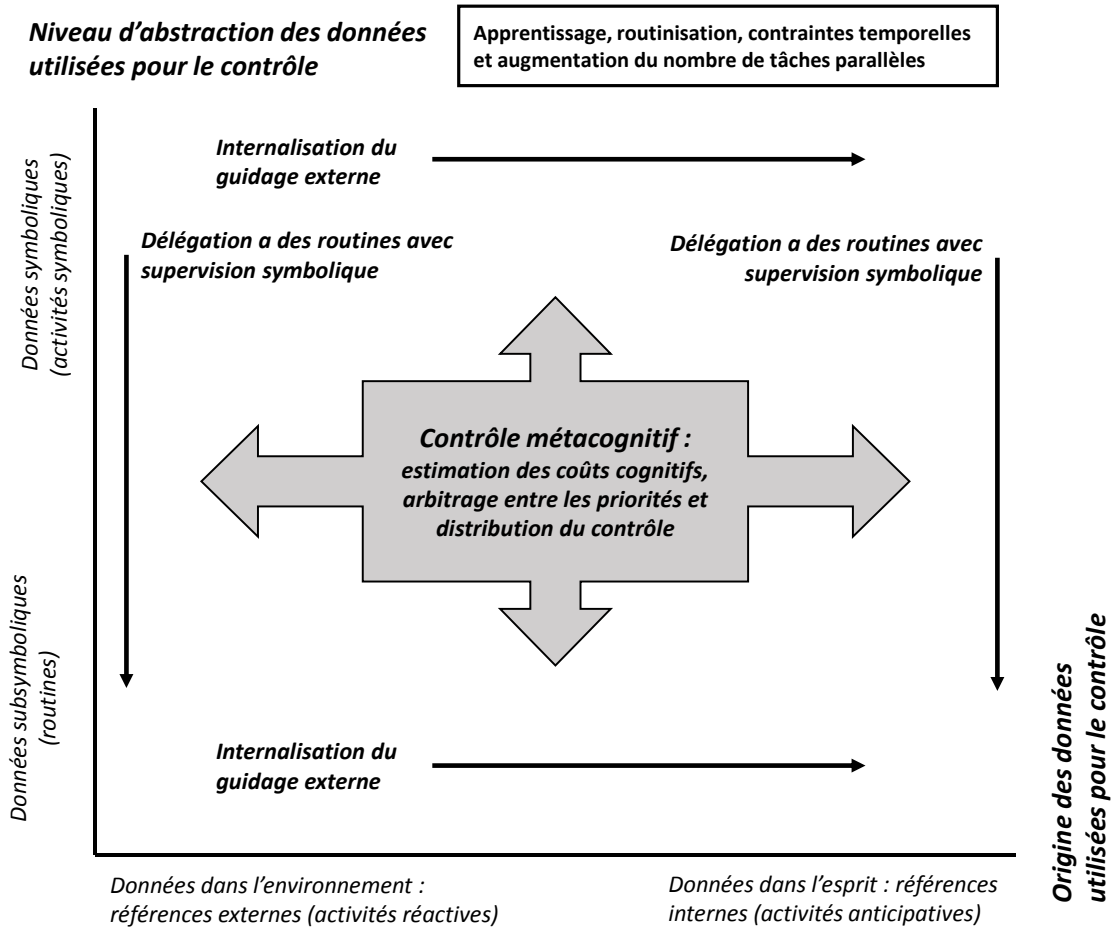


Figure 2 : effet de l'expertise sur le contrôle cognitif selon Hoc et Amalberti (2007) (traduction personnelle)

supervisées par des processus plus symboliques, ce qui doit permettre de détecter des problèmes éventuels. Ces apprentissages, et la routinisation de l'activité qui apparait en conséquence chez l'expert, permettent d'augmenter le nombre de tâches réalisables en parallèle et de plus facilement gérer les contraintes temporelles.

Ces routines et autres ressources vont se créer avec la répétition de l'exercice. Les études faites sur l'expertise s'accordent cependant sur le fait que la répétition ne suffit pas (Farrington-Darby & Wilson, 2006 ; Fiebig, Hayes, & Parzen, 1997), il faut que la pratique soit « délibérée » (Charness & Tuffiash, 2008). On définit une pratique délibérée comme étant un effort volontaire et prolongé, par exemple la répétition d'un exercice, souvent légèrement au-delà du niveau de compétences actuel de l'individu, et qui ne semble pas, *a priori,* avoir de lien avec l'exercice ou le domaine que l'on souhaite maitriser (Ericsson, 2008 ; Ericsson, Krampe, & Tesch-Römer, 1993). On remarque en effet, que les experts ne répètent pas

forcément tous les exercices, et pas forcément aussi longtemps, mais qu'ils répètent certains exercices en particulier qui les aident à améliorer ou maintenir leur niveau général.

I.2. Utilisation des études sur l'expertise

Malgré ce manque d'unanimité sur la définition de l'expertise, cette notion est utilisée régulièrement dans la littérature.

Pour concevoir des outils efficaces, il faut comprendre quelles compétences sont développées et dans quel ordre (Fiebig et al., 1997). Fiebig et ses collaborateurs étudient donc le développement de l'expertise à travers cinq phases qu'ils ont préalablement définies. Ils identifient les manques et les points forts de chaque phase dans l'optique d'élaborer par la suite des programmes d'entrainement ou des outils d'aide à la prise de décision. Ils utilisent ainsi cette méthode dans les domaines de la fabrication de pièces par des machinistes et de logiciels par des développeurs.

L'observation d'experts engagés dans des tâches représentatives permet de mieux définir les formations et les outils d'aide à la prise de décision selon Charness et Tuffiash (2008). Ces chercheurs rappellent ainsi que l'étude de la pratique des experts et des informations qu'ils utilisent dans l'environnement permet de former les novices. Ils citent des expériences dans le sport, l'aviation et la médecine. À chaque fois, on forme ou on construit des interfaces en utilisant ce que regarde l'expert. Cette méthode n'est donc pas sans lien avec celle de la conception d'interfaces écologiques.

I.3. Limites et interrogations concernant l'expertise

Cependant, ce type d'études, centrées sur la description des savoirs et compétences détenues par les opérateurs experts, explique rarement les mécanismes d'acquisition ou les processus impliqués dans l'acquisition de ces savoirs et compétences. Or, la compréhension des mécanismes cognitifs en jeu lors de l'acquisition de compétences, et non seulement des manifestations de la compétence, pourrait également être un atout lors de la conception d'interface.

De plus, l'utilisation d'heuristiques par les experts pourrait, dans certaines conditions, être problématique. En effet, l'expert est normalement capable de mobiliser l'heuristique appropriée, il serait en mesure de ne traiter que les paramètres pertinents de la situation et de choisir le bon procédé. Or, la question de l'erreur reste ici posée : que ce passe-t-il si l'environnement active la mauvaise heuristique, si l'environnement ne donne que peu ou pas d'informations permettant de prendre des décisions ? Enfin, l'expert peut-il avoir des représentations fausses ou tronquées ?

Ces questions, ainsi que celles concernant les mécanismes cognitifs en jeu lors de l'apprentissage et du développement ont été en partie traitées dans la littérature sur le développement.

II. LE DÉVELOPPEMENT DANS LA LITTÉRATURE CLASSIQUE : UNE DÉFINITION DE LA COMPÉTENCE

Afin de permettre le développement des compétences d'un utilisateur, nous avons besoin de nous représenter les mécanismes, qui de façon générale, sont mis en œuvre dans son développement cognitif, lesquels sont facilitateurs et lesquels, au contraire, peuvent se solder par des échecs. Ces mécanismes généraux pourront ensuite être appliqués au cas particulier de l'utilisation d'une interface homme-machine.

II.1. Les ressorts de l'apprentissage et du développement des compétences

Piaget : assimilation et accommodation

Pour Piaget et Inhelder (1966), tout apprentissage se fait par assimilation et accommodation. On assimile les nouveautés à des choses déjà connues et on les accommode pour qu'elles s'ajustent aux résistances du réel. Ainsi, aucun apprentissage ne se fait à partir de rien. Il existerait des mouvements réflexes au départ, à l'exemple de la

succion, sur lesquels l'ensemble des apprentissages viendraient peu à peu se greffer. Selon Weil-Barais (1994) l'acquisition de nouveaux concepts se fait, également, par imitation et collaboration, à partir de concepts préexistants pas encore matures.

L'élément de base soutenant ces assimilations et accommodations serait le schème. Piaget et Inhelder (1966) parlent ainsi de schèmes sensorimoteurs par exemple. Les schèmes sont des éléments qui vont organiser l'action, puis se modifier et se compléter pour permettre d'agir sur le monde, de la naissance à l'âge adulte.

Définition du schème

Pour Vergnaud (1991, p. 136), un schème est « une organisation invariante de l'activité dans une classe de situations données ». Vergnaud s'inscrit dans une approche développementale et cherche à déterminer dans quel ordre introduire les savoirs dans les formations, sachant que, souvent, les acquisitions se font en parallèle. Pour lui, il faut analyser les tâches scolaires et les situations que l'on présente à l'enfant. Il s'intéresse également à l'analyse des essais et erreurs et remet au centre de la conceptualisation la notion de représentation. Par exemple, pour comprendre comment l'enfant apprend les mathématiques, il faut également comprendre comment il se les représente. Dans un concept, il y a le flux de la conscience, les invariants opératoires, les systèmes signifiants/signifié et les schèmes. Le schème fait partie de la représentation et permet de la comprendre (Merri, 2007). Pour étudier les représentations et la conceptualisation, il faut analyser l'activité du sujet, d'où l'importance de la notion de schème.

Organisation invariante de l'activité

Une organisation invariante de l'activité ne signifie pas que l'activité se déroule toujours de la même façon. C'est bien l'organisation qui est la même. Ainsi, on distingue quatre éléments constitutifs d'un schème et qui organisent l'activité : les invariants opératoires, les inférences, les règles d'action et les anticipations (Coulet, 2011).

Les invariants opératoires sont les éléments que l'individu considère comme vrais ou pertinents pour effectuer l'action. Ce sont, en résumé, ses connaissances sur l'environnement ou la situation dans laquelle il agit. Ces connaissances ne sont pas forcément vraies dans l'absolu, c'est ce que l'individu croit ou pense, c'est la façon dont il se

représente l'environnement et ce qu'il peut faire dans cet environnement (Vergnaud, 1996). Enfin, il ne s'agit pas de toutes ses connaissances sur le sujet mais bien celles qu'il estime pertinentes ou appropriées à la situation en cours. Ces concepts sont le plus souvent implicites.

Les inférences sont les calculs que l'individu réalise pour ajuster le schème global à la situation particulière. Ces calculs étant inaccessibles, car interne à l'individu, on cherche en réalité ici à comprendre les paramètres d'ajustements sur lesquels l'individu s'appuie pour moduler et ajuster son activité à l'action en cours.

Les règles d'action sont les mouvements ou opérations précises à mettre en œuvre afin de réaliser l'activité en fonction des paramètres d'ajustement déterminés par les inférences et la situation en cours. Les règles d'action présentées dans le modèle du schème sont différentes des règles au sens de Rasmussen (Rasmussen, 1983). En effet, ces dernières renvoient au niveau plus ou moins symbolique du traitement cognitif sur lequel s'appuie l'action. Ainsi, chez Rasmussen (1983), les règles sont d'un niveau plus symbolique que les aptitudes et moins symboliques que les connaissances. Ici, dans le cadre du schème, la règle d'action peut se baser sur l'un ou l'autre des niveaux de la taxonomie, du plus symbolique au plus subsymbolique. Le cout cognitif du schème n'est pas abordé à ce niveau.

Les anticipations sont les résultats attendus de l'action. En mettant en œuvre une action, dans une situation particulière, on s'attend à obtenir un certain résultat. C'est l'écart entre le résultat réellement obtenu et nos anticipations qui va entrainer ou non une reprise modifiée de l'action.

Par exemple, dans le cadre du choix d'un itinéraire pour un trajet domicile-travail, un individu a des invariants opératoires concernant les différentes routes possibles, leurs qualités et la circulation sur ces routes. En fonction d'inférences, ici de l'horaire, et de la circulation estimée, l'individu peut décider d'une règle d'action ou d'une autre : emprunter le périphérique à midi et une route de centre-ville le matin. Il s'attend ainsi à arriver plus rapidement à destination dans un cas ou l'autre.

Enfin, le développement s'effectue par assimilation et accommodation de schèmes. Les nouveaux schèmes sont conçus en assemblant, modifiant et ajustant les anciens (Piaget & Inhelder, 1966). De fait, des conceptions préexistantes peuvent faire barrage à l'acquisition

de nouvelles connaissances. Pour Vergnaud (1991), il faut donc adjoindre aux schèmes une théorie de la référence qui permet de situer la zone d'action dans laquelle on peut intervenir. Ainsi, un schème donné ne s'appliquera qu'à une classe de situations donnée.

Classes de situations et champs conceptuels

En effet, les schèmes se consolident et se forment par l'interaction de l'individu et de son environnement, cette interaction forme une situation. Ainsi, l'apprentissage dépend de l'individu, des tâches qu'il cherche à réaliser, mais également de l'environnement, de ce que cet environnement met à disposition et des réponses qu'il renvoie suite aux actions de l'individu.

Cette interaction de l'individu dans une situation a été théorisée par des didacticiens et des psychologues du développement. Si ces cadres théoriques ont été développés dans le cadre de l'apprentissage, en grande partie chez l'enfant, ils restent pertinents pour les domaines scientifiques et techniques. En effet, un environnement professionnel constitue lui aussi une situation dans la mesure où l'individu devra s'y adapter et apprendre. Il est donc intéressant de définir ce que l'on appelle une situation et un champ conceptuel car ces éléments vont guider les apprentissages.

Dans le cadre de la didactique, Brousseau (2004) considère qu'une connaissance est une adaptation de l'élève à une situation. Il considère donc qu'il faut réfléchir aux situations proposées aux élèves de telle sorte qu'elles favorisent les apprentissages. Dans le cadre de l'enseignement, il définit deux types de situations : les situations didactiques et les situations adidactiques[3]. Les premières constituent l'intervention du maitre qui choisit des problèmes à présenter à l'élève, elles sont propres au contexte d'enseignement. Dans les secondes, en revanche, le maitre n'intervient pas. C'est le problème en lui-même qui va permettre à l'élève de construire la connaissance nécessaire. La connaissance ainsi créée, émanant de l'élève, doit pouvoir être utilisée en dehors des contextes scolaires et sans que l'élève ne soit incité à l'utiliser. Dans une situation adidactique, si l'intention d'enseigner a disparu, il y a tout de même un savoir à acquérir. Ainsi, les connaissances ne sont pas décontextualisées, au contraire, elles se « [caractérisent] par une (ou des) situations adidactiques qui en

[3] Orthographe définie par les auteurs.

préservent le sens et que nous appellerons *situation fondamentale* » (Brousseau, 2004, p. 59‑60).

En résumé, une situation est l'interaction entre un individu et son environnement ou une tâche. Ainsi, ce sont les situations qui donnent du sens à un concept *via* l'activité du sujet. Et, inversement, les schèmes permettent de traiter une situation (Vergnaud, 2001).

Il faut ici préciser que, pour Vergnaud (1982), un concept est composé de trois entités : les situations de références, les invariants opératoires et des représentations symboliques. Ces éléments font références aux trois pôles de la sémiotique triadique : l'objet, le signifié et le signifiant, respectivement. En effet, contrairement aux invariants opératoires, qui, toujours selon Vergnaud (1982), ne sont pas explicites ou verbalisables bien qu'ils puissent être consciemment mobilisés, les concepts s'appuient, quant à eux, sur des symboles. On peut ainsi les décrire, les enseigner ou encore échanger à leur sujet.

Ces concepts, ne sont pas stables chez un individu donné. Ils vont évoluer en fonction des situations qu'il rencontre et qui vont être associées à chacun de ses concepts : son histoire, sa formation et son expérience personnelle. Certains concepts, qui sont appliqués à des situations proches, vont pour l'individu être associés et former un système. Un champ conceptuel est ainsi formé de concepts et de situations qui y sont associées (Vergnaud, 2001). Ces situations et les connaissances qui y sont liées peuvent être regroupées entre elles, par domaine pédagogique ou scientifique. Un champ conceptuel est à la fois un ensemble de situations et un ensemble de concepts et de théorèmes qui permettent d'analyser ces situations (Vergnaud, 1991). Ici, on entend situation au sens de tâche que l'on peut décomposer en sous-tâches afin d'en analyser la difficulté. On a comme exemple de champ conceptuel : les classes additives, les classes multiplicatives mais également l'électricité, la mécanique, les grandeurs spatiales, la logique des classes (cette dernière utilise des schèmes qui sont également présents dans les classes additives). La construction d'un champ conceptuel consiste en une construction d'un ensemble de problèmes, rationnellement organisés, à partir d'une variété empirique de situations (Pastré, 2007).

Il y a deux idées principales à retenir : il existe une grande variété de situations dans un champ contextuel donné, et les connaissances d'un individu dépendent des situations qu'il a rencontrées et maitrisées, c'est-à-dire de son histoire (Vergnaud, 1991).

Vergnaud (2001) donne l'exemple de la reproduction des végétaux. L'enfant a l'occasion d'en croiser des exemples dans la vie quotidienne : lorsqu'il plante une graine, lorsqu'il voit des fleurs, ou qu'il mange un fruit. Ces éléments vont former chacun un concept : la graine, la fleur et le fruit. Ils sont associés car ils permettent aux plantes de se de reproduire. Le concept de fruit par exemple évolue chez l'enfant : il est d'abord de la nourriture avant d'être associé à la reproduction végétale. Dans le cadre de l'école, ces concepts seront abordés sous un angle nouveau, plus scientifique. Les connaissances antérieures de l'enfant pourront alors être un appui ou un obstacle aux nouvelles acquisitions.

II.2. Obstacles, schèmes trompeurs et conceptions erronées

Bien que l'apprentissage soit différent d'un enfant à l'autre, on peut retrouver un certain nombre de régularités dans les types de procédures utilisés, les obstacles et les représentations existants chez eux. C'est pour cela que l'utilisation de la théorie des champs conceptuels est justifiée en didactique.

Séré et Weil-Barais (1988) étudient par exemple le développement du concept de conservation de la quantité d'air. Elles montrent que certains enfants interrogés pensent que la chaleur est matériellement semblable à l'air. Pour d''autres, elle peut détruire des particules d'air. Ces mauvais postulats entrainent des réponses erronées, s'ils ne sont pas déterminés avant l'enseignement, ils conduiraient à des représentations fausses des problèmes physiques, notamment sur la nature des particules. On utilise le principe du médiateur social pour l'apprentissage des sciences, en utilisant des modèles scientifiques corrects mais intermédiaires entre ceux que l'élève a déjà construits et ceux que l'on veut l'amener à élaborer. Le compromis ainsi effectué permet de reconnaitre les difficultés des élèves lors d'apprentissages nouveaux (Weil-Barais & Resta-Schweitzer, 2008).

Bachelard (Mony, 1938) parle ainsi d'obstacle épistémologique concernant la physique. Ce philosophe considère que, intrinsèquement à cette discipline, il existe des connaissances partagées par les chercheurs, à un moment donné de l'histoire de la science, qui perturbent, voire empêchent, l'acquisition de nouvelles connaissances. Une anecdote concernant Einstein illustre cette idée : il aurait, pendant un temps, considéré ses résultats concernant la

théorie de la relativité comme étant faux, car ils remettaient en cause les principes de la physique classique admis jusqu'alors.

Brousseau (1989) étend la notion d'obstacle épistémologique au domaine de la didactique. Ce n'est pas seulement au niveau des sciences physiques que des obstacles existent mais dans toutes les disciplines, également au niveau de l'individu, qui, au cours de son apprentissage, rencontrerait les mêmes obstacles. Les erreurs observées chez les élèves étant en général semblables, il en conclut en effet, qu'elles ne sont pas aléatoires ni dues à l'ignorance. Au contraire, elles sont, selon lui, dues à des connaissances antérieures que l'élève a acquises, à des savoirs antérieurs qui contredisent de nouveaux savoirs. En règle générale, ces obstacles, et les erreurs qui en sont la manifestation, sont persistants, même longtemps après que le modèle erroné ait été rejeté par le sujet. Il faut un nombre suffisant de situations nouvelles incompatibles pour réussir à le faire disparaitre. Brousseau défini trois types d'obstacles : les obstacles ontogénétiques sont liés au développement neurobiologique, les obstacles didactiques sont liés à des choix éducatifs, enfin les obstacles épistémologiques sont liés à l'histoire du concept.

On retrouve une idée semblable dans le modèle néo-structuraliste de Pascual Leone (Charron, Dumet, Guéguen, Lieury, & Rusinek, 2007). En effet, pour Pascual Leone (Houdé & Winnykammen, 1992; Pascual-Leone, 2013), l'apprentissage se fait à partir de schèmes préexistants et, dans certaines situations, certains schèmes non pertinents peuvent être activés. Lors d'un apprentissage, les schèmes préexistants sont accommodés ou assemblés pour créer de nouveaux schèmes.

Pascual Leone (Pascual-Leone & Irwin, 1994) définit deux types d'apprentissage. Le premier type d'apprentissage est lent et cumulatif, mais il n'est possible que dans un environnement facilitant. En effet, lors de ce type d'apprentissage, l'individu n'investit pas ou peu de ressources à l'apprentissage. Il agit dans son environnement et construit ses connaissances à partir des régularités qu'il y retrouve. Ainsi, les schèmes issus de cet apprentissage sont très liés à la ou aux situations qui les ont induits. Si ces situations sont nombreuses et variées, alors le schème sera facilement généralisable. Cependant, le plus souvent, ce type d'apprentissage abouti à des schèmes peu transférables.

Le second type d'apprentissage est rapide et intentionnel. Il est plus centré sur la structure que sur les détails de l'apprentissage, les schèmes qui en sont issus sont ainsi

potentiellement plus facilement généralisables. Ils sont au départ couteux à mettre en œuvre, mais avec la pratique et la répétition, ils se transforment et deviennent moins couteux à utiliser tout en restant facilement transférables à d'autres situations.

Il y a un point commun entre les schèmes issus de ces deux types d'apprentissages : ils sont activés par la situation. Cependant, il existe des situations trompeuses. Il s'agit de situations dans lesquelles des schèmes non pertinents, appelés schèmes trompeurs, sont activés en même temps que des schèmes pertinents. L'individu doit alors inhiber ces schèmes trompeurs et allouer plus d'énergie mentale aux schèmes pertinents afin de s'adapter correctement à la situation. Toutefois, l'inhibition est couteuse. Ainsi, pour savoir si un sujet est capable de réussir une tâche, il faut connaitre l'énergie mentale dont il dispose et l'énergie demandée par la tâche (Pascual-Leone, 2013). L'individu peut donc réussir une tâche dans une situation trompeuse, à condition que l'énergie mentale nécessaire (mesurée par le nombre de schèmes à activer et inhiber) soit inférieure à l'énergie mentale disponible chez l'individu (le nombre de schèmes qu'il est capable d'activer ou d'inhiber simultanément). Il est à rappeler que les schèmes disponibles chez un individu dépendront de son histoire personnelle. Parmi ces schèmes, on compte des schèmes affectifs, en lien avec la motivation, des schèmes cognitifs (l'essentiel des compétences) et des schèmes personnels (par exemple comme la dépendance à l'égard du champ).

En résumé, dans certaines situations, des schèmes non pertinents, ou trompeurs, sont activés. S'ils ne sont pas inhibés, ils vont interférer avec la réalisation de la tâche et faire obstacle à l'apprentissage de schèmes pertinents.

II.3. Les schèmes dans le support aux procédés de fabrication

Les théories du développement chez l'enfant et du développement des compétences ont déjà été utilisées afin de développer des interfaces.

Ainsi, Rogalski et Marquié (2004) présentent un modèle du développement des compétences, appelé « KEOPS[4] » qui doit permettre d'élaborer des situations de formations

[4] *Knowledge (K), Experience (E), Operative cognitive tools (O) and Problems & Solutions (PS)*

et des situations de travail, ce qui inclut les outils utilisés lors de ces situations. Ces auteurs considèrent qu'il existe quatre types de connaissances : les connaissances K qui sont des connaissances conceptuelles et factuelles, des connaissances PS qui sont des connaissances concernant les situations et les procédures qui y sont associées, les connaissances E qui sont des connaissances épisodiques concernant une situation particulière déjà rencontrée et enfin, les connaissances O qui concernent les outils à disposition à qui l'on peut déléguer certaines tâches. Ils lient leur modèle à celui de Rasmussen (1983), présenté dans le chapitre précédent : ainsi, les connaissances K sont prédominantes dans les comportements basés sur les connaissances, les connaissances PS le sont dans les règles et les connaissances E fréquemment rencontrées le sont dans les aptitudes. Le modèle KEOPS est utilisé, par exemple, afin d'analyser une situation de travail dynamique et concevoir des situations de formation (Rogalski, 2004).

Un autre élément important du modèle qu'ils présentent est l'existence d'une double boucle de régulation : l'individu agit sur une situation qu'il va donc modifier, en retour, la situation, notamment par les feedbacks qu'elle renvoie, va modifier l'individu, son organisation, ses connaissances et les outils qu'il utilisera.

Il faut donc réfléchir en particulier aux situations de travail et les adapter à la façon dont on peut enrichir chacun des pôles de connaissances (KEOPS). Traiter des situations variées permet de développer le répertoire des connaissances PS, à condition de recevoir un feedback sur le résultat de l'action menée. Le répertoire des connaissances K s'enrichit de la même façon avec en plus la nécessité d'inclure une médiation de la part d'acteurs plus expérimentés. Enfin, il faut inclure des situations nouvelles aux situations standards afin d'enrichir le pôle E mais également le pôle K, en favorisant encore une activité réflexive sur les situations rencontrées et les connaissances élaborées. L'utilisation d'outils cognitifs opératifs divers (représentations externes, instruments de calculs, méthodes de traitement de situations), quant à elle, va favoriser l'accroissement du pôle O. Dans un premier temps, l'opérateur va développer des schèmes d'utilisation de ces outils. Ces outils pourront, dans un second temps, être intériorisés. Cependant, leur conception doit éviter deux écueils. Ils ne doivent pas se contenter de régler les situations de travail courantes sans laisser à leur utilisateur la possibilité de développer ses connaissances : en effet, les situations problématiques, qui sont en général à régler par l'utilisateur, nécessitent des connaissances

sur le domaine qu'il ne peut pas développer sans pratique. Enfin, les situations de travail courantes ne doivent pas limiter les situations problèmes ou l'activité de l'opérateur. En effet, celui-ci a besoin de rencontrer et de gérer des situations variées pour développer ses compétences. Il est important de conserver, également dans les situations de formation, la complexité et les contraintes du domaine réel, tout en les maintenant dans la zone de proche développement de l'utilisateur, c'est-à-dire, en référence à Vygotski (1935), dans la zone de développement, qu'il est capable d'atteindre au vu de ses capacités actuelles et s'il est soutenu par autrui.

Dans la théorie de la zone de proche développement, on considère que l'apprentissage se fait par changement radicaux dans le fonctionnement de la pensée. Le cheminement dans la zone de proche développement se fait grâce à un tuteur, un adulte ou un pair plus capable, qui soutient l'évolution de l'apprenant en fonction de son positionnement actuel (Rogalski, 2005 ; Vygotski, 1935). L'interface devrait donc pouvoir remplir ce rôle en donnant des informations sous la forme appropriée à l'utilisation mais également à l'individu et à son développement actuel.

III. CONCLUSION

En fonction du niveau de développement qu'il a atteint, de son parcours de vie, de ses expériences antérieures, l'opérateur va être plus ou moins capable d'utiliser l'interface qu'on lui propose afin de réaliser la tâche proposée. L'interface de l'outil que nous souhaitons développer devrait, dans l'idéal, être capable de déterminer le développement de l'utilisateur et de lui proposer les informations adaptées à son niveau de développement. Pour cela, il faudrait non seulement étudier le compromis cognitif des utilisateurs, mais également les trajectoires développementales possibles, mettre en exergue les fausses croyances qui pourraient bloquer les apprentissages et, de fait, l'utilisation de l'interface.

Dans le champ des interfaces, comme dans le développement en général, les opérateurs utilisant depuis longtemps un dispositif se sont forcément construit des représentations qu'il faudra analyser et positionner par rapport à la représentation que l'on souhaiterait leur faire acquérir : la présentation d'une représentation correcte et exhaustive ne sert à rien si elle va à l'encontre des représentations erronées préexistantes chez l'individu.

QUESTIONS EN SUSPENS ET PRÉSENTATION DES CONTRIBUTIONS EMPIRIQUES

Les cadres théoriques présentés aux chapitres précédents, bien qu'ils appartiennent à des domaines de la littérature *a priori* éloignés les uns des autres, sont nécessaires afin de répondre à notre question initiale. En effet, il s'agit pour nous d'élaborer des préconisations quant à un compagnon virtuel, utilisant la simulation, qui permette de soutenir un procédé de production, dans une situation dynamique, tout en maintenant ou en développant les compétences des opérateurs qui l'utilisent.

Nous présentons ici une synthèse de ces cadres théoriques : les travaux sur les situations dynamiques et les interfaces écologiques présentent le fonctionnement cognitif des opérateurs dans une situation dynamique ; ceux sur le développement des compétences décrivent quels éléments d'une situation peuvent favoriser les apprentissages. Ces deux cadres ne sont pas antithétiques, au contraire, les mécanismes qu'ils décrivent sont, dans certaines mesures, semblables, malgré des différences de vocabulaire.

I. SYNTHÈSE THÉORIQUE ET HYPOTHÈSE GÉNÉRALE

I.1. Lien entre les différents modèles

Le modèle de l'EID nous dit que l'expert prend ses décisions et agit en fonction des caractéristiques saillantes de l'environnement qu'il a préalablement identifiées. La littérature sur l'expertise semble également aller dans ce sens, en particulier avec la notion

d'heuristique de décision. Dans le modèle de Pascual Leone (1987), l'environnement de travail correspond à une classe de situations qui active un certains nombres de schèmes, pertinents ou non. Parmi eux, l'opérateur choisit le schème qui lui semble efficace dans une certaine configuration de la situation et inhibe les autres. L'expert, en particulier, en ayant eu la possibilité et la volonté d'investir dans son domaine de travail, a créé un répertoire de schèmes large et varié lui permettant de faire face à un nombre de situations particulières plus important. Avec l'expertise, la sélection d'un schème pertinent et l'inhibition des schèmes trompeurs ou non pertinents dans la situation rencontrée deviennent plus aisées. En résumé, ces schèmes sont l'équivalent de ce que Hoc et Amalberti (2007) nomment les ressources internes de l'opérateur.

Selon le modèle SRK de Rasmussen (1983), les comportements basés sur les connaissances, les règles ou les aptitudes émergent d'une représentation du système. Certains éléments caractéristiques de la situation vont provoquer des comportements basés sur des traitements subsymboliques de l'information. Dans une définition du schème (Coulet, 2011), les inférences sont les calculs réalisés pour adapter son comportement à la situation. Ils se manifestent par des indices présents dans la situation que l'individu va utiliser pour adapter son comportement. Dans une situation dynamique, ces deux concepts se rejoignent. Dans les deux cas, il s'agit d'éléments de l'environnement permettant d'adapter son comportement. Par exemple, dans le cadre de la conduite, les feux tricolores agissent, selon le modèle de Rasmussen (1983), comme un signal : ils provoquent un comportement basé sur les aptitudes donc, situés à un niveau subsymbolique, d'arrêt ou de départ. Via le prisme du schème, il s'agirait d'une inférence : l'action de démarrer ou d'arrêter le véhicule est conditionnée à la présence d'une couleur ou d'une autre. De façon générale, si les schèmes ont été théorisés pour comprendre comment les apprentissages se déroulent, ils conditionnent également la façon dont l'individu restitue ses connaissances, comment il agit, résout un problème ou prend une décision. Ils peuvent être plus ou moins automatisés ou symboliques comme le sont les comportements décrits par le modèle SRK.

Dans le cadre de l'apprentissage chez les enfants, il a été démontré que certains schèmes, pertinents dans certaines situations, sont mobilisés à tort dans d'autres types de situations proches, mais trompeuses (Charron, 1998). Il en va de même pour un adulte (Pascual-Leone, 2013). Les comportements basés sur des habiletés, règles, et connaissances, n'étant pas si

différents des schèmes, pourraient donc également s'appuyer sur des indices trompeurs ou faux.

Enfin, comme le précise le modèle de Hoc et Amalberti (2007), si les ressources externes sont limitées ou si l'opérateur ne peut pas agir dans son environnement, les ressources internes investies seront plus faibles afin de limiter les dépenses cognitives inutiles. Ainsi, un tel environnement de travail serait une situation qui ne permettrait pas le développement de schèmes pertinents ou qui laisserait des schèmes non pertinents se mettre en œuvre. En effet, les opérateurs ayant besoin de se représenter la situation, mais n'ayant pas à leur disposition les moyens de valider ou d'infirmer leurs représentations seraient dans l'incapacité d'apprendre.

I.2. Hypothèse théorique

Un schème trompeur peut apparaître chez l'adulte novice ou en formation, voire chez l'adulte expérimenté, si la situation de travail favorise l'apparition de ce schème ou si elle empêche ou ne permet pas sa déconstruction. De plus, ce schème trompeur devrait altérer les performances des opérateurs qui le mettent en œuvre. Enfin, une déconstruction ou une inhibition du schème trompeur *via* un assistant au procédé de fabrication conçu dans ce but devrait être possible. Une telle assistance pourrait même éviter l'apparition du schème trompeur.

II. MÉTHODOLOGIE

Afin d'établir l'existence d'un schème trompeur chez des opérateurs et son lien avec leurs performances, trois études ont été mises au point.

II.1. Analyse du domaine de travail et activité des opérateurs

L'atelier tenant lieu de cas d'étude étant un environnement dynamique, avec peu d'informations disponibles sur le processus de fabrication, il semblait propice à l'apparition

de schèmes trompeurs notamment chez les novices. Nous avons donc analysé l'activité des opérateurs dans l'atelier et le processus de fabrication.

L'utilisation de la hiérarchie d'abstraction, telle que décrite dans le cadre de la conception d'interfaces écologiques (Bennett & Flach, 2011), a permis d'élaborer une représentation aussi vraie que possible du système étudié. Le traitement des entretiens avec les opérateurs selon le modèle du schème et les observations des opérateurs dans leur activité ont permis d'obtenir leurs représentations.

Dans l'atelier, seulement deux opérateurs pilotent la machine, ce qui représente un échantillon trop restreint pour établir des conclusions. De plus, le processus de production n'étant pas contrôlable, nous ne pouvions établir, dans le cadre de l'atelier, de liens entre les représentations obtenues et les performances des opérateurs. Nous avons donc choisi d'investiguer ce lien *via* le paradigme du micromonde.

II.2. Développement du micromonde et étude du schème trompeur

Un micromonde est une simulation simplifiée d'une situation réelle (Omodei & Wearing, 1995). Notre micromonde a été développé, pendant un an, à partir des résultats obtenus lors de l'analyse de l'activité afin de reproduire, tout en les contrôlant, l'atelier, les contraintes qui s'exercent sur le processus de production et les tâches à réaliser par l'opérateur.

Le micromonde permet ainsi d'étudier le schème trompeur : sa mobilisation par les participants est comparable à sa mobilisation par les opérateurs de l'atelier réel. Il permet également de tester l'existence d'un lien entre les schèmes utilisés et les performances des participants, et ce, dans le but d'estimer s'il peut être intéressant de faire disparaître ce schème trompeur dans l'atelier réel par le biais d'un outil d'aide au procédé de fabrication adapté : le compagnon virtuel.

II.3. Test d'une interface dans le micromonde

Afin d'établir la capacité de certains éléments particuliers du compagnon virtuel à faire disparaitre ou à empêcher l'apparition du schème trompeur, une version simplifiée du compagnon virtuel a été créée dans le micromonde.

Cette version simplifiée concerne uniquement deux des éléments du micromonde sur lesquels les participants doivent agir et pour lesquels l'utilisation du schème trompeur s'avèrera particulièrement pénalisante dans le micromonde. L'interface du compagnon virtuelle représente les caractéristiques saillantes de l'activité qui devraient favoriser la mise en œuvre d'un schème identifié comme pertinent. L'objectif de l'étude est ici de déterminer si la présentation d'un schème identifié comme pertinent permet d'empêcher l'apparition du schème trompeur dans le micromonde et si, même en l'absence de du compagnon virtuel, les performances s'en retrouvent améliorées.

III. MÉTHODOLOGIE STATISTIQUE

Durant chacune des études réalisées, un grand nombre de variables sont susceptibles d'agir sur les critères d'évaluations qui sont fixés. Il faut donc, à chaque fois, déterminer parmi ces variables lesquelles sont déterminantes pour notre étude avant de pouvoir étudier précisément comment ces variables affectent nos paramètres.

Plusieurs statistiques de sélection de variables ont donc été utilisées pour sélectionner ces variables. Nous présentons ici dans le détail ces analyses statistiques afin de faciliter la lecture des analyses et des résultats qui seront présentés lors des chapitres expérimentaux.

Sélection de variables avec le BIC

Le BIC (Critère d'Information Bayésien) est un critère de sélection de modèles statistiques par comparaison de la vraisemblance de chacun des modèles ajustée par le nombre de variables contenues dans le modèle. Il se calcule à partir de la formule suivante :

$$BIC = -2\ln R - k\ln n$$

Dans cette équation, R représente la vraisemblance du modèle, n le nombre d'observations et k le nombre de paramètres indépendants du modèle. Le modèle gardé est celui dont le BIC, calculé grâce à cette formule, est le plus petit. C'est le modèle qui est à la fois le plus vraisemblable et le plus parcimonieux. Les variables qui sont sélectionnées sont celles qui sont présentes dans ce modèle. Cornillon et Matzner-Loeber (2007) ont montré qu'en matière de modèles linéaires, comparé au R^2 ajusté, au F de Fisher ou encore à l'AIC, le BIC est le critère de sélection de variables le plus exigeant, c'est-à-dire qu'il garde le nombre minimum de variables. Ainsi, en utilisant ce critère, il y a moins de risque de sélectionner à tort une variable.

Le BIC fonctionne avec tout type de loi de probabilité : on peut donc choisir un modèle avec une loi qui correspond aux caractéristiques de nos données (avec une loi Binomiale, de Poisson, Gamma, Gaussienne, etc.). L'inconvénient est qu'il faut tester tous les modèles avec toutes les combinaisons de variables possibles ou intéressantes. Or, les combinaisons à tester augmentant de manière exponentielle en fonction du nombre de variables, dès que ce nombre devient important, il devient en pratique difficile de faire tous les calculs. Pour pallier à cette difficulté, deux solutions existent : la procédure pas-à-pas (*stepwise procedure*) et la présélection de variables par analyse de déviance.

Procédure pas à pas (*Stepwise procedure*)

Dans le logiciel R, la procédure pas-à-pas crée et compare automatiquement des modèles emboités (l'un contenant exactement les mêmes paramètres que l'autre plus *k* paramètres additionnels) compris entre le modèle nul (avec aucune variable) et le modèle complet avec toutes les variables. Elle donne pour résultat le meilleur modèle, parmi les modèles comparés, selon le critère de sélection de modèle utilisé (par exemple le BIC).

On ne peut pas, avec cette procédure, comparer des modèles suivant des lois de probabilité différentes. De même, lorsque le nombre de variables du modèle complet devient important, les résultats obtenus donnent moins de chances que le modèle retenu soit le meilleur de tous, même s'il reste quand même un modèle acceptable.

Analyse de déviance

Dans certains cas, avant d'utiliser la méthode du BIC, l'effet de chacune des variables identifiées est évalué par une analyse de déviance. La déviance est une mesure statistique de la qualité d'ajustement d'un modèle aux données fondée sur le calcul de vraisemblance. Cette évaluation commence par calculer la déviance d'un modèle complet, c'est-à-dire un modèle qui considère que toutes les variables explicatives ont un lien avec le critère que l'on souhaite expliquer. Puis, elle estime la part d'information expliquée par chacune des variables du modèle en retirant une à une les variables et en constatant la baisse de déviance que le retrait de chacune des variables produit. Comme la différence de déviance entre deux modèles emboités suit de manière asymptotique une loi du Chi-deux à k degrés de liberté, sous l'hypothèse nulle que le modèle le plus parcimonieux est vrai, il est possible de tester si la part d'explication apportée par une variable est négligeable, à un seuil inférieur ou égal au niveau choisi (pour nous 0,1).

Dans les cas où nous avons utilisé cette méthode, les variables présélectionnées ont ensuite été validées par la méthode des BIC. Pour ce faire, de nouveaux modèles ont été créés à partir des variables présélectionnées une à une ou combinées entre elles. On garde ensuite le modèle ayant le plus petit BIC et on conclut que les variables prédictives de ce modèle ont un effet. Si le BIC le plus petit est celui du modèle nul, on considère que l'on ne peut pas garder les variables présélectionnées.

IV. CONCLUSION

Il ressort de l'étude des champs théoriques que les situations dynamiques sont des situations de travail complexes, nécessitant différents niveaux de mobilisation cognitive selon le problème à traiter, notamment s'il est bien connu ou s'il est nouveau. Cependant, dans ce type de situation, les informations fournies par l'environnement de travail peuvent être limitées, comme dans le cas d'étude qui sera présenté et étudié dans les chapitres suivants. Les opérateurs, pour agir, vont donc se reposer en grande partie sur leurs représentations existantes du système. Le manque d'information ne facilitant ni l'apprentissage ni le diagnostic des situations limites, les représentations qu'ils vont mobiliser peuvent alors être non pertinentes voire fausses.

Les chapitres suivant visent à étudier l'existence de telles représentations erronées dans le cadre d'un atelier réel, puis dans un micromonde reprenant les caractéristiques de l'atelier réel. Enfin, un outil visant à limiter l'utilisation du schème trompeur identifié est testé dans le micromonde.

ÉTUDE 1 : ANALYSE DE L'ACTIVITÉ D'OPÉRATEURS SUR UN POSTE D'ÉTIRAGE DE CADRE DANS UN ATELIER D'AÉRONAUTIQUE

I. POSITION DU PROBLÈME

I.1. Objectifs

L'atelier tenant lieu de cas d'étude appartient à une usine d'aéronautique qui fabrique et assemble des carlingues d'avion. En particulier, l'atelier présenté transforme des poutres métalliques rectilignes en poutres incurvées devant, à termes, servir d'ossature à l'avion. Le compagnon virtuel utilisera les techniques de simulation des processus physiques développées par l'équipe du GeM. Ce compagnon virtuel est l'outil d'assistance aux procédés de fabrication demandé dans le cadre du projet ARTUR.

L'enjeu de cette première étude est d'élaborer les premières recommandations pour la conception du compagnon virtuel.

Afin d'élaborer ces recommandations, nous avons besoin de connaître les processus mentaux des opérateurs de l'atelier. Pour déterminer ce qui est pertinent ou non dans les représentations des opérateurs nous avons besoin de connaître la représentation réelle des processus physiques existant dans l'atelier. Pour ce faire, nous avons utilisé trois niveaux d'analyse basés sur trois cadres théoriques.

La hiérarchie d'abstraction est utile pour comprendre les contraintes s'exerçant sur l'atelier étudié (Bennett & Flach, 2011). Cette analyse nous servira également plus tard (cf. étude 3)

à la conception d'une interface écologique pour l'assistance à l'opérateur. Le modèle du contrôle cognitif nous éclairera sur l'architecture cognitive des opérateurs de l'atelier (Charron et al., 2010; Hoc & Amalberti, 2007). Enfin, la théorie des schèmes d'action permettra de décrire les représentations symboliques présentes chez les opérateurs (Coulet, 2011; Vergnaud, 1988), qu'elles soient pertinentes ou non (Pascual-Leone, Johnson, & Agostino, 2010).

Nous présentons donc ici l'atelier tenant lieu de cas d'usage ainsi que les hypothèses de travail qui ont guidé l'élaboration de notre protocole d'étude. Nous présenterons ensuite chacune des trois phases de ce protocole et les résultats obtenus.

I.2. Présentation du travail dans l'atelier

L'atelier

Déroulement général de l'activité

Les poutres sont appelées « cadres » dans l'atelier. L'objectif de l'atelier est d'incurver et d'étirer ces cadres. Les cadres peuvent avoir, au niveau de leur section, une forme de U ou une forme de T, et mesurer jusqu'à 10 mètres de long. Afin d'avoir les caractéristiques et la forme requises pour être utilisés dans les avions, les cadres subissent plusieurs transformations. La Figure 3 présente de façon synthétique l'atelier.

Lorsqu'ils arrivent dans l'atelier, les cadres sont d'abord « étirés » sur une machine d'étirage semi-automatisée. L'étape d'étirage est composée de deux mouvements presque simultanés : l'étirage et l'enroulement. C'est la première passe.

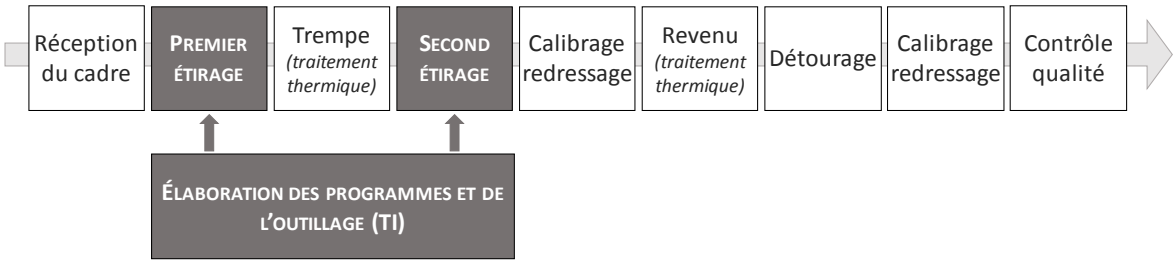


Figure 3 : représentation schématique de l'organisation de l'atelier étudié
NB : Sur fond gris apparaissent les étapes étudiées
TI = Technicien d'industrialisation

Ensuite, les caractéristiques internes du cadre sont modifiées grâce à un traitement thermique : ce traitement permet à la fois de les rendre plus faciles à travailler pendant quelques heures et plus résistante après ce délai. Les cadres peuvent être mis en chambre froide, appelée « frigo », afin de ralentir le processus de durcissement du cadre.

Après le traitement thermique, le cadre est à nouveau étiré et enroulé afin d'atteindre les dimensions requises. C'est la seconde passe.

Enfin, pour terminer le processus de durcissement, le cadre subit un nouveau traitement thermique permettant de finaliser la maturation : après cette étape, il est assez résistant pour tenir son rôle de squelette d'avion. Enfin, comme le cadre doit obtenir une forme spécifique en fonction de sa position et de son rôle dans l'avion, il est ensuite découpé, échancré et percé par un robot : c'est l'étape d'usinage. Toutes ses étapes sont partiellement automatisées : les opérateurs interviennent pour déplacer les cadres et contrôler les machines.

Cependant, comme les résultats obtenus, notamment par la machine d'étirage, ne sont pas parfaits, chaque cadre est repris manuellement avant et après le robot d'usinage. Ces étapes de calibrations manuelles sont les plus longues du processus, elles peuvent, en effet, durer plusieurs heures alors que l'étirage ne dure qu'entre deux et six minutes par cadre et l'usinage environ 30 minutes. De plus, ces étapes de calibrage mobilisent plusieurs opérateurs quand l'étirage ou les traitements thermiques n'en nécessitent qu'un. Il serait donc intéressant d'améliorer l'étirage pour réduire ces étapes de calibrations manuelles.

Organisation du personnel

En ce qui concerne l'organisation de l'atelier, plusieurs types d'opérateurs sont mobilisés pour atteindre les objectifs de l'atelier :

- le chef de ligne gère la production, les cadences, les équipes ;
- le technicien d'industrialisation (TI) intervient lorsqu'une nouvelle référence de cadre apparaît pour créer les programmes utilisés par la machine, déterminer l'outillage nécessaire, ou modifier les programmes en cas de problème ;
- le responsable qualité contrôle la marchandise en particulier en sortie de ligne afin de remonter les défauts observés et au besoin modifier les paramètres de production en collaboration avec le TI, le chef de ligne et parfois les opérateurs experts ;

- les opérateurs d'étirage utilisent au quotidien la machine et les outillages conçus par le TI, avec les programmes créés par celui-ci, en cas de problème, ils peuvent remonter des défauts au TI, au chef de ligne, au responsable qualité ;
- les opérateurs de calibrage récupèrent les cadres étirés par les opérateurs d'étirage et les corrigent si nécessaire, ils peuvent remonter les problèmes aux mêmes interlocuteurs que les opérateurs d'étirage ;
- l'opérateur d'usinage contrôle le robot qui découpe les cadres.

Enfin, les opérateurs considèrent les tâches de calibrage comme étant laborieuses et fastidieuses. La direction comme les opérateurs pensent qu'améliorer le processus d'étirage pourrait faciliter et limiter les tâches de calibrage. En effet, les cadres peuvent sortir déformés de la phase d'étirage. Le compagnon virtuel devra aider à mieux contrôler et programmer la machine d'étirage.

Tâche d'étirage

L'étirage se déroule en deux passes : la première, lors de l'arrivée des cadres dans l'atelier et, la seconde, après le traitement thermique. Il y a peu de différences entre les deux passes. Des étapes intermédiaires sont ajoutées lors de la seconde passe du fait de la forme incurvée du cadre à ce moment.

Lors de l'étirage, deux opérateurs travaillent ensemble : l'opérateur support qui aide à la manutention du cadre et le pilote qui contrôle le processus et la machine. Le panneau de contrôle indique la position des deux bras hydrauliques de la machine et l'état des mors (ouverts ou fermés) qui tiennent le cadre à chacune de ses extrémités.

Les deux opérateurs vérifient l'ordre de fabrication, qui est la fiche de suivi des cadres et sur laquelle figure les références du cadre, les programmes d'étirage et les références des outils nécessaires à l'étirage.

Ils installent ensuite le cadre sur la machine. Le cadre est alors maintenu par les mors. Puis, ils installent de longues pièces en élastomère dans le cadre : ce sont les chenilles qui doivent maintenir la section du cadre en place lors de l'étirage. Le pilote lance ensuite chaque phase de l'étirage depuis le panneau de contrôle. Il peut également contrôler la vitesse d'étirage durant tout le processus. L'opérateur support s'assure que le cadre est bien maintenu dans la machine et reste auprès de celle-ci. Enfin, après la première passe, les deux opérateurs

installent ensemble les cadres sur les paniers d'envoi en four (pour le traitement thermique) ou les mettent dans le stock en attendant le calibrage après la seconde passe.

D'après la fiche de poste, les opérateurs doivent vérifier la planéité et la rectitude, c'est-à-dire la forme de la section. Ils doivent également vérifier la longueur du cadre après le premier étirage du premier cadre de l'ordre de fabrication. Enfin, ils doivent le poser sur la table de calibration afin de vérifier l'angle d'enroulement après la seconde passe. D'après la fiche de poste, pendant un étirage, pour un cadre donné, la vitesse d'étirage doit rester constante et elle peut varier d'un cadre à l'autre en fonction de l'état initial du cadre. Bien qu'il soit interdit de changer les programmes, le pilote a accès, dans le panneau de contrôle, aux fonctions d'édition du programme.

I.3. Hypothèses

L'environnement étudié est une situation dynamique dans lequel les opérateurs ont un accès limité à l'information. Pour agir efficacement, les opérateurs doivent compenser ce manque d'informations et de ressources externes en se créant une représentation de cet environnement : les schèmes (Vergnaud, 1988).

Il est important de noter qu'avoir développé un schème dans le cadre de son activité ne signifie pas que ce schème sera toujours efficace. Ainsi, Pascual-Leone (1987) a proposé la notion de schème trompeur ou de schème dangereux afin de définir ces schèmes. En effet, on peut développer un schème efficace dans une activité standard, mais qui provoquerait un résultat inattendu dans des situations plus générales ou plus spécifiques. Dans le cadre de l'enseignement des mathématiques, on peut ainsi montrer que les enfants apprenant la multiplication avec nombres entiers construisent le raisonnement suivant : la multiplication induit des nombres plus grands. Ils ont alors du mal à appliquer la multiplication à des décimaux car le résultat contredit leurs anticipations (Brousseau, 1998). Ces schèmes trompeurs apparaissent également lors des apprentissages chez l'adulte. Il est donc nécessaire de repérer ce type de schème qui peut apparaitre lors d'un apprentissage afin de soit le déconstruire, soit éviter son élaboration par les personnes. Ainsi, on s'attend à trouver de tels schèmes chez les opérateurs de notre atelier.

En particulier, des opérateurs novices et en phase d'apprentissage peuvent mobiliser de tels schèmes alors que des experts, ayant plus d'expérience, devraient avoir eu le temps de déconstruire de tels schèmes ou reconnaitre les situations dans lesquelles l'un ou l'autre schème de leur répertoire peut s'appliquer. En effet, dans la littérature sur l'expertise (Charness & Tuffiash, 2008 ; Dreyfus & Dreyfus, 1980), on a montré que les experts ne raisonnent pas de façon plus analytique que les novices. Ils ont, au contraire, un répertoire plus large d'heuristiques, ils reconnaissent les situations et sélectionnent certaines informations importantes permettant de déterminer la ou lesquelles parmi ces heuristiques s'appliquent. Il devrait donc y avoir moins de schèmes trompeurs chez les opérateurs experts.

Par définition, les schèmes déterminent l'activité des opérateurs dans l'atelier. Afin de déterminer s'il existait de telles représentations chez les opérateurs dans l'atelier, un protocole en trois phases a été mis en œuvre. La première phase vise à définir le cas d'étude grâce à la hiérarchie d'abstraction. Cette étape nous a également permis d'élaborer une représentation de référence, aussi juste que possible, du domaine de travail. Une seconde phase vise à déterminer les schèmes présents chez les opérateurs. En comparant ces schèmes et la représentation vraie du domaine de travail, nous avons identifié des schèmes trompeurs. Enfin, une troisième phase d'observation a pour objectif d'identifier les effets de ces schèmes et de ces représentations mentales sur l'activité des opérateurs. Ces deux phases nous ont également apporté des éléments concernant le compromis cognitif des opérateurs.

II. PHASE 1 : COMPRENDRE LE CAS D'ÉTUDE

II.1. Méthode

Une première étape de notre protocole vise à comprendre le processus global de notre cas d'étude : l'étirage et l'enroulement de poutres en alliage d'aluminium. Les observations préliminaires nous ont permis de comprendre les différentes transformations ayant lieu dans l'usine et les liens entre les différents services et ateliers. Ces observations ont duré quatre jours, dont un jour d'observation non armé global et de visite de l'usine et trois

consacrés à deux paires d'opérateurs travaillant sur le poste semi-automatisé d'étirage que l'on cherche à améliorer.

Vingt documents transmis par l'atelier ont été étudiés : les fiches de poste, manuels de procédures, manuels de la machine, descriptifs physiques de certaines poutres, certificats matières. En ce qui concerne les descriptifs physiques des poutres et les certificats matières, ils ont été dépouillés avec l'aide d'un doctorant en physique des matériaux qui nous a expliqué les différentes informations présentes et leurs rôles dans le processus d'étirage.

En parallèle, la méthode a consisté à échanger à plusieurs reprises avec ce doctorant et un chercheur en physique des matériaux. Tous les deux travaillent sur la simulation du processus physique sous-tendant l'activité : l'étirage et l'enroulement des poutres en alliage d'aluminium. Ces entretiens nous ont permis d'accéder à une certaine compréhension des lois physiques s'exerçant sur le processus.

Enfin, des étudiants ingénieurs en alternance dans l'entreprise ont mis en œuvre et analysé une campagne de mesure dans l'atelier. Cette campagne visait à recueillir des données sur les cadres, en entrée et en sortie : en particulier, il s'agissait de mesurer les cadres entrant dans l'atelier au niveau de leur section et le nombre de défauts observés sur ces cadres après l'étirage.

Les informations issues des différentes sources, observations, études de documents, entretiens avec expert et campagne de mesure ont été classées, regroupées et synthétisées selon la hiérarchie d'abstraction telle que décrite dans le cadre théorique de l'EID (Bennett & Flach, 2011). Il est à noter que de nouvelles nomenclatures pour la hiérarchie d'abstraction ont été proposées (Flach, 2015; Naikar, Hopcroft, & Moylan, 2005). Ces nomenclatures permettent par exemple de prendre en compte l'organisation sociale et la répartition des tâches entre différents acteurs (Flach, 2015) ou de développer des systèmes totalement nouveaux et pour lesquels plusieurs acteurs entrent en jeux (McIlroy & Stanton, 2011). Dans ces situations, l'utilisation de la nouvelle nomenclature semble plus précise aux auteurs (Naikar et al., 2005). Ces nomenclatures ont donc principalement pour but de pallier aux limitations de la première nomenclature. Cette première nomenclature est plus adaptée dans les cas où le système étudié est isolé, comme c'est le cas du micromonde DURESS II (Christoffersen et al., 1996) dans lequel elle a été opérationnalisée au départ ou dans le cas de système causaux, pour lesquels les lois de la nature prédominent. Ce qui est le cas de

notre système : l'utilisation de la première nomenclature permet dans notre étude de décrire le système étudié de façon adéquate. La hiérarchie présentée utilisera donc la nomenclature originelle des cinq niveaux d'abstraction (Vicente, 1999). De plus, c'est cette hiérarchie d'abstraction qui a été présentée dans l'usine. Elle a ensuite été améliorée en fonction des retours qui nous ont été faits.

II.2. Résultats : hiérarchie d'abstraction

Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4. Cette figure est commentée et décrite dans l'ordre des différents niveaux de la hiérarchie d'abstraction.

Niveau des buts fonctionnels

L'objectif principal des opérateurs impliqués dans la tâche d'étirage est d'obtenir les dimensions correctes en termes d'allongement, d'angle d'enroulement, mais également de rectitude et de planéité. Le cadre doit ainsi avoir la bonne longueur, le bon angle et sa section doit rester plane et les branches du U ou du T doivent être perpendiculaires à la section. Enfin, après avoir présenté ses éléments dans l'atelier, ils nous ont également signalé que les caractéristiques finales du matériau devaient satisfaire certaines normes.

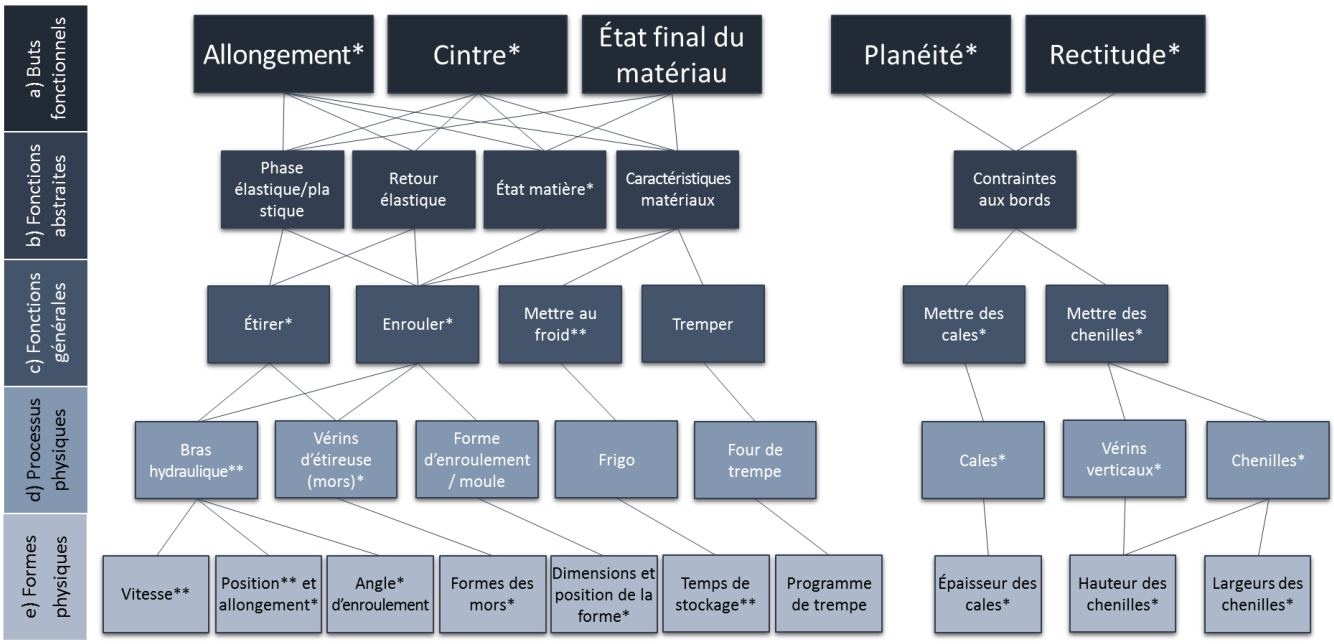


Figure 4 : hiérarchie fin-moyen obtenue pour la tâche d'étirage.
**Éléments accessibles aux opérateurs mais non modifiables (actions interdites ou informations).*
*** Éléments accessibles aux opérateurs et qu'ils ont l'autorisation de modifier.*

Ainsi le service qualité teste également l'état final du matériau.

Ces cinq éléments constituent donc le premier niveau de la hiérarchie d'abstraction (Figure 4, a). En effet, ce sont les objectifs finaux que les opérateurs à ce poste cherchent à atteindre.

Niveau des fonctions abstraites

D'après les chercheurs en physique que nous avons interrogés, trois éléments physiques sont importants lors d'un étirage avec enroulement idéal.

Le premier élément qui peut avoir un effet sur l'étirage est la limite d'élasticité du matériau, cette limite détermine la force minimale nécessaire pour que le cadre entre en phase plastique, c'est-à-dire pour que la déformation qu'on lui impose ait un effet. Dans l'atelier étudié, ce facteur est estimé à partir des tests effectués par le fournisseur des cadres, une valeur moyenne par lot est donc disponible. Bien que cette valeur puisse varier d'un cadre à l'autre, il est difficile d'obtenir une valeur pour chaque cadre. En effet, les tests qui permettent d'obtenir une valeur précise sont soit destructifs, soit onéreux.

Le deuxième élément important est une caractéristique qui dépend de l'ensemble des matériaux formant l'alliage utilisé pour fondre le cadre : le module de Young. Il détermine la façon dont le cadre revient à sa position initiale après que l'on ait relâché les forces imposées sur lui pour le déformer.

En effet, même si l'on a atteint la phase plastique, qui permet de déformer le cadre, celui-ci aura tendance à retourner vers sa position initiale, sans pour autant totalement l'atteindre. Ce phénomène qui fait que le cadre va avoir tendance à revenir vers sa position initiale s'appelle le retour élastique. C'est ce retour élastique qui est le dernier élément à prendre en compte pour prédire la déformation finale du cadre. Il dépend d'une combinaison de la limite d'élasticité et du module de Young. Il est également susceptible de changer en fonction des traitements thermiques subis par le cadre.

Enfin, dans la pratique, deux éléments physiques supplémentaires sont nécessaires pour prédire le résultat d'un étirage : l'état du cadre (avant ou après traitement thermique) et les contraintes aux bords. L'état du cadre dépend de contraintes internes au cadre ou de défauts invisibles. Ces défauts sont impossibles à prévoir et changent pour chaque cadre. De

plus, après le traitement thermique, ils peuvent changer de façon imprévisible tout comme les autres caractéristiques présentées au paragraphe précédent. Les contraintes aux bords sont provoquées par les dimensions des outils, les chenilles pouvant être trop grosses ou petites, ce qui peut légèrement altérer le processus d'étirage.

Nous avons considéré que ces cinq éléments constituent le second niveau de la hiérarchie d'abstraction (Figure 4, b). Ce sont, en effet, les limites physiques imposées au système d'étirage qui déterminent comment on peut atteindre les buts fixés : pour étirer le cadre, il faut lui imposer une force suffisante pour qu'il atteigne la phase élastique et qu'il reste dans les tolérances fixées même après retour élastique. Ces lois déterminent le résultat de l'étirage.

Niveau des fonctions générales

Pour atteindre la phase plastique et anticiper le retour élastique, décrits dans la section précédente, le cadre doit être étiré et enroulé par un opérateur grâce à la machine d'étirage. L'opérateur peut également envoyer le cadre au traitement thermique ou le mettre en chambre froide : ces actions vont influencer l'état interne du cadre. Enfin, pour éviter les déformations de la section du cadre, ils doivent mettre des chenilles ou des cales.

Niveau des processus physiques

Au niveau du processus physique, ce sont les bras hydrauliques qui assurent l'étirage et l'enroulement. Les cylindres hydrauliques maintiennent le cadre lors de l'étirage. Pour avoir la forme exacte souhaitée, notamment pour l'angle d'enroulement, le cadre est enroulé autour d'un moule appelé forme. Finalement, afin de maintenir les caractéristiques internes du cadre après le traitement thermique, l'opérateur peut le mettre dans une chambre froide.

En ce qui concerne les contraintes aux bords, les opérateurs disposent de chenilles et de cales. Enfin, des cylindres verticaux maintiennent le cadre sur toute sa longueur.

Niveau des formes physiques

Les opérateurs peuvent changer, au niveau des formes physiques, la position des bras et la vitesse de déplacement. D'après les chercheurs en physique, la vitesse ne devrait pas avoir d'effet sur l'étirage, sauf si un défaut interne existe, auquel cas une trop grande vitesse pourrait provoquer une rupture du défaut et donc casser le cadre.

L'opérateur peut changer la forme des mors qui sont dans ces cylindres, cependant le nombre de mors différents est limité aux types de cadres.

Les positions et tailles de la forme pourraient être changées.

Les temps après traitement thermique, dans ou hors chambre froide, sont en partis gérés par les opérateurs : ils peuvent décider du temps d'attente lorsqu'ils réceptionnent les cadres après traitement thermique, cependant ils ne maitrisent pas le temps de transfert entre le four de traitement thermique et leur poste de travail.

Les dimensions des chenilles et des cales sont fixes, mais les opérateurs pourraient, le cas échéant, utiliser d'autres références, qui auraient des tailles différentes, pour améliorer le résultat. Enfin, il est possible de créer des chenilles de dimensions variables. Il est à noter que la campagne de mesure a déterminé que deux cadres d'une même référence et d'un même lot peuvent présenter des mesures différentes de presque un millimètre, ce qui parait suffisant aux chercheurs en physique pour nécessiter des jeux de chenilles de dimensions variables.

Enfin, l'épaisseur des chenilles pourrait également varier. Ce qui conduirait à serrer plus ou moins les cylindres verticaux.

II.3. Discussion

Les principaux éléments contraignant le système de la machine d'étirage sont issus des lois de la physique : retour élastique, état du matériau, phase élastique, caractéristique interne du cadre et contraintes aux bords. Cependant, les normes et protocoles réglementaires dans l'atelier limitent énormément les actions possibles par les opérateurs. Le technicien d'industrialisation semble être celui qui profiterait le plus du compagnon virtuel étant donné qu'il est le seul actuellement habilité à modifier les programmes d'étirage.

De plus, il est à noter que, bien que les dimensions des outils soient fixes, les résultats de la campagne de mesure indiquent que les dimensions peuvent varier d'un cadre à l'autre, pour une même référence, voire pour un même lot. Ces différences pourraient expliquer les différences de résultats obtenus concernant la section des cadres. De plus, si les cadres varient dans leurs dimensions, il est probable, mais non vérifiable, qu'ils varient dans leurs caractéristiques internes. Il faut en effet utiliser des méthodes destructrices ou couteuses pour pouvoir évaluer ces éléments.

Enfin, il serait pertinent, vu la variabilité et les dynamiques en œuvre dans le processus, de modifier le protocole de production pour le rendre plus adaptable à la situation réelle, c'est-à-dire à la variabilité des cadres. Il serait ainsi pertinent de donner aux opérateurs la possibilité de changer de jeux de chenilles et de permettre au technicien d'industrialisation de créer, a minima, un programme par lot de cadre à partir des données moyennes fournies pour chaque lot.

III. PHASE 2 : EXTRAIRE LES SCHÈMES

Cette deuxième phase nous a permis de découvrir les représentations explicites des opérateurs travaillant à ce poste tant d'un point de vue de leur contrôle cognitif que de celui de leurs représentations symboliques.

III.1. Méthode

Deux semaines après ces premières observations, la seconde phase a consisté à rencontrer cinq opérateurs de l'atelier. Nous avons mené les entretiens selon une méthodologie inspirée des entretiens d'explicitation de Vermersch (1990, 1994). Nous demandions aux opérateurs comment ils procédaient sur ce poste en particulier, dans quels buts, pourquoi, et s'ils opéraient toujours de la même manière (cf. Annexe 1 : grilles d'entretien de l'étude 1). En cas de blocage, nous relancions sur un exemple précis observé lors de la phase précédente.

Les opérateurs interrogés étaient les opérateurs des deux paires observées lors de la phase précédente, chaque paire étant composée d'un pilote, qui contrôle la machine, et d'un

support, qui aide lors de la manipulation des cadres. Le premier duo travaille sur la machine quotidiennement depuis plus de quinze ans et a, de plus, participé à l'installation de la machine et à la création des programmes d'étirage. Nous considérons donc qu'il s'agit d'experts. Ils sont d'ailleurs reconnus comme tels dans l'atelier, les autres opérateurs renvoyant souvent à ce binôme lors qu'on les interroge sur la machine. Le second duo ne travaille sur la machine que depuis deux semaines lors des entretiens et seulement en cas de surcharge de travail, nous le considérons donc comme novice. Enfin, nous avons également rencontré le technicien d'industrialisation qui programme la machine mais qui n'a jamais travaillé en tant qu'opérateur sur la machine, ni en tant que support, ni en tant que pilote. Il a été promu à ce poste deux ans auparavant. Le technicien d'industrialisation connait le logiciel de simulation programmant la machine, il programme également d'autres machines du même type.

Ainsi, si les opérateurs et le technicien d'industrialisation ont la même formation initiale et une durée d'expérience équivalente dans la forge (environ seize ans), ils ont une expérience différente de la machine d'étirage et du poste de pilote en particulier.

III.2. Résultats

Nous présentons ici les résultats obtenus grâce aux entretiens des deux pilotes (l'expert et le novice), ainsi que celui du technicien d'industrialisation (cf. Annexe 2 : extraits des analyses en terme de schèmes des entretiens de l'étude 1). Nous avons classés les éléments obtenus lors des entretiens en fonction des éléments du modèle du schème d'action (Vergnaud, 1988) : les invariants opératoires, les règles d'actions, les inférences et les anticipations.

Nous avons ensuite distribués chacun des invariants opératoires en fonction de leur correspondance avec les éléments de la hiérarchie d'abstraction (Figure 4 et Tableau 1). Ainsi, nous pouvons savoir si, pour chaque opérateur interrogé, sa représentation latente

Tableau 1 : présence ou absence d'invariants opératoires concernant l'élément de la hiérarchie d'abstraction pour chaque opérateur

	Technicien d'industrialisation	Opérateur expert	Opérateur novice
a) Buts fonctionnels			
Avoir un bon cadre	Oui	Oui	Oui
Enroulement	Oui	Oui	Oui
État final du matériau	Oui	Non mentionné	Oui
Planéité	Oui	Oui	Oui
Rectitude	Oui	Oui	Oui
Allongement	Oui	Avant oui, mais plus maintenant	Oui
b) Fonction abstraite			
Phase Plastique	Implicitement	Implicitement	Non mentionné
Retour	Oui, avec des essais erreurs	Implicitement	Implicitement
État initial	Oui	Implicitement	Implicitement
État après trempe	Oui	Implicitement	Implicitement
Caractéristiques du matériau	Oui, mais seulement dans la simulation	Non mentionné	Implicitement
c) Fonctions générales			
Étirer	Oui	Oui	Oui
Enrouler	Oui	Oui	Oui
Réfrigérer	Oui	Non mentionné	Oui
Tremper	Oui	Oui	Oui
Mettre les cales	Oui	Oui	Oui
Mettre les chenilles	Oui	Oui	Oui
d) Processus physique			
Bras hydrauliques	Non mentionné	Non mentionné	Oui
Cylindres hydrauliques	Non mentionné	Oui	Oui
Forme	Oui	Oui	Non mentionné
Frigo	Non mentionné	Non mentionné	Oui
Four de trempe	Oui	Oui	Oui
Cales	Non mentionné	Oui	Oui
Cylindres verticaux	Non mentionné	Oui	Oui
Chenilles	Oui	Oui	Oui
e) Formes physiques			
Position des bras	Oui	Oui, mais interdit	Ne sait pas
Vitesse des bras hydrauliques	Oui, veut la fixer	Non, ne fonctionne pas	Oui
Angle d'enroulement	Oui	Seulement lorsque les programmes ont été faits	Non mentionné
Dimension et position de la forme	Oui	Oui	Non mentionné
Temps de stockage	Oui	Non mentionné	Oui
Programme de trempe	Oui, choisi dans la base de données	Non mentionné	Non mentionné
Épaisseur des cales	Non mentionné	Oui	Non mentionné
Cylindres verticaux	Non mentionné	Oui	Oui
Hauteur des chenilles	Non mentionné	Oui	Non mentionné
Largeur des chenilles	Oui	Oui	Oui, mais rien à faire

correspond aux éléments importants relevés lors de la phase 1.

En conséquence, il ressort des entretiens qu'ils partagent les mêmes invariants concernant le processus général (cf. Figure 4, c.). Le plus souvent ces informations ne sont pas explicitées : ils expliquent les conséquences des processus sans réellement les nommer. Ils partagent également les mêmes règles d'action concernant le processus standard : ils connaissent tous les règles de production. En effet, ils sont capables de décrire la succession correcte d'action à réaliser : vérifier le cadre, le mettre sur la machine, mettre les chenilles, lancer le programme puis vérifier le résultat. En revanche, comme on lui a demandé de nous décrire son activité, le technicien d'industrialisation nous a plutôt parlé du processus de réalisation du programme d'étirage et de ce que le logiciel de simulation faisait. Il nous a donc parlé des mêmes éléments à contrôler mais moins de la succession des actions à effectuer sur la machine.

En ce qui concerne les invariants opératoires des niveaux inférieurs de la hiérarchie d'abstraction du processus d'étirage (cf. Figure 4, d. et e.), ils sont quasiment tous évoqués par l'opérateur expert. L'opérateur novice a également des invariants opératoires concernant le fonctionnement de la machine, il sait détecter les problèmes, il sait également qu'en théorie il pourrait faire quelque chose mais se dit incapable d'intervenir. En général, il préfère résoudre les problèmes lors de la phase de calibrage manuelle qu'il maitrise totalement. En effet, les inférences que nous avons trouvées chez l'un et l'autre de ces opérateurs sont les mêmes : ils utilisent tous les deux l'angle d'enroulement, l'allongement, la planéité et la rectitude comme éléments leur permettant d'adapter leur activité. Ils sont tous les deux capables d'attribuer une cause à ces défauts : manque d'étirage dans un cas et défaut d'outillage dans l'autre. Cependant, l'expert a développé des règles d'action lui permettant de résoudre chaque problème, quand cela est possible : étirer un peu plus ou changer de référence de chenille, alors que le novice considère qu'il ne peut rien faire.

Les deux opérateurs, tout comme le technicien d'industrialisation, déclarent qu'il faut d'abord étirer un premier cadre, vérifier le résultat de l'étirage puis modifier leurs actions sur le cadre suivant. Ils considèrent que tous les cadres d'un même lot devraient avoir les mêmes caractéristiques. Paradoxalement, ils déclarent également que chaque cadre est différent, même au sein d'un même lot. Tout se passe comme si, leur connaissance de l'hétérogénéité des cadres était négligée lors de la réalisation de l'action.

Enfin, ils sont en désaccord concernant l'effet de la vitesse : l'expert considère qu'elle n'a pas de conséquences sur le processus, le novice considère qu'elle est importante, surtout après la trempe. L'expert déclare avoir essayé de modifier la vitesse, ce qui signifie qu'il a eu ce schème trompeur au départ, mais il n'a noté aucune différence dans les résultats alors que le novice dit chercher à corriger des défauts trop nombreux dans les cadres en changeant la vitesse. Le technicien d'industrialisation pense que ça doit avoir un effet et voudrait pouvoir en fixer la valeur dans les programmes, ce qui n'est pas possible.

III.3. Discussion

Cette deuxième phase de notre protocole d'observation a donc révélé des points communs et des différences chez les opérateurs novice et expert et chez le technicien d'industrialisation.

Comme attendu, l'opérateur expert, grâce à son expérience, a déconstruit certains schèmes trompeurs : celui de l'influence de la vitesse par exemple. Cependant, il en a maintenu un qui nous semble trompeur et paradoxal. Il déclare, comme l'opérateur novice, que tous les cadres sont différents mais que l'on peut s'appuyer sur le résultat d'un cadre antérieur pour ajuster les paramètres du programme du cadre en cours. Le technicien d'industrialisation, qui veut trouver un programme unique par référence, semble également partager ce schème trompeur.

Ces entretiens ont également révélé que l'opérateur novice avait des méta-connaissances concernant son activité : il sait que certaines choses sont possibles mais que lui ne sait pas le faire.

Enfin, dans les entretiens, quasiment tous les éléments de la hiérarchie d'abstraction sont évoqués par les trois protagonistes. Cela nous amène à conclure que la différence de compétences ne réside pas dans la représentation des différents niveaux de la hiérarchie mais bien dans la construction de lien entre les différents niveaux. En effet, seul l'opérateur expert a créé ces liens et établis des règles guidant ses comportements.

Nous pensons trouver des manifestations de ces différences en ce qui concerne les schèmes d'action des opérateurs novice et expert dans leurs comportements observables lors de leur activité à ce poste de travail. Ainsi, la troisième phase du protocole a été une étape

d'observation instrumentée dont le but est d'illustrer l'effet des représentations latentes des opérateurs sur leurs actions.

IV. PHASE 3 : MANIFESTATIONS COMPORTEMENTALES DES CONTENUS DE REPRÉSENTATIONS

IV.1. Méthode

Comme nous avons identifié des différences entre l'opérateur novice et l'opérateur expert pendant les entretiens, nous voulons déterminer si ces différences se matérialisent par des différences dans certains comportements des opérateurs pendant la tâche. Nous avons donc observé les opérateurs pendant une semaine.

Cette troisième étape a eu lieu huit mois plus tard. Nous avons alors observé les comportements avec une grille détaillée pendant une semaine. Les données ont été enregistrées grâce à une tablette et le logiciel ACTOGRAM. Les données recueillies formaient une liste de cinquante-quatre actions ainsi que leurs temps de début et de fin. Nous avons ensuite ajouté différentes caractéristiques manuellement à la liste : l'expérience des opérateurs, le rang du cadre et sa référence, le numéro et l'heure de la session d'observation.

Durant cette étape, nous avons observé les deux duos précédemment observés, novices et experts. Cependant, le soutien pour le duo novice avait changé, il s'agissait, lors de cette troisième phase, d'un apprenti en formation. Enfin, le dernier jour, nous avons observé un troisième pilote, qui travaillait habituellement sur une machine semblable, mais qui avait également participé à l'élaboration des programmes lors de l'installation de la machine étudiée. Nous l'avons donc nommé ancien expert. De plus, nous avons observé une session de formation pendant laquelle l'apprenti a pris le poste de pilote. Nous avons donc quatre opérateurs pilotes : l'expert (noté e), le novice (noté n), l'apprenti (noté a) et l'ancien expert (noté ae).

Au vu des éléments relevés lors de la phase 2, nous nous attendions à retrouver plusieurs choses. Tout d'abord, nous voulions voir si l'opérateur novice utilisait le bouton vitesse pour modifier les résultats obtenus. Nous avons pour cela particulièrement analysé les résultats de l'action « changer la vitesse ».

Nous pensions également que l'opérateur expert se distinguerait par ses actions de remédiations pour améliorer le résultat obtenu. Nous avons pour cela regardé les actions « changer les chenilles ». Nous espérions voir l'opérateur expert modifier un programme après avoir vérifié la longueur d'un cadre. Ces actions « modifier le programme » et « mesurer la longueur » seraient des manifestations des représentations de l'expert concernant l'étirage et la mise en œuvre de règles.

L'expert devrait mobiliser moins de ressources cognitives que l'opérateur novice ou l'apprenti. Afin d'évaluer les ressources cognitives mises en œuvre, nous avons regardé les actions « regarder ailleurs » et « discuter ». Cette dernière action était enregistrée quand l'opérateur parlait avec d'autres opérateurs de sujets sans rapport avec la tâche. Ces deux actions sont donc un indicateur de la distraction des opérateurs. Plus ils sont distraits moins ils allouent de ressources au contrôle, à la surveillance ou à l'exécution de la tâche.

Enfin, lors de l'observation nous avons remarqué que l'opérateur expert était le seul à vérifier le résultat de son activité. Nous avons donc analysé l'action « mesurer la rectitude » pour valider qu'il existait une différence entre ces opérateurs. Cette mesure tient lieu de vérification du résultat de l'activité. Sa présence indique que l'opérateur cherche à vérifier les résultats obtenus afin de les améliorer s'ils ne sont pas bons.

De plus, il semblait avoir besoin de moins d'itérations que les autres opérateurs pour atteindre la position désirée lors d'une phase de manipulation des bras hydrauliques. Nous avons donc regardé l'action « utiliser les commandes manuelles » pour valider qu'une différence entre opérateurs était présente.

IV.2. Résultats

Pendant cette semaine, cinquante-quatre actions différentes ont donc été observées. Nous avons divisé les temps d'observation en session, en fonction de la journée et de l'opérateur observé. Nous avons ensuite divisé chaque session d'observation en pas temporel de 120

secondes, ce qui correspond à environ un tiers du temps nécessaire pour étirer un cadre. Puis, nous avons compté le nombre d'apparitions de chacune des actions décrites dans la partie méthode de cette phase 3 durant ces pas temporels et ce pour chaque participant : l'expert et le novice mais également pour l'ancien expert et l'apprenti.

Cela nous a permis de considérer que le nombre de chaque action durant un pas temporel donné (noté Y) suit une loi de Poisson puisqu'il s'agit d'un comptage. Nous avons alors créé plusieurs modèles linéaires généralisés (GLM) afin de décrire au mieux les données. Un GLM est une généralisation d'une régression ordinaire des moindres carrés. Il permet de décrire une relation entre une mesure (ici Y) et une ou plusieurs variables (également appelées prédicteurs et notées X_i). Ici les prédicteurs étaient le temps (en seconde) depuis le début de la session, l'opérateur-pilote observé, la référence du cadre, le numéro du cadre dans la session, le numéro de l'étirage (premier ou deuxième étirage). Ainsi, l'effet de tous ces facteurs est étudié. Nos hypothèses sont vérifiées si, pour chacune de ces actions, on retrouve un effet de l'opérateur.

Nous avons donc créé plusieurs modèles pour dix des cinquante-quatre actions observées : vérifier la vitesse, vérifier la rectitude, changer la vitesse, lancer le programme, regarder ailleurs, discuter, utiliser les commandes manuelles, regarder le panneau de contrôle, regarder la machine d'étirage. Pour chaque action, le modèle estime la fréquence d'apparition de l'action en fonction de chacun des paramètres choisis ou pour une combinaison de paramètres ou pour tous les paramètres. Enfin, on choisit le meilleur modèle au vue des données, c'est-à-dire le modèle qui s'ajuste le mieux aux données, grâce au critère d'information bayésien (BIC). Sous R, la procédure utilisée était une procédure pas à pas (*stepwise*) : le logiciel compare tous les modèles existants entre le modèle nul et le modèle complet, et indique le meilleur modèle. Cela permet donc de choisir parmi nos prédicteurs, ceux qui ont effectivement un effet.

Pour cinq actions, le meilleur modèle parmi les modèles comparés est celui qui stipule un effet de l'opérateur : « mesurer la rectitude », « changer la vitesse », « utiliser les commandes manuelles », « regarder ailleurs » et « discuter ». Parmi les variables étudiées, l'opérateur aurait donc un effet sur ces actions mais pas sur les autres. Les résultats obtenus indiquent de plus qu'il n'y avait pas d'effet du temps. La Figure 5 présente les moyennes des actions réalisées par opérateur et par pas temporel pour chacune de ces actions et les valeurs prédites par le modèle.

L'action « mesurer la rectitude » était enregistrée à chaque fois qu'un opérateur vérifiait la rectitude, c'est-à-dire qu'il utilisait une équerre sur les branches d'un cadre. Cette action n'a été observée que chez l'opérateur expert lors du second étirage. Le meilleur modèle pour cette action prend en compte l'effet combiné de l'opérateur et du numéro d'étirage. D'après le modèle, l'opérateur expert est plus susceptible de mesurer la rectitude (espérance pour l'expert : m_e = 0,26 action par pas temporel) que les autres opérateurs (espérance pour l'ancien expert, le novice et l'apprenti : $m_{ae,n,a} \approx 0$) mais seulement pour le second étirage.

L'action « changer la vitesse » était enregistrée à chaque fois qu'un opérateur manipulait le

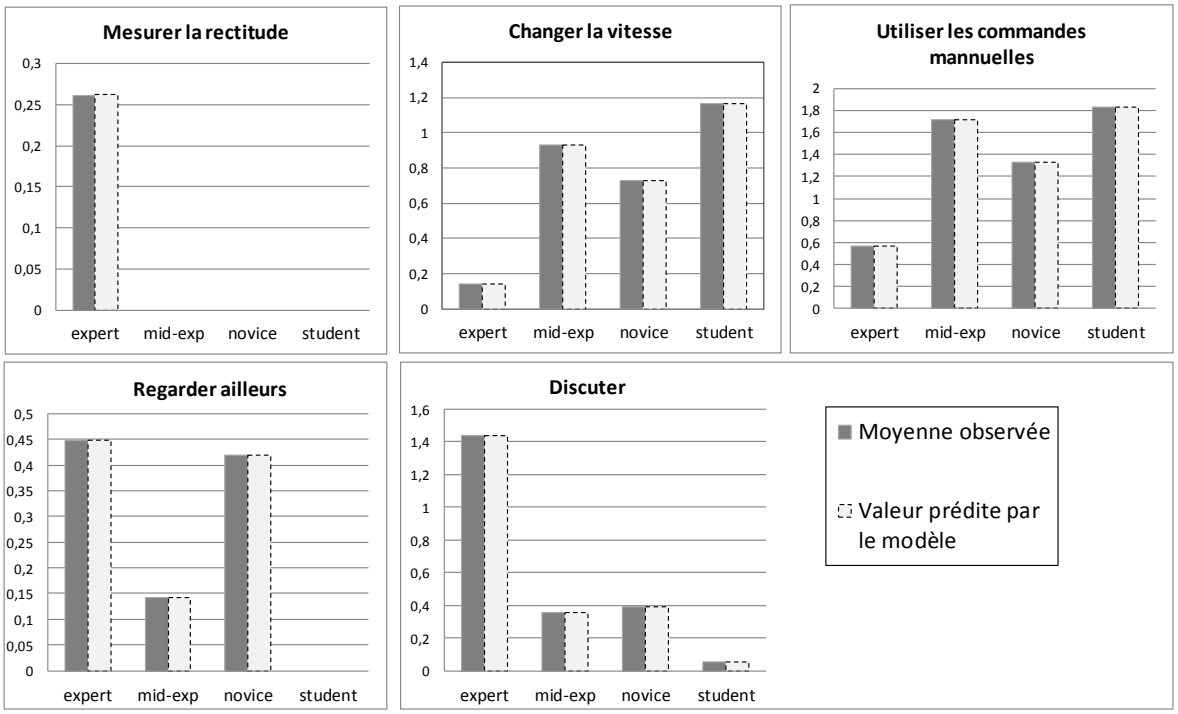


Figure 5 : représentations graphiques des moyennes du nombre d'actions observées par pas temporel et des valeurs prédites par les modèles par opérateur pour les actions « mesurer la rectitude », « changer la vitesse », « utiliser les commandes manuelles », « regarder ailleurs » et « parler ».

NB : En ce qui concerne les actions « mesurer la rectitude » et « utiliser les commandes manuelles », seule la passe 2 est présentée.

curseur de vitesse situé sur le poste de commande. Le meilleur modèle pour cette action considère un effet de l'opérateur : l'expert manipule moins souvent ce curseur que les autres opérateurs (espérance de chacun des opérateurs : m_e = 0,14 ; m_{ae} = 0,93 ; m_n = 0,73 ; m_a = 1,17).

L'action « utiliser les commandes manuelles » était enregistrée à chaque fois qu'un opérateur dirigeait manuellement les bras hydrauliques de la machine. Cette action est effectuée lors de la mise en mors des cadres lors du second étirage. En effet, comme les cadres sont alors incurvés, il faut aider l'opérateur soutien pour la manutention en alignant les mors et les extrémités du cadre. Une fois le cadre dans les mors, l'opérateur pilote doit également réaligner le centre du cadre et le centre de la machine. Le meilleur modèle pour cette action stipule un effet combiné du numéro d'étirage et de l'opérateur. Pendant le second étirage, l'opérateur expert utilise moins les commandes manuelles (m_e = 0,57) que les autres opérateurs (m_{ae} = 1,17 ; m_n = 1,32 ; m_a = 1,83).

L'action « regarder ailleurs » était enregistrée à chaque fois que l'opérateur pilote arrêtait de se concentrer sur la machine ou sur le panneau de contrôle pour regarder ailleurs. Le meilleur modèle pour cette action stipule un effet de l'opérateur uniquement. L'expert (m_e = 0,45) et le novice (m_n = 0,42) regardent plus ailleurs que les deux autres opérateurs (m_{ae} = 0,14 ; $m_a \approx 0$).

L'action « discuter » était enregistrée à chaque fois que l'opérateur pilote parlait au soutien ou à n'importe quel autre opérateur. Bien qu'ils puissent discuter pour échanger sur le travail en cours, cette action était surtout relevée lorsqu'ils échangeaient sur des sujets divers. Ici, le meilleur modèle pour l'action « discuter » prenait en compte un effet de l'opérateur seul. L'expert parlait plus (me = 1,44) que les autres (m_{ae} = 0,36 ; m_n = 0,39 ; m_a = 0,06).

IV.3. Discussion

Le premier élément important révélé par les analyses concerne les prises de mesure sur la rectitude. L'opérateur expert est le seul à procéder à ce contrôle durant son activité. En fait, il ne le fait que pour les trois premiers cadres lors du second étirage, puis pour le premier cadre d'un second lot de cadre. Il utilise cet élément en tant que feedback pour son activité

et comme élément soutenant sa prise de décision. En effet, durant l'observation, cette mesure a été suivie une fois par un changement de chenille, l'outil utilisé pour maintenir les branches de la section du cadre en place, mais sur le cadre suivant. Cela est cohérent avec le fait que l'opérateur expert dit considérer les cadres d'un même lot comme étant homogènes et réagissant de la même façon.

Ici, en référence au modèle de Hoc et Amalberti (2007), l'opérateur agit de façon réactive, alors qu'une activité plus anticipative pourrait éviter le mauvais résultat sur le premier cadre, ou de tirer des conclusions basées sur des éléments non pertinents. Ainsi, en mesurant l'écartement des branches avant d'étirer, l'opérateur pourrait avoir une idée de la réaction obtenue avec des chenilles trop larges ou trop étroites.

En ce qui concerne l'action « changer la vitesse », les opérateurs novices l'utilisent plus souvent que l'expert. Pendant les observations préliminaires, un opérateur novice utilisait la vitesse dans l'espoir d'améliorer ses résultats. Potentiellement, après huit mois de pratique, il aurait pu établir qu'aucun lien direct n'existe entre la vitesse et les résultats obtenus. Cependant, lors de la dernière phase du protocole, l'observation instrumentée, il garde constamment sa main sur le bouton de vitesse afin de pouvoir ajuster son activité (il ralenti ou accélère le processus quand il en a besoin). Il est donc difficile de dire s'il considère encore la vitesse comme un élément clé de l'activité. Il a peut-être cessé d'utiliser le schème trompeur concernant la vitesse, mais ce bouton restant le seul moyen lui permettant de contrôler directement son activité, il le manipule constamment. Au regard du modèle du contrôle cognitif (Hoc & Amalberti, 2007), l'individu investit des ressources sur les seuls moyens à sa disposition de façon justifiée ou non. Or, la tâche prescrite limite le novice à l'action d'un seul bouton, celui de la vitesse, c'est donc par là qu'il investit son activité : il est libre d'y toucher quand il le souhaite contrairement aux autres réglages qui sont fixés par les fiches de suivi des cadres (références des chenilles et du programme).

L'expert, au contraire, n'utilise le bouton vitesse que pour arrêter la machine ou la mettre à vitesse maximum. Ainsi, il lance le programme, met la vitesse au maximum, attend la fin de l'étirage, et met la vitesse à zéro. Son expérience passée lui a permis d'investir d'autres éléments afin de contrôler son activité : il se sait capable de modifier le programme d'étirage.

La troisième action distinguant les opérateurs lors des observations est « commande manuelle ». Bien que cet élément n'ait jamais été mentionné lors des entretiens, les opérateurs ont probablement développé des habiletés en ce qui le concerne. L'action « utiliser les commandes manuelles » peut indiquer une dimension plus réactive ou anticipative de l'activité à ce moment donné. En effet, une utilisation plus fréquente des commandes manuelles indique la nécessité d'avoir recours à des essais et erreurs avant de positionner correctement le cadre. Au contraire, avoir moins recours à ces commandes indique que la position désirée est obtenue directement.

Ainsi, alors qu'il formait l'apprenti, l'ancien expert lui donnait des indices visuels permettant de savoir quand le cadre est bien positionné, ceci pour mieux déplacer les bras hydrauliques. Ces éléments sont certainement intégrés par l'opérateur expert, même s'il ne les explicite pas lors des entretiens. Même si l'opérateur novice arrive rapidement en position, il doit procéder à plusieurs ajustements en cours d'activité, alors que l'opérateur expert arrive directement à la position souhaitée, ce qui laisse penser qu'il anticipe mieux le résultat de son action.

Enfin, « discuter » et « regarder ailleurs », nous indique que les opérateurs expert et novice travaillent souvent avec un niveau de distraction élevé. L'apprenti et l'ancien expert, en revanche, semblent plus concentrés sur leur tâche. En ce qui concerne l'opérateur expert, cela semble cohérent avec la maitrise qu'il a de son activité qui parait, de fait, également plus standardisée. Il n'a donc pas besoin d'investir beaucoup de ressources cognitives dans le traitement de la tâche. Pour l'opérateur novice, la standardisation de l'activité peut être mise en perspective avec l'absence de vérification des résultats de son activité. Il réalise donc les actions de manutention de façon automatisée, mais sans faire attention aux erreurs ou défauts pouvant apparaître. Il n'a donc pas de charge cognitive relative aux traitements des problèmes à gérer. En revanche, l'apprenti et l'ancien expert, n'ont pas ou plus d'automatismes concernant les phases de manutention simple sur cette machine, ils ont donc un besoin plus marqué de contrôler visuellement le bon déroulement du processus.

Les autres actions observées ne discriminaient pas les opérateurs. La plupart d'entre elles concernaient les aspects standardisés de l'activité, par exemple lancer le programme (qui dépend de la programmation plus que de l'activité), mettre les outils ou déplacer les cadres.

Tableau 2 : synthèse des résultats obtenus selon les phases de l'étude et le cadre théorique mobilisé

Méthodologie/ Cadre théorique	Entretiens avec les spécialistes de la discipline	Entretiens avec les opérateurs	Observations et analyses statistiques
Analyse cognitive du travail	Éléments du processus physique à faire ressortir	Règles de décisions utilisées par les opérateurs	Nécessité d'utiliser le niveau des connaissances ou des règles pour modifier l'activité
Contrôle cognitif	Nécessité d'anticiper pour pallier les différences entre les cadres.	Manque de sentiment de maîtrise chez certains opérateurs	Diminution des performances acceptables de l'opérateur novice Possibilité d'anticiper à partir de certains éléments non utilisés
Schème d'action	Invariants opératoires vrais concernant le processus physique	Présence de schèmes trompeurs chez les opérateurs	Manifestation des schèmes trompeurs lors de l'activité : modification de l'action en fonction du cadre précédent ; utilisation du bouton de vitesse

Cela indique que les processus standards de l'activité sont réalisés de la même façon par les différents opérateurs.

Nous espérions trouver des différences concernant d'autres éléments tels que mesurer la longueur ou la planéité, mais ces actions n'ont pas été assez souvent observées, ou encore changer le programme, qui n'a pas été du tout observé pendant cette période.

V. DISCUSSION GÉNÉRALE

V.1. Résumé des résultats obtenus

L'étude présentée ici nous a permis d'obtenir, en trois phases et via le prisme de trois cadres théoriques, le déroulement du processus étudié ainsi que les représentations mentales des opérateurs et ce qu'elles modifiaient dans leur façon de réaliser la tâche (cf. Tableau 2).

Ainsi, nous avons obtenu la hiérarchie d'abstraction (Bennett & Flach, 2011) relative à la tâche d'étirage. Celle-ci nous permet de comprendre les processus physiques entrant en jeu dans la réalisation de la tâche et comment les outils utilisés permettent ou pas de réaliser la tâche de façon optimale. Cette hiérarchie nous donne également les opérations à mettre en

œuvre pour réaliser la tâche et la réussir. Elle constitue la représentation correcte à avoir de la situation de travail.

En ce qui concerne les représentations des opérateurs novices et experts, nous avons déterminé qu'ils ont acquis tous les deux des connaissances ou invariants opératoires pour l'ensemble du processus, c'est-à-dire à tous les niveaux de la hiérarchie d'abstraction. Ainsi, les opérateurs novices et experts ont tous les deux des connaissances générales en ce qui concerne le processus, cela est cohérent avec d'autres études évaluant les représentations d'opérateurs en situation dynamique (Rogalski & Samurçay, 1991). Cependant, des différences existent tout de même entre le novice et l'expert. Par exemple, il est intéressant de noter que seul l'opérateur expert semble avoir créé des liens entre les différents niveaux de la hiérarchie d'abstraction et des règles lui permettant de modifier son activité en fonction du type de défaut obtenu.

De plus, l'opérateur novice a montré lors de l'entretien qu'il avait, dans son répertoire de schèmes, deux schèmes trompeurs : l'un concernant la vitesse, l'autre concernant le critère d'ajustement de son activité (il pense que l'on peut modifier l'activité pour un cadre en fonction du résultat du cadre précédent). L'apparition de schèmes trompeurs était effectivement attendue chez l'opérateur novice, en références aux théories du développement (Pascual-Leone, 1995). Il a également des méta-connaissances concernant son activité : il déclare que certaines remédiations sont possibles mais qu'il ne sait pas les mettre en œuvre.

L'opérateur expert, en revanche, a éliminé le schème trompeur concernant la vitesse. Cependant, lors des entretiens, il évoque le schème trompeur concernant le critère d'ajustement de son activité : le résultat du cadre précédent. Il semble également mettre en œuvre ce schème trompeur lors de son activité. Il parait incompatible avec la littérature sur l'expertise de trouver un tel schème chez un opérateur considéré comme expert. En effet, un élément qui pourrait se rapprocher de ce schème trompeur dans la littérature est l'heuristique : un processus cognitif efficace et peu couteux cognitivement mais qui ignore une partie de l'information (Gigerenzer & Gaissmaier, 2011). On ne peut cependant pas conclure que tous les schèmes trompeurs en sont. En effet, ici, nos opérateurs laissent de côté les caractéristiques spécifiques d'un cadre pour prendre leurs décisions. Ils utilisent les informations obtenues suite à l'étirage du premier cadre d'un lot afin de modifier leur

activité pour l'ensemble des cadres du même lot. Néanmoins, en général, lorsque des experts utilisent une heuristique de décision, ils sont capables de déterminer, à partir des informations disponibles dans l'environnement, s'ils peuvent ou non l'appliquer (Dreyfus & Dreyfus, 1980 ; Hoc, 2005). Toutefois, dans notre cas d'usage, l'information est peu disponible et les possibilités d'action sont limitées : cela ne favorise pas le développement de compétences en référence au cadre des environnements capacitants (Falzon, 2005). Les résultats montrent donc un résultat intéressant : même un expert peut présenter un schème trompeur lorsque l'environnement de travail limite les possibilités offertes aux opérateurs.

Les observations ont révélé que l'expert met en œuvre le schème trompeur dans le cadre de son activité. Le novice en revanche n'applique ni le schème trompeur ni le schème pertinent : il exécute des schèmes de base au regard de l'activité mais il ne régule pas son activité en fonction des résultats obtenus. En fait, il semble avoir diminué la performance qu'il juge satisfaisante (Hoc & Amalberti, 2007), puisqu'il se contente d'étirer les cadres sans vérifier le résultat de son activité, donc sans jamais mettre en œuvre une remédiation si cela s'avérait nécessaire. Cependant, il manipule toujours beaucoup le bouton vitesse. Dans le même temps, il a automatisé le procédé de base, c'est-à-dire qu'il effectue toutes les tâches de manutention et de contrôle de la machine sans mobiliser toutes ses ressources cognitives.

En faisant le lien entre ces différents résultats, nous avons déduit certaines caractéristiques propres à l'opérateur novice et d'autres propres à l'opérateur expert.

V.2. Caractéristiques psychologiques des opérateurs

L'opérateur novice manipule toujours beaucoup le bouton vitesse. Ainsi, il semble toujours avoir le schème trompeur concernant la vitesse. Cependant ce facteur n'est plus pour lui un moyen d'améliorer ses performances, mais simplement un moyen de contrôler la machine et le processus physique.

Chez cet opérateur, le schème trompeur qui consiste à ajuster son activité en fonction du résultat du cadre précédant n'est pas mis en œuvre. On ne peut tout de même pas conclure qu'il a disparu ou qu'il est inhibé. En effet, l'opérateur novice n'alloue que peu de ressources

cognitives à la tâche d'étirage. Il ne vérifie pas le résultat de son activité, il préfère sans doute reporter la mobilisation de ses ressources cognitives aux tâches de calibrages manuelles qu'il maitrise complètement (Amalberti, 2001). Il semble ainsi avoir diminué ses performances acceptables en ce qui concerne le poste d'étirage : il ne cherche pas à obtenir un bon cadre, mais juste à étirer les cadres.

La diminution des performances acceptables semble ici liée à un manque de ressources à la fois externes et internes. En effet, d'un côté, l'environnement limite ses capacités d'action. Le protocole est strict et ne peut pas être changé en raison du haut niveau de sécurité imposé. De plus, l'opérateur, comme il le dit lui-même, ne sait pas quels paramètres il pourrait changer pour améliorer le résultat de son activité à ce poste d'étirage : il n'a ni les schèmes d'action pertinents, ni créé des règles liant paramètres observés et action de remédiation possibles. Il n'a pas non plus la possibilité de créer ces règles, vu que toute erreur est interdite, il ne peut donc pas expérimenter dans le réel. Il est donc dans l'impossibilité d'apprendre par essais-erreurs (Houdé & Winnykammen, 1992 ; Pastré, 2005).

L'opérateur expert, quant à lui, a déconstruit le schème trompeur concernant la vitesse. En revanche, il met en œuvre le schème trompeur consistant à modifier son activité en utilisant le résultat obtenu lors de l'étirage d'un cadre précédant appartenant au même lot. Paradoxalement, il déclare que chaque cadre est différent et qu'il règle son activité en considérant les lots comme homogènes. Cela soulève deux questions : ce schème trompeur altère-t-il les performances ? En effet, beaucoup de facteurs entrent en jeu dans l'atelier, il est donc difficile d'estimer lequel de ces éléments diminue ou améliore la performance. De plus, dans certaines conditions, l'utilisation de ce schème fonctionne. Il faut donc savoir s'il altère les performances pour décider de la nécessité d'éviter son activation, de l'inhiber ou de le déconstruire.

La seconde question soulevée est celle de l'origine de ce schème trompeur. En effet, dans l'atelier tout semble fait pour qu'il soit mis en œuvre : les fiches de postes qui ne demandent de vérifier que le premier cadre du lot, le protocole qui ne prévoit qu'un seul programme et qu'une seule référence d'outil pour un cadre donné. En fait, tout le principe de production est construit selon le principe de l'homogénéité. Dans le même temps, la tendance à régler un comportement en fonction d'un résultat antérieur est commune dans la vie de tous les

jours, l'origine de ce schème trompeur pourrait donc également être extérieure à l'atelier. Il faudrait pouvoir déterminer son origine pour mieux le déconstruire si cela est nécessaire.

Enfin, la construction du protocole de production de façon si rigide a également influencé le compromis cognitif de l'opérateur expert (Hoc & Amalberti, 2007). Le haut niveau d'automatisation de la tâche ne nécessite pas pour lui d'allouer beaucoup de ressources à la tâche, d'où un haut niveau de distraction. En situation problème, il dispose des ressources internes suffisantes pour les mobiliser dans une recherche de solution. Il a créé des règles liant un type de problème donné à une solution spécifique, par exemple, telle déformation de la section nécessite un changement d'outil. Cependant, l'utilisation du schème trompeur le conduit à être réactif : ainsi un défaut a besoin d'être constaté sur un cadre avant de changer l'activité pour le cadre suivant. Il en résulte que le premier cadre sera difficile à reprendre au calibrage.

De façon générale, l'environnement ne permet pas pour l'instant d'anticiper les défauts, les opérateurs, comme le technicien d'industrialisation, n'ont que peu d'accès aux informations concernant les cadres, aucune mesure, de la section ou des caractéristiques internes des cadres, n'est prise avant étirage. De plus, ils ne sont pas censés modifier l'étirage, que ce soit pour le programme de la machine ou pour les outils à disposition. L'environnement limite donc le contrôle que l'opérateur a de son activité.

V.3. Conséquences pour l'interface du compagnon virtuel

De cette étude, nous avons déduit les éléments importants à faire figurer dans le compagnon virtuel pour soutenir à la fois le développement des compétences et l'activité quotidienne à ce poste, qu'elle soit normale ou inhabituelle.

Afin de soutenir la formation et le développement des compétences, l'interface doit permettre de visualiser les différents niveaux de la hiérarchie d'abstraction, en particulier en rendant visibles les liens entre ces différents niveaux, tel que préconisé dans le cadres de la conception d'interface écologique (Bennett & Flach, 2011). Ainsi, utiliser les lois physiques s'appliquant à ce système en s'inspirant des modes de représentation de ces lois devrait permettre de transmettre une représentation correcte aux opérateurs. Notamment,

devraient figurer les contraintes aux bords, les caractéristiques internes et le retour élastique ainsi que les contraintes internes créées lors de l'étirage.

La simulation des processus physiques dans le compagnon virtuel, en permettant les essais-erreurs sans nuire aux cadres réels, devrait permettre aux opérateurs de se former, d'élaborer et de tester des hypothèses (Pastré et al., 2009).

Afin de soutenir l'activité quotidienne normale, ou problématique, ce compagnon virtuel devrait permettre à son utilisateur, qu'il soit novice ou expert, d'anticiper les problèmes potentiels rencontrés. Ainsi, l'opérateur devrait, avant l'étirage, prendre des mesures et utiliser le simulateur pour connaître le résultat théorique de son activité. Cela devrait permettre d'éviter d'utiliser un cadre réel pour tester sa réaction.

Ce simulateur devrait également permettre au technicien d'industrialisation de déterminer les limites d'application d'un programme d'étirage à une plage donnée de caractéristiques internes des matériaux. Cela nécessiterait de changer l'organisation de l'activité dans l'entreprise, en apportant plus de flexibilité. Il faudrait en effet, au minimum pour chaque lot, vérifier grâce au compagnon virtuel que le programme fonctionne.

Enfin, représenter dans le compagnon virtuel les informations en traitant les cadres de façon individuelle et non les uns par rapport aux autres devrait être une première façon de ne pas évoquer le schème trompeur identifié. Cependant, il reste encore à évaluer si ce schème trompeur a un effet négatif sur les performances et, si oui, à identifier son origine afin de savoir comment l'inhiber.

Le chapitre suivant s'attachera donc, dans un environnement contrôlé grâce au paradigme du micromonde (Omodei & Wearing, 1995), à étudier le lien entre schème trompeur et performances.

ÉTUDE 2 : ÉTUDE DU SCHÈME TROMPEUR, DE SON ORIGINE ET DE SES LIENS AVEC LES PERFORMANCES AU MOYEN D'UN MICROMONDE

I. INTRODUCTION

Lors de l'analyse de l'activité des opérateurs expert et novice au poste d'étirage dans l'atelier tenant lieu de cas d'usage, nous avons repéré un schème trompeur qui semble guider l'activité des opérateurs (novice et expert). En effet, bien que ceux-ci déclarent que chaque cadre est unique et particulier, ils règlent certains paramètres, par exemple le modèle de chenilles, en fonction du résultat d'un cadre précédent.

Ce chapitre vise à atteindre trois objectifs.

Tout d'abord, nous souhaitons vérifier que le schème trompeur se manifeste en laboratoire comme nous l'avons observé dans l'atelier, ce qui tendrait à montrer que le schème trompeur est un phénomène général et non limité aux seuls opérateurs observés dans l'étude 1.

Le deuxième objectif est d'étudier et de définir les liens potentiels entre ce schème trompeur et les performances, et ce à travers le paradigme du micromonde. En effet, si le schème trompeur a un effet délétère sur les performances, il faudra que le compagnon virtuel créé puisse soit éviter de le faire apparaitre, soit aider les opérateurs qui l'ont déjà développé à ne pas l'utiliser lors de la tâche d'étirage.

Connaitre la psychogenèse du schème trompeur forme le troisième objectif de ce chapitre, car la prise en charge du schème trompeur dans le compagnon virtuel ne sera pas la même

s'il s'agit d'un schème apparaissant dans la vie courante, suite à une formation, ou construit lors de l'utilisation de la machine.

L'existence de schèmes trompeurs a été démontrée à la fois chez l'enfant (Pascual-Leone et al., 2010) et l'adulte (Moutier, Angeard, & Houdé, 2002). De plus, on sait que les schèmes peuvent aider à organiser une activité dans un environnement de travail (Pastré, 1994). Si l'effet négatif de biais de raisonnement a été démontré dans des tâches de résolution de problèmes, il est difficile de déterminer l'existence d'un lien entre schèmes trompeurs et performances dans des situations de travail, en particulier dans notre cas d'étude.

En effet, l'étude du lien entre le schème trompeur et les performances est difficile dans le cadre de l'atelier car beaucoup d'éléments différents modifient l'activité des opérateurs, ainsi que les résultats obtenus. Ces éléments sont impossibles à contrôler et à évaluer dans le monde réel. De plus, le protocole lié au poste d'étirage limite les possibilités d'actions pour les opérateurs. Ces derniers sont peu nombreux dans l'atelier, ce qui limite les possibilités de comparaison et de mesure.

Ainsi, nous avons choisi d'étudier ce schème trompeur au travers du paradigme du micromonde. Celui-ci nous permet de contrôler les caractéristiques des cadres traités par les participants, et donc de standardiser le rôle de ces caractéristiques sur les résultats. Nous contrôlons donc la difficulté et l'ordre de présentation des cadres. Le micromonde permet également d'avoir un accès à toutes les mesures prises et à toutes les actions effectuées. Enfin, ce paradigme nous permet de tester plus de participants que ceux présents dans l'atelier réel.

Un micromonde est une simulation informatique d'un environnement réel. Omodei et Wearing (1995) ont démontré que la simulation peut servir avantageusement la recherche sur les situations dynamiques pour peu que l'environnement soit réaliste dans le scénario développé et proche des connaissances que les utilisateurs ont du système simulé.

Ce paradigme est ainsi utilisé dans différents domaines d'activité dynamique, par exemple les domaines financier (Sterman, 1989), industriel (Gibson, Fichman, & Plaut, 1997), ou militaire (Lintern, 2006). Les objectifs sont variés. Il peut s'agir de définir des modèles de l'apprentissage en situation dynamique (Gonzalez, 2005), de déterminer différentes

stratégies de résolutions de problèmes (Pastré et al., 2009), mais également d'élaborer (McIlroy & Stanton, 2011) ou de valider des interfaces (Drivalou & Marmaras, 2009).

Hilliard (2012) préconise pour développer de tels micromondes d'utiliser l'analyse cognitive du travail. Nous avons donc utilisé les résultats de notre première étude, qui reprend en partie l'analyse cognitive du travail, pour développer notre micromonde. Nous décrirons le protocole expérimental ainsi que le micromonde dans une première partie.

Nous étudierons ensuite l'apparition du schème trompeur dans le micromonde, et discuterons de ces origines probables. Enfin, nous testerons l'effet du schème trompeur sur les performances dans le micromonde.

II. MÉTHODE

Afin d'étudier le schème trompeur et son effet sur les performances, nous avons développé un micromonde, qui reproduit l'activité d'étirage des cadres observée dans l'étude 1, et comparé l'activité des participants dans deux situations. Dans la première, les participants sont laissés en autonomie et, dans la seconde, ils suivent un entrainement spécifique visant à les prévenir de l'existence du schème trompeur et à les encourager à mettre en œuvre le schème pertinent.

II.1. Participants

Les participants de cette expérience étaient douze étudiants et actifs recrutés via les listes de diffusions de l'École Centrale de Nantes. Ils avaient entre 21 et 34 ans, (m=26.92, SD=4,08)[5].

Lors de la première séance et avant le premier scénario, un premier questionnaire était administré aux participants afin d'évaluer leurs connaissances concernant la physique des matériaux et l'étirage des cadres. Il s'agissait de questions concernant la phase élastique et le module de Young. Il ne fournissait, en soi, aucune aide à la réalisation de la tâche ultérieure. Ce questionnaire évaluait également les habitudes des participants concernant

[5] Deux autres participants ont dû arrêter l'expérience à cause du mal des simulateurs.

Tableau 3 : répartition des participants dans les groupes expérimentaux en fonction de leurs connaissances antérieures et de leurs habitudes en jeux vidéo.

	Connaissances faibles		**Connaissances fortes**	
	Joueur occasionnel	Joueur régulier	Joueur occasionnel	Joueur régulier
Autonome	2	1	3	0
Entrainé	2	1	1	2

les jeux vidéo, la familiarité avec de tels environnements pouvant être un facilitateur dans le micromonde. La moitié des participants avait des connaissances sur la physique des matériaux, et l'autre moitié non, ils ont été répartis dans chacun des groupes expérimentaux. Enfin, quatre participants jouaient au moins une fois par semaine aux jeux vidéo et les six autres moins de quelques fois par an.

Comme le montre le Tableau 3, les participants sont répartis équitablement dans les deux groupes expérimentaux en fonction de leurs connaissances antérieures. Il y a également autant de joueurs réguliers ou occasionnels ayant des connaissances antérieures que de joueurs réguliers ou occasionnels n'ayant pas de connaissances antérieures. En revanche, il y a plus de participants jouant régulièrement aux jeux vidéo dans le groupe « entrainé » que dans le groupe « autonome ».

II.2. Micromonde et tâche d'étirage

L'étude s'est déroulée sur un ordinateur avec un écran de vingt-deux pouces, fonctionnant sous Windows ou Linux. Dans les deux cas le même logiciel était lancé, avec les mêmes paramètres d'affichage.

Le logiciel utilisé est de type micromonde : il s'agit d'une simulation simplifiée de l'atelier réel. Ce logiciel a été conçu dans le cadre de cette thèse à partir des éléments récoltés lors de l'analyse du système de travail et de l'activité des opérateurs de l'atelier réel. Il a été développé par un informaticien recruté au sein de l'équipe PsyCoTec de septembre 2013 à juin 2014.

Le micromonde représente l'atelier de l'usine d'aéronautique qui nous tient lieu de cas d'étude. Cet atelier a été présenté en détail dans le chapitre précédent. Dans le monde virtuel, les opérateurs doivent également transformer des poutres métalliques rectilignes en poutres plus longues et incurvées. Ces poutres sont appelées cadres. Elles sont présentées comme étant destinées à servir d'ossature à un avion. Les principales caractéristiques du micromonde, ainsi que leurs correspondances avec l'activité observée en atelier, sont résumées dans le Tableau 4.

Chaque participant du micromonde endosse le rôle d'un opérateur-technicien d'industrialisation et doit étirer les cadres afin qu'ils atteignent des valeurs précisées par des « fiches de suivi » disponibles dans le micromonde. Ces valeurs sont au nombre de quatre et constituent nos critères de réussite : la longueur, l'angle, la rectitude et la planéité.

Pour atteindre ces valeurs cibles, le participant doit utiliser une machine d'étirage (Figure 6 a) et suivre le protocole présenté dans les fiches de postes. Il doit étirer une première fois le cadre, c'est ce que l'on appelle la passe 1. Il doit ensuite envoyer le cadre en trempe, procédé thermique modifiant le cadre. Enfin, il doit étirer une deuxième fois le cadre : c'est la passe 2. En pratique, l'opérateur peut étirer les cadres autant de fois qu'il le souhaite, on appelle étirage le fait de lancer un programme d'étirage qui consiste à allonger et enrouler un cadre. On appelle passe 1 tous les étirages réalisés avant la trempe, et passe 2 tous les étirages réalisés après la trempe.

Le participant dispose de plusieurs possibilités d'action, ayant chacune un ou plusieurs effets sur le cadre final.

Tableau 4 : caractéristiques du micromonde

Éléments extraits de l'analyse de l'activité en atelier	Caractéristiques du micromonde
Impossibilité de connaitre les caractéristiques internes des cadres (module de Young et limite d'élasticité).	Accès limité à l'information
Chaque cadre à des caractéristiques internes différentes qui vont modifier le résultat de l'activité.	Sources d'aléas multiples
La modification de l'état interne du cadre après trempe est limitée au changement de limite d'élasticité (contrairement à l'atelier) Les aléas causés par la variabilité dans l'écartement des branches restent dans les tolérances sauf en cas d'oubli ou d'erreur (contrairement à l'atelier).	Sources d'aléas limitées
Le participant a le droit de modifier les paramètres du programme (ce qui n'est pas le cas des opérateurs dans l'usine).	Possibilité de contrôler le processus d'étirage
Le participant a la possibilité d'évaluer le résultat de son activité en mesurant différentes dimensions du cadre étiré	Possibilité de contrôler le résultat de son activité

Le participant peut utiliser les différents types de chenilles présents dans le micromonde pour chacun des étirages. Les chenilles ont le même rôle que dans le monde réel : elles assurent le maintien des branches du cadre. Ainsi, elles agissent sur les valeurs de rectitude et de planéité.

Il existe deux types de cadre (cf. Figure 7), chacun associé à un type de chenilles en première passe et à un autre type de chenilles en deuxième passe. Si le participant oublie les chenilles ou s'il se trompe de type de chenille, la rectitude et la planéité seront hors des tolérances : le cadre sera donc considéré comme mauvais lors de l'analyse des résultats. De plus, à chaque étirage, les branches du cadre se resserrent. Ainsi, si le participant multiplie les étirages lors d'une même passe, les chenilles ne joueront plus leur rôle et la rectitude ou la planéité seront hors des tolérances.

De même, les cales de fond de forme auront un effet sur la rectitude et la planéité en cas d'erreur ou d'oubli. Enfin, il est à noter que chaque cadre est légèrement différent de telle sorte que les résultats obtenus seront toujours différents mais dans les tolérances si les bons outils (cales et chenilles) sont utilisés.

Le participant peut également modifier le programme (Figure 7. b) : deux paramètres vont

Figure 6 : le micromonde avec de gauche à droite a) l'environnement virtuel avec le poste de commande et la machine d'étirage, b) panneau de gestion des programmes, c) outils de mesures et fiche de poste.

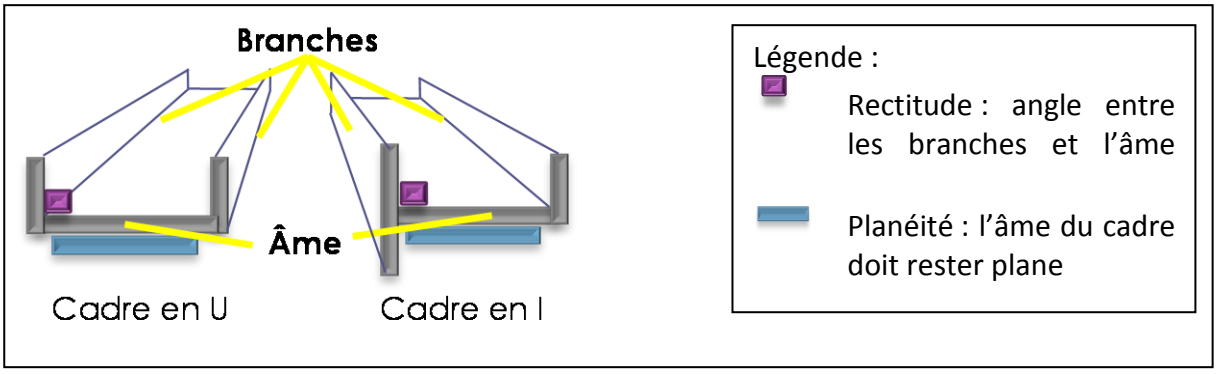


Figure 7 : représentation schématique des deux types de cadres présents dans le micromonde.

avoir un effet direct sur les cadres : l'allongement et l'enroulement.

En modifiant l'allongement, le participant modifie la longueur finale du cadre. En modifiant l'enroulement, il modifie l'angle final du cadre. Deux paramètres internes au cadre vont modifier les réactions des cadres et nécessiter des modifications des programmes : le module de Young et la limite d'élasticité. Le module de Young peut varier pour chaque cadre avec une intensité plus ou moins importante. La limite d'élasticité est la même pour tous les cadres (sauf dans le dernier scénario). Cependant, après la trempe, la limite d'élasticité change brusquement puis évolue en fonction du temps, rendant le cadre de plus en plus difficile à étirer. Ainsi, le participant dispose de cinq minutes pour étirer le cadre. Après ce délai, le cadre est beaucoup trop dur à étirer et peut se rompre. Pour arrêter ce phénomène, le participant peut mettre un cadre en chambre froide (le « frigo »).

Ces deux caractéristiques internes, le module de Young et la limite d'élasticité, vont provoquer le retour des cadres vers leur position d'origine. En effet, lors de l'étirage, le cadre est allongé et enroulé. Cependant, lorsque l'on enlève le cadre de la machine, celui-ci rapetisse et se détend, il est donc moins long et moins enroulé que ce qui est écrit sur le programme. Ce phénomène de « retour élastique » dépend directement et uniquement de ces deux caractéristiques internes dans le micromonde. Le rôle du participant sera donc d'anticiper ce retour élastique et de programmer la machine de façon à ce qu'elle étire suffisamment mais pas trop, en fonction des caractéristiques internes du cadre. Ces caractéristiques ne sont pas directement accessibles au participant, il doit les inférer à partir des résultats obtenus suite à un premier étirage.

Enfin, le participant peut également changer la vitesse : celle-ci n'a aucun effet sur les résultats. Cependant, en deuxième passe, si elle est supérieure à 90, les risques de casser le cadre deviennent importants.

Afin de contrôler son activité et les résultats obtenus, le participant dispose d'outils de mesure (cf. Figure 6. c). Le rapporteur permet de mesurer l'angle, la rectitude et la planéité. Le mètre permet de mesurer l'allongement. Enfin, une lime et un marqueur sont à disposition, mais ils ne sont pas utiles dans les scénarios implémentés jusqu'ici : la lime permettrait de limer des défauts de surface et le marqueur de placer des repères pour mesurer la poutre par segment.

Le Tableau 5 résume les éléments du programme, leurs effets sur les cadres, et les mesures possibles.

Lors d'une session, toutes les actions de l'opérateur sont automatiquement enregistrées dans un tableur (au format .csv) : les objets manipulés, les commandes données à la machine ainsi que l'orientation du participant dans le monde virtuel (position et angle entre le sol et le centre de l'image). Cette dernière information n'a pas été traitée dans le cadre de cette étude. Enfin, un fichier récapitulatif fournit les informations sur chaque cadre étiré lors de la session : dimensions finales, état cassé ou intact du cadre, nombre et noms des programmes d'étirage subis.

Afin d'évaluer les performances des participants, nous utilisons ces mêmes mesures : l'angle, la longueur, la rectitude et la planéité. Cependant, les schèmes étudiés ont essentiellement un effet sur l'angle et la longueur. Nous avons donc évalué les performances principalement sur ces deux critères. Tout d'abord d'un point de vu binaire : l'angle est-il oui ou non un motif de rebut ? La longueur est-elle oui ou non un motif de rebut ? Ces variables sont appelées « angle comme motif de rebut » et « longueur comme motif de rebut ». Afin d'évaluer la précision des participants sur ces dimensions, nous avons également analysé « la distance à la longueur cible » et « la distance à l'angle cible ». Pour cela, nous avons utilisé la valeur absolue de l'écart entre la valeur obtenue et la valeur cible, pour la longueur et pour l'angle.

Enfin, afin de disposer d'un critère à la fois décisif pour l'entreprise et plus global, nous avons regardé, pour chaque cadre, s'il était réussi. Un cadre réussi est dans les tolérances pour tous les critères d'évaluation du cadre : l'angle, la longueur, la rectitude et la planéité.

Tableau 5 : actions, effets sur les performances et mesures possibles

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 peuvent 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

II.3. Procédure

Chacun des douze participants réalisait deux ou trois séances selon le groupe expérimental auquel il était affecté. Lors de chaque séance, le participant jouait deux scénarios à chaque fois différents. Nous présentons ici, les variables que nous avons manipulées lors du protocole, puis nous décrivons le déroulement d'une séance de test.

Variables manipulées

Nous avons manipulé deux variables indépendantes : la difficulté des scénarios, en lien avec la similarité des cadres entre eux, et l'entrainement des participants.

Scénarios dans le micromonde

Nous avons développé six scénarios de difficulté croissante dans le micromonde. Les scénarios étaient traités les uns après les autres par les participants, avec une pause entre deux scénarios. Lors de chaque séance, un participant traitait deux scénarios. Il y avait un délai d'au minimum un jour et d'au maximum une semaine entre deux séances.

On faisait varier la difficulté des scénarios en rendant les caractéristiques internes des cadres plus ou moins semblables.

Les caractéristiques internes des cadres ont été déterminées et fixées avant les expériences de telle sorte que, dans un scénario, chaque cadre est différent et unique. En revanche, les scénarios étaient identiques pour tous les participants, c'est-à-dire que les participants traitaient les mêmes cadres.

Il est important de noter que, lorsque les cadres sont similaires, c'est-à-dire que leurs caractéristiques internes sont semblables, l'utilisation du schème trompeur peut être efficace. En effet, bien que chaque cadre soit unique, la différence entre deux cadres est inférieure aux tolérances demandées ce qui fait qu'un même réglage peut donner des résultats corrects pour tous les cadres. Pour autant, nous voulions que les cadres restent ostensiblement différents les uns des autres pour éviter d'induire l'utilisation du schème trompeur en montrant d'emblée des cadres identiques. En revanche, lorsque les cadres sont très différents les uns des autres, l'utilisation du schème trompeur, qui consiste à régler le programme d'un cadre en fonction du résultat d'un précédent, n'est plus efficace.

En particulier, nous avons choisi une limite d'élasticité fixe pour tous les cadres sauf pour le scénario 6. Les modules de Young de chaque cadre étaient différents et tirés aléatoirement dans une loi normale pour un scénario donné. On considérait alors que les cadres étaient homogènes ou similaires quand l'écart-type de la loi normale était faible, et que les cadres étaient hétérogènes ou différents quand l'écart-type de la loi normale était élevé. Enfin, comme précisé au paragraphe précédent, afin de s'assurer que tous les participants traitaient les mêmes cadres, une fois les valeurs de module de Young et de limite d'élasticité établis par tirage aléatoire pour chaque cadre, elles restaient identiques pour le scénario. Nous avons donc obtenu et fixé les six scénarios présentés ci-après.

Le premier scénario est un scénario de découverte et d'initiation : il ne contient que quatre cadres, deux I et deux U. Ces cadres ont des caractéristiques internes conformes à celles attendues par le programme : il suffit donc d'appliquer les programmes par défaut pour obtenir des cadres dans les tolérances. Bien que les cadres soient parfaitement conformes à ce que le programme attend, les cadres, une fois étirés, ne seront pas forcément parfaits : le résultat dépend du temps écoulé après la trempe. Ce scénario doit permettre aux participants de prendre en main le micromonde et les tâches qui lui sont échues. Il leur permet également de se familiariser avec l'environnement.

Le second scénario contient huit cadres en U, issus d'un même lot. Ces cadres sont semblables les uns aux autres, c'est-à-dire que leur module de Young et leur limite d'élasticité sont proches en début de scénario. Le participant peut donc repérer le décalage et utiliser les résultats de chaque cadre pour ajuster les paramètres d'étirage (allongement et enroulement). Ici, le schème trompeur est donc efficace : il ne permet pas d'avoir des cadres parfaits, mais il permet de garder les cadres dans les tolérances pour l'angle et la longueur avec un seul paramétrage des programmes. Ce scénario doit permettre au participant de créer des liens entre un certain résultat obtenu en première passe et le paramètre de programme adéquat en deuxième passe.

Le scénario 3 est identique au scénario 2, cependant les paramètres de programme permettant d'obtenir des cadres dans les tolérances sont différents. Ce scénario permet également aux participants de réactiver leurs compétences concernant le micromonde après une coupure assez longue.

Le scénario 4 comporte également huit cadres issus d'un même lot. Cependant, ces cadres sont très différents les uns des autres : les modules de Young et la limite d'élasticité varient beaucoup d'un cadre à l'autre. Ainsi, un même programme pourra donner des cadres dans les tolérances ou hors tolérances pour la longueur et l'angle. Ce scénario permet de montrer l'inefficacité du schème trompeur dans certaines situations. Les scénarios 3 et 4 ne sont réalisés que par les participants du groupe « entrainé ».

Le scénario 5 comporte deux lots de quatre cadres en I. Chaque lot se compose de cadres similaires les uns aux autres mais différents des cadres de l'autre lot. Ce scénario doit donc permettre à nouveau de créer des liens entre certains résultats de première passe et des paramètres de programmes adéquats en deuxième passe. Il permet également de réactiver les compétences acquises lors des scénarios précédents avant de passer le scénario test.

Enfin, le scénario 6 est semblable au scénario 4 : il contient huit cadres appartenant à un même lot mais différents entre eux. Il est donc nécessaire, pour obtenir des cadres dans les tolérances pour l'angle et la longueur, de ne pas avoir recours au schème trompeur et de modifier les programmes d'étirage pour chaque cadre en deuxième passe, en fonction des résultats en première passe. Ce scénario est le scénario test : en effet, il est passé dans les mêmes conditions par les participants du groupe « autonome » et par les participants du groupe « entrainé ».

Groupes expérimentaux : entrainement dans le micromonde

Les douze participants ont été répartis dans les deux groupes expérimentaux en fonction de leurs disponibilités : soit dans le groupe « entrainé », soit dans le groupe « autonome ». En effet, le groupe « entrainé » passait tous les scénarios en trois séances de deux heures (soit un total de six heures).

Lors des deux premières séances, chaque participant du groupe entrainé manipulait les scénarios 1 à 4 du micromonde en étant formé par un tuteur. Il recevait donc un feedback sur ses actions, en particulier lors d'erreurs. On insistait particulièrement sur l'hétérogénéité des cadres et sur la tendance du participant à régler la machine en fonction du résultat d'un cadre précédent. Les participants de ce groupe étaient donc sensibilisés au schème trompeur. De plus, lors de la deuxième séance, durant le scénario 4, ils pouvaient

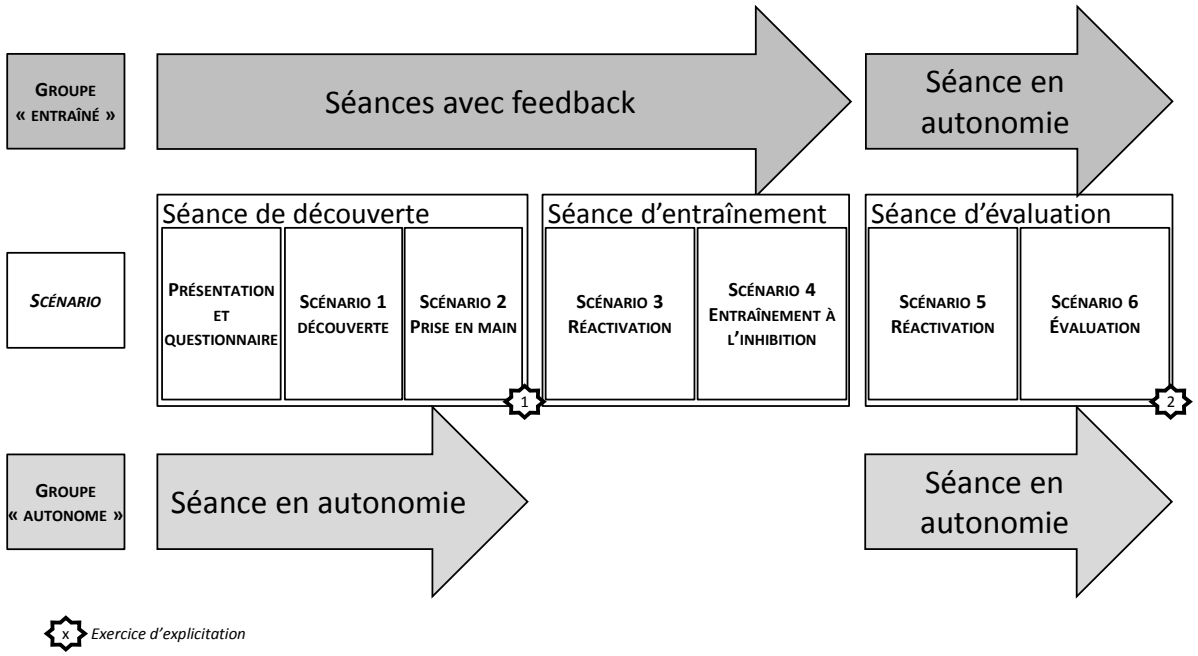


Figure 8 : représentation schématique du protocole expérimental

expérimenter les difficultés engendrées par le schème trompeur et la nécessité de traiter les cadres individuellement. Ils avaient donc un entrainement visant à prévenir l'utilisation du schème trompeur.

Enfin, lors de la troisième séance, ces participants étaient laissés en autonomie afin de pouvoir évaluer dans les mêmes conditions les participants des deux groupes. Ils passent alors les deux derniers scénarios : le 5 et le 6. Le scénario 5 permet de réactiver les connaissances sur le micromonde, d'autant qu'un délai d'une semaine peut se dérouler entre deux séances. Le scénario 6 est le scénario test.

Le groupe « autonome » en revanche, ne passait que quatre scénarios : les scénarios 1 et 2, puis les scénarios 5 et 6. Les participants ne recevaient aucun retour sur leurs actions, ils étaient laissés seuls devant le micromonde.

Le groupe « entrainé » bénéficiait donc d'une séance supplémentaire pour assimiler le fonctionnement du micromonde et d'une session d'entrainement leur permettant d'expérimenter que les cadres pouvaient être différents pour un même lot. Il pouvait donc constater empiriquement l'inefficacité du schème trompeur. Les différences entre les deux groupes sont schématisées dans la Figure 8.

Déroulement d'une séance

Lors de la première séance et avant le premier scénario, un premier questionnaire était administré aux participants afin d'évaluer leurs connaissances concernant la physique des matériaux et l'étirage des cadres.

Une fiche de consigne leur indiquait qu'ils devaient prendre le rôle d'un opérateur dans une usine. Il leur était également présenté un diaporama reprenant les différents éléments du micromonde, expliquant précisément la tâche à accomplir et définissant les principaux éléments de physique manipulés dans le micromonde (module de Young, limite d'élasticité et retour élastique). Les tâches à accomplir étaient également disponibles lors de l'utilisation du micromonde à partir de la touche F1.

Les séances suivantes débutaient directement par un scénario sur le micromonde.

Enfin, les participants réalisaient chaque scénario dans l'ordre croissant, en fonction de leur groupe expérimental, au rythme de deux scénarios par séance. Entre chaque scénario, ils avaient droit à une pause de dix minutes pendant laquelle une collation leur était proposée.

À la fin de la première séance et de la dernière séance, les participants répondaient à un exercice visant à obtenir des indications sur la façon dont ils procédaient et pourquoi : « l'exercice d'explicitation ». La première question de cet exercice est une question piège qui induit l'utilisation du schème trompeur s'il n'est pas parfaitement inhibé ou inexistant. En effet, on donne des valeurs numériques précises concernant un cadre terminé et on demande à l'opérateur comment il procèderait pour un autre cadre appartenant au même lot. La seconde question est une question facile qui n'induit pas l'utilisation du schème trompeur car on demande au participant comment il traiterait un cadre d'un lot différent. Ces deux questions permettent de déterminer si le participant a, dans son répertoire de schèmes relatifs au micromonde, le schème trompeur et s'il est capable de le verbaliser ou si, au contraire, il ne l'a pas ou est capable de l'inhiber.

III. HYPOTHÈSES

III.1. Hypothèses concernant l'existence du schème trompeur

Le protocole expérimental proposé, qui enchaine les scénarios où les cadres sont homogènes, devrait permettre l'apparition du schème trompeur. En effet, cet enchainement peut donner l'impression que les cadres d'un scénario ou d'un lot seront toujours homogènes. De fait, les participants pourraient utiliser les résultats obtenus sur le premier cadre et modifier les programmes pour les cadres suivants en considérant qu'ils sont identiques.

Celui-ci devrait en particulier se manifester dans le scénario 6, où les participants sont en autonomie et où les cadres réagissent de façons différentes malgré un numéro de lot unique. En effet, dans les autres scénarios, les participants mettant en œuvre le schème trompeur ne devraient pas se distinguer des autres participants. En revanche, dans le scénario 6, les paramètres d'étirage ne devraient pas suivre le même modèle statistique lorsque le schème trompeur est présent ou lorsque le schème pertinent est présent. En effet, lorsque le schème trompeur est présent, les paramètres d'étirages devraient être liés aux mesures prises sur d'autres cadres. Au contraire, si le schème pertinent est présent les paramètres d'étirage en deuxième passe devraient être liés aux mesures prises sur le même cadre en première passe. En effet, le schème pertinent consiste à régler son activité en fonction du résultat de première passe du même cadre.

Le schème trompeur devrait également se manifester à l'écrit lors des exercices d'explicitation. En particulier, la question 1, qui est une question de type piège, devrait montrer plus souvent le schème trompeur. Cela indiquerait que ce schème est présent chez le participant et qu'il a du mal à l'inhiber. Ainsi, certains participants pourraient réussir à l'inhiber dans leur activité mais pas dans leur réponse à cette question, ce qui indiquerait que le schème trompeur ne disparait pas mais qu'il est inhibé lors de l'activité. En revanche certains participants pourraient ne pas l'expliciter mais le mettre en œuvre lors de leur activité. Cette hypothèse sera testée dans la première partie de nos résultats.

III.2. Hypothèses concernant la provenance du schème trompeur

En comparant l'apparition de ce schème trompeur dans nos sous-groupes de population, nous pourrons avoir un indice concernant la provenance du schème trompeur. Contrairement à ce que nous attendons, il serait possible que le schème trompeur soit plus fréquent chez nos participants « entrainés » que chez nos participants « autonomes ». Nous pourrions alors en déduire que le schème trompeur apparait du fait de l'activité dans le micromonde, une exposition prolongée favorisant sa mise en œuvre. Au contraire, s'il apparait de la même façon dans les deux groupes, nous pourrons en déduire qu'il apparait en fonction du vécu antérieur des participants, suggérant une origine ontogénétique (Brousseau, 1998). Enfin, s'il apparait plus souvent chez les participants du groupe « autonome », on saura que le vécu antérieur peut être atténué par la formation dispensée lors de l'entrainement et la formation dispensée aux participants du groupe « entrainé ».

Nous avons également cherché à vérifier un certain nombre d'hypothèses secondaires liées aux variables invoquées concernant les connaissances antérieures en physique des matériaux et l'expérience des jeux vidéo.

Si les participants qui ont des connaissances antérieures manifestent plus souvent le schème trompeur, on pourra en déduire que, dans leur formation antérieure, des biais didactiques ont favorisé l'apparition de ce schème. Si ceux qui ont ou n'ont pas de connaissances antérieures ne se distinguent pas, on en déduira que le schème trompeur apparait à cause d'activités quotidiennes. Cependant, s'il apparait moins chez les participants ayant des connaissances antérieures, cela suggèrera que leur formation déconstruit ce schème acquis dans la vie quotidienne.

Enfin, nous avions au départ voulu contrôler l'habitude en jeux vidéo des participants, car l'environnement en trois dimensions ainsi que le maniement de la souris pourraient favoriser les joueurs réguliers. Cependant, les participants ayant l'habitude de jouer aux jeux vidéo pourraient soit manifester plus souvent le schème trompeur, ce qui indiquerait une forte tendance à catégoriser acquise via le jeu vidéo (dans le cas présent, il s'agirait de tenir pour équivalent des cadres d'un même lot), soit le manifester moins souvent, ce qui

indiquerait une plus grande flexibilité et une assimilation facilitée du micromonde pour ce type de participant.

III.3. Hypothèses concernant le lien entre schème trompeur, entrainement et performances

Le schème trompeur devrait altérer la performance des participants et, inversement, le schème pertinent devrait améliorer les performances dans le scénario test (scénario 6).

En effet, la mise en œuvre du schème trompeur dans le scénario 6, dans lequel tous les cadres sont différents, entraine un ajustement de l'activité en fonction d'un mauvais paramètre. Ainsi, les participants mettant en œuvre ce schème trompeur devraient moins réussir en ce qui concerne l'angle et la longueur comme motif de rebut, ces deux paramètres étant directement liés aux valeurs de programmes utilisés. De la même façon, le nombre de cadres réussis devrait être inférieur chez les participants mettant en œuvre le schème trompeur.

Cependant, mettre en œuvre le schème pertinent ne devrait pas être suffisant pour avoir de bons résultats. En effet, les participants du groupe « entrainé » ont eu le temps et les occasions de créer des règles (Rasmussen, 1983) liant une mesure du cadre en première passe à une certaine valeur de programme. En revanche, ceux du groupe « autonome » n'ont pas eu cette opportunité. Ainsi, même s'ils utilisent les bons paramètres pour ajuster leur activité, c'est-à-dire le résultat en première passe, ils n'ont pas de règles précises, ils n'ont donc pas les ressources internes suffisantes. Nous devrions ainsi avoir de meilleurs résultats chez les participants mettant en œuvre le schème pertinent uniquement s'ils appartiennent au groupe « entrainé ».

IV. RÉSULTATS

IV.1. Existence du schème trompeur

Présence des schèmes dans les exercices d'explicitation

Les exercices d'explicitation étaient constitués d'un paragraphe présentant le problème, suivi de deux questions (cf. Figure 9). Pour les deux questions, on repère la présence des schèmes en fonction des règles suivantes :

- si dans la réponse on trouve des paramètres de programme ou un lien entre le résultat du cadre de l'énoncé et du cadre suivant, on considère que le schème trompeur est présent ;
- si on trouve une réponse indiquant que le programme du nouveau cadre sera fixé en fonction du résultat du premier étirage, on considère que le schème pertinent est présent ;
- pour tout autre type de réponse ou pour des réponses floues ou ambigües, on notera que la réponse est indéterminée.

Nous nous intéressons aux réponses des participants à la question 1 lors du second questionnaire. En effet, il s'agit ainsi d'observer si, à l'issue du scénario 6, les différents schèmes sont présents. De plus, la question 1 est celle qui induit le plus le schème trompeur. Elle constitue une question piège, il faut en effet inhiber le schème trompeur, s'il existe, pour y répondre correctement.

En comparant des modèles binomiaux testant l'apparition du schème trompeur à l'aide de la méthode des BIC, on ne trouve pas de différence entre les deux groupes (chez 4 participants sur 6 dans le groupe « autonome », et chez 3 participants sur 6 dans le groupe « entrainé » ;

Vous avez étiré un premier cadre en utilisant les valeurs de programme par défaut en première et en deuxième passe.

Vous avez obtenus les résultats suivants en ce qui concerne l'allongement et l'angle d'étirage

- 1er étirage : longueur 5,29 Angle 45,07
- 2ème étirage : longueur 5,51 Angle 45,07

1) Vous devez à présent étirer un second cadre appartenant au même lot, comment procédez-vous et pourquoi ?

2) Vous devez maintenant étirer un troisième cadre appartenant à un lot différent, comment procédez-vous et pourquoi ?

- Question 1
  - Si on trouve une réponse donnant des paramètres de programme on sera en présence du schème trompeur.
    - Ex. participant 12 : « *Je réduis la longueur sur la deuxième passe.* »
  - Si on trouve une réponse disant que le programme sera modifié en fonction du résultat du premier étirage : schème pertinent.
    - Ex. participant 5 : « *2ème étirage en fonction de la longueur mesurée : si longueur < 5,29 j'augmente l'étirage si longueur > 5,29 je réduis l'étirage* »

Figure 9 : exemples de questionnaires

BIC du modèle nul = 7,378, BIC du modèle d'une différence entre les groupes = 9,518).

Ainsi, le schème trompeur apparait de la même façon dans les deux groupes, lors de la question 1 du deuxième exercice d'explicitation.

De la même façon, l'apparition du schème pertinent apparait de la même façon dans les deux groupes (chez 1 participant sur 6 dans le groupe autonome et chez 2 participants sur 6 dans le groupe entrainé ; BIC du modèle nul = 6.981, BIC du modèle de la différence entre les groupes = 9.015).

Enfin, dans les réponses à la deuxième question, les deux groupes ne se distinguent pas, que ce soit pour le schème trompeur (chez 1 participant dans chaque groupe ; BIC M0 = 6,131, BIC M1 = 8,616) ou pour le schème pertinent (chez 4 participants du groupe « autonome » et chez 3 participants du groupe « entrainé » ; BIC M0 = 6,797, BIC M1 = 9,143).

Le Tableau 6 résume le nombre de schèmes pour chaque groupe, par participant et par question à l'exercice d'explicitation numéro 2. Nous retrouvons donc bien à la fois le schème trompeur et le schème pertinent dans les écrits des participants. Ainsi, comme nous l'avions envisagé dans nos hypothèses (paragraphe III.1), il est possible que certains participants ne mettent en œuvre le schème trompeur que dans la question piège. Chez eux, les deux schèmes coexistent donc. Contrairement à ce qui était attendu, les deux groupes répondent de façon similaire à chacune des questions posées. L'entrainement ne fait donc pas disparaitre complètement le schème trompeur.

Manifestation des schèmes dans l'activité des participants dans le micromonde

Afin de tester la manifestation des schèmes pertinents et trompeurs, nous avons analysé les comportements des participants dans le micromonde. Ainsi, nous avons comparé, pour

Tableau 6 : nombre de participants ayant répondu à l'exercice d'explicitation 2 par le schème trompeur, le schème pertinent ou de façon indéterminée pour chaque question par groupe expérimental

	Question 1			Question 2		
Résultat / Groupe expérimental	Schème trompeur	Schème pertinent	Indéterminé	Schème trompeur	Schème pertinent	Indéterminé
autonome	4	1	1	1	4	1
entrainé	3	2	1	1	3	2
total	7	3	2	2	7	3

chaque participant, deux modèles statistiques, un qui postule l'existence du schème trompeur et l'autre celui du schème pertinent.

Lorsqu'ils mobilisent le schème trompeur, les individus modifient leur activité en fonction des résultats obtenus sur les cadres précédents. Statistiquement, cela correspond à un modèle qui dit que la valeur du programme en deuxième passe sera liée aux mesures prises sur le cadre précédent.

Au contraire, lorsqu'ils mobilisent le schème pertinent, ils modifient leur activité en fonction des résultats obtenus sur le même cadre lors de la première passe. Cela correspond à un modèle statistique qui lie la valeur du programme à la mesure prise sur le même cadre antérieurement.

Ainsi, pour chaque participant, pour le scénario 6, nous avons comparé plusieurs modèles : le modèle nul, le modèle du schème trompeur, le modèle du schème pertinent, et le modèle de la présence des deux schèmes. Nous avons effectué ces analyses à chaque fois pour la longueur et pour l'angle, en tenant compte pour le premier des programmes d'allongement et pour le second des programmes d'enroulement. Pour chaque participant, les modèles étaient déterminés avec les huit cadres du scénario 6, c'est-à-dire, huit individus statistiques.

Nous avons ainsi pu déterminer si globalement le participant mobilisait l'un des schèmes, les deux ou aucun. La ligne « total » du tableau 7 montre le nombre de participants ayant mobilisé l'un ou l'autre de ces modèles statistiques lors du scénario 6 pour la longueur. En comparant les résultats obtenus dans le micromonde et les réponses à la question 1 (question piège) de l'exercice d'explicitation, on remarque que trois participants ont mis en œuvre le schème pertinent seul dans le micromonde mais ont répondu avec le schème trompeur à la question piège. En revanche, aucun participant ayant mis en œuvre le schème trompeur seul dans le micromonde n'a répondu avec le schème pertinent.

Tableau 7 : distribution des participants en fonction de leurs résultats à la question 1 de l'exercice d'explicitation et de leur activité dans le micromonde.

Activité dans le micromonde / **Question 1 d'explicitation**	Deux schèmes	Modèle Nul	Schème trompeur seul	Schème pertinent seul	**Total général**
Schème trompeur seul	1	1	2	3	**7**
Schème pertinent seul	1	1	0	1	**3**
Indéterminé	2	0	0	0	**2**
Total	**4**	**2**	**2**	**4**	**12**

Conclusion

Cette partie visait à valider l'hypothèse 1 concernant l'apparition du schème trompeur dans le micromonde. Le schème trompeur se manifeste donc bien dans le scénario 6, que ce soit au cours de l'activité des participants ou dans leurs réponses à l'exercice d'explicitation.

De plus, on remarque que l'apparition du schème pertinent dans l'activité des participants ne signifie pas que celui-ci disparait. En effet, certains participants sont capables de mettre en œuvre le schème pertinent dans leur activité mais réutilisent le schème trompeur dans la question piège de l'exercice d'explicitation. En revanche, ceux qui mobilisent exclusivement le schème trompeur dans leur activité le mobilisent également dans l'exercice d'explicitation.

Nous avons donc montré que le schème trompeur existe bien dans notre protocole expérimental, il nous faut à présent essayer d'en déterminer l'origine.

IV.2. Provenance du schème trompeur

Afin de déterminer l'origine potentielle du schème trompeur à partir de nos observations, nous avons comparé les participants selon trois facteurs : l'entrainement qu'ils ont reçu sur le micromonde, leurs connaissances antérieures sur la physique des poutres et leurs habitudes de jeux vidéo.

Nous comptions alors l'apparition de l'événement « apparition du schème trompeur » en fonction du sous-groupe du participant qui le manifestait. Enfin, comme cet événement « apparition du schème trompeur » peut se manifester seul ou en même temps que l'événement « apparition du schème pertinent », dans le cas où le modèle « présence des deux schèmes » est sélectionné, nous avons analysé les deux cas de figure. Nous avons donc réalisé une première série d'analyses en considérant que l'événement « apparition du schème trompeur » était réalisé lors que le modèle des deux schèmes se manifestait ou lorsque le modèle du schème trompeur seul se manifestait. Nous avons ensuite fait à nouveau les analyses mais en considérant que l'événement « apparition du schème trompeur » n'était réalisé que lorsque le modèle du schème trompeur seul apparaissait.

Nous avons également procédé de la même façon concernant l'apparition de l'événement « apparition du schème pertinent ».

Apparition du schème trompeur dans les groupes expérimentaux

Le Tableau 8 montre que les groupes expérimentaux ne se distinguent pas quant à l'apparition du schème trompeur si l'on considère à la fois les modèles des deux schèmes et du schème trompeur seul.

Ainsi, lorsque l'on compare des modèles binomiaux indiquant un effet du groupe sur l'apparition du schème trompeur au modèle nul qui indique qu'il n'y a pas d'effet, le modèle choisi est le modèle nul, à la fois pour la longueur (BIC_{M0} = 8,288 ; BIC_{M1} = 9,414) et pour l'angle (BIC_{M0} = 6,131 ; BIC_{M1} = 8,616). De même, il n'y a pas d'effet du groupe pour l'apparition du schème pertinent pour la longueur (BIC_{M0} = 8,186 ; BIC_{M1} = 9,119) ou pour l'angle (BIC_{M0} = 6.981, M1 = 9.015).

En revanche, le schème trompeur apparait moins chez les participants du groupe « entrainé » (n = 0) que chez les participants du groupe « autonome » (n = 2), si l'on considère le schème trompeur seul et uniquement pour la longueur (BIC_{M0} = 7,882, BIC_{M1} = 7,192).

Tableau 8 : nombre de participants par modèle statistique pour l'angle et la longueur en fonction du groupe expérimental, des connaissances antérieures et de l'habitude des jeux vidéo

	Résultats pour la longueur				Résultats pour l'angle			
Groupe expérimental	**Modèle nul**	**Schème trompeur**	**Schème pertinent**	**Les deux schèmes**	**Modèle nul**	**Schème trompeur**	**Schème pertinent**	**Les deux schèmes**
autonome	1	2	1	2	3	1	1	1
entrainé	1	0	3	2	3	1	2	0
Connaissances antérieures	**Modèle nul**	**Schème trompeur**	**Schème pertinent**	**Deux schèmes**	**Modèle Nul**	**Schème trompeur**	**Schème pertinent**	**Deux schèmes**
absence	2	0	2	2	3	2	1	0
présence	0	2	2	2	3	0	2	1
Habitude des jeux vidéo	**Modèle Nul**	**Schème trompeur**	**Schème pertinent**	**Deux schèmes**	**Modèle Nul**	**Schème trompeur**	**Schème pertinent**	**Deux schèmes**
JV faible	2	2	1	3	5	0	2	1
JV fort	0	0	3	1	1	2	1	0

Apparition du schème trompeur en fonction des connaissances antérieures

De la même façon, il n'y a pas de différences entre les participants ayant des connaissances antérieures et ceux qui n'en ont pas si l'on considère le schème trompeur, en y incluant les participants ayant les deux schèmes, que ce soit pour l'angle (BIC_{M0} = 6,981 ; BIC_{M1} = 9,015) ou pour la longueur (BIC_{M0} = 8,288 ; BIC_{M1} = 9,414).

En revanche, si l'on considère le schème trompeur seul, on peut conclure que les participants ayant des connaissances antérieures (n = 2) manifestent plus le schème trompeur que les participants qui n'en ont pas (n = 0) pour la longueur (BIC_{M0} = 7,882 ; BIC_{M1} = 7,192). Inversement pour l'angle (BIC_{M0} = 7,882 ; BIC_{M1} = 7,192), les participants ayant des connaissances antérieures manifestent moins souvent le schème trompeur (n = 0) que les participants n'ayant pas de connaissances antérieures (n = 2).

Enfin, concernant l'apparition du schème pertinent, il n'y a pas de différence entre les participants ayant des connaissances antérieures ou pas que l'on compte ou pas les participants ayant utilisé les deux schèmes, que ce soit pour l'angle ou pour la longueur.

Apparition du schème trompeur en fonction de l'habitude des jeux vidéos

Le schème pertinent concernant la longueur apparait de façon différente chez les participants qui ont l'habitude de jouer aux jeux vidéo et chez ceux qui jouent rarement. Cela est vrai lorsque l'on considère que l'évènement « apparition du schème pertinent » n'est réalisé que lorsque le schème pertinent se manifeste seul (BIC_{M0} = 10,830 ; BIC_{M1} = 8,565). Ce résultat est également vrai lorsque l'on considère que l'évènement « apparition du schème pertinent » est réalisé lorsque les deux schèmes se manifestent chez un même participant (BIC_{M0} = 9,264 ; BIC_{M1} = 7,563).

Ainsi, ceux qui jouent aux jeux vidéo régulièrement manifestent plus souvent le schème pertinent pour la longueur (f = 0,75) que ceux qui y jouent rarement (f = 0,25). En revanche, on ne peut pas conclure à une différence concernant l'apparition du schème trompeur pour la longueur (BIC_{M0} = 6,634 ; BIC_{M1} = 7,303).

À l'inverse, le schème pertinent pour l'angle n'apparait pas différemment en fonction des habitudes de jeux vidéo (BIC_{M0} = 6,544 ; BIC_{M1} = 9,029), mais le schème trompeur si. Ainsi, les joueurs réguliers (f = 0,5) manifestent plus souvent le schème trompeur pour l'angle que les joueurs occasionnels (f = 0).

Conclusion

Le schème trompeur apparait plus souvent chez les participants du groupe « autonome » et chez les participants qui ont des connaissances antérieures concernant la physique des poutres pour ce qui est de la longueur. Il aurait donc une double origine : à la fois ontogénétique et didactique. Les résultats indiquent également que le schème pertinent apparait plus souvent chez les joueurs réguliers que chez les joueurs occasionnels en ce qui concerne la longueur.

Pour l'angle en revanche, les résultats sont moins nets, voire inversés. Tout se passe comme si certains participants n'étaient pas capables de traiter à la fois l'angle ou la longueur, ils délaissent alors l'angle. D'autres tentent de régler l'angle une fois pour toute lors du premier étirage, ils sont alors obligés de mettre en œuvre le schème trompeur. En effet, si les participants n'anticipent pas et ne modifient pas le programme par défaut de l'angle dès le premier étirage, l'angle du cadre sera en dehors des tolérances dès le premier étirage pour certains cadres. Cela n'est pas le cas pour la longueur. Dans l'idéal, il faudrait diminuer suffisamment l'angle en premier étirage, et de la même façon pour tous les cadres, pour ensuite ajuster le programme en deuxième passe. De plus, le programme par défaut concernant l'angle est de 46,26° en première passe, et de 0° en deuxième passe. Cela peut laisser penser qu'il ne faut pas changer l'angle en deuxième passe. Tous ces éléments rendent l'angle plus difficile à traiter que la longueur.

Cette partie a permis de répondre à l'hypothèse 2 concernant l'origine des schèmes. Il s'avère donc que l'origine du schème est multiple mais antérieure à l'activité sur le micromonde. Pour savoir s'il sera utile de chercher à inhiber ce schème préexistant, il nous faut maintenant déterminer s'il a un effet sur les performances des participants.

IV.3. Lien entre schème trompeur, groupe expérimental et performances

Afin d'établir le lien entre schèmes et performances, en utilisant les tableaux liant valeurs des mesures prises et valeurs de programmes utilisés (cf. Annexe 7 : tableaux des programmes et mesures de l'étude 2), nous avons d'abord déterminé, quand cela était possible, le schème utilisé pour chacun des huit cadres du scénario 6 pour chaque participant.

Ainsi, en combinant les résultats des analyses statistiques et l'analyse détaillée des programmes et mesures prises, nous avons distingués quatre façons de procéder ou stratégies :

- utilisation du schème pertinent seul (réglage en fonction du résultat du premier étirage) ;
- utilisation du schème trompeur seul (réglage en fonction du ou des cadres étirés antérieurement) ;
- regroupement des cadres par résultat à l'issue du premier étirage ;
- multiplication des étirages de deuxième passe pour arriver petit à petit au résultat désiré (contrôle cognitif de type plus réactif, Hoc & Amalberti, 2007).

En effet, l'étude détaillée des valeurs de mesures prises et des programmes utilisés montre que les participants qui étaient classés dans la catégorie « deux schèmes » sur l'ensemble du scénario 6 (cf. paragraphe 4.1) peuvent présenter deux patterns de comportements différents : soit ils commencent le scénario avec le schème trompeur puis le terminent avec le schème pertinent quand le précédent montre ses limites, soit ils décident de regrouper les cadres en fonction du résultat de la première passe.

Quand un participant met en œuvre le schème trompeur, on voit dans ce tableau (cf. Annexe 8 : exemples d'identification de schèmes) que les valeurs de programme changent dans la direction opposée au résultat obtenu sur un cadre précédent, quelle que soit la valeur obtenue pour ce cadre en première passe. On observe par exemple que, lorsque la mesure prise en première passe augmente mais qu'un cadre étiré précédemment est trop petit, le participant va augmenter la valeur du programme risquant alors de trop étirer le cadre.

En revanche, on observera dans la même situation, chez un participant mettant en œuvre le schème pertinent, que la valeur du programme sera diminuée (Annexe 8 : exemples

d'identification de schèmes). Dans ce cas, les valeurs de programme sont modifiées en fonction de la valeur obtenue en première passe pour le même cadre.

Lorsqu'un changement de schème se produit, on remarque qu'après avoir mis en œuvre des actions qui manifestent la présence du schème trompeur, le participant va obtenir un mauvais résultat, c'est-à-dire un cadre beaucoup trop grand dans le cas décrit ci-avant. On observera alors chez ce participant une rupture dans la façon dont les programmes sont modifiés : par exemple, il augmentera la valeur du programme pour un troisième cadre ayant un résultat de premier étirage plus petit. On observera ensuite d'autres changements de programme cohérents avec la mise en œuvre du schème pertinent.

Chez un participant qui regroupe ses cadres, on remarquera que les cadres ne sont pas étirés dans l'ordre des numéros de cadres présents sur la fiche de poste mais qu'ils sont étirés en faisant se succéder des cadres dont les mesures de premier étirage sont proches. Cette stratégie indique une combinaison entre le schème pertinent et le schème trompeur : le participant prend en considération le résultat de la première passe, cependant il modifie la situation pour pouvoir apprendre du résultat du cadre précédent. Cette stratégie appelée regroupement des cadres leur permet de modifier la situation de test afin de pouvoir appliquer le schème trompeur, mais seulement à un nombre limité de cadres, et ainsi d'éviter des erreurs.

Un des participants a procédé par étirages successifs. Ainsi, en deuxième passe, il a parfois étiré un même cadre jusqu'à dix fois afin de se rapprocher petit à petit de la valeur cible.

Pour chaque cadre, nous avons donc considéré que chacune des stratégies ainsi déterminée était un facteur à deux modalités : présente ou absente. Suite à ce codage, nous n'avons non plus 12 participants mais 96 individus statistiques, correspondant à 8 cadres par participant. Ainsi, à chaque cadre on peut lier une ou plusieurs stratégies, une suite d'actions et plusieurs critères de performances. Afin de déterminer si les stratégies déterminées ici ont un effet sur chaque critère de performance, nous avons utilisé plusieurs méthodes.

Tout d'abord, nous avons réalisé une sélection de modèles par BIC. À chaque fois, on étudie le modèle complet et, afin de déterminer l'apport explicatif de chaque facteur au critère de performance, nous procédons à une analyse de déviance. Ce test nous permet le plus souvent d'éliminer certaines variables. Le modèle complet compte cinquante-quatre

variables, incluant les facteurs individuels et expérimentaux, les stratégies et toutes les actions faites pendant le scénario 6.

Enfin, nous comparons l'effet des variables gardées individuellement ou ensemble aux modèles nuls et complet avec la méthode du BIC : au final, on ne garde que les variables utilisées dans le modèle ayant le plus petit BIC. Si deux BIC sont identiques, on garde le modèle le plus simple.

Nous avons démontré au paragraphe 4.2 que le schème trompeur apparait moins souvent dans le groupe « entrainé ». En effet, les participants de ce groupe reçoivent un entrainement à l'inhibition du schème trompeur. De plus, étant donné qu'ils ont une séance supplémentaire pour se former, ils peuvent avoir eu le temps de développer des règles dans le micromonde. Nous avons donc voulu étudier plus spécifiquement l'interaction entre performances, schème et groupe expérimental.

Pour ce faire, nous avons finalement comparé les modèles nul et complet décrits au paragraphe précédent à un modèle stipulant une interaction entre le groupe et chaque stratégie utilisée. Lorsque l'un de ces modèles, indiquant un effet combiné de la stratégie et du groupe, avait un BIC inférieur au modèle nul, nous avons alors étudié dans le détail le lien entre groupe, stratégie et performances.

Résultats liés à l'angle

L'angle comme motif de rebut

Les résultats de cette analyse montrent un effet de la stratégie réactive seule (BIC_{M0} = 128,1147 ; BIC_{M1} = 126,4971).

Ainsi les cadres étirés de façon réactive, ou petit à petit, sont moins souvent rebutés à cause de l'angle. Cependant, il est à noter qu'un seul individu, du groupe « autonome » utilise cette méthode. De plus, le participant a jeté un de ses cadres à l'issue de la première passe, il n'est donc pas comptabilisé dans l'analyse.

Au final, les sept cadres étirés avec cette stratégie sont réussis en ce qui concerne l'angle, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas rebutés à cause de l'angle (cf. Figure 10).

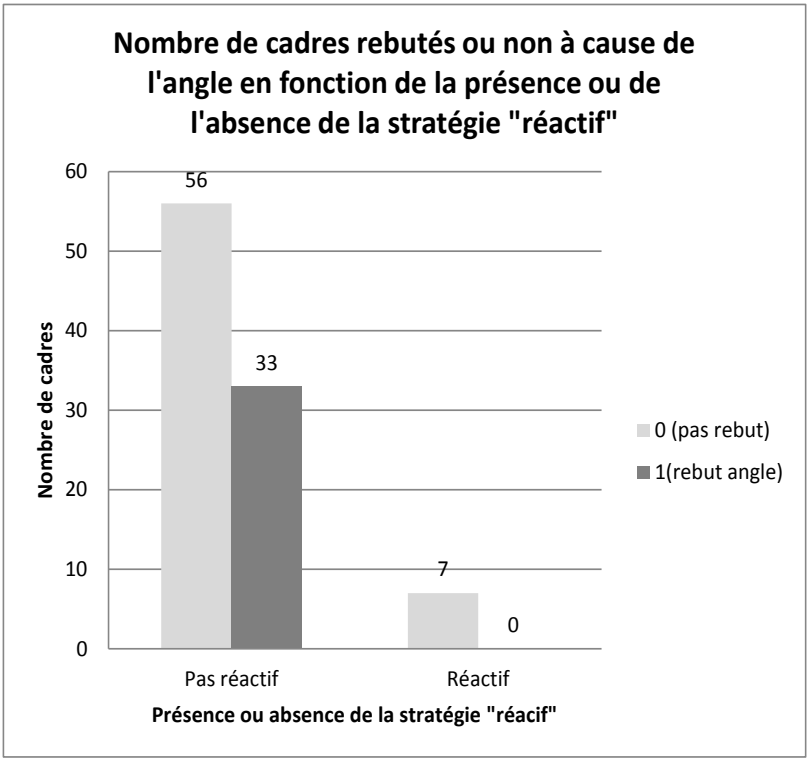


Figure 10 : nombre de cadres rebutés ou non à cause de l'angle en fonction de la présence ou de l'absence de la stratégie "réactif"

Distance à l'angle cible

Les modèles ne conservant que les stratégies une à une et l'interaction entre chaque stratégie et le schème ne donnent pas de plus petits BIC que le modèle complet. Ainsi, pour ce qui est de la distance à l'angle cible, nous ne gardons aucune stratégie seule.

Résultats liés à la longueur

La longueur comme motif de rebut

L'analyse des facteurs par BIC ne garde que le modèle de l'interaction entre le groupe et le schème trompeur pour la longueur (BIC_{M0} = 128,115, BIC_{M1} = 126,6422).

Afin de mieux comprendre comment le groupe et le schème trompeur interagissent, nous avons procédé à une analyse inductive. En partant du postulat que le rebut du cadre suit une loi binomiale, différents modèles ont été testés en utilisant à nouveau le critère du BIC. Chaque modèle consiste en un set d'hypothèses sur la probabilité d'apparition de l'évènement « rebut du cadre » pour chaque combinaison entre l'effet du groupe expérimental et la mobilisation du schème dangereux (cf. Tableau 10). Le modèle

Tableau 9 : distribution du nombre de cadres rebutés ou non pour la longueur par groupe expérimental en fonction de la présence ou de l'absence du schème trompeur

	Absence du schème trompeur		Présence du schème trompeur	
	groupe autonome	**entrainé**	**autonome**	**entrainé**
Non rebutés	10	31	16	6
Rebutés	11	4	11	7

Tableau 10: liste des modèles testés et BIC associés

Nom du modèle	Hypothèse (mathématique)	Nombre de paramètres	Hypothèse (expression littérale)	BIC
M_0	$\pi_{1=}\ \pi_{2=}\ \pi_{3=}\ \pi_{4=}\ \pi$	1	Modèle nul : aucun paramètre n'a d'effet	33.174
M_1	$\pi_{1\neq}\ \pi_{2\neq}\ \pi_{3\neq}\ \pi_4$	4	Modèle complet : tous les paramètres ont un effet	31.701
M_2	$\pi_{12=}\ \pi_{12\neq}\ \pi_{34=}\ \pi_{34}$	2	Effet du schème trompeur seul	34.324
M_3	$\pi_{13=}\ \pi_{13\neq}\ \pi_{24=}\pi_{24}$	2	Effet du groupe seul	32.070
M_4	$\pi_{13=}\ \pi_{13\neq}\ \pi_{2\neq}\pi_4$	3	Effet du schème uniquement pour le groupe entrainé	27.782*
M_5	$\pi_{1\neq}\ \pi_{3\neq}\ \pi_{24\ =}\ \pi_{24}$	3	Effet du schème pour le groupe autonome	35.989

Note : $\pi_{1=}$ probabilité de voir le cadre rebuté chez les participants du groupe « autonome » n'ayant pas le schème trompeur, $\pi_{2=}$ probabilité de voir le cadre rebuté chez les participants du groupe « entrainé » n'ayant pas le schème trompeur, $\pi_{3=}$ probabilité de voir le cadre rebuté chez les participants du groupe « autonome » ayant le schème trompeur, $\pi_{4=}$ probabilité de voir le cadre rebuté chez les participants du groupe « entrainé » ayant le schème trompeur

* : modèle gardé.

sélectionné considère un effet du schème trompeur uniquement chez les participants du groupe « entrainé ». Ainsi, on observe que le schème trompeur altère la performance uniquement chez les participants du groupe « entrainé » (cf. Tableau 9).

En effet, en absence du schème trompeur, dans le groupé « entrainé » seuls 4 cadres sur 35 sont rebutés à cause de la longueur, alors que, en présence du schème trompeur, 7 cadres sur 13 sont rebutés à cause de ce motif.

Distance à la longueur cible

L'analyse des BIC pour le critère de performance distance à la longueur cible, garde l'interaction entre le schème trompeur et le groupe (BIC_{M0} = -409,734 ; BIC_{M1} = -423,750). Les résultats montrent qu'en l'absence du schème trompeur, les participants du groupe « entrainé » sont proches de la valeur cible. Ils sont donc très précis. Par contre, ils sont plus éloignés de la valeur cible lorsque le schème trompeur et présent.

Inversement, les participants du groupe « autonome » sont plus proches de la valeur cible, donc plus précis, quand le schème trompeur est présent (cf. Figure 11) sans pour autant rattraper les participants du groupe « entrainé » qui n'utilisent pas le schème trompeur.

Résultats concernant la réussite du cadre

Pour ce qui est de l'analyse des résultats concernant le critère réussite du cadre, le meilleur modèle indique un effet de l'interaction entre le schème trompeur et le groupe expérimental (BIC_{M0} = 128,1147 ; BIC_{M1} = 126,3777).

Afin de mieux comprendre comment le groupe et le schème trompeur interagissent, nous avons procédé à une analyse inductive. En partant du postulat que le rebut du cadre suit une loi binomiale, différents modèles ont été testés en utilisant à nouveau le critère du BIC.

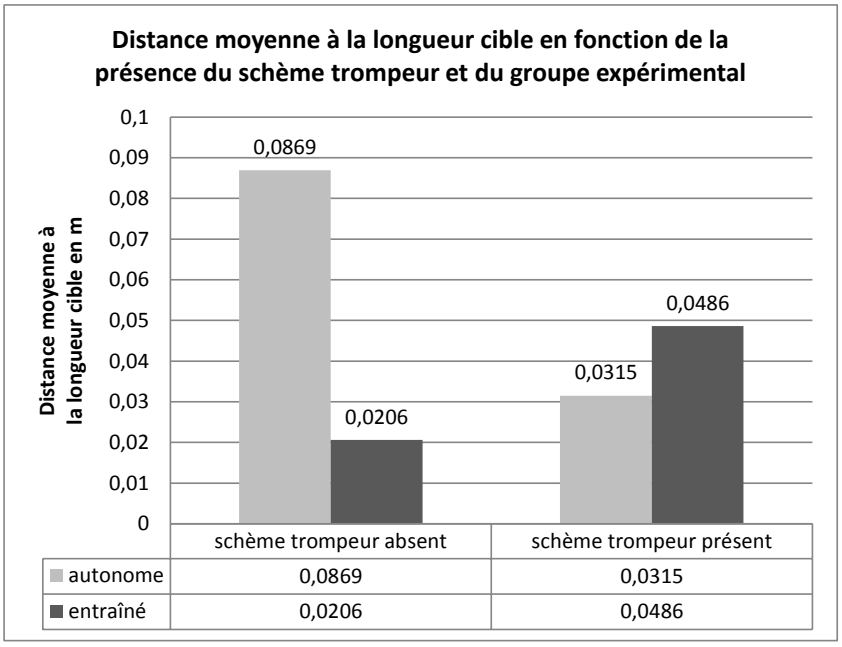


Figure 11 : distance moyenne à la longueur cible en fonction de la présence du schème trompeur et du groupe expérimental

Chaque modèle consiste en un set d'hypothèses sur la probabilité d'apparition de l'évènement « rebut du cadre » pour chaque combinaison entre l'effet du groupe expérimental et la mobilisation du schème dangereux (cf. Tableau 12). Ainsi, on observe que le schème trompeur altère la performance uniquement chez les participants du groupe « entrainé » (cf. Tableau 11). En effet, en absence du schème trompeur, 20 cadres sont réussis sur 35 alors qu'en sa présence, seul 1 cadre sur 12 est réussi.

En conclusion, pour ce critère à nouveau, on retrouve un effet du schème trompeur qui altère la performance uniquement chez les participants du groupe entrainé. Cependant, les autres stratégies et le schème pertinent en particulier, n'ont pas d'effet.

Conclusion

Pour ce qui est de l'angle en tant que motif de rebut, seule la stratégie consistant à étirer le cadre petit à petit en deuxième passe semble fonctionner. Cependant, le seul participant utilisant ce modèle ne modifie pas du tout l'enroulement en deuxième passe : ainsi, le modèle associé serait plutôt le modèle nul.

La présence du schème trompeur semble pénaliser les participants du groupe « entrainé » et favoriser les participants du groupe « autonome » pour ce qui est de leur précision pour le critère de réussite longueur.

Tableau 11 : distribution du nombre de cadres réussis par groupe expérimental en fonction de la présence ou de l'absence du schème trompeur

	Absence du schème trompeur		Présence du schème trompeur	
	groupe autonome	**entrainé**	**autonome**	**entrainé**
Cadres rebutés	17	15	19	12
Cadres réussis	4	20	8	1

Tableau 12 : liste des modèles testés et BIC associés

Nom du modèle	Hypothèse (mathématique)	Nombre de paramètres	Hypothèse (expression littérale)	BIC
M_0	$\pi_{1=}\ \pi_{2=}\ \pi_{3=}\ \pi_{4=}\ \pi$	1	Modèle nul : aucun paramètre n'a d'effet	32,562
M_1	$\pi_{1\neq}\ \pi_{2\neq}\ \pi_{3\neq}\ \pi_4$	4	Modèle complet : tous les paramètres ont un effet	30,825
M_2	$\pi_{12=}\ \pi_{12\neq}\ \pi_{34=}\ \pi_{34}$	2	Effet du schème trompeur seul	33,35
M_3	$\pi_{13=}\ \pi_{13\neq}\ \pi_{24=}\pi_{24}$	2	Effet du groupe seul	32,715
M_4 [a]	$\pi_{13=}\ \pi_{13\neq}\ \pi_{2\neq}\pi_4$	3	Effet du schème uniquement pour le groupe entrainé	26,979
M_5	$\pi_{1\neq}\ \pi_{3\neq}\ \pi_{24\ =}\ \pi_{24}$	3	Effet du schème pour le groupe autonome	37,196

Note : $\pi_{1=}$ probabilité de voir le cadre réussi chez les participants du groupe « autonome » n'ayant pas le schème trompeur, $\pi_{2=}$ probabilité de voir le cadre réussi chez les participants du groupe « entrainé » n'ayant pas le schème trompeur, $\pi_{3=}$ probabilité de voir le cadre réussi chez les participants du groupe « autonome » ayant le schème trompeur, $\pi_{4=}$ probabilité de voir le cadre réussi chez les participants du groupe « entrainé » ayant le schème trompeur
M_x [a] : modèle gardé.

De même, le schème trompeur, plutôt que le schème pertinent, va modifier les résultats, mais uniquement pour le groupe « entrainé ». Ainsi, sa présence diminue le nombre de cadres réussis pour le critère longueur et diminue le nombre de cadres réussis tous critères confondus chez les participants du groupe « entrainé ».

V. DISCUSSION

V.1. Existence du schème trompeur

On détecte bien le schème trompeur chez les participants de l'étude à la fois dans leurs réponses à l'exercice d'explicitation concernant la tâche et dans leur activité dans le micromonde. Cependant, un participant peut avoir mis en œuvre le schème pertinent dans le micromonde et répondre en faisant référence au schème trompeur dans le questionnaire.

Ainsi, certains individus capables d'inhiber le schème trompeur en acte n'ont pas pu l'inhiber dans des réponses pièges. Ces résultats ne sont pas sans rappeler les résultats obtenus avec des enfants dans l'épreuve classique de quantification d'inclusion (Piaget & Inhelder, 1966) et dans ces versions modifiées (Bideaud & Houdé, 1989). Notamment, dans une de ces épreuves modifiées (Bideaud & Lautrey, 1983), des enfants capables de répondre correctement à la question : « Y a-t-il plus de marguerite ou plus de fleurs ? » alors qu'on leur montre dix roses et deux marguerites, ne le sont plus lorsqu'on leur cache le problème avec un écran. Ici, les participants sont capables de résoudre le problème en mettant en œuvre le schème pertinent en situation, mais échoue lorsqu'ils ne le voient plus. Le schème trompeur n'a donc pas disparu même chez les participants qui ne le mettent pas en œuvre, ce qui montre une résistance importante de ce schème.

V.2. Origine du schème trompeur

Les participants du groupe « entrainé » présentent moins souvent le schème trompeur, et, s'ils le présentent, il n'apparait pas seul. Il n'empêche que certains participants mobilisent toujours le schème trompeur, il n'a donc pas totalement disparu. Ainsi, l'entrainement proposé n'est pas suffisant pour totalement faire disparaitre le schème trompeur. On peut en déduire que chez ces participants, ce schème est particulièrement saillant et résistant. De

la même façon, il doit être suffisamment automatisé pour résister à une formation simple. En effet, il semble qu'une formation simple ne fait pas disparaitre des réponses automatiques dans des situations d'urgence, qui sont, comme notre situation expérimentale, couteuses cognitivement (Mollenhauer, Dingus, Carney, Hankey, & Jahns, 1997). De plus, certains participants commencent par utiliser le schème trompeur pour ensuite mettre en œuvre le schème pertinent lorsque le premier montre ces limites. Des résultats similaires montrent que le jugement subjectif d'incertitude des individus guide leurs comportements de surveillances et de contrôle dans le but de diminuer cette incertitude (Osman, 2010). On peut donc en déduire que, pour ces participants en tout cas, le schème trompeur est moins couteux à mettre en œuvre et suffit, dans certaines situations, à obtenir des résultats satisfaisants (Amalberti, 2001).

Enfin, certains participants du groupe « autonome », sans avoir bénéficié de la formation préconisant l'utilisation du schème pertinent, mettent en œuvre le schème pertinent, alors que d'autres mettent en œuvre le schème trompeur, ce qui signifie que le micromonde seul ne suffit pas à expliquer l'apparition du schème trompeur. En effet, certains participants arrivent d'eux même à comprendre qu'il n'est pas efficace. Cela signifie également que l'entrainement proposé n'est pas utile à certains participants qui parviennent d'eux même à mettre en œuvre le schème pertinent. En résumé, si le micromonde permet d'observer des manifestations du schème trompeur, celui-ci ne semble pas s'être construit dans le micromonde. Il s'agirait plutôt d'un schème exogène utilisé par certains participants dans ce contexte inapproprié. Il faut donc chercher pourquoi les participants qui mettent en œuvre le schème pertinent sont capables d'inhiber le schème trompeur ou de ne pas l'activer.

Les participants ayant des connaissances antérieures présentent plus souvent le schème trompeur concernant la longueur mais moins souvent concernant l'angle. Pour autant, ils ne mettent pas plus souvent en œuvre le schème pertinent pour l'angle. En revanche, de façon générale, le « modèle nul » est souvent apparu pour l'angle, ce qui semble indiquer que ce paramètre est plus souvent mis de côté. De plus, cette formation aux lois physiques n'est pas suffisante pour permettre aux participants du groupe autonome d'inhiber le schème trompeur en faveur du schème pertinent. Ce résultat laisse également entendre que leur formation initiale contient peut-être un biais didactique favorisant l'apparition du schème trompeur. En effet, certains éléments sont parfois enseignés de façon simplifiée dans le

cadre académique. L'objectif étant d'adapter le contenu au niveau actuel des élèves et de leurs besoins. Cependant, de tels enseignements peuvent ensuite se transformer en obstacles lorsque la notion est étendue, approfondie dans les classes supérieures ou confrontée au réel (Brousseau, 1998).

D'autre part, les joueurs réguliers manifestent plus souvent le schème pertinent, ce qui traduit une influence bénéfique de l'habitude de jeu dans cet environnement. Cela peut s'expliquer par le fait que les joueurs réguliers ont l'habitude de traiter les environnements en trois dimensions et de s'y déplacer. Ils n'ont donc pas besoin d'allouer beaucoup de ressources cognitives à ces traitements et peuvent, de ce fait, les allouer à la tâche. De plus, il semblerait que la pratique régulière des jeux vidéo ait un effet sur certaines capacités cognitives telles que l'attention visuelle (Green & Bavelier, 2003), la mémoire ou le contrôle exécutif (Boot, Kramer, Simons, Fabiani, & Gratton, 2008), ce qui pourrait, en partie, expliquer l'utilisation plus fréquente du schème pertinent par les joueurs réguliers. Pour autant, cet avantage n'est pas suffisant pour leur permettre de traiter de la même façon les différentes dimensions. En effet, les joueurs mettent aussi plus souvent en œuvre le schème trompeur concernant l'angle. Ils sont donc capables d'inhiber le schème trompeur pour ce qui est de la longueur, mais pas pour l'angle. Ils ont donc peut-être choisi d'allouer plus de ressources cognitives au traitement des informations relatives à la longueur, au détriment de l'angle. Cela serait cohérent avec le fait que le schème trompeur semble moins couteux à mettre en œuvre que le schème pertinent.

Ainsi, le schème trompeur semble préexister au micromonde et être construit lors d'activités antérieures. En effet, les participants peuvent mettre en œuvre un schème valable dans d'autres situations qui consiste à traiter de façon équivalente deux objets qui ont des caractéristiques communes. Une telle façon de faire a été identifiée comme une règle intuitive par Tirosh et Stavy (1999) qui montrent que des erreurs commises par des élèves dans une grande variété de situation peuvent correspondre à un même type de raisonnement : si deux objets ont une dimension commune, alors la seconde dimension doit être identique. C'est le cas par exemple dans les erreurs liées à l'estimation de la quantité en fonction de la longueur d'un objet au détriment de sa largeur, de la quantité de liquide en fonction de la hauteur d'un verre au détriment de sa largeur, de l'estimation du ratio surface/volume d'un cube en fonction de la largeur et non d'un calcul, etc. Dans le cadre de

notre micromonde, le schème trompeur est, de plus, facile à mettre en œuvre, ce qui favorise son apparition. Il sera donc important pour nous, dans le cadre du compagnon virtuel, de rendre l'utilisation du schème pertinent moins couteuse dans le but de limiter l'utilisation du schème trompeur. En effet, il sera difficile de déconstruire le schème trompeur, son inhibition ne sera possible qu'en proposant une alternative facilement mise en œuvre.

Cette remédiation sera d'autant plus nécessaire que nous avons pu démontrer que les schèmes ainsi définis ont un effet sur les performances.

V.3. Lien entre schème trompeur et performances

Les résultats concernant l'angle vont dans le sens des hypothèses énoncées en début de chapitre : le schème trompeur semble pénaliser la performance, en tout cas la précision (distance à l'angle cible). Cependant, les critères liés à l'angle sont difficiles à analyser car le modèle « nul » apparait souvent pour l'angle (cf. Tableau 8). Ainsi, certains participants semblent tout simplement laisser ce critère de côté. On peut, au vu de cet élément, émettre l'hypothèse que les participants réalisent un compromis : la tâche étant trop couteuse cognitivement parlant, ils choisissent d'abandonner un des critères de performances. Cela est cohérent avec la théorie du compromis cognitif (Hoc & Amalberti, 2007).

De même, la présence du schème trompeur concernant la longueur diminue les performances pour ce critère. La présence du schème pertinent concernant l'angle semble également altérer la performance concernant la longueur. Tout se passe comme si, les participants ne pouvaient traiter en même temps les deux paramètres : ils choisissent en général d'allouer leurs ressources cognitives à la longueur. Cela peut se traduire par l'utilisation du schème trompeur concernant l'angle pour les participants mettant en œuvre le schème pertinent pour la longueur ou par un total abandon de la dimension « angle ». Dans ce dernier cas, les programmes concernant l'angle ne sont le plus souvent pas changés.

Enfin, nous retrouvons également le fait que le schème trompeur altère la réussite générale du cadre.

V.4. Groupe expérimental, schème trompeur et performances

Nous avons également pu déterminer que le schème trompeur pouvait altérer les performances et ce en particulier dans le groupe « entrainé ». Cela pourrait paraitre paradoxal, mais on peut l'expliquer de deux façons. Tout d'abord, le groupe « autonome » réussi mal dans le micromonde. Pour lui, l'utilisation du schème trompeur ne peut donc pas altérer ses performances plus qu'elles ne le sont déjà. Ensuite, le groupe « entrainé » réussit globalement mieux que le groupe « autonome », toute erreur diminue donc drastiquement ses performances.

En premier lieu, tout se passe comme si le groupe « autonome » ne pouvait pas profiter du schème pertinent même lorsqu'il est mis en œuvre. En effet, ils n'ont pas eu le temps de créer des règles au sens de Rasmussen (1983) liant les mesures observées à un paramètre d'étirage précis, contrairement aux participants du groupe « entrainé ». Ces derniers ont eu le temps, grâce à la séance supplémentaire, de tester les résultats de différents paramètres d'étirage sur différents types de cadres. Or les compétences peuvent se développer par l'entrainement et l'activité même dans un environnement complexe (Rogalski, 2004). En l'absence de règles précises, il est plus avantageux de mettre en place une stratégie intermédiaire qui consiste à regrouper les cadres en fonction du résultat de la première passe. Ils peuvent ainsi tester la réaction des premiers cadres et subséquemment améliorer leurs résultats. Cependant, les premiers cadres étirés risquent d'être perdus, ce qui ne permet pas l'obtention de bons résultats. En effet, si le premier cadre est trop grand et qu'il sert d'étalonnage, il sera alors étiré avec les paramètres d'étirage par défaut. Il est alors fort probable qu'il se retrouve en dehors des tolérances à l'issue du second étirage.

En parallèle, les participants du groupe « entrainé » qui mettent en œuvre le schème trompeur ne peuvent pas réussir non plus car, s'ils ont à leur disposition des règles liant une valeur mesurée à un paramètre de programme, ils n'utilisent pas le bon paramètre d'ajustement. En effet, le schème trompeur les pousse à ajuster le programme en fonction du dernier cadre en deuxième passe, et non en fonction du même cadre en première passe. Cependant, cela ne fonctionne pas dans le scénario 6, car il faudrait que tous les cadres soient identiques et que le premier cadre ne soit pas en dehors des tolérances à l'issue du

deuxième étirage. En effet, lorsqu'ils utilisent cette stratégie, les participants ne changent pas le programme par défaut pour le premier cadre.

En conclusion, afin de réussir dans le micromonde, le participant doit à la fois posséder des règles efficaces et le schème pertinent. Posséder une représentation symbolique idoine de la situation ne permettra pas à elle seule d'ajuster l'activité de la meilleure façon. Inversement, posséder des règles d'ajustement ne suffira pas si la représentation symbolique, en particulier les inférences du schème d'action, est erronée.

V.5. Conclusion

Le compagnon virtuel doit donc soit conduire à l'inhibition du schème trompeur (Houdé, 2014), soit favoriser l'activation du schème pertinent (Pascual-Leone, 1995). Le compagnon pourra, par exemple, viser à véhiculer une représentation symbolique correcte, inspirée du schème pertinent, c'est-à-dire cadre par cadre.

Cependant, le compagnon virtuel doit également favoriser le développement des règles permettant la mise en œuvre efficace du schème pertinent. Pour ce faire, les essais-erreurs permis par la simulation dans le compagnon virtuel semblent être un bon atout (Pastré et al., 2009).

ÉTUDE 3 : RELATION ENTRE UTILISATION D'UN COMPAGNON VIRTUEL, APPARITION DES SCHÈMES ET PERFORMANCES DANS LE MICROMONDE

I. INTRODUCTION

Lors de l'étude présentée au chapitre précédent, nous avons démontré qu'un schème trompeur, liant directement les cadres précédents au cadre en cours, peut apparaitre dans le micromonde et altérer les performances chez les sujets entrainés. Ce schème trompeur apparait également chez les participants autonomes. Cependant, leur manque d'entrainement les empêche d'obtenir de bons résultats quel que soit le schème mobilisé.

Une interface écologique, en présentant la situation de travail de façon complète et efficace (Bennet et Flach, 2011), devrait favoriser l'apparition du schème pertinent et, ainsi, diminuer celle du schème trompeur.

En effet, les interfaces écologiques peuvent favoriser le développement des compétences car elles transmettent des feedbacks utiles à l'utilisateur (Jamieson & Vicente, 2001). Cependant, il faut que l'utilisateur soit motivé à apprendre et à réaliser la tâche en profondeur, c'est-à-dire qu'il doit réfléchir activement à ces feedbacks (Christoffersen et al., 1996 ; Christoffersen, Hunter, & Vicente, 1998). Il développe ainsi ses aptitudes mais également ses connaissances.

De plus, la simulation permet 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 erreurs sans craindre d'altérer ses performances, l'opérateur devrait avoir des occasions supplémentaires de s'entrainer (Pastré et al., 2009), à condition de mettre en œuvre une pratique réflexive : il doit chercher à comprendre les causes de ses erreurs, un débriefing à l'issue d'un exercice est souvent nécessaire.

En effet, une pratique réflexive est nécessaire comme l'est une pratique délibérée dans le cas du développement de l'expertise. L'expertise ne se développe pas seulement en pratiquant de façon répétée les mêmes exercices (Farrington-Darby & Wilson, 2006). La durée d'entrainement est en général moins importante que la façon dont l'entrainement est pratiqué. Il s'agit alors de produire un effort prolongé, motivé et contraint (Ericsson, Krampe, & Tesch-Römer, 1993). Cet effort bénéficie de l'encadrement d'un enseignant ou d'un tuteur, il n'est pas forcément plaisant ni perçu comme directement valable pour améliorer les performances (Shea & Paull, 1996). L'objectif est de réaliser des tâches que l'on sait en dehors de son champ de compétences actuel afin d'en acquérir de nouvelles ou de corriger certaines faiblesses (Ericsson et al., 2006). Ainsi, dans le cadre de la simulation, les tâches proposées devront, pour améliorer les compétences de l'utilisateur, se situer légèrement en dehors de son champ de compétences. L'instructeur devra aider l'élève à développer ses compétences en revenant sur les éléments pertinents et les erreurs qui se sont manifestées lors de l'exercice de simulation (Pastré, 2005).

Le compagnon virtuel, hybride entre interface d'aide à la prise de décision et simulateur, doit permettre d'améliorer les compétences des participants sur le micromonde. Ce compagnon virtuel est présenté ici, ainsi que les résultats obtenus lors de son utilisation. En particulier, les objectifs de cette étude sont de déterminer l'effet du compagnon virtuel sur l'utilisation du schème trompeur et de récolter des éléments exploratoires sur la façon dont les participants utilisent le compagnon virtuel.

II. MÉTHODE

Contrairement à ce qui se fait traditionnellement dans les études sur les interfaces écologiques, notre interface n'est pas comparée à d'autres interfaces dites traditionnelles, c'est-à-dire qui ne représentent que les niveaux les plus bas de la hiérarchie d'abstraction

(Vicente, 2002). Dans cette étude, l'activité des participants ayant utilisé le compagnon virtuel est comparée à l'activité de participants n'ayant utilisé aucun type d'interface, c'est-à-dire à celles des participants à l'étude 2.

II.1. Participants

Les participants à cette étude sont onze étudiants et actifs recrutés par les listes de diffusion de l'École Centrale de Nantes et du laboratoire I3S (Laboratoire d'Informatique, Signaux et Systèmes de Sophia Antipolis) de l'Université de Nice Sophia Antipolis. Ils avaient entre 20 et 40 ans (m = 25,82 ; SD = 5,04).[6] Ces participants seront comparés aux participants de l'étude 2 (m = 26,92 ; SD = 4,08), soit un total de vingt-trois participants (m = 26,39 ; SD = 4,49).

De fait, dans la section résultats, nous considérerons trois groupes : les groupes « autonome » et « entrainés » qui sont issus de l'étude 2, et le groupe « Compagnon Virtuel » (ou « CV ») qui est constitué des participants ayant eu accès et ayant utilisé le compagnon virtuel. Les participants ayant eu accès au compagnon virtuel lors de cette troisième étude mais ne l'ayant pas utilisé sont exclus des analyses statistiques. Ils constituent le groupe « exclus » lorsqu'ils sont évoqués, notamment lors de la partie des résultats intitulée « étude clinique des conduites » (page 135).

La répartition des participants dans les groupes en fonction de leurs connaissances antérieures et de leurs habitudes de jeux vidéo est présentée dans le Tableau 13.

Tableau 13 : distribution des participants de chaque groupe en fonction de leurs connaissances antérieures sur la mécanique des poutres et de leurs habitudes de jeux vidéo

Connaissances antérieures	**Absence de connaissances antérieures**					**Total absence de connaissances antérieures**	**Présence de connaissances antérieures**					**Total présence de connaissances antérieures**	**Total général**
Habitude de jeu	**Jamais**	**Annuelle**	**Mensuelle**	**Hebdomadaire**	**Quotidienne**		**Jamais**	**Annuelle**	**Mensuelle**	**Hebdomadaire**	**Quotidienne**		
Autonome	1	1			1	**3**	2	1				**3**	**6**
Entrainé		2			1	**3**	1			1	1	**3**	**6**
Exclu*		1			1	**2**		1				**1**	**3**
CV		2	1	1	1	**5**		1		1	1	**3**	**8**
Total général	**1**	**6**	**1**	**1**	**4**	**13**	**3**	**3**	**0**	**2**	**2**	**10**	**23**

** Les participants de l'étude 3 à qui l'on a présenté le compagnon virtuel mais qui ne l'ont pas utilisé sont exclus des analyses statistiques mais leur activité sera présentée dans la partie résultats.*

[6] Quatre autres participants ont arrêté l'expérience en raison du mal des simulateurs. Ils ne sont pas comptabilisés ici.

II.2. Le compagnon virtuel

L'étude se déroule sur le micromonde présenté lors de l'étude 2 (paragraphe II.2, page 82), sur un écran de même taille. L'unique différence est l'implémentation, dans le micromonde, d'un compagnon virtuel devant aider le participant à régler la machine d'étirage.

Le compagnon virtuel a été conçu en suivant en parti les principes de conception écologique à l'exception de deux points : il ne représente qu'une partie du processus d'étirage et il ne permet pas d'agir directement sur le processus d'étirage.

Dans le compagnon virtuel présent dans le micromonde, la géométrie des pièces, c'est-à-dire la rectitude et la planéité, n'est pas réellement un élément dynamique : elle n'évolue qu'en fonction des outils utilisés. Dans l'atelier réel, les outils sont également le principal élément affectant ces dimensions. Il suffit de connaitre les dimensions des outils et la géométrie du cadre, avant une phase d'étirage, afin d'obtenir le résultat concernant la rectitude et la planéité à l'issue de cette phase d'étirage. En revanche, le retour élastique évolue au court du temps après la trempe indépendamment des actions de l'opérateur ou du participant du micromonde. Les éléments en lien avec ce retour élastique constituent donc les véritables éléments dynamiques de l'activité représentée dans le micromonde.

De plus, le micromonde est construit de façon à ce que le schème trompeur n'affecte pas la géométrie de la pièce, comme nous l'avons présenté dans le chapitre concernant l'étude 2 (II.2, p. 82). En effet, la rectitude et la planéité ne sont affectées que par un oubli ou une erreur dans les outils, chenilles ou cales. Les participants, sur le micromonde, ne peuvent pas choisir de chenilles alternatives ou adapter les chenilles à la largeur des cadres. L'objectif est, ici, de tester l'effet de ce compagnon virtuel sur le schème trompeur. De ce fait, le compagnon virtuel testé dans le micromonde ne présente que le lien entre les paramètres d'étirage, le retour élastique et les résultats attendus concernant l'allongement et l'angle du cadre final. Il n'est donc pas exhaustif comme le voudrait le cadre des interfaces écologiques (Bennett & Flach, 2011).

En revanche, le compagnon virtuel qui sera développé pour l'atelier réel représentera les différents éléments relevés lors de l'analyse de l'activité de l'étude 1 et en particulier la hiérarchie d'abstraction (Figure 4) : à la fois les informations concernant le retour élastique,

les contraintes internes (pas implémentées dans le micromonde) et celles concernant la géométrie.

De la même façon, alors que le cadre théorique de conception d'interface stipule que l'opérateur doit pouvoir agir sur le système directement à travers l'interface de contrôle, ici le compagnon virtuel ne fait que simuler le processus mais ne permet pas de contrôler 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 du fabricant. De plus, nous voulions travailler en particulier sur les possibilités offertes par la simulation, ce qui n'est pas forcément compatible avec le contrôle direct de la machine.

Cependant, le compagnon virtuel satisfait aux autres critères d'une interface écologique. Tout d'abord, il a été conçu en prenant en compte les informations concernant le retour élastique issues de l'analyse de l'activité réalisée dans le monde réel (étude 1 paragraphe II.2, page 57). S'il est difficile de représenter les informations récoltées lors de ces phases dans une interface (Upton & Doherty, 2008), les contraintes agissant sur le système, l'état actuel et les possibilités d'action doivent ressortir.

Nous avons donc représenté dans le compagnon virtuel tous les éléments concernant le retour élastique en les reliant les uns aux autres par l'intermédiaire d'un schéma classiquement utilisé pour l'enseignement de cette notion et sa représentation en physique des matériaux. Ce schéma est reproduit pour les deux éléments qu'il affecte, la longueur et l'angle, et lors des deux étapes d'étirage (cf. Figure 12).

Il a pour but de rendre visibles les contraintes existant sur le système. De plus, les participants peuvent directement manipuler ce schéma en jouant avec des curseurs représentant les éléments de la machine d'étirage et évaluer le résultat. 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.

L'interface du compagnon virtuel intervient aux différents niveaux de la taxonomie SRK (Rasmussen, 1983). Des couleurs, tenant lieu de signaux, permettent aux participants d'identifier immédiatement un problème avec les paramètres choisis : le rouge est en effet, traditionnellement associé au danger ou à l'interdit dans notre société alors que le vert est lié à ce qui est permis ou ce qui va bien, enfin, l'orange est lui un intermédiaire qui permet également d'attirer l'attention. Le participant peut également fonctionner au niveau des comportements guidés par des connaissances car des symboles numériques sont utilisés pour permettre des calculs. Par la pratique et l'entrainement, les compétences devraient se développer : plus le participant manipulera ces symboles, plus il pourra les transformer en

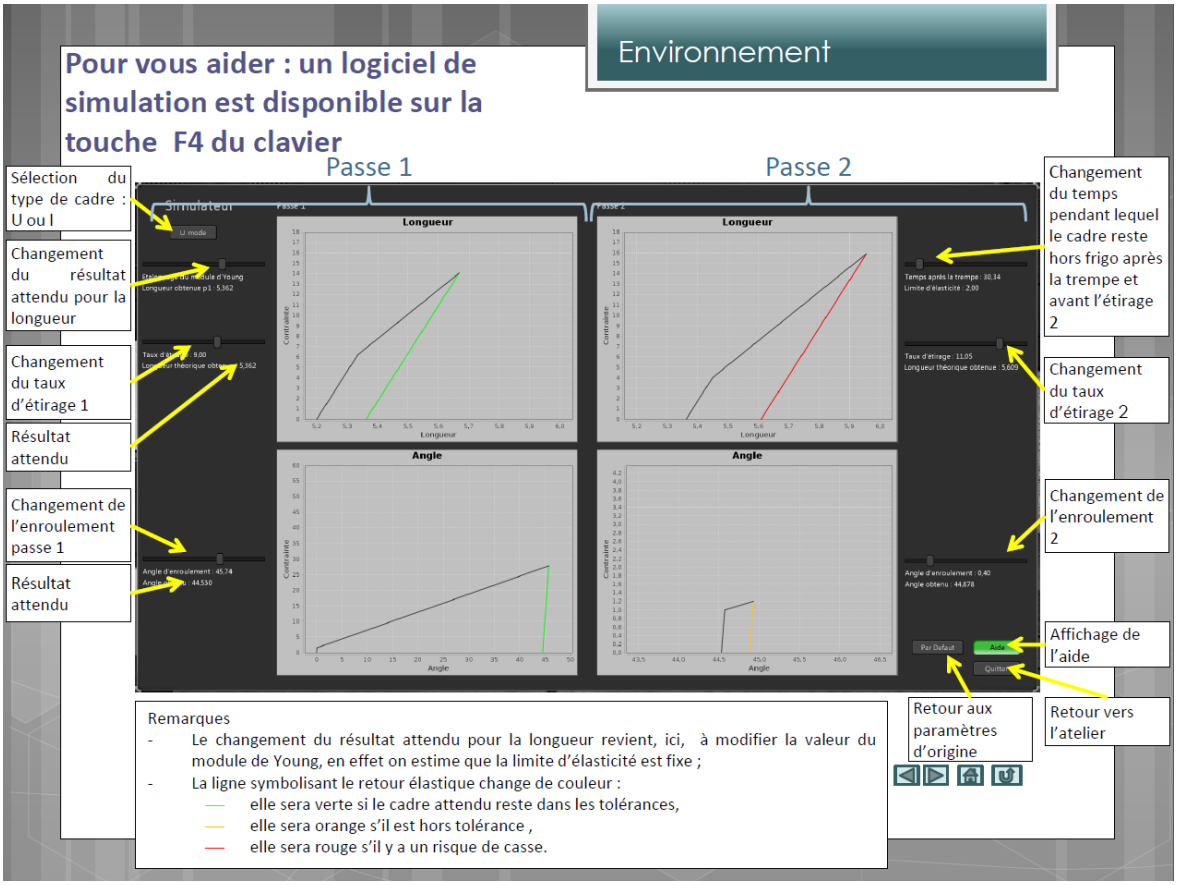


Figure 12 : compagnon virtuel, présentation faite aux participants présente dans l'aide du compagnon virtuel

signes et ainsi travailler au niveau des règles. En effet, l'utilisation de symboles comme base au comportement, est fréquente lors du traitement de problèmes nouveaux, de situations inédites, donc lors d'apprentissages. Au contraire, dans des 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, 2015; Rasmussen, 1983).

Enfin, l'interface, telle qu'elle est conçue, devra également permettre de limiter les risques d'évocation du schème trompeur : en effet, elle représente un seul cadre à différent moment de son étirage, ce qui indique au participant que les critères d'adaptation se font cadre par cadre. Nous aurions pu présenter plusieurs cadres simultanément ou présenter les résultats obtenus sur un dernier cadre, ou uniquement le résultat final, afin de renforcer l'utilisation du schème trompeur en laissant à penser que les cadres sont liés entre eux par des propriétés communes.

Dans le compagnon virtuel, le participant peut choisir le type de cadre (U ou I), étalonner le module de Young à partir du résultat du premier étirage, changer les valeurs d'allongement et d'enroulement du programme pour la première passe et pour la deuxième passe. Il peut également modifier le temps passé par le cadre en dehors du frigo après la trempe. Enfin, il a accès à trois boutons permettant de :

- remettre le compagnon virtuel sur les paramètres par défaut, correspondant au programme d'étirage de base et au module de Young d'un cadre parfait,
- de consulter l'aide constituée de deux pages, la première expliquant le retour élastique et la seconde présentant les différents éléments du compagnon virtuel,
- de quitter le compagnon virtuel et de retourner dans le micromonde.

Le compagnon est présenté aux participants lors de la première séance dans le diaporama de présentation du micromonde. Durant l'activité, il est ensuite accessible par la touche F4. La Figure 12 présente la diapositive consacrée à la présentation du compagnon virtuel telle qu'il a été présenté aux participants à l'étude. Afin de ne pas influencer l'utilisation que les participants pourraient faire du compagnon virtuel, aucune autre démonstration n'est faite aux participants.

II.3. Procédure

Cette étude s'est déroulée dans les mêmes conditions que pour le groupe « autonome » de l'étude 2 : les participants réalisaient deux séances d'environ deux heures.

Déroulement d'une séance

Lors de la première séance, les participants répondaient à un questionnaire, le même que celui de l'étude 2. Puis, ils lisaient le diaporama de présentation du micromonde. Par rapport au diaporama de l'étude 2, celui de l'étude 3 contient une diapositive présentant le fonctionnement du compagnon virtuel (cf. Figure 12).

Ils passaient ensuite le scénario d'initiation, avec les mêmes caractéristiques que pour les participants de l'étude 2 : afin de faciliter la prise en main du micromonde, les cadres sont parfaits et tels qu'attendus par les programmes par défaut, de telle sorte que les participants puissent se concentrer sur le déroulement des tâches. Après une pause d'environ dix minutes, ils réalisaient le scénario 2 qui contient des cadres semblables entre eux mais différents des cadres parfaits.

Afin de déterminer immédiatement s'ils utilisent ou non le compagnon virtuel et d'éviter la non utilisation de compagnon virtuel, les participants sont observés pendant toute la première séance. S'ils n'utilisent pas le compagnon virtuel lors du scénario d'initiation, l'existence du compagnon et de la touche F4 leur est rappelée lors du scénario 2, après environ 15 minutes de pratique, en général après la deuxième passe du premier cadre. Comme pour les participants de l'étude 2, les participants peuvent poser des questions lors de cette phase. Cependant, les questions m'ont semblées plus fréquentes dans la condition avec observation[7]. Afin de ne pas induire un mode d'utilisation du compagnon virtuel plutôt qu'un autre, les questions concernant le compagnon virtuel ou sur des points précis du programme étaient renvoyées au bon vouloir du participant (on leur répondait par exemple : « comme vous voulez » ou « c'est à vous de voir »).

À la fin de la première séance, les participants répondaient à l'exercice d'explicitation. Cet exercice, comme lors de l'étude 2, était composé de deux questions présentant des valeurs

[7] Non mesuré.

obtenues pour des cadres en première et seconde passe et interrogeant le participant sur ce qu'il ferait pour un troisième cadre. La première question était une question piège, elle renvoyait à un cadre d'un même lot. La seconde était une question facile, elle renvoyait à un cadre d'un lot différent. Cet exercice vise à déterminer si le schème trompeur peut se manifester même chez les participants n'utilisant pas le schème trompeur lors de leur activité dans le micromonde. Ce type de question incite les participants à verbaliser et à réfléchir sur leur propre pratique ce qui peut par la suite modifier leurs comportements (Pastré et al., 2009). Afin de garder les mêmes conditions pour tous les groupes expérimentaux, ces exercices ont donc été maintenus.

Lors de la deuxième séance, les participants ne sont plus observés. En effet, l'effet de l'observation de l'activité par un tiers sur la productivité et sur les stratégies de l'individu a été démontré dans des tâches assez rébarbatives (Klehe & Anderson, 2007). Afin de pouvoir comparer les participants à cette étude aux autres participants, nous avons donc arrêté les observations lors de la deuxième séance. Cette séance d'évaluation est identique à la séance d'évaluation des participants de l'étude 2. Ils passent d'abord le scénario 5 qui a pour but de réactiver leur activité dans le micromonde. Il y a deux lots de cadres. Dans un lot, les cadres sont homogènes, mais il y a des différences entre les deux lots. Les participants ont accès au compagnon virtuel.

Dans le scénario 6, les huit cadres sont différents. De plus, afin de pouvoir comparer les participants des deux études, le compagnon virtuel n'est plus accessible. Les participants doivent donc gérer seuls les huit cadres, comme l'avaient fait les participants de l'étude 2.

Variables manipulées

La variable manipulée est ici le groupe expérimental. Les participants du groupe « CV », c'est-à-dire les participants ayant utilisé le compagnon virtuel, sont comparés aux participants des groupes « autonomes » et « entrainés » de l'étude 2. Ceux-ci n'ont pas eu accès au compagnon virtuel. Les participants du groupe « entrainés » ont eu un tutorat et une séance supplémentaire. Les participants du groupe « autonomes » ont eu le même nombre de séance que les participants du groupe « CV » mais n'ont eu droit à aucune assistance : ni tutorat, ni compagnon virtuel.

Enfin, les niveaux de difficultés étant les mêmes que lors de l'étude 2 et les cadres étant les mêmes (c'est-à-dire qu'ils sont présentés dans le même ordre), on ne regardera que le scénario 6 qui est celui dont les conditions sont comparables pour tous les participants.

Critères de performances

Comme pour l'étude 2, nous regarderons les résultats liés à l'angle et à la longueur, c'est-à-dire si l'un ou l'autre est un motif de rebut. Ces deux critères étant indépendants, un participant peut décider d'en traiter un plutôt que l'autre ou de vouloir traiter les deux simultanément.

Nous regarderons également la précision des participants quant à ces deux critères, c'est-à-dire la distance de chaque cadre pour chacun de ces critères par rapport aux valeurs cibles. En effet, l'absence de motif de rebut ne signifie pas que le cadre a atteint parfaitement la valeur cible. Une distance faible indique que le participant a créé des règles ou a effectué des calculs suffisamment précis pour atteindre la valeur cible.

Enfin, nous regarderons la réussite globale des cadres. Un cadre sera considéré comme réussi s'il ne présente aucun motif de rebut, que ce soit l'angle, la longueur, la rectitude ou la planéité. Ce dernier critère est un indicateur de la maitrise globale du processus d'étirage.

III. HYPOTHÈSES

Les participants à cette étude, appartenant au groupe « CV » devraient mobiliser moins souvent le schème trompeur que les participants à l'étude 2, ceux des groupes « autonomes » et « entrainés ». En effet, nous pensons avoir créé l'interface du compagnon virtuel dans ce sens.

De fait, les participants à cette étude devraient avoir de meilleurs résultats que les participants à l'étude 2, et ce de façon générale. En effet, l'utilisation du compagnon virtuel devrait à la fois permettre de moins souvent mobiliser le schème trompeur et d'établir des règles précises permettant de programmer la machine d'étirage. Les participants à cette étude devraient donc avoir moins de cadres rebutés.

Enfin, les participants à cette étude, en particulier ceux n'utilisant pas le schème trompeur, devraient avoir des résultats plus précis que les participants à l'étude 2. En effet, l'utilisation du compagnon virtuel devrait leur permettre d'établir des règles précises pour le réglage des programmes.

IV. RÉSULTATS

IV.1. Apparition du schème trompeur

Afin de valider la première hypothèse qui stipule que le schème trompeur apparait moins souvent chez les participants ayant utilisé le compagnon virtuel que chez les participants à l'étude 2, plusieurs modèles linéaires généralisés ont été créés.

Modèles comparés

Lors de l'étude 2, plusieurs schèmes avaient été identifiés lors de l'activité des participants dans le micromonde : schèmes trompeurs pour la longueur et pour l'angle, schèmes pertinents pour la longueur et pour l'angle et stratégie du regroupement. Pour chacun de ces schèmes, trois modèles ont été comparés à un modèle nul, modèle qui stipule que le groupe n'a aucun effet. Le premier modèle considère que les trois groupes sont différents, le deuxième que le groupe ayant utilisé le compagnon virtuel est équivalent au groupe « autonome » de l'étude 2 et le dernier que le groupe ayant utilisé le compagnon virtuel est équivalent au groupe « entrainé » de l'étude 2. Ces modèles sont résumés dans le Tableau 14. Pour chaque cadre, on regarde si le schème étudié est apparu : la loi choisie est donc une loi binomiale. Le meilleur modèle est choisi grâce au critère du BIC. Ainsi le modèle ayant le plus petit BIC est conservé.

Résultats obtenus

Il est ainsi possible de savoir si les schèmes apparaissent de façon différente dans chacun des groupes expérimentaux. La Figure 13 montre la distribution des fréquences d'apparition des différents schèmes étudiés en fonction du groupe expérimental.

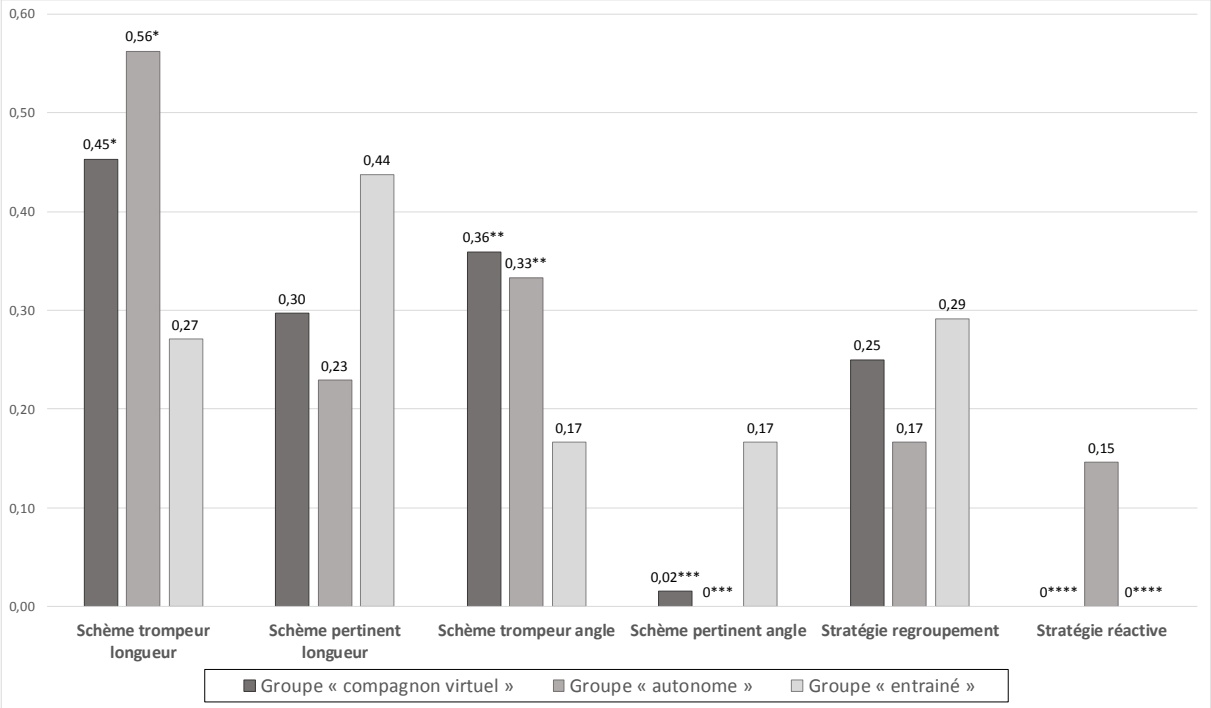


Figure 13 : distribution des fréquences d'apparition de chaque schème en fonction du groupe expérimental
*, **, ***, **** *Valeurs considérées comme identiques entre elles d'après la comparaison par BIC.*

Tableau 14 : description des modèles comparés

Nom du modèle	Description du modèle	Nombre de paramètres
Modèle nul	Pas d'effet du groupe	**0**
Modèle 1	Effet du groupe, les trois groupes sont différents	**1**
Modèle 2	Effet du groupe, groupe compagnon virtuel confondu au groupe « autonome »	**1**
Modèle 3	Effet du groupe, groupe compagnon virtuel confondu au groupe « entrainé »	**1**

Tableau 15 : BIC des différents modèles pour chaque schème et stratégie repérés.

Modèle / Schème étudié	Modèle nul	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3
Schème trompeur longueur	223,85	225,25	221,49*	224,13
Schème pertinent longueur	205,37**	210,54	206,11	207,82
Schème trompeur angle	198,83	203,18	198,18**	203,39
Schème pertinent angle	74,36	68,78	64,83*	72,79
Stratégie regroupement	180,49*	188,41	184,49	183,57
Stratégie réactive	62,57	55,11	62,52	50,03*

**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.*

Tableau 16 : fréquence d'apparition du schème étudié en fonction du groupe expérimental.

Groupe / Schème étudié	Groupe compagnon virtuel	Groupe « autonome »	Groupe « entrainé »
Schème trompeur longueur	0,4531*	0,5625*	0,2708
Schème pertinent longueur	0,2969	0,2292	0,4375
Schème trompeur angle	0,3594*	0,3333*	0,1667
Schème pertinent angle	0,0156*	0,0000*	0,1667
Stratégie regroupement	0,2500	0,1667	0,2917
Stratégie réactive	0,0000*	0,1458	0,0000*

**Valeurs de la ligne qui sont considérées comme identiques d'après la comparaison par BIC.*
On peut lire le tableau comme suis : à la première ligne, le schème trompeur de la longueur apparait pour 45% des cadres étirés par les participants du groupe compagnon virtuel et 56% des participants du groupe « autonome » de l'étude 2. Ces deux valeurs ne se distinguent pas, selon les modèles, mais elles se distinguent de l'apparition du schème trompeur dans le groupe « entrainé » (27% des cadres).

Le Tableau 15 montre ainsi que les schèmes trompeurs, pour la longueur et pour l'angle, ainsi que le schème pertinent pour l'angle, apparaissent de la même façon chez les participants à l'étude 3 et chez les participants du groupe « autonome » de l'étude 2. Ainsi, le schème trompeur apparait plus souvent chez ces participants (50% des cadres étirés sont étirés avec le schème trompeur) que chez les participants du groupe « entrainé » de l'étude 2 (27 % des cadres étirés avec le schème trompeur).

De la même façon, le schème trompeur pour l'angle apparait plus souvent chez les participants à l'étude 3 et du groupe « autonome » de l'étude 2 (34% des cadres) que dans le groupe « entrainé » (17% des cadres).

En revanche, on ne peut pas distinguer les participants concernant le schème pertinent pour la longueur ni concernant la stratégie de regroupement.

Enfin, la stratégie réactive, qui consistait à étirer les cadres petit à petit lors de la passe 2, n'est apparue que chez un participant du groupe « autonome » de l'étude 2. On ne distingue donc pas les participants des groupes entrainés des participants ayant utilisé le compagnon virtuel.

Conclusion concernant l'apparition du schème trompeur.

Les différents schèmes n'apparaissent pas de la même façon dans chacun des groupes expérimentaux. Contrairement à ce qui était attendu, les participants ayant utilisé le compagnon virtuel utilisent le schème trompeur et dans des proportions importantes, comparables à celles des participants du groupe « autonome ». Notre première hypothèse n'est donc pas validée.

IV.2. Performances obtenues

La deuxième hypothèse formulée concernait les performances des participants utilisant le compagnon virtuel que l'on s'attend à trouver meilleures que celles des autres participants. Pour cela, nous avons donc comparé les performances des différents groupes expérimentaux en fonction des cinq critères retenus lors de l'étude précédente : la longueur comme motif de rebut, l'angle comme motif de rebut, la réussite du cadre, la distance à la longueur cible et la distance à l'angle cible. Comme lors de l'étude précédente, la longueur et l'angle

comme motifs de rebut sont des critères de sanction pour chaque cadre alors que les distances à l'angle et à la longueur cible sont des critères de précision. Enfin, la réussite du cadre prend en considération l'ensemble des éléments pouvant conduire au rebut d'un cadre : la longueur, l'angle, la rectitude et la planéité.

Cependant, comme les participants ayant utilisé le compagnon virtuel n'étaient pas supposés utiliser le schème trompeur, nous avons, dans un second temps, comparé les résultats en croisant le groupe expérimental et l'utilisation des différents schèmes.

Performances par groupe expérimental

Pour chacun des critères, nous procédons comme pour l'évaluation de la présence des schèmes : plusieurs modèles linéaires généralisés sont créés et comparés à l'aide du critère du BIC. Les modèles comparés sont présentés dans le Tableau 17. L'objectif est, comme pour l'étude de l'apparition du schème trompeur du paragraphe précédent, de déterminer si les participants se distinguent en fonction de leurs groupes d'appartenance, mais cette fois-ci en ce qui concerne leurs performances.

Résultats concernant la réussite du cadre et les motifs de rebut

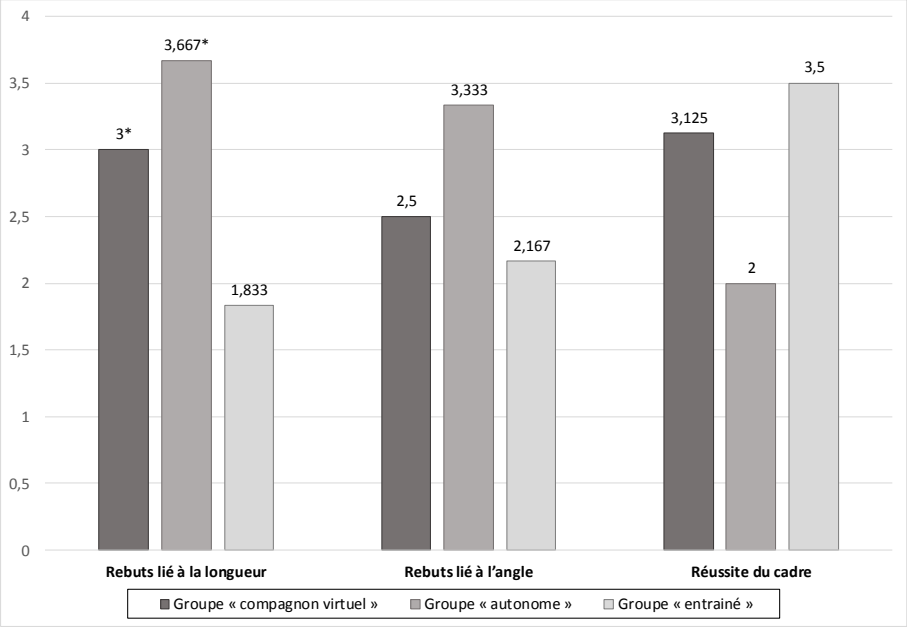


Figure 14 : nombre moyen de cadres rebutés pour la longueur et l'angle ou réussis, par participant en fonction du groupe
** : valeurs considérées comme identiques d'après l'analyse des BIC*

Afin de comparer les participants sur les critères de rebut et de réussite, qui sont des critères binaires, nous avons procédé à un comptage. Ainsi, c'est le nombre de cadre par participant (nombre de cadres réussis, ou rebutés à cause de la longueur et à cause de l'angle) qui est étudié. En conséquence, la loi utilisée est une loi de poisson.

La réussite des cadres et le nombre de rebuts liés à l'angle ne sont pas différents dans nos groupes expérimentaux. En effet, le Tableau 18 montre que pour ces deux critères, le modèle choisi est le modèle nul. En revanche, le meilleur modèle considère que les participants ayant utilisé le compagnon virtuel ne se distinguent pas des participants autonomes de l'étude 2, mais qu'ils se distinguent des participants entrainés. Ainsi, les participants ayant utilisé le compagnon virtuel, comme les participants autonomes, rebutent plus de cadres à cause de la longueur (3,29 cadres en moyenne) que les participants du groupe « entrainé » (1,83 cadres en moyenne), comme on peut le voir sur la Figure 14.

Résultat concernant les critères de précision

Les modèles comparés ont été créés à partir des distances moyennes par participant. Les distances aux valeurs cibles sont des variables continues, de même que leurs moyennes. Les lois pouvant correspondre étaient les lois gaussiennes et gamma. Les modèles utilisant la loi gaussienne avaient systématiquement des BIC plus importants que les modèles utilisant la

Tableau 17 : description des modèles comparés

Nom du modèle	Description du modèle	Nombre de paramètres
Modèle nul	Pas d'effet du groupe	**0**
Modèle 1	Effet du groupe, les trois groupes sont différents	**1**
Modèle 2	Effet du groupe, groupe compagnon virtuel confondu au groupe « autonome »	**1**
Modèle 3	Effet du groupe, groupe compagnon virtuel confondu au groupe « entrainé »	**1**

Tableau 18 : BIC des différents modèles pour les cinq critères de performances retenus

Modèle / Critère de performance	Modèle nul	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3
Rebut lié à la longueur	82,82	84,97	82,43**	83,90
Rebut lié à l'angle	82,04**	86,43	84,26	83,90
Réussite du cadre	87,23**	90,50	89,19	87,65
Distance à la longueur cible	-91.53	-89,98	-90,32	-92,71**
Distance à l'angle cible	-16,20	-21,29	-15,72	-24,21*

**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.*

Tableau 19 : moyenne par groupe expérimental pour chaque critère de performance considéré

Groupe / Critère de performance	Groupe « compagnon virtuel »	Groupe « autonome »	Groupe « entrainé »
Rebuts lié à la longueur	3,000*	3,667*	1,833
Rebuts lié à l'angle	2,500	3,333	2,167
Réussite du cadre	3,125	2,000	3,500
Distance moyenne à la longueur cible	0,033*	0,056	0,028*
Distance moyenne à l'angle cible	0,086*	0,596	0,101*

**Valeurs de la ligne qui sont considérées comme identiques d'après la comparaison par BIC.*

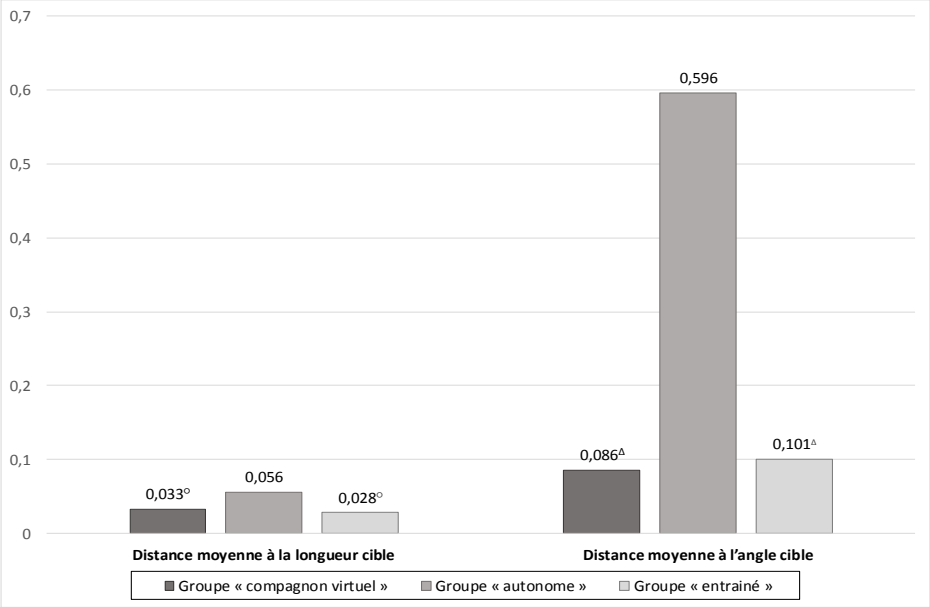


Figure 15 : distance moyenne à la longueur et à l'angle cible en fonction du groupe expérimental
° et Δ indiquent respectivement les valeurs semblables d'après le modèle choisi par le BIC.

loi gamma. Le Tableau 18 ne présente donc que les résultats concernant les modèles utilisant la loi gamma.

Les résultats présentés dans le Tableau 19 et la Figure 15 indiquent que le groupe « compagnon virtuel » et le groupe « entrainé » sont plus précis que le groupe « autonome » que ce soit pour la longueur (distance moyenne à la cible de 0,03 m contre 0,05 m respectivement), ou pour l'angle (distance à l'angle cible de 0,09° contre 0,59° respectivement).

Conclusion concernant les performances de chaque groupe

Les participants ne se comportent pas de la même façon en fonction du type de critère repéré. En effet, les participants du groupe « compagnon virtuel » sont semblables à ceux du groupe « autonome » pour ce qui est de la longueur comme motif de rebut. En revanche, les participant du groupe « compagnon virtuel » sont semblables à ceux du groupe « entrainé » en ce qui concerne les critères de précision, c'est-à-dire la distance à la longueur cible et la distance à l'angle cible.

Il est à noter que le seuil de rebut pour la distance à la longueur cible est fixé à 0,03 m et que la moyenne du groupe « compagnon virtuel » est de 0,033 m. Cela explique la différence

entre longueur comme motif de rebut et distance à la longueur cible d'un point de vue statistique : les participants du groupe « compagnon virtuel » sont certes plus précis que les participants du groupe « autonome » mais restent, en moyenne, en dehors des tolérances.

Il peut, *a priori*, sembler paradoxal que les participants ne se comportent pas de la même façon pour ces deux types de critères de réussite. Cependant, comme nous l'avons vu lors de l'étude 2, différents facteurs peuvent expliquer ces différences : le schème utilisé, les connaissances antérieures et l'habitude des jeux vidéo. Ces différents facteurs sont explorés dans le paragraphe suivant afin de chercher les causes de ce paradoxe.

Facteurs ayant un effet sur les performances

Les cinq critères de performances (rebut lié à la longueur, rebut lié à l'angle, réussite du cadre, distance à la longueur cible, distance à l'angle cible) ont été analysés par comparaison de modèles linéaires généralisés avec le critère du BIC. Le détail de la méthodologie statistique, des modèles comparés et des résultats obtenus est présenté en annexes (Annexe 12 : méthodologie statistique utilisée dans l'étude 3). Nous ne présentons ici que les modèles gardés par les analyses.

Effet du schème trompeur croisé au groupe expérimental sur la longueur

Il y a un effet combiné du schème et du groupe expérimental pour les deux critères liés à la

Tableau 20 : fréquence des cadres rebutés à cause de la longueur en fonction du groupe expérimental et de la présence du schème trompeur

Groupe expérimental	Schème trompeur présent	Schème trompeur absent	Total général
Autonome	0,4074	0,5238	0,4583
Entrainé	0,5385	0,1143	0,2292
Compagnon virtuel	0,5172	0,2571	0,3750
Total général	0,4783	0,2637	0,3563

Tableau 21 : moyenne de la distance à la longueur cible en fonction du groupe expérimental et de la présence du schème trompeur

Groupe expérimental	Schème trompeur présent	Schème trompeur absent	Total général
Autonome	0,0315	0,0869	0,0557
Entrainé	0,0486	0,0206	0,0281
Compagnon virtuel	0,0384	0,0288	0,0332
Total général	**0,0376**	**0,0390**	**0,0384**

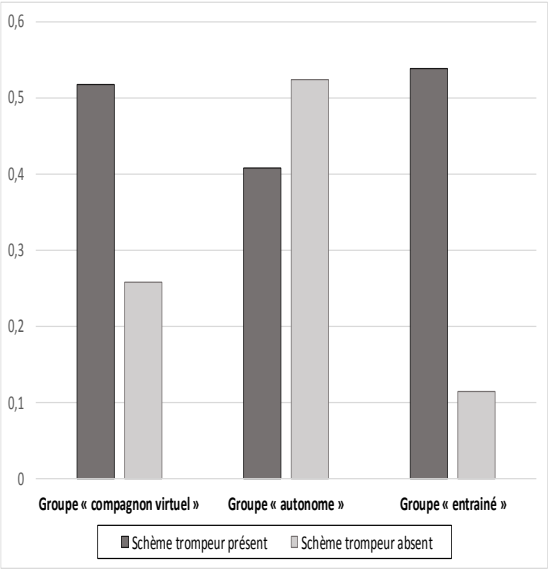


Figure 16 : fréquence des rebuts liés à la longueur en fonction du groupe expérimental et de la présence du schème trompeur

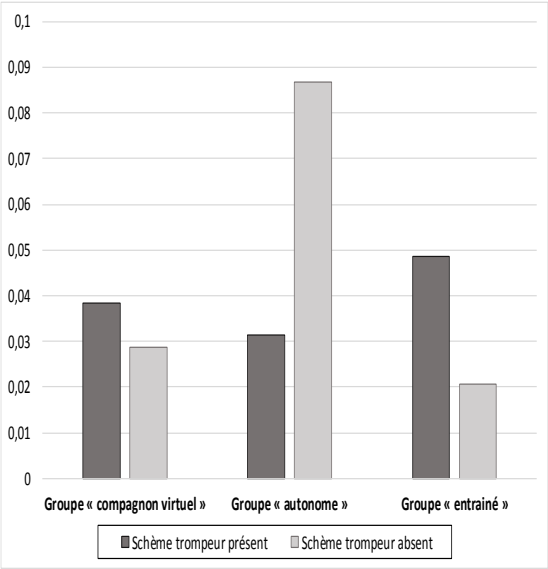


Figure 17 : distance moyenne à la longueur cible en fonction du groupe expérimental et de la présence du schème trompeur

longueur.

Pour la longueur comme motif de rebut et pour la distance à la longueur cible, le modèle choisi stipule un effet croisé du schème trompeur et du groupe expérimental, lorsque l'on considère que les participants des groupes « compagnon virtuel » et « entrainé » sont confondus.

Le Tableau 20 et le Tableau 21 montrent que les participants du groupe « compagnon virtuel » réussissent mieux lorsque le schème trompeur est absent, que ce soit pour les cadres rebutés à cause de la longueur ou que ce soit pour la distance à la longueur cible.

Ils sont ainsi comparables aux participants du groupe « entrainé » de l'étude 2. En revanche, les participants du groupe « autonome » de l'étude 2 réussissent mal pour le nombre de cadres rebutés à cause de la longueur, que le schème trompeur soit présent ou non (Figure 16). Ils réussissent même mieux lorsque le schème trompeur est présent pour ce qui est de la distance à la longueur cible (Figure 17).

Paramètres affectant l'angle

En ce qui concerne les rebuts liés à l'angle, le modèle gardé indique que les connaissances antérieures et les habitudes de jeux vidéo ont un effet. La Figure 18 montre que les participants jouant quotidiennement aux jeux vidéo rebutent moins de cadres à cause de

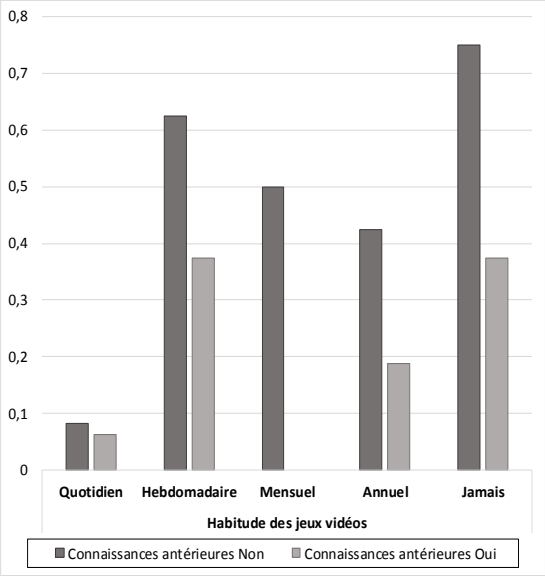


Figure 18 : fréquence de rebut lié à l'angle en fonction de l'habitude des jeux vidéo et des connaissances antérieures

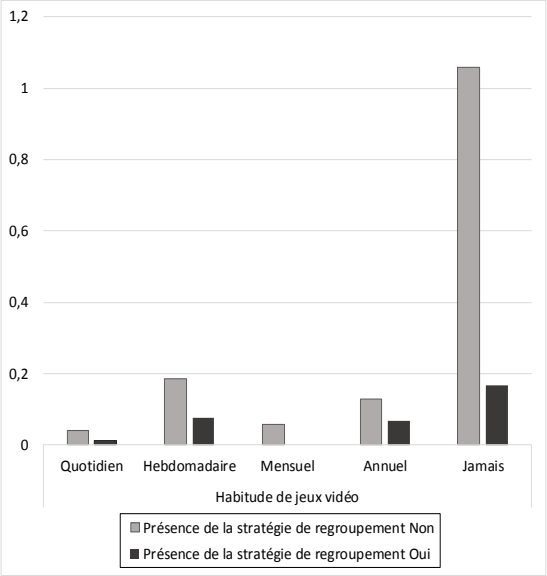


Figure 19 : distance moyenne à l'angle cible en fonction de la présence de la stratégie de regroupement et de l'habitude des jeux vidéo

l'angle. Quelle que soit leurs habitudes de jeux vidéo, la présence de connaissances antérieures améliore également leurs performances quant à l'angle en tant que motif de rebut.

En ce qui concerne la distance à l'angle cible, le modèle gardé indique que les habitudes de jeu vidéo et la stratégie de regroupement ont un effet. La Figure 19 montre que les participants regroupant les cadres sont plus proches de la valeur cible. De plus, les participants jouant plus régulièrement aux jeux vidéo sont plus précis que les autres.

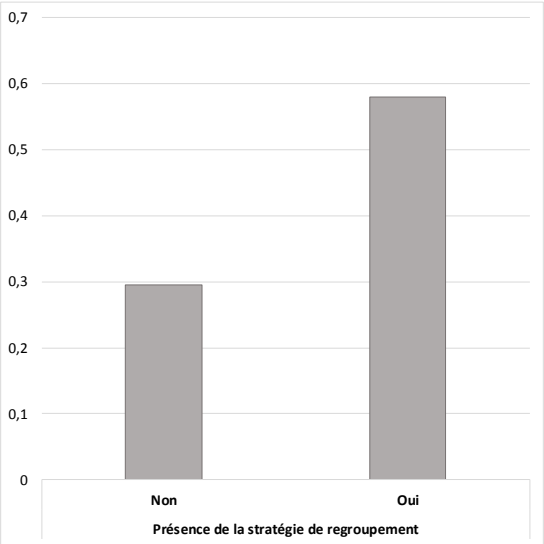


Figure 20 : fréquence des cadres réussis en fonction de la présence de la stratégie regroupement

Paramètres affectant la réussite des cadres

En ce qui concerne la réussite, le meilleur modèle stipule que la stratégie de regroupement a un effet. La Figure 20 montre que les cadres sont mieux réussis lorsque la stratégie de regroupement est utilisée.

Conclusion concernant les facteurs ayant un effet sur les performances

Notre troisième hypothèse est validée mais seulement en ce qui concerne la longueur. En effet, on s'attendait à ce que les participants utilisant le compagnon virtuel mais pas le schème trompeur soit plus précis que les autres. C'est effectivement ce que nous observons. Ces participants ont des performances semblables aux participants à l'étude 2 ayant bénéficié d'un entrainement, c'est-à-dire les participants du groupe « entrainé ». De plus, les participants ayant utilisé le compagnon virtuel lors des premières séances et n'utilisant pas le schème trompeur sont également comparables aux participants du groupe « entrainé » pour ce qui est de la 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 ont de moins bons résultats. Ils se rapprochent alors des participants du groupe « entrainé » utilisant le schème trompeur et des participants du groupe « autonome ».

Cependant, en ce qui concerne l'angle ou la réussite du cadre, l'utilisation de la stratégie de regroupement, qui consiste à étirer successivement, lors du second étirage, les cadres ayant eu des résultats proches à l'issue du premier étirage, produit de meilleurs résultats. 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.

IV.3. Étude clinique des conduites

Les résultats présentés dans cette section ne concernent que les participants à l'étude 3, c'est-à-dire les participants à qui l'on a présenté le compagnon virtuel. Comme nous l'avions précisé lors de la présentation des participants, deux types de participants se sont distingués : ceux qui ont utilisé le compagnon virtuel et ceux ne l'ayant pas utilisé bien qu'il leur ait été présenté. Ces deux types de participants forment deux groupes distincts : le groupe « compagnon virtuel », que nous avons comparés jusqu'alors aux participants de l'étude 2, et le groupe « exclu » que nous n'avons pas, jusqu'à présent, étudié.

Le groupe exclu est composé de trois participants n'ayant pas utilisé le compagnon virtuel alors qu'il leur avait été présenté. Nous présentons ici brièvement leur activité sur le simulateur. De plus, nous présentons également quelques exemples d'utilisation de l'interface faite par les participants qui l'ont effectivement utilisée, ainsi que des erreurs qui sont apparues et qui semblent informatives quant à l'activité des participants.

Participants n'ayant pas utilisé le compagnon virtuel

Les participants numérotés 41, 42 et 43 n'ont pas utilisé le compagnon virtuel lors de la séance 1 (scénarios 1 et 2) qui était observée. Ces participants, lorsqu'il leur était rappelé l'existence du compagnon virtuel durant le scénario 2, ouvrent brièvement le compagnon virtuel puis le referment. L'un n'a manipulé aucun curseur, les autres ont manipulé quelques curseurs mais n'ont plus ensuite utilisé le compagnon virtuel. Celui d'entre eux qui a le plus utilisé le compagnon n'a jamais modifié le curseur du module de Young.

Exemples qualitatifs d'utilisation du compagnon virtuel

Le plus souvent le compagnon virtuel est utilisé comme une aide à la prise de décision.

Ainsi le participant 31 utilise le compagnon virtuel pour essayer des réglages de la machine qu'il applique ensuite à un cadre. Il compare ensuite le résultat obtenu au résultat attendu et étalonne ensuite le module de Young du compagnon virtuel en fonction du résultat. Il consulte ainsi le compagnon virtuel entre deux cadres et pendant la trempe avant de modifier les programmes de passe 2.

D'autres comme le participant 32, après avoir un peu exploré le compagnon pour déterminer l'utilité de chaque curseur, ne vont utiliser le compagnon virtuel qu'en cas de problème. Ainsi lors du scénario 2, le participant 32 n'utilise le compagnon virtuel que lors qu'un premier cadre a été rebuté.

Le participant 34, quant à lui, utilise le compagnon virtuel pour mieux comprendre les effets des différents paramètres de la tâche : par exemple, il joue avec le curseur de temps avant de conclure, à voix haute, que le temps rend le cadre plus difficile à étirer. Ce participant commence par étirer chaque cadre en première passe et à utiliser le compagnon virtuel pour choisir l'étirage au centième près lors de la seconde passe. Cependant, au bout de quelques minutes lors du scénario 2, il s'exclame : « Mais je suis bête, si c'est le même lot c'est toujours pareil ». Il commence alors à mettre en œuvre le schème trompeur : il étalonne le compagnon pour un cadre puis utilisera le même programme pour tous les cadres suivants.

La prise en main du compagnon virtuel n'est pas évidente pour tous les participants, ainsi les participants 35 et 36, manipulent le bouton réglant le module de Young au hasard pour les premiers cadres. Ce n'est qu'une fois qu'ils se rendent compte que les résultats prédits ne correspondent pas qu'ils essaient à nouveau et finissent par comprendre comment procéder.

Enfin, le participant 37 a également des difficultés à utiliser le compagnon. S'il règle correctement dès le début le module de Young et les programmes d'étirage, il ne prend pas le temps en compte, c'est-à-dire qu'il ne manipule pas ce bouton au départ. Il ne l'utilise qu'après avoir cassé quelques cadres.

Enfin, il est a noté que deux participants évoquent le fait que la vitesse n'est pas représentée. L'un d'entre eux commente à voix haute cette absence avant de conclure qu'il ne touchera donc pas à ce bouton dont il ne connait pas l'utilité. Le second évoque à voix haute le fait que la vitesse devait être liée à la rectitude et à la planéité qui ne sont pas non plus représentées dans le compagnon virtuel.

Erreurs inédites

Les participants ayant utilisé le compagnon virtuel ont, lors des phases d'observation, manifesté des erreurs qui n'avaient pas été observées chez les participants à l'étude 2 ayant été entrainés. Certaines de ces erreurs sont encore présentes lors du scénario 6 alors qu'elles n'étaient pas apparues jusque-là.

Le participant 39 prend toutes les mesures sur la machine d'étirage durant le premier scénario. De fait, ces mesures ne correspondent pas aux résultats attendus par le compagnon virtuel et sont en dehors des résultats attendus. En effet, lorsque la machine tient encore le cadre, le retour élastique n'a pas lieu, les cadres sont donc plus grands que leur taille effective finale. Ce participant finit par abandonner le compagnon lors du scénario 2 et par tenter de rectifier les cadres avec la lime[8]. À partir de ce moment, il prend les mesures sur les tables de mesure. Il semble considérer ensuite que la lime provoque les différences entre les mesures prises sur la machine et celles prises sur les tables. Ce n'est qu'à la fin du deuxième scénario qu'il arrête d'utiliser la lime.

Les participants 35 et 36 essayent d'avoir un cadre bon dès le premier étirage. Ils étirent un premier cadre en première passe. Ils étalonnent ensuite le compagnon virtuel à partir des résultats obtenus. Enfin, ils règlent sur le compagnon virtuel, puis sur la machine d'étirage, les programmes de passe 1 afin que les valeurs cibles soient atteintes dès la passe 1. Si cette stratégie est efficace lors des premiers scénarios, où tous les cadres sont homogènes, elle n'est pas efficace dans le scénario 6 pour lequel les cadres ne sont pas homogènes. Cependant, l'étude du tableau liant valeurs mesurées et programmes utilisés montre qu'ils

[8] La lime est un outil qui avait été implémenté en début de programme afin de corriger des défauts à la surface des cadres. Cependant, les textures dans le micromonde ne permettaient pas d'insérer de tels défauts, l'idée a été abandonnée. La lime est restée dans le micromonde, mais n'a donc pas d'utilité.

ont utilisé la même stratégie pour le scénario 6 : les valeurs de programme en première passe sont élevées, certains cadres ne sont étirés qu'en première passe. Enfin, les cadres étirés en seconde passe le sont avec des valeurs très faibles. Cette stratégie ne serait pas possible sans le compagnon virtuel.

Enfin, le participant 37 n'utilise jamais le frigo, ses cadres évoluent donc très vite après la trempe. Ce participant n'avait pas manipulé le curseur temps du compagnon virtuel. Durant le scénario 6, à partir du tableau des mesures et programmes, on note qu'il utilise le schème pertinent et des programmes qui seraient efficaces si les cadres avaient été envoyés au frigo, ou si le temps avait été pris en compte pour ajuster le programme.

Résumés des résultats concernant l'étude 3

Le Tableau 22 rassemble et résume les informations obtenues sur chacun des participants à cette étude sur le compagnon virtuel.

On remarque que les participants ayant utilisé le compagnon virtuel, ceux du groupe « compagnon virtuel », ne semblent pas se distinguer des participants ne l'ayant pas utilisé, groupe « exclu », en ce qui concerne leurs caractéristiques personnelles : ainsi, on retrouve dans les deux groupes des personnes ayant des connaissances antérieures ou n'en ayant pas et des personnes jouant régulièrement aux jeux vidéo ou pas. Le nombre peu élevé de participants n'ayant pas utilisé le compagnon virtuel ne permet cependant pas d'effectuer d'analyses statistiques pour valider cet élément.

En ce qui concerne la présence des schèmes, le schème trompeur apparait dans les deux groupes. Cela se vérifie à la fois lors de l'exercice d'explicitation et lors de l'activité concernant la longueur. Cependant, notre échantillon est trop petit pour que l'on puisse déterminer si des différences significatives existent.

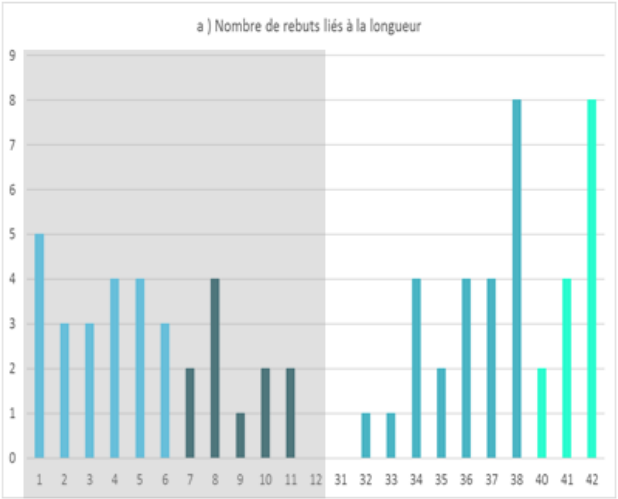
De la même façon, l'échantillon est trop petit pour pouvoir déterminer si des différences significatives existent entre les participants du groupe « compagnon virtuel » et ceux du groupe « exclu ». Cependant, les trois participants du groupe « exclu » ne réussissent que trois cadres, ils en rebutent 14 à cause de la longueur (soit une moyenne de 4,67) et 14 à cause de l'angle (soit une moyenne de 4,67) comme on peut le voir dans le tableau 24. Leurs performances sont donc faibles.

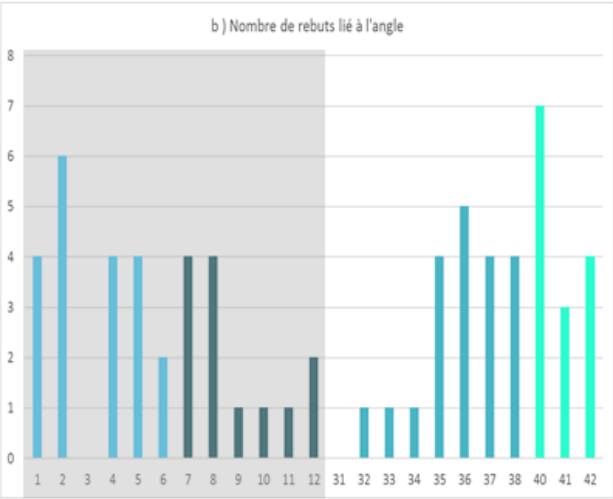
Tableau 22 : résumé des profils des participants, des schèmes qu'ils ont manifestés et de leurs résultats.

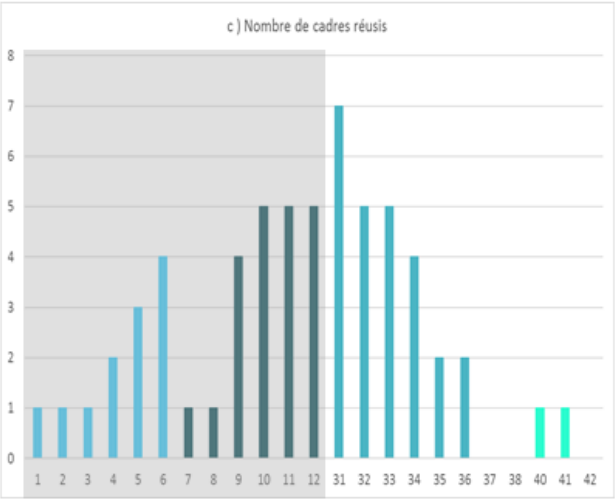
Participant	Jeux Vidéo	Connaissance antérieure	Utilisation du CV	Test 2_1	Test 2_2	Schème longueur	Schème angle	Rebut long	Rebut angle	Réus-site	Distance longueur moyenne	Distance angle moyenne
31	Quotidien	Oui	Oui	Les deux schèmes	Les deux schèmes	Regroupé	Regroupé	0	0	7	0,0094	0,0093
32	Annuel	Oui	Oui	Schème pertinent	Indéterminé	Schème pertinent	Schème trompeur	1	1	5	0,0199	0,0217
33	Annuel	Non	Oui	Schème trompeur	Schème trompeur	Regroupé	Pas de régulation	1	1	5	0,0111	0,0246
34	Quotidien	Non	Oui	Schème trompeur	Schème trompeur	Schème trompeur	Schème trompeur	4	1	4	0,0364	0,0276
35	Annuel	Non	Oui	Schème trompeur	Schème trompeur	Schème trompeur	Pas de régulation	2	4	2	0,0202	0,0549
36	Hebdomadaire	Non	Oui	Schème trompeur	Schème trompeur	Schème trompeur	Schème trompeur	4	5	2	0,0472	0,4370
37	Hebdomadaire	Oui	Oui	Schème trompeur	Schème pertinent	Schème pertinent	Pas de régulation	4	4	0	0,0458	0,0549
38	Mensuel	Non	Oui	Schème trompeur	Schème pertinent	Schème trompeur	Pas de régulation	8	4	0	0,0753	0,0586
40	Quotidien	Non	Non	Schème trompeur	Schème pertinent	Schème pertinent	Schème trompeur	2	7	1	0,0467	2,8692
41	Annuel	Oui	Non	Schème trompeur	Schème pertinent	Schème trompeur	Schème trompeur	4	3	1	0,0430	0,0386
42	Annuel	Non	Non	Schème trompeur	Indéterminé	Pas de régulation	Pas de régulation	8	4	0	0,0819	2,8521

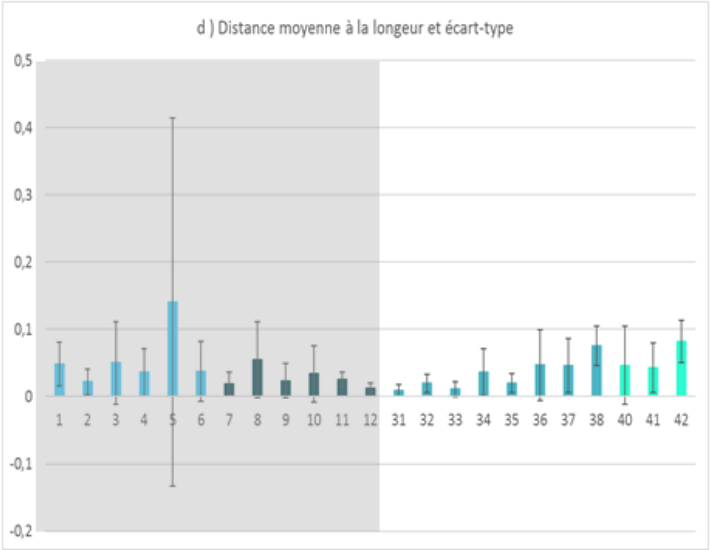
IV.4. Synthèse des résultats obtenus lors des deux études sur le micromonde

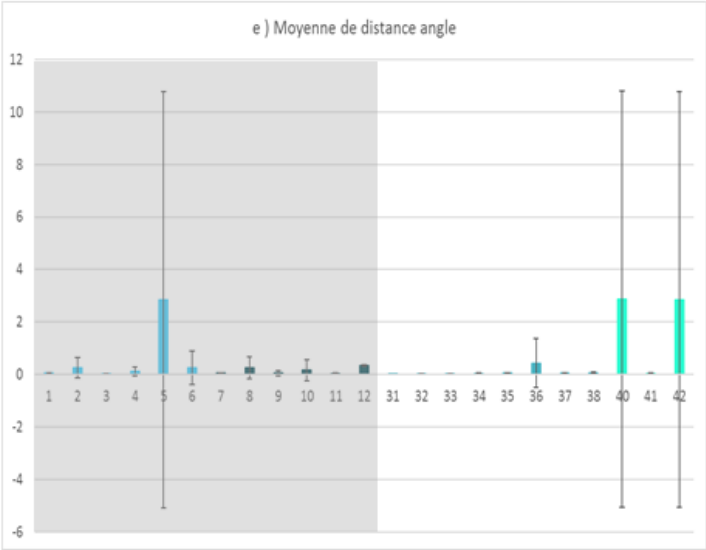
La Figure 21 (de a à c), présente graphiquement les résultats obtenus par chaque participant aux études 2 et 3. On remarque que si certains participants à l'étude 3 sont très performants en ce qui concerne le nombre de cadres réussis, d'autres ont des résultats médiocres. En ce qui concerne la précision, les participants très performants sont en moyenne très proches des valeurs cibles, avec des écart-types faibles.











Légende	Étude 2		Étude 3	
	Groupe autonome	Groupe entrainé	A utilisé le CV	N'a pas utilisé le CV

Rappel des résultats concernant le schème pour la longueur lors de l'étude 2

Schème	Participants
Modèle nul	2 ; 8
Schème trompeur	1 ; 6
Schème pertinent	4 ; 9 ; 11 ; 12
Deux schèmes	3 ; 5 ; 7 ; 10

Figure 21 : résultats de chaque participant pour le scénario 6 pour les cinq critères d'évaluation retenus : a) rebuts liés à la longueur, b) rebut liés à l'angle, c) cadres réussis, d) distance à la longueur cible, e) distance à l'angle cible

V. Discussion

Trois éléments importants sont ressortis de cette étude concernant le compagnon virtuel.

Le premier élément concerne l'utilisation du compagnon virtuel. Deux participants n'ont pas réussi à l'utiliser, et un troisième n'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). Il semble en effet que l'utilisation de la simulation, en tant qu'outil de prise de décision, peut soulever des difficultés dans les organisations, notamment en terme d'acceptabilité (Centeno & Carrillo, 2001). Dans le cas des pages internet, il ne semble pas y avoir de lien entre l'esthétique d'une interface et son utilisabilité (van Schaik & Ling, 2009), mais la simplicité perçue augmente la satisfaction de l'utilisateur (Choi & Lee, 2012). Bien que Reising et Sanderson (2002) ont montré que des utilisateurs considèrent une interface écologique comme plus utile que des interfaces ne représentant pas les plus hauts niveaux de la hiérarchie d'abstraction, les interfaces écologiques n'ont pas vocation à être aisées d'utilisation pour une personne non initiée au domaine (Borst, Flach, & Ellerbroek, 2014). Au vu des résultats concernant l'utilisation du compagnon virtuel, son interface en particulier semble peu entrainante : la difficulté perçue pourrait décourager les utilisateurs. Trois hypothèses pourraient expliquer ce fait.

Tout d'abord, certains participants pourraient manquer de connaissances préalables sur les modèles physiques sous-tendant la représentation utilisée dans le compagnon virtuel. Or, il a été démontré qu'une expertise théorique permet de mieux exploiter une interface écologique (Vicente, 1995). En effet, les courbes représentant le retour élastique peuvent être difficiles à interpréter si l'on ne connait pas ces principes physiques. Cependant, parmi les participants ayant utilisé le compagnon virtuel, cinq déclarent n'avoir aucune connaissance sur les principes physiques tels que le retour élastique. Inversement, un participant n'ayant pas utilisé le compagnon virtuel déclare avoir des connaissances sur le retour élastique et le module de Young par exemple. Le faible échantillon ne permet pas de trancher quant à cette hypothèse. Il pourrait être intéressant d'approfondir cette question en augmentant la taille de l'échantillon et en contrôlant également l'origine des connaissances et la formation (les participants déclarant avoir des connaissances en physique des matériaux ont suivi des cursus de physique ou de biomécanique).

De fait, l'interface du compagnon virtuel pourrait être trop compliquée à utiliser et nécessiter un cout cognitif pour la maîtriser supérieur au cout engagé pour traiter simplement le problème du réglage de la machine dans des conditions simples d 'utilisation. Or, de façon générale, les couts engagés par un opérateur lors de la réalisation d'une tâche sont volontairement limités afin de pouvoir maintenir un effort sur le long terme (Amalberti, 2001).

L'utilisation du compagnon virtuel devrait permettre de réussir tous les cadres en anticipant les écarts au programme dès le premier cadre. Cependant, dans les scénarios où les participants ont accès au compagnon virtuel, il reste possible de mobiliser le schème trompeur et de réussir quelques cadres. Tout dépend donc des exigences que le participant se fixe, c'est-à-dire de la performance qu'il juge satisfaisante (Hoc & Amalberti, 2007). Mettre plus l'accent sur l'utilisation du compagnon virtuel que sur la maitrise du processus d'étirage devrait permettre d'éviter cet écueil. En effet, l'orientation des buts des participants vers un élément spécifique peut avoir un effet sur les apprentissages dans un micromonde (Miller, Lehman, & Koedinger, 1999). Enfin, dans notre étude, afin de ne pas induire des modes d'utilisation du compagnon virtuel, celui-ci n'a été que présenté sans aucune démonstration des utilisations possibles. Administrer une formation à l'utilisation du compagnon virtuel plus longue aux participants pourrait permettre d'éviter de voir apparaître des différences à cause de la formation initiale ou dues à la difficulté apparente d'utilisation du compagnon virtuel. Cette formation pourrait prendre alors la forme de démonstrations ou de tutorat. En effet, le fait d'avoir un enseignant ou un tuteur est bénéfique au développement de l'expertise (Shea & Paull, 1996).

Une autre hypothèse possible serait qu'il existerait, chez les participants n'ayant pas utilisé le compagnon virtuel, une représentation préalable de la tâche à accomplir qui ne serait pas compatible avec la représentation proposée par le compagnon virtuel.

Ainsi, si les participants s'attendent, en lisant la présentation du micromonde, à traiter les cadres simultanément en prenant en compte les résultats finaux, ils pourraient être décontenancés devant une représentation cadre par cadre et en deux temps. Leurs représentations de la tâche ne coïncideraient pas avec la représentation proposée par l'interface. Les interfaces écologiques sont, en général, conçues en regard du principe de cartographie sémantique (Reising & Sanderson, 2002) : les significations transmises par

l'interface doivent correspondre au système étudié. Cependant, pour pouvoir être comprise par l'utilisateur, cette interface doit être cohérente avec la représentation que l'opérateur a du système. Enfin, la représentation que l'opérateur se fait du système doit effectivement correspondre au système lui-même. La littérature sur la conception d'interface écologique est, en effet, fortement influencée par une vision triadique de la sémiotique (Eco, 1988, 1992). Ainsi, un signifiant donné (symbole, signe ou signal de l'interface) n'est pas choisi de façon arbitraire, il fait sens dans son rapport à l'objet représenté (le système étudié) et à l'interprétant (l'opérateur qui a des représentations et des connaissances) (Bennett & Flach, 2011 ; Flach, 2015).

Cependant, l'existence de deux schèmes concurrents chez les participants et les opérateurs dans notre cas d'étude rend cet exercice difficile. Afin de tester l'hypothèse de l'influence de cette représentation erronée sur la non-utilisation du compagnon virtuel, il pourrait être intéressant d'induire chez certains participants le schème trompeur, et chez d'autre le schème pertinent, puis de regarder l'utilisation que les uns et les autres font du compagnon virtuel. Dans ce cas également, une formation appropriée, visant à contrôler et, le cas échéant, à modifier les représentations préalables des utilisateurs du compagnon virtuel devrait permettre d'éviter la non utilisation ou l'abandon de ce dernier.

Enfin, dans leur étude, Torenvliet, Jamieson, et Vicente (2000) ont montré que l'utilisation d'une interface écologique était plus aisée pour les utilisateurs ayant un style cognitif global. En effet, Pask et Scott (1972) ont démontré qu'il existait deux types d'apprentissage et qu'en général les individus utilisent préférentiellement l'un ou l'autre, plus rarement les deux. Le style cognitif global correspond ainsi aux individus qui apprennent de façon générale et schématique. Le style cognitif sériel correspond quant à lui aux individus qui apprennent de façon séquentielle ou pas à pas. Enfin, certains individus sont capables de passer d'un mode d'apprentissage à l'autre, ils sont appelés versatiles (Pask, 1976). Ainsi, les personnes ayant un style cognitif global auraient tendance à traiter l'information de façon plus globale également, il serait donc plus aisé pour elles de tirer profit d'une interface écologique qui présente l'information de façon schématique et globale. Il pourrait être intéressant de contrôler cette dimension dans de futures études (Cegarra & Hoc, 2006 ; Howie, 1996).

Le second élément d'interrogation soulevé par cette étude est que l'interface de notre compagnon virtuel ne fait pas disparaitre 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. 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 concluante. Une formation à l'inhibition du schème trompeur, inspirée de l'inhibition aux biais de raisonnement (Moutier et al., 2002), semble donc indispensable à la bonne utilisation du compagnon virtuel.

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 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 performant. 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 maitriser 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. 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 utilisés le compagnon virtuel sont également capables de mettre en place des actions correctrices appropriées dès le premier cadre étiré.

VI. CONCLUSION

Si certains éléments concernant l'interface du compagnon virtuel peuvent encore améliorés et approfondis, celle-ci semble prometteuse. Cependant, au vu des résultats obtenus lors de cette étude, l'utilisation du compagnon virtuel ne pourra pas remplacer une formation visant à provoquer l'inhibition du 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 lien avec les outils disponibles et les contraintes internes créées dans le matériau lors de l'étirage. Il faudra particulièrement faire attention à respecter les liens entre les différents niveaux de la hiérarchie d'abstraction pour intégrer ces différents éléments à une seule interface (Mazaeva & Bisantz, 2014). Cependant, représenter simultanément ces éléments sur un même écran peut être complexe. La taille de l'écran, celle d'une tablette tactile, sera une contrainte majeure.

En revanche, le compagnon virtuel réel s'adressera à des opérateurs confirmés déjà conscients des problématiques liées à la non-homogénéité des cadres dans un lot. Chez ces opérateurs, les deux schèmes semblent concurrents mais le schème pertinent est difficile à mettre en œuvre à cause du manque d'information. L'utilisation du compagnon virtuel n'aura peut-être donc pas le même effet chez eux.

Enfin, dans l'atelier, les différents niveaux hiérarchiques rencontrés, de l'opérateur au responsable de ligne, en passant par le technicien d'industrialisation, semblent convaincus que le respect des normes de sécurité nécessite la mise en place d'un protocole de production normé et fixé, conforme au schème trompeur. Si l'on n'a pas démontré en conditions réelles les conséquences du schème trompeur sur les résultats d'étirage et d'enroulement, une plus grande flexibilité pourrait être bénéfique en ce qui concerne la rectitude et la planéité.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette thèse, réalisée en collaboration avec des spécialistes d'autres disciplines telles que le physique ou l'informatique, visait en premier lieu à proposer des solutions d'assistance aux procédés de fabrication dans les ateliers du futur. Dans le cadre de la psychologie cognitive et de l'ergonomie, cette problématique soulevait plusieurs questions. Tout d'abord les ateliers du futur considérés constituent des environnements dynamiques avec des contraintes et des incertitudes fortes qui poussent à mettre en œuvre des solutions innovantes afin de mieux contrôler les processus en jeux. Ainsi, l'utilisation de la simulation en cours d'activité ayant fait des progrès considérables, son utilisation dans ces ateliers semble certaine et utile. Cependant, son utilisation soulève une question centrale : comment s'assurer qu'elle soutienne le processus de production tout en maintenant ou en améliorant le niveau de compétences des opérateurs qui l'utilisent ?

Afin de répondre à cette problématique, deux champs théoriques, rarement mis en œuvre simultanément mais, comme nous l'avons vu, complémentaires ont été mobilisés. Le premier concerne l'assistance aux procédés de fabrication dans les environnements dynamiques avec, par exemple, l'analyse cognitive du travail (Vicente, 1999), la conception d'interface écologique (Bennett & Flach, 2011) et le contrôle cognitif (Hoc & Amalberti, 2007). Dans ces champs théoriques, l'accent est mis sur une analyse exhaustive des contraintes de l'environnement de travail et sur l'utilisation, dans les interfaces produites, de représentations qui soutiennent différents niveaux de comportement de l'opérateur. Le second cadre théorique mobilisé concerne le développement des compétences. Ici, l'accent est mis sur l'opérateur, ses compétences, ses représentations mentales et la façon dont elles se construisent.

Le croisement de ces deux champs d'études a soulevé la question suivante : s'il existe, en général, dans les apprentissages des représentations erronées, obstacles (Brousseau, 1989) ou schèmes trompeurs (Pascual-Leone, 1987), ceux-ci ne sont-ils pas présents dans les ateliers, en particulier dans les environnements dynamiques où l'incertitude peut contraindre les opérateurs à construire des représentations à partir d'informations

incomplètes ? Enfin, si de tels schèmes trompeurs existent, peuvent-ils être déconstruits ou inhibés par le biais d'une interface ?

Pour répondre à ces questions, il fallait dans un premier temps établir l'existence d'un tel schème trompeur dans un atelier réel qui correspondait aux critères d'étude relevés : un atelier avec un processus dynamique pour lequel l'accès à l'information est limité. Dans un second temps, l'atelier a été reproduit et étudié dans un micromonde. Enfin, un compagnon virtuel a été conçu et développé pour le micromonde.

I. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS OBTENUS

Lors de la première étude, une analyse de l'activité auprès d'opérateurs d'un atelier d'aéronautique a été réalisée. Cet atelier correspondait aux critères établis car les opérateurs devaient y étirer des cadres métalliques qui subissaient un traitement thermique faisant évoluer les caractéristiques des cadres : il s'agissait bien d'un environnement dynamique (Hoc & Amalberti, 2007). De plus, ces caractéristiques étaient inconnues des opérateurs et difficiles à obtenir de façon générale.

Cette étude a révélé que non seulement des représentations erronées existaient dans l'atelier mais certaines d'entre elles perduraient même chez les opérateurs experts et chez les techniciens d'industrialisation ayant en charge d'élaborer le processus de production. Ces représentations tenaient lieu d'organisateurs de l'activité, nous les avons donc assimilées à des schèmes (Coulet, 2011 ; Vergnaud, 1991). Cependant, comme ces schèmes sont erronés ou appliqués à des situations pour lesquels ils ne sont pas adaptés, ces schèmes ont été considérés comme des schèmes trompeurs (Pascual-Leone, 1987). Notamment, le schème trompeur consistant à régler la machine et à utiliser des outils en fonction des résultats de cadres précédents, alors même que les opérateurs déclaraient que chaque cadre est différent, nous a interpellé. Une campagne de mesure a alors montré l'existence de différences importantes dans la géométrie des pièces, entre les lots d'une même référence et parfois entre les pièces d'un même lot. De plus, les spécialistes en physique des matériaux travaillant sur la simulation du procédé ont déclaré que des différences devaient également exister dans les caractéristiques internes du matériau. Enfin, ces différences expliquaient les

différences obtenues dans les cadres après étirage et la durée des phases de rectifications manuelles des cadres.

Cependant, cet environnement difficilement contrôlable rendait l'étude du schème trompeur assez difficile. C'est pourquoi une deuxième étude, visant à comprendre l'origine du schème trompeur et ses conséquences sur l'activité et les performances, a été réalisée en laboratoire, à l'aide du paradigme du micromonde (Omodei & Wearing, 1995).

Les résultats de cette deuxième étude ont montré que le schème trompeur n'était pas intrinsèque à l'atelier mais qu'il était facilement reproduit dans le micromonde. Ce schème est apparu plus souvent chez les participants ayant des connaissances antérieures. Nous en avons conclu une double origine probable du schème trompeur : à la fois ontogénétique et didactique (Brousseau, 1998). Enfin, des participants ayant reçu un entrainement et une formation les sensibilisant au schème trompeur continuaient pourtant de l'utiliser, ce qui semble démontrer une forte résistance de ce schème.

Les résultats de cette étude ont également montré que le schème trompeur n'a pas d'effet sur les performances de participants novices, n'ayant pas reçu d'entrainement particulier. En effet, ces participants ont des résultats assez faibles quel que soit le schème utilisé. Ainsi, le schème pertinent ne peut pas compenser un manque d'entrainement. En revanche, le schème trompeur a un effet négatif sur les performances de participants ayant reçu un entrainement qui devrait leur permettre de réussir : ceux-ci ont en effet de bons résultats lorsqu'ils n'utilisent pas le schème trompeur.

Enfin, les résultats de la troisième étude ont montré que le compagnon virtuel conçu pour favoriser l'apparition du schème pertinent au détriment du schème trompeur n'a pas l'effet escompté. En effet, la simple utilisation du compagnon virtuel reproduisant une courbe classiquement utilisée en physique, mais sans formation adéquate, n'a pas suffi à empêcher l'activation du schème trompeur (Pascual-Leone, 1995) ni à provoquer son inhibition chez certains participants (Houdé, 2014). De plus, des erreurs importantes ont été produites par les participants utilisant le compagnon virtuel en ce qui concerne le respect du protocole de production. En revanche, le compagnon virtuel a permis aux participants ne mettant pas en œuvre le schème trompeur d'avoir de bons résultats, quantitatifs et qualitatifs. Ce qui semble indiquer qu'il permet le développement de règles au sens de Rasmussen (Rasmussen, 1983) car ils sont capables d'ajuster leur activité de façon précise malgré

l'absence d'outils. Il est également important de noter que ce compagnon n'était pas simple d'utilisation. Outre des erreurs qui sont revenues plusieurs fois, certains ne l'ont simplement pas utilisé. Ainsi, le compagnon virtuel, tel qu'il a été conçu, ne peut assurer à lui seul une amélioration des performances. Une formation à l'utilisation du compagnon virtuel et une sensibilisation à l'existence du schème trompeur (Moutier et al., 2002) sont nécessaires.

II. APPORTS ET LIMITES

Cette thèse a permis d'enrichir la problématique initiale, celle de l'assistance au contrôle de procédés de fabrication, par trois apports principaux. Le premier concerne l'aspect méthodologique. Les deux derniers sont plus importants dans la mesure où ils ont permis de soulever des questions intéressantes concernant des aspects psychologiques de cette problématique.

Le premier apport intéressant de cette thèse concerne l'aspect méthodologique. En effet, afin d'explorer notre champs d'étude, l'existence du schème trompeur, un micromonde a été entièrement conçu et développé. Ce micromonde a été développé à partir de l'analyse de l'activité dans un atelier réel. De plus, les résultats ont montré que les participants aux études sur le micromonde ont mis en œuvre une organisation de leur activité proche de celle des opérateurs réels, ce qui atteste de la validité de cet outil dans le cadre de notre étude. Ce micromonde peut certes être amélioré, mais il pourrait permettre en l'état de réaliser d'autres études permettant d'approfondir la problématique. Cependant, si cet outil a été précieux dans le cadre de cette thèse, sa mise en œuvre a nécessité du temps et des compétences pas toujours disponibles dans le cadre d'une démarche d'ergonomie standard. Ainsi, reproduire une activité réelle dans le cadre d'un tel paradigme parait difficile lorsque les contraintes temporelles sont fortes, par exemple lors de l'intervention d'un ergonome dans un contexte industriel. De même, les études réalisées sur le micromonde que nous avons présentées gagneraient à être reproduites sur un échantillon plus large, en prenant en compte les différents facteurs que nous avons pu identifier.

Le deuxième apport important de cette thèse concerne la mise en évidence d'un schème trompeur dans une activité de travail chez des personnes adultes et, en particulier, chez un expert. Cet élément souligne les limites d'une approche de conception qui n'étudierait que

le comportement et les compétences d'experts de la tâche, sans croiser les sources et les points de vue. De plus, le schème trompeur que nous avons identifié est présent chez d'autres adultes non spécialistes du domaine ce qui soulève la question de sa généralité. Les résultats de cette thèse indiquent que ce schème trompeur est couteux à inhiber et difficile à déconstruire, ce qui le rend d'autant plus intéressant à étudier. Enfin, cette thèse a apporté des éléments concernant les processus psychologiques et la nature du schème trompeur : il y a manifestement un lien entre schème trompeur (Pascual-Leone, 1995), heuristique de décision, obstacle (Brousseau, 1998) et biais cognitif (Moutier et al., 2002). La nature exacte de ce lien reste cependant à déterminer. On pourrait reprendre la formulation de Vergnaud (2001) lorsqu'il parle des algorithmes : une heuristique de décision est un schème mais tous les schèmes de sont pas des heuristiques. En revanche, les heuristiques ne sont pas forcément des schèmes trompeurs car, le plus souvent, elles permettent de gérer efficacement les situations et les opérateurs experts sont capables de distinguer, parmi les situations, celles auxquelles une heuristique peut s'appliquer (Gigerenzer & Gaissmaier, 2011). Le lien avec les obstacles et le schème trompeur semble plus direct, même si le concept d'obstacle n'est pas forcément présenté comme un organisateur de l'activité, plutôt comme un frein aux apprentissages (Brousseau, 1998). Il en va de même pour les biais cognitifs : ce sont des concepts proches, même s'il manque une référence à l'activité quand on évoque ces derniers.

Enfin, le dernier élément important à noter est que l'utilisation de notre interface seule ne suffit pas à faire disparaitre le schème trompeur. Notre interface a uniquement permis aux participants de développer des règles précises concernant les programmes à utiliser sur le micromonde. Cependant, l'interface que nous avons utilisée dans le micromonde n'était pas complète, ce qui incitait les participants à rechercher les effets des éléments non représentés. De la même façon, notre population n'était pas identique à la population à laquelle le compagnon virtuel réel sera destiné, notamment en termes de compétences. Ce qui soulève de nouvelles questions.

III. PERSPECTIVES

En effet, les limites présentées au paragraphe précédent engendrent de nouvelles perspectives expérimentales et opérationnelles.

En ce qui concerne le déploiement du compagnon virtuel dans l'atelier réel, celui-ci devra certainement s'accompagner d'une formation des opérateurs. Le compagnon virtuel sera ensuite modifié et amélioré en fonction des retours faits par les opérateurs. Mais de façon plus générale, cette thèse démontre qu'il peut être intéressant d'interroger l'existence de schèmes trompeurs dans l'industrie, et ce quel que soit le niveau hiérarchique de l'organisation. En effet, de telles représentations erronées pourraient exister dans d'autres domaines et nécessiter la mise en œuvre de remédiations, qu'elles soient sous la forme d'une interface homme-machine ou de formations spécifiques.

D'un point de vue expérimental, il pourrait être intéressant d'étudier l'effet d'un compagnon virtuel semblable, plus complet qui prendrait en compte à la fois les caractéristiques internes et la géométrie des cadres. Cela nécessiterait de concevoir et développer un nouveau compagnon virtuel pour le micromonde.

En utilisant le micromonde et le compagnon virtuel tels qu'ils sont implémentés à l'heure actuelle, il pourrait être intéressant d'étudier l'effet combiné du compagnon virtuel et d'une formation qui serait soit centrée sur l'utilisation du compagnon virtuel, soit centrée sur l'inhibition du schème trompeur. Cela permettrait d'approfondir l'étude du schème trompeur et des moyens nécessaires à son inhibition. Enfin, il pourrait être intéressant d'étudier de la même manière d'autres schèmes trompeurs déjà connus que ce soit dans le développement de l'enfant ou chez l'adulte.

BIBLIOGRAPHIE

Amalberti, R. (2001). La maîtrise des situations dynamiques. *Psychologie française*, *46*(2), 107–118.

Attia, S., Gratia, E., De Herde, A., & Hensen, J. L. (2012). Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and buildings*, *49*, 2–15.

Bahner, J. E., Hüper, A.-D., & Manzey, D. (2008). Misuse of automated decision aids: Complacency, automation bias and the impact of training experience. *International Journal of Human-Computer Studies*, *66*(9), 688‑699. http://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2008.06.001

Becu, N., Neef, A., Schreinemachers, P., & Sangkapitux, C. (2008). Participatory computer simulation to support collective decision-making: potential and limits of stakeholder involvement. *Land Use Policy*, *25*(4), 498–509.

Bennett, K. B., & Flach, J. (2011). *Display and interface design: subtle science, exact art*. Boca Raton; London: CRC Press.

Bideaud, J., & Houdé, O. (1989). Le développement des catégorisations : « capture » logique ou « capture » écologique des propriétés des objets ? *L'année psychologique*, *89*(1), 87‑123. http://doi.org/10.3406/psy.1989.29319

Bideaud, J., & Lautrey, J. (1983). De la résolution empirique à la résolution logique du problème d'inclusion : Évolution des réponses en fonction de l'âge et des situations expérimentales. *Cahiers de Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition*. Consulté à l'adresse http://psycnet.apa.org/psycinfo/1984-20048-001

Boot, W. R., Kramer, A. F., Simons, D. J., Fabiani, M., & Gratton, G. (2008). The effects of video game playing on attention, memory, and executive control. *Acta Psychologica*, *129*(3), 387‑398. http://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.09.005

Borst, C., Flach, J. M., & Ellerbroek, J. (2014). Beyond Ecological Interface Design: Lessons From Concerns and Misconceptions. Consulté à l'adresse http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6963425

Boucheix, J.-M. (2003). Simulation et compréhension de documents techniques : le cas de la formation des grutiers. *Le travail humain*, *Vol. 66*(3), 253‑282. http://doi.org/10.3917/th.663.0253

Brousseau, G. (1989). Obstacles épistémologiques, conflicts socio-cognitifs et ingéniérie didactique. In *Les obstacles épistémologiques et le conflit socio-cognitif. Construction des savoirs (obstacles et conflits). Colloque internationale CIRADE, Université de Québec, Canadá*. Consulté à l'adresse https://hal.inria.fr/docs/00/51/65/86/PDF/Obstacles_epistemologiques_conflits_socio_cognitifs_et_ingenierie_didactique89.pdf

Brousseau, G. (1998). Théorie des situations didactiques, [Textes rassemblés et préparés par N. Balacheff, M. Cooper, R. Sutherland, V. Warfield], Grenoble : La Pensée Sauvage-Éditions, coll. *Recherches en didactique des mathématiques*.

Brousseau, G. (2004). Les représentations : étude en théorie des situations didactiques. *Revue des sciences de l'éducation*, *30*(2), 241–277.

Cegarra, J., & Hoc, J.-M. (2006). Cognitive styles as an explanation of experts' individual differences: A case study in computer-assisted troubleshooting diagnosis. *International Journal of Human-Computer Studies*, *64*(2), 123–136.

Centeno, M. A., & Carrillo, M. (2001). Challenges of introducing simulation as a decision making tool. In *Simulation Conference, 2001. Proceedings of the Winter* (Vol. 1, p. 17–21). IEEE. Consulté à l'adresse http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=977241

Charness, N., & Tuffiash, M. (2008). The Role of Expertise Research and Human Factors in Capturing, Explaining, and Producing Superior Performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *50*(3), 427‑432. http://doi.org/10.1518/001872008X312206

Charron, C. (1998). *Ruptures et continuités dans la construction des nombres*. Atelier national de Reproduction des Thèses.

Charron, C., Dumet, N., Guéguen, N., Lieury, A., & Rusinek, S. (2007). *La psychologie de A à Z, 500 mots pour comprendre*. Paris : Dunod. 208p.

Charron, C., Hoc, J.-M., & Milleville-Pennel, I. (2010). Cognitive control by brain-injured car drivers: an exploratory study. *Ergonomics*, *53*(12), 1434‑1445. http://doi.org/10.1080/00140139.2010.532880

Choi, J. H., & Lee, H.-J. (2012). Facets of simplicity for the smartphone interface: A structural model. *International Journal of Human-Computer Studies*, *70*(2), 129‑142. http://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2011.09.002

Christoffersen, K., Hunter, C. N., & Vicente, K. J. (1996). A Longitudinal Study of the Effects of Ecological Interface Design on Skill Acquisition. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *38*(3), 523‑541. http://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*, 729‑762.

Cornillon, P.-A., Guyader, A., Husson, F., Jégou, N., Josse, J., Kloareg, M., Matzner-Lober, E, & Rouvière, L. (2008). *Statistique avec R*. Presses Universitaires de Rennes

Cornillon, P.-A., & Matzner-Lober, E. (2007). *Régression : théorie et applications*. Paris : Springer.

Coulet, J.-C. (2011). La notion de compétence : un modèle pour décrire, évaluer et développer les compétences. *Le travail humain*, *74*(1), 1–30.

Debanne, T., & Chauvin, C. (2013). Cognitive control in the activity of handball coach. In *International Conference on Naturalistic Decision-Making* (p. 22–24). Consulté à l'adresse http://www.ndm11.org/proceedings/papers/ndm11-157.pdf

Dreyfus, S. E., & Dreyfus, H. L. (1980). *A five-stage model of the mental activities involved in directed skill acquisition*. DTIC Document. Consulté à l'adresse

http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA084551

Drivalou, S., & Marmaras, N. (2009). Supporting skill-, rule-, and knowledge-based behaviour through an ecological interface: An industry-scale application. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *39*(6), 947–965.

Eco, U. (1988). *Le Signe : histoire et analyse d'un concept*. (J.-M. Klinkenberg, Trad.). Paris : Librairie Générale Française.

Eco, U. (1992). *La production des signes*. Paris : Librairie générale française.

Ericsson, K. A. (2008). Deliberate practice and acquisition of expert performance: a general overview. *Academic emergency medicine: official journal of the Society for Academic Emergency Medicine*, *15*(11), 988–994.

Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological review*, *100*(3), 363.

Falzon, P. (2005). Developing ergonomics, developing people. In *8th South-east Asian Ergonomics Society Conference SEAES-IPS (Plenary paper)*. Consulté à l'adresse http://ergonomie.cnam.fr/equipe/falzon/articles_pf/developing_erg_05.pdf

Farrington-Darby, T., & Wilson, J. R. (2006). The nature of expertise: A review. *Applied Ergonomics*, *37*(1), 17‑32. http://doi.org/10.1016/j.apergo.2005.09.001

Fiebig, C., Hayes, C., & Parzen, M. (1997). Development of expertise in complex domains. In *Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation, 1997 IEEE International Conference on* (Vol. 3, p. 2684–2689).

Flach, J. (2015). Supporting productive thinking: The semiotic context for Cognitive Systems Engineering (CSE). *Applied ergonomics*. Consulté à l'adresse http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687015300739

Gibson, F. P., Fichman, M., & Plaut, D. C. (1997). Learning in dynamic decision tasks: Computational model and empirical evidence. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *71*(1), 1–35.

Gigerenzer, G., & Gaissmaier, W. (2011). Heuristic Decision Making. *Annual Review of Psychology*, *62*(1), 451‑482. http://doi.org/10.1146/annurev-psych-120709-145346

Gonzalez, C. (2005). Decision support for real-time, dynamic decision-making tasks. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *96*(2), 142‑154. http://doi.org/10.1016/j.obhdp.2004.11.002

Green, C. S., & Bavelier, D. (2003). Action video game modifies visual selective attention. *Nature*, *423*(6939), 534–537.

Ham, D.-H., & Yoon, W. C. (2001). The effects of presenting functionally abstracted information in fault diagnosis tasks. *Reliability Engineering & System Safety*, *73*(2), 103‑119. http://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00053-9

Hilliard, A. (2012). Applying Work Domain Analysis to Scope Micro-or Scaled World Simulator Design: A Petrochemical Domain Case Study. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 56, p. 378–382). SAGE Publications. Consulté à l'adresse http://pro.sagepub.com/content/56/1/378.short

Hoc, J.-M. (2000). La relation homme-machine en situation dynamique. *Revue d'intelligence artificielle*, *14*(1-2), 55–71.

Hoc, J.-M. (2001). Towards a cognitive approach to human–machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, *54*(4), 509–540.

Hoc, J.-M. (2005). Cooperation between human cognition and technology in dynamic situations. *Intelligence and Technology: the impact of tools on the nature and levels of human ability*, 135–157.

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.

Hoc, J.-M., Amalberti, R., & Plee, G. (2000). Vitesse du processus et temps partagé : Planification et concurrence attentionnelle. *L'année Psychologique*, *100*(4), 629–660.

Hoc, J.-M., & Moulin, L. (1994). Rapidité du processus contrôlé et planification dans un micro-monde dynamique. *L'année psychologique*, *94*(4), 521‑551. http://doi.org/10.3406/psy.1994.28787

Høseggen, R., Wachenfeldt, B. J., & Hanssen, S. O. (2008). Building simulation as an assisting tool in decision making: Case study: With or without a double-skin façade? *Energy and Buildings*, *40*(5), 821–827.

Houdé, O. (2014). Inhiber pour raisonner : Le système 3 (exécutif). *Que sais-je ?*, 73‑111.

Houdé, O., & Winnykammen, F. (1992). Note de synthèse [Les apprentissages cognitifs individuels et interindividuels]. *Revue française de pédagogie*, *98*(1), 83–103.

Howie, D. E. (1996). *Shaping expertise through ecological interface design: strategies, metacognition, and individual differences.* University of Toronto. Consulté à l'adresse http://cel.mie.utoronto.ca/wp-content/uploads/CEL-96-01.pdf

Jamieson, G. A., Miller, C. A., Ho, W. H., & Vicente, K. J. (2007). Integrating Task- and Work Domain-Based Work Analyses in Ecological Interface Design: A Process Control Case Study. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, *37*(6), 887‑905. http://doi.org/10.1109/TSMCA.2007.904736

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. http://doi.org/10.1016/S0098-1354(01)00678-0

Klehe, U.-C., & Anderson, N. (2007). Working hard and working smart: motivation and ability during typical and maximum performance. *Journal of Applied Psychology*, *92*(4), 978.

Lintern, G. (2006). A functional workspace for military analysis of insurgent operations. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *36*(5), 409‑422. http://doi.org/10.1016/j.ergon.2006.01.005

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*, 1555343414521424.

McIlroy, R. C., & Stanton, N. (2015). Ecological Interface Design Two Decades On: Whatever Happened to the SRK Taxonomy? *Human-Machine Systems, IEEE Transactions on*, *45*(2), 145–163.

McIlroy, R. C., & Stanton, N. A. (2011). Getting past first base: Going all the way with Cognitive Work Analysis. *Special Section: Ergonomics, health and working time organization*, *42*(2), 358‑370. http://doi.org/10.1016/j.apergo.2010.08.006

Merri, M. (2007). Activité humaine et conceptualisation : questions à Gérard Vergnaud. Presses Universitaires du Mirail.

Miller, C. S., Lehman, J. F., & Koedinger, K. R. (1999). Goals and learning in microworlds. *Cognitive Science*, *23*(3), 305–336.

Mollenhauer, M. A., Dingus, T. A., Carney, C., Hankey, J. M., & Jahns, S. (1997). Anti-lock brake systems: An assessment of training on driver effectiveness. *Accident Analysis & Prevention*, *29*(1), 97–108.

Mony, P. (1938). G. Bachelard, La Formation De L'esprit Scientifique. Consulté à l'adresse http://philpapers.org/rec/MONGBL-2

Morineau, T., Hoc, J.-M., & Denecker, P. (2003). Cognitive control levels in air traffic Radar Controler activity. *The international Journal Of Aviation Psychology*, *13*(2), 107‑130.

Moutier, S., Angeard, N., & Houdé, O. (2002). Deductive reasoning and matching-bias inhibition training: Evidence from a debiasing paradigm (English). *Think. reason.*, *8*(3), 205‑224.

Naikar, N., Hopcroft, R., & Moylan, A. (2005). *Work domain analysis: Theoretical concepts and methodology*. DTIC Document. Consulté à l'adresse http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA449707

Omodei, M. M., & Wearing, A. J. (1995). The Fire Chief microworld generating program: An illustration of computer-simulated microworlds as an experimental paradigm for studying complex decision-making behavior. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *27*(3), 303–316.

Osman, M. (2010). Controlling uncertainty: A review of human behavior in complex dynamic environments. *Psychological Bulletin*, *136*(1), 65‑86. http://doi.org/10.1037/a0017815

Parasuraman, R., & Manzey, D. H. (2010). Complacency and Bias in Human Use of Automation: An Attentional Integration. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *52*(3), 381‑410. http://doi.org/10.1177/0018720810376055

Parasuraman, R., Molloy, R., & Singh, I. L. (1993). Performance consequences of automation-induced'complacency'. *The International Journal of Aviation Psychology*, *3*(1), 1–23.

Pascual-Leone, J. (1987). Organismic processes for neo-Piagetian theories: A dialectical causal account of cognitive development. *International Journal of Psychology*, *22*(5-6), 531–570.

Pascual-Leone, J. (1995). Learning and development as dialectical factors in cognitive growth. *Human Development*, *38*(6), 338–348.

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. http://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 (éd.), *The Developmental Relations among Mind, Brain and Education* (p. 49‑82). Dordrecht: Springer Netherlands. Consulté à l'adresse http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-3666-7_3

Pask, G. (1976). Styles and strategies of learning. *British journal of educational psychology*, *46*(2), 128–148.

Pask, G., & Scott, B. C. E. (1972). Learning strategies and individual competence. *International Journal of Man-Machine Studies*, *4*(3), 217‑253. http://doi.org/10.1016/S0020-7373(72)80004-X

Pastré, P. (1994). Évolution des compétences en formation : le cas des régleurs de presse à injecter. *Rapport de recherche MESR–AGEFOS PME Bourgogne*, (91).

Pastré, P. (2005). *Apprendre par la simulation : de l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. Octarès.

Pastré, P. (2007). Champs conceptuels et champs professionnels. In M. Merri (éd.) *Activité humaine et conceptualisation : questions à Gérard Vergnaud*. Presses Universitaires du Mirail.

Pastré, P., Parage, P., Richard, J.-F., Sander, E., Labat, J.-M., & Futtersack, M. (2009). La résolution de problèmes professionnels sur simulateur. *Activités, (6)*, *1*, 3–28.

Piaget, J., & Inhelder, B. (1966). *La psychologie de l'enfant*. Presses universitaires de France Paris. Consulté à l'adresse http://bu.u-bourgogne.fr/clientBookline/service/reference.asp?INSTANCE=EXPLOITATION&OUTPUT=PORTAL&DOCID=40358&DOCBASE=CATALOGUE

Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, (3), 257–266.

Rasmussen, J. (1986). *A framework for cognitive task analysis in systems design*. Springer. Consulté à l'adresse http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-50329-0_12

Reising, V. D. C., & Sanderson, P. M. (2002). Ecological interface design for Pasteurizer II: A process description of semantic mapping. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *44*(2), 222–247.

Rogalski, J. (2004). Psychological analysis of complex work environments. *European perspectives on learning at work: the acquisition of work process knowledge*, 218–236.

Rogalski, J. (2005). Articulation des théories de Piaget et de Vygotsky, outils pour la didactique. *Actes du séminaire national de didactique des mathématiques*, 237–262.

Rogalski, J., & Marquié, J.-C. (2004). Chapitre 7. Évolution des compétences et des performances. *Le Travail humain*, 141–173.

Rogalski, J., & Samurçay, R. (1991). Effects of expertise on knowledge representation in dynamic environment management. In *Proceedings of the Third European Conference Cognitive Science Approaches to Process Control.* Cardiff: University of Wales.

Shea, J. B., & Paull, G. (1996). Capturing expertise in Sports. *The road to excellence: The acquisition of expert performance in the arts and sciences, sports, and games*, 321–335.

Sterman, J. D. (1989). Misperceptions of feedback in dynamic decision making. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *43*(3), 301‑335. http://doi.org/10.1016/0749-5978(89)90041-1

Terzi, S., & Cavalieri, S. (2004). Simulation in the supply chain context: a survey. *Computers in industry*, *53*(1), 3–16.

Tirosh, D., & Stavy, R. (1999). Intuitive rules: A way to explain and predict students' reasoning. In D. Tirosh (éd.) *Forms of Mathematical Knowledge* (p. 51–66). Springer. Consulté à l'adresse http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-1584-3_3

Torenvliet, G. L., Jamieson, G. A., & Vicente, K. J. (2000). Making the most of ecological interface design: the role of individual differences. *Applied Ergonomics*, *31*(4), 395–408.

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* (p. 391–402). ATIEF ; INRP. Consulté à l'adresse https://edutice.archives-ouvertes.fr/edutice-00000154/

Tricot, A., & Tricot, M. (2000). Un cadre formel pour interpréter les liens entre utilisabilité et utilité des systèmes d'information. In *Colloque Ergo-IHM*. Consulté à l'adresse https://www.researchgate.net/profile/Andre_Tricot/publication/36380836_Un_cadre_formel_pour_interprter_les_liens_entre_utilisabilit_et_utilit_des_systmes_d'information/links/53e528b70cf21cc29fcc09d3.pdf

Upton, C., & Doherty, G. (2008). Extending Ecological Interface Design principles: A manufacturing case study. *International Journal of Human-Computer Studies*, *66*(4), 271‑286. http://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2007.10.007

Van Der Zee, D.-J., & Van Der Vorst, J. G. (2005). A modeling framework for supply chain simulation: Opportunities for improved decision making*. *Decision Sciences*, *36*(1), 65–95.

Van Schaik, P., & Ling, J. (2009). The role of context in perceptions of the aesthetics of web pages over time. *International Journal of Human-Computer Studies*, *67*(1), 79‑89. http://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2008.09.012

Vergnaud, G. (1982). Cognitive and developmental psychology and research in mathematics education: some theoretical and methodological issues. *For the learning of Mathematics*, *3*(2), 31–41.

Vergnaud, G. (1988). Multiplicative structures. *Number concepts and operations in the middle grades*, *2*. Consulté à l'adresse http://www.nrdc.org.uk/anr_details.asp?ID=421

Vergnaud, G. (1991). La théorie des champs conceptuels. *Recherche en didactique des mathématiques*, *10*(2.3), 133‑169.

Vergnaud, G. (1996). Au fond de l'action, la conceptualisation. *Savoirs théoriques et savoirs d'action*, 275–292.

Vergnaud, G. (2001). Piaget visité par la didactique. *Intellectica*, *2*(23), 106–123.

Vermersch, P. (1990). Questionner l'action : l'entretien d'explicitation. *Psychologie française*, *35*(3), 227–235.

Vermersch, P. (1994). L'entretien d'explicitation.

Vicente, K. J. (1995). Cognitive work analysis: implications for microworld research on human-machine interaction. In *Systems, Man and Cybernetics, 1995. Intelligent Systems for the 21st Century., IEEE International Conference on* (Vol. 4, p. 3432–3436). Consulté à l'adresse http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=538317

Vicente, K. J. (1999). *Cognitive work analysis: Toward safe, productive, and healthy computer-based work*. CRC Press. Consulté à l'adresse http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=2lJHL_ZmsGoC&oi=fnd&pg=PP1&dq=cognitive+work+analysis&ots=kUn1ZrKgfx&sig=4Wm_9fVM3vuvS1L81kTYXJTxchI

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.

Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1992). Ecological interface design: Theoretical foundations. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, *22*(4), 589–606.

Vygotski, L. S. (1935). Pensée et langage, trad. F. *Sève, Paris : La Dispute*.

Weil-Barais, A. (1994). Heuristic value of the notion of zone of proximal development in the study of child and adolescent construction of concepts in physics. *European Journal of Psychology of Education*, *9*(4), 367‑383. http://doi.org/10.1007/BF03172908

Weil-Barais, A., & Resta-Schweitzer, M. (2008). Approche cognitive et développementale de la médiation en contexte d'enseignement–apprentissage. *Nouvelle Revue AIS*, *42*, 83–98.

Weil-Barais, A., & Séré. (1988). Nouvelle approche de la conservation des grandeurs physiques. Étude transversale de la conservation de la quantité de gaz auprès d'élèves de 11 à 15 ans. *Enfance*, *41*(1), 21‑37. http://doi.org/10.3406/enfan.1988.1851

ANNEXES

ANNEXE 1 : GRILLES D'ENTRETIEN DE L'ÉTUDE 1

Guide d'entretien « opérateurs »

Bonjour, merci de recevoir
Enregistrement : pour ne rien oublier, ne sera pas diffusé.
Objectif : bien comprendre le fonctionnement de la tâche et la façon dont vous procédez.
I - RÈGLES D'ACTION
Comment faites-vous pour réaliser l'activité ?
- Toutes les étapes depuis l'arrivée de la poutre

II - ANTICIPATIONS
Qu'attendez-vous comme résultats quand vous réalisez l'activité ?
III - INVARIANTS OPÉRATOIRES
Pourquoi vous faites ça ?
- Quelles sont les connaissances indispensables ?
- Que tenez-vous pour pertinent ?

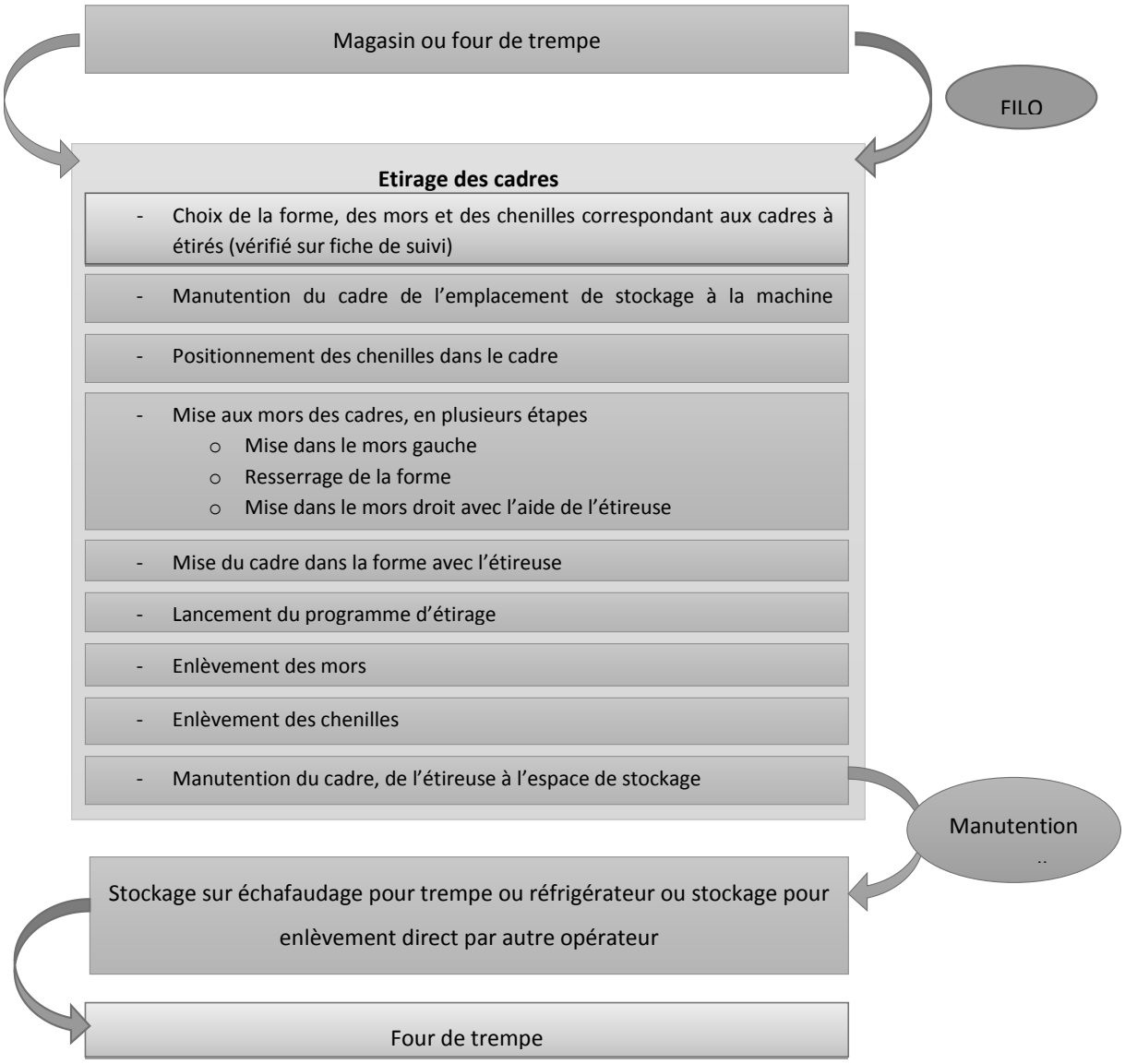
IV - INFÉRENCES
Est-ce que vous faites toujours comme ça ?
- Sur quoi porte votre attention ?
- Quelles sont les informations que vous regardez avant d'agir ?
- De quoi tenez-vous compte quand vous réalisez l'activité ?

V - AUTRES QUESTIONS
- Pourquoi vous mesurez l'étirement (des fois mais pas tout le temps) ?
- Comment vous savez que cette fois il faut mesurer ?
- Pourquoi vous vérifier la planéité ?
- Comment vous savez qu'il faut la vérifier cette fois et pas d'autres ?
- Pourquoi vous vérifier l'angle ?
- Pourquoi vous changer la vitesse d'étirage ?
- Qu'est-ce que ça change ?
- Comment se passe la mise en place d'un nouveau processus ?

Merci pour votre aide

Figure utilisée pour faciliter les échanges et relancer l'entretien

Processus d'étirage des cadres



Guide d'entretien « technicien industriel »

Bonjour, merci de recevoir

Enregistrement : pour ne rien oublier, ne sera pas diffusé.

Objectif : bien comprendre le fonctionnement de la tâche et la façon dont vous procédez.

I - RÈGLES D'ACTION

Comment faites-vous pour réaliser l'activité ?

II - ANTICIPATIONS

Qu'attendez-vous comme résultats quand vous réalisez l'activité ?

III - INVARIANTS OPÉRATOIRES

Pourquoi vous faites ça ?

- Quelles sont les connaissances indispensables ?
- Que tenez-vous pour pertinent ?

IV - INFÉRENCES

Est-ce que vous faites toujours comme ça ?

- Sur quoi porte votre attention ?
- Quelles sont les informations que vous regardez avant d'agir ?
- De quoi tenez-vous compte quand vous réalisez l'activité ?

V - AUTRES QUESTIONS

- Quels sont les paramètres importants ?
- Pourquoi certains programmes laissent beaucoup de marge de manœuvre à l'opérateur alors que pour d'autres il ne change que la vitesse ?
- Pourquoi certaines pièces partent en trempe et pas d'autres ?
- Quelles sont les difficultés dans l'élaboration des protocoles de production ?
- Pourquoi le logiciel de simulation actuel n'est que peu utilisé ?
- Pensez-vous qu'autrement il pourrait être plus efficace ?
- Comment se passe la mise en place d'un nouveau processus ?
- Y aura-t-il bientôt un nouveau protocole à mettre en place ?

Merci pour votre aide

ANNEXE 2 : EXTRAITS DES ANALYSES EN TERME DE SCHÈMES DES ENTRETIENS DE L'ÉTUDE 1[9]

Opérateur novice

NUM	VERBATIM	SCHEME	THEME	QUESTION
1	ça ne fait qu'une semaine que j'utilise la 100T, oui 15 jours, non une semaine et demi au total en pilote	ALT	MACHINE	
2	et avant je ne l'avais utilisé que deux ou trois fois en matelot	ALT	MACHINE	
3	"c'est plus facile à faire qu'à dire"	ALT	ETIRAGE	
4	Déjà	INF	ETAPE	I
7	on trie de manière à programmer la machine	ANT	PROGRAMME	I
15	on va chercher le programme	RA	PROGRAMME	I
16	Et	INF	ETAPE	I
17	on va voir si ça correspond à la FI	RA	PLAN	I
18	Ensuite	INF	ETAPE	I
19	on va installer les machines : chenilles cales ou pas de cales de fond de forme	RA	OUTILLAGE	I
22	on va lancer le programme pour démarrer la machine	RA	PROGRAMME	I
23	Logique	IO	CERTITUDE	I
24	Ensuite	INF	ETAPE	I
25	il faut mettre les pièces dans les mors,	RA	PROFILE	I
26	mettre les chenilles	RA	OUTILLAGE	I
27	lancer le programme	RA	PROGRAMME	I
28	faire attention au bon déroulement	RA	ETIRAGE	I
29	vérifier l'enroulement	RA	ETIRAGE	I
30	Puis	INF	ETAPE	I
31	vérifier si la pièce est bonne	RA	PROFILE	I
32	Puis	INF	ETAPE	I
33	on la met sur le panier	RA	PROFILE	I
34	puis, […]	INF	ETAPE	I
35	même processus	IO	ETIRAGE	I
36	en deuxième passe	INF	ETAPE	I
37	on revérifie le programme	RA	PROGRAMME	I
38	le dossier	RA	PLAN	I
39	on fait la mise en mors	RA	ETIRAGE	I
40	on change de programme	RA	PROGRAMME	I
41	on vérifie la première	RA	PROFILE	I
42	en deuxième passe	INF	ETAPE	I
43	même process que la première	IO	ETIRAGE	I
44	à chaque nouvelle phase	INF	ETIRAGE	I
45	on relance le programme	RA	PROGRAMME	I

[9] Pour des raisons de confidentialité et d'anonymat, seuls des extraits sont présentés ici. Les entretiens et analyses intégrales sont disponibles sur demande.

NUM	VERBATIM	SCHEME	THEME	QUESTION
53	pour engager la pièce dans la forme	ANT	PROFILE	I
54	fermeture de la forme, enroulement, étirage, réouverture des mors	IO	ETIRAGE	I
55	en deuxième passe	INF	ETAPE	I
56	on ferme la plaque	RA	ETIRAGE	I
57	on met aux mors	RA	OUTILLAGE	I
58	on rouvre la forme	RA	ETIRAGE	I
59	Puis	INF	ETAPE	I
60	remise au mors manuellement	RA	OUTILLAGE	I
61	quand un peu centré	INF	ETIRAGE	I
62	on ferme la forme	RA	ETIRAGE	I
63	on met au mors droit	RA	OUTILLAGE	I
64	on rouvre	RA	MACHINE	I
65	on positionne manuellement approximativement	RA	PROFILE	I
66	on relance le programme	RA	PROGRAMME	I
67	ça se remet bien en place d'elle-même, la forme se ferme et étire	IO	ETIRAGE	I
68	puis ouverture	IO	MACHINE	I
69	on met au frigo	RA	PROFILE	II
70	si temps trop court après le traitement thermique	INF	TREMPE	II
71	environ deux heures après [le traitement thermique	INF	TREMPE	II
72	ce sera frigo	RA	FRIGO	II
73	sinon	INF	AUTRE	II
74	c'est la même chose que ce soit des U ou des T	IO	PROFILE	II
75	on ajuste la chenille et le cale	RA	OUTILLAGE	II
76	et changement de programme	RA	PROGRAMME	II
77	c'est conçu comme ça,	IO	ETIRAGE	II
78	il n'y a pas d'autre moyen de le faire	IO	ETIRAGE	II
79	c'est le plus logique	IO	ETIRAGE	II
80	on essaye de les avoir le mieux possible	ANT	PROFILE	III
81	mais ça dépend de la largeur des profilés	INF	PROFILE	III
82	[quand faut-il vérifier]	RA	AUTRE	IV
83	si une plus longue que l'autre	INF	PROFILE	IV
84	si bizarre	INF	PROFILE	IV
85	on regarde sur la table	RA	CALIBRAGE	IV
86	on verra à l'œil que c'est pas bon	ANT	PROFILE	IV
87	surtout à la deuxième pièce	INF	PROFILE	IV
88	on voit s'il y a une différence, si un vérin tire plus que l'autre	ANT	MACHINE	IV
89	si la longueur est différente	INF	PROFILE	IV
90	il faudra plus de calibrage, des fois plus de boulot	ANT	CALIBRAGE	IV
91	meilleur est l'étirage, moins il y a de boulot	ANT	ETIRAGE	IV
92	il y en a jamais une de bonne	ANT	PROFILE	IV
93	il y a toujours du boulot	IO	CALIBRAGE	IV
94	on ne peut rien faire	IO	ETIRAGE	IV
95	car les chenilles ont toujours la même taille et pas les profilés, enfin pas la même largeur	IO	OUTILLAGE	IV
96	la longueur reste la même, normalement	IO	PROFILE	IV
97	du coup les pièces sont bizarres	ANT	PROFILE	IV
98	Profilé mal laminé : c'est comme une baguette, ça ressemble à une baguette mais il n'y en a pas une pareille !	IO	PROFILE	IV
99	En général c'est tout le lot, si on en a deux qui se suivent et qui sont pas pareilles, on regarde le dossier le numéro de lot	IO	PROFILE	IV
100	les pièces peuvent être trop ouvertes ou trop fermées.	ANT	PROFILE	IV
101	Des fois c'est parce qu'elles sont mal accrochées pour aller à la trempe,	INF	TREMPE	IV
104	On ne peut rien faire à l'étirage pour compenser	IO	ETIRAGE	IV
105	Sauf en mode manuel "mais je ne sais pas faire moi"	IO	ETIRAGE	IV

NUM	VERBATIM	SCHEME	THEME	QUESTION
106	pour étirer un peu plus	RA	ETIRAGE	IV
107	mais on gagne au milieu mais sur les bords ça s'allonge et ça déforme tout	ANT	ETIRAGE	IV
108	On ne vérifie pas la matière entrant	RA	PROFILE	IV
109	c'est contrôlé après	IO	CALIBRAGE	IV
110	la camelote doit être conforme	ANT	PROFILE	IV
111	C'est pas la même vitesse	RA	VITESSE	V
112	En début de trempe ou en fin de trempe	INF	TREMPE	V
113	ou si les pièces sont vraiment moches	INF	PROFILE	V
114	on fait des test	RA	ETIRAGE	V
115	quand c'est trop longtemps dehors	INF	PROFILE	V
116	les pièces ont plus de ressort, il vaut mieux	IO	PROFILE	V
117	tirer moins	RA	ETIRAGE	V
118	Une barre molle	INF	PROFILE	V
119	reste cintrée	ANT	PROFILE	V
120	une barre dure	INF	PROFILE	V
121	revient plus à sa position initial	ANT	PROFILE	V
122	Si on tire vite	INF	VITESSE	V
123	c'est comme avec une gomme	IO	PROFILE	V
124	si on va trop vite ça risque de péter	ANT	VITESSE	V
125	alors que doucement	INF	VITESSE	V
126	ça a plus de flexibilité	IO	PROFILE	V
127	On mesure	RA	CALIBRAGE	VI
128	la première pièce	INF	PROFILE	VI
129	sinon quand il y a une pièce qui déconne	INF	PROFILE	VI
130	Si la première déconne	INF	PROFILE	VI
131	on arrête là	RA	ETIRAGE	VI
138	Plus elles sont bonnes en première passe, plus elles sont bonnes en deuxième	IO	ETIRAGE	VI
139	Soit c'est un problème de machine	IO	MACHINE	VI
140	ça fait trois ans qu'elle déconne, des fois elle tire plus d'un côté que de l'autre.	IO	MACHINE	VI
141	[planéité] quand on pose sur le support, la pièce doit poser bien	IO	PROFILE	VII
142	si déconne	INF	PROFILE	VII
143	on va sur le marbre	RA	CALIBRAGE	VII
144	si un problème d'angle	INF	PROFILE	VII
145	le profilé est trop étroit pour la chenille	IO	OUTILLAGE	VII
147	C'est mesuré avec l'équerre mais ça se voit à l'œil nu "c'est l'œil du chaudronnier"	IO	FORMATION	VII
148	pour la planéité : le vérin c'est une force, ça monte à la force dont il a besoin	IO	MACHINE	VII
149	dépend de la trempe	INF	TREMPE	VII
150	rectitude : en bosses ou en creux	IO	PROFILE	VII
151	il faut regarder le cintre	RA	PROFILE	VII
152	il doit être correct	ANT	PROFILE	VII
153	si la pièce est trop ouverte	INF	PROFILE	VII
154	on ne pourra rien faire, il faudra calibrer	IO	CALIBRAGE	VII
155	chaudronnier depuis 31 ans (depuis l'âge de 16 ans et demi	ALT	FORMATION	VIII
156	On doit savoir si la pièce est bonne ou pas	IO	PROFILE	VIII
157	Savoir appuyer sur un bouton,	IO	MACHINE	VIII
158	regarder la télé, l'écran et choisir le programme	IO	MACHINE	VIII
159	il faut être attentif à tout	IO	FORMATION	VIII

Opérateur expert

NUM	Verbatim	SCHEME
1	On reçoit les pièces du magasin	IO
2	Après on fait une première passe, un premier étirage, ce serait mieux	RA
3	premier étirage sur recuit	IO
4	après on les met sur le panier de trempe	RA
5	on les envoie à la trempe	RA
6	Au retour	INF
7	on fait un deuxième étirage sur trempe	RA
8	et puis après	INF
9	on les calibre… calibrage	RA
10	En fait on les reçoit, sur état O, on appelle ça sur état O,… C'est un recuit, qu'est, qu'est fait sur la pièce pour qu'elle soit malléable quoi	IO
11	Qu'on puisse la tirer euh…, sans qu'elle casse	ANT
12	on étire	RA
13	Puis	INF
14	on enroule	RA
15	on fait un allongement	RA
16	puis après	INF
17	on enroule en maintenant la tension	RA
18	on parle que des cadres là ?	INF
19	au niveau de la forme, il n'y en a qu'une	IO
20	les mors, on peut les changer	RA
21	bien sûr	IO
22	les chenilles aussi	RA
23	Vérifier, oui	RA
24	mise aux mors oui	RA
25	ça c'est le deuxième étirage alors !	INF
26	on ne fait pas de resserrage de forme	RA
27	là,… sur le premier étirage	INF
28	premier étirage	INF
29	on fait une mise aux mors à gauche puis à droite	RA
30	et après on	INF
31	on fait un tensionnement	RA
32	[donc vous commencez ?]	INF
33	à tirer un peu	RA
34	Après	INF
35	on l'amène dans la forme	RA
36	et là	INF
37	on sert, on sert la forme	RA
38	puis après	INF
39	ben on enroule	RA
40	Tandis que là, le deuxième étirage	INF
41	on le met à gauche	RA
42	on sert la forme	RA
43	et puis […] après	INF
44	le gars, […], lui il rentre le mors dans la pièce	IO
45	Après	INF
46	on desserre la forme	RA
47	et puis	INF
48	on sort la pièce	RA
49	de façon à ce qu'elle aille de l'autre côté	ANT
50	Et	INF
51	on resserre la forme	RA

NUM	Verbatim	SCHEME
52	mise du cadre dans la forme,	RA
53	lancement du programme	RA
54	Il y a deux choses, il y a le premier étirage et il y a le deuxième étirage. C'est pas tout à fait la même chose en fait. Parce qu'en fait le deuxième étirage, on fait que tirer c'est tout, on n'a pas d'enroulement.	IO
55	Ben oui autrement… Stockage, oui	IO
56	Faut que la pièce soit bonne	ANT
57	En première passe	INF
58	On fait 0,5% d'allongement	RA
59	On le mesure	RA
60	Au départ	INF
61	Maintenant	INF
62	on le mesure plus	RA
63	Parce que bon, c'est par habitude maintenant	IO
64	C'est dans le programme	IO
65	En deuxième passe	INF
66	On tire à… 2%, 2,5%	RA
67	C’est pareil euh… On doit le mesurer	IO
68	puis après, sur la première	INF
69	on mesure	RA
70	puis après	INF
71	c’est bon	IO
72	On le fait plus	RA
73	parce qu’on sait	IO
74	depuis le temps qu’on le fait c’est bon quoi	IO
75	Ben après logiquement, après la pièce finie	INF
76	on l’amène sur la table	RA
77	on regarde le cintre	RA
78	s’il est euh… si elle est pas trop fermée	INF
79	si… l’angle et la planéité	INF
80	Puis selon ça après	INF
81	enfin on n’a pas le droit de toucher au programme	IO
86	Normalement, c'est le gars qu'est dans les bureaux qui fait ça	IO
87	Si la pièce est comme ça (montre le plat), si elle décolle devant moi, comme ça (geste avec la main qui monte près de lui)	INF
88	ça manque d'étirage	ANT
89	Si elle est dans l'autre sens	INF
90	C'est qu'il y a trop d'étirage.	ANT
91	Sur la forme, là, on le voit	IO
92	Si elle est pas assez chargée, c'est pareil […] au niveau du cintre	INF
93	Elle manque d'étirage	ANT
95	[Donc vous connaissez la forme qu’elle doit avoir exactement…] Hum Hum	IO
96	[connaissances importantes] c'est l'allongement en fait, c'est tout hein,	IO
97	[un nouveau] il a un dossier, il lit la fiche d'instruction pour que, logiquement, sur la fiche d'instruction il y a tout ce qu'il faut	IO
98	à la limite, un gars qui vient de l'extérieur, normalement, ça devrait être comme ça.	IO
99	normalement, il doit savoir faire la pièce	IO
100	logiquement, si les fiches d'instruction sont à jour, ça c'est encore une autre histoire	IO
101	Ben on aurait du amener un dossier, j't'aurais montré	ALT
102	Ben c'est au niveau de l'allongement, tout ça, la mise en place… la mise en place des chenilles, euh, il y a le numéro des chenilles, euh, le numéro de euh, du programme, d'étirage, qu'est sur la fiche d'instruction normalement…	IO
103	[vous procédez toujours de la même façon] oui	IO

NUM	Verbatim	SCHEME
104	[vitesse ?] Moi, je mets toujours à fond	RA
105	Régler la vitesse on a essayé	RA
106	ça n'a rien changé au niveau de la qualité de la pièce	IO
110	[absence de résultat convenable] il y a un tas de choses qui entre là dedans	IO
111	les dimensions de la pièce	INF
112	il y a des tolérances, il y a le mini et le maxi	INF
113	Bon après là, quand on met les chenilles, et bien, bien sûr des fois la pièce elle est trop grande, et la chenille elle flotte dedans.	IO
114	Des fois trop petite, et puis la chenille a du mal à rentre dedans	IO
115	quand on fait la pièce	RA
116	ben soit l'angle il est ouvert, soit il est fermé	ANT
117	Il y a plein de choses à revoir aussi sur les chenilles	IO
118	il faudrait presque un jeu de mini et un jeu de maxi	IO
128	[mesure de planéité?]	RA
129	Oui, l'équerrage, oui plat oui.	IO
130	oui ben ça c'est que la forme, il y a des vérins sur la forme ?	IO
131	soit c'est trop serré ou pas assez serré	INF
132	Ben là c'est pareil, chacun essaye de…	IO
133	c'est pour ça j'avais, on en avait parlé ça,	ALT
134	pour avoir des vérins automatiques qui se serrent selon l'épaisseur de la chenille et de la pièce	IO
135	si on pouvait avoir des vérins qui se serrent automatiquement avec la force qu'il faut quoi.	IO
136	Je ne sais pas si c'est possible	IO
137	si c'est trop serré	INF
138	[on peut jouer] sur le serrage des vérins	RA
139	ça ne nous apporte pas grand-chose ça la vitesse	IO
152	[nouvelle pièce] logiquement l'approche est la même	IO
153	maintenant,	INF
154	le programme c'est pas nous qui le faisons, hein, c'est tout	IO
155	Autrement l'approche est la même	IO
156	[consulté pour faire le programme] plus maintenant	IO
157	Avant	INF
158	Oui	IO
159	Plus [négation]	IO
160	maintenant,	INF
161	la c'est pareil, il y a tout un système d'apprentissage qui est sur la machine, là…	IO
162	en fait, ben, on fait la mise en mors,	RA
163	donc euh, on met la mise en mors dans le programme	RA
164	ben c'est pareil,	IO
165	ben l'allongement, ben faut qu'on le mesure	RA
166	qu'on le rentre dans le programme	RA
167	toutes les phases en fait, on fait	RA
168	ben, on rentre dans le programme	RA
169	Après, voilà. Pour la première passe	INF
170	on fait la mise en mors des deux côtés	RA
171	après	INF
172	il fait un pré-tensionnement,	IO
173	Là	INF
174	on l'avance dans la forme	RA
175	pour l'enrouler	ANT
176	et là	INF
177	on ferme la forme.	RA
178	Et après	INF
179	on fait l'enroulement	RA

NUM	Verbatim	SCHEME
180	Tandis que l'autre	INF
181	on met en mors	RA
182	on ferme la forme	RA
183	sur la deuxième passe	INF
184	C'est seulement ça la différence	IO
185	[l'angle d'enroulement] il est un peu différent	IO
186	parce que la largeur des pièces n'est pas la même,	INF
187	donc, on met des cales dans le fond de la forme	RA
188	donc euh, il est forcément un peu différent	IO
189	mais ça c'est dans le programme ça, quand on l'a approché, on a rentré l'angle qui allait bien quoi	IO
190	chaudronnier	ALT
191	Ben j'ai passé un CAP, après, oui, il y a des formations ici de perfectionnement quoi	ALT
192	Hum, logiquement,	ALT
193	Pour entrer ici ou…	ALT
194	pour les machines qui a l'a, il y a pas de formation	IO
195	on apprend sur le tas en fait, avec quelqu'un	IO
196	ça n'a rien à voir avec la chaudronnerie ça, ça n'a rien à voir.	IO
197	Chaudronnier c'est un autre métier	IO
198	ça c'est pas un métier en fait	IO
199	on connait l'allongement de la pièce	IO
200	et on appuie sur des boutons	RA
201	et puis c'est tout, y a rien de…	IO
202	le métier de chaudronnier il est un peu après sur le formage des pièces là en fait,	IO
203	sur le calibrage quoi C'est plus là qu'on rentre dans le métier de chaudronnier quoi…	IO
204	la rétreinte	IO
205	l'allongement, ça c'est tout un apprentissage par contre	IO
206	[beaucoup de monde qui travaille sur cette machine.] Non quelque personne, non, fin oui dans ce quart-ci on doit être, un peu quand même, plus dans ce quart-ci ! 3 ou 4, et dans l'autre quart, ils doivent être deux je crois,…	IO
207	Un qui connait la machine et puis un gars qu'est avec en fait.	IO
208	le fonctionnement [de la machine]	IO
209	Oui voilà, c'est ça… Après quand on connait ça, la machine, c'est pas dur à la faire fonctionner.	IO
210	Même vous vous pouvez la faire fonctionner, donc ça, il y a pas de problèmes	IO
211	Ben on demande, oui… euh… [changer le programme ?]	RA
212	[le programme] si on veut qu'il soit changé	INF
213	comme là, là, il y a des… certaines modification qu'on voudrait qui soit faites sur le, sur certaines pièces sur l'allongement et tout ça là…	IO
214	alors on dit ça à notre chef	RA
215	[chef] qui demande aux gars qui sont dans les bureaux là, et qui vont venir changer le programme	IO
220	parce que des fois, à la trempe, c'est, les pièces sont jamais pareil	IO
221	soit qu'elles sont un peu plus déformées ou pas assez,	ANT
222	la trempe on peut pas savoir comment elles vont sortir	IO
223	[pareil pour toutes les pièces ?] non	IO
224	Avant	INF
225	on pouvait changer, c'était pratique	IO
226	on faisait directement et puis on changeait	RA
227	tandis que, là, aujourd'hui	INF
228	si on leur demande de changer le programme ils vont le changer pour toutes	IO

NUM	Verbatim	SCHEME
	les pièces quoi	
232	[de combien changer] ben après ça c'est l'expérience	IO
233	si on dit, ben la pièce elle est comme ça	INF
234	on mettrait bien ça,	RA
235	peut-être 0,5% en plus, peut-être 1% [allongement]	RA
236	ça dépend de la déformation	INF
237	[à l'œil] hum hum [oui de la tête]	IO
238	C'est l'expérience ça après	IO
239	C'est quand on la présente sur la table qu'on voit	IO
240	après étirage	INF
241	soit qu'on la remet dedans et qu'on la retire un peu, ou alors que pour les prochaines on modifie, et puis, euh…	RA
242	[les pièces d'un même lot sont] généralement oui, enfin pas toujours	IO
243	logiquement elles sont semblables, oui, oui, oui, c'est quand on change de lot des fois il y a des différences	IO
244	au niveau de la largeur, c'est ça les tolérances, ils ont une, je sais plus combien qu'c'est les tolérances mais c'est assez énorme	IO
245	je crois que sur les chenilles il y a beaucoup de choses à faire, pour les chenilles, même au niveau matériaux, changer peut-être	IO
246	moi je pensais peut être à une matière qui serait assez malléable, euh dur à la fois et qui servirait à toutes les pièces en fait.	IO
247	quand la forme elle arrive, elle écrase et elle épouse en fait la pièce quoi	IO
248	il y a une réflexion à faire là-dessus aussi	IO

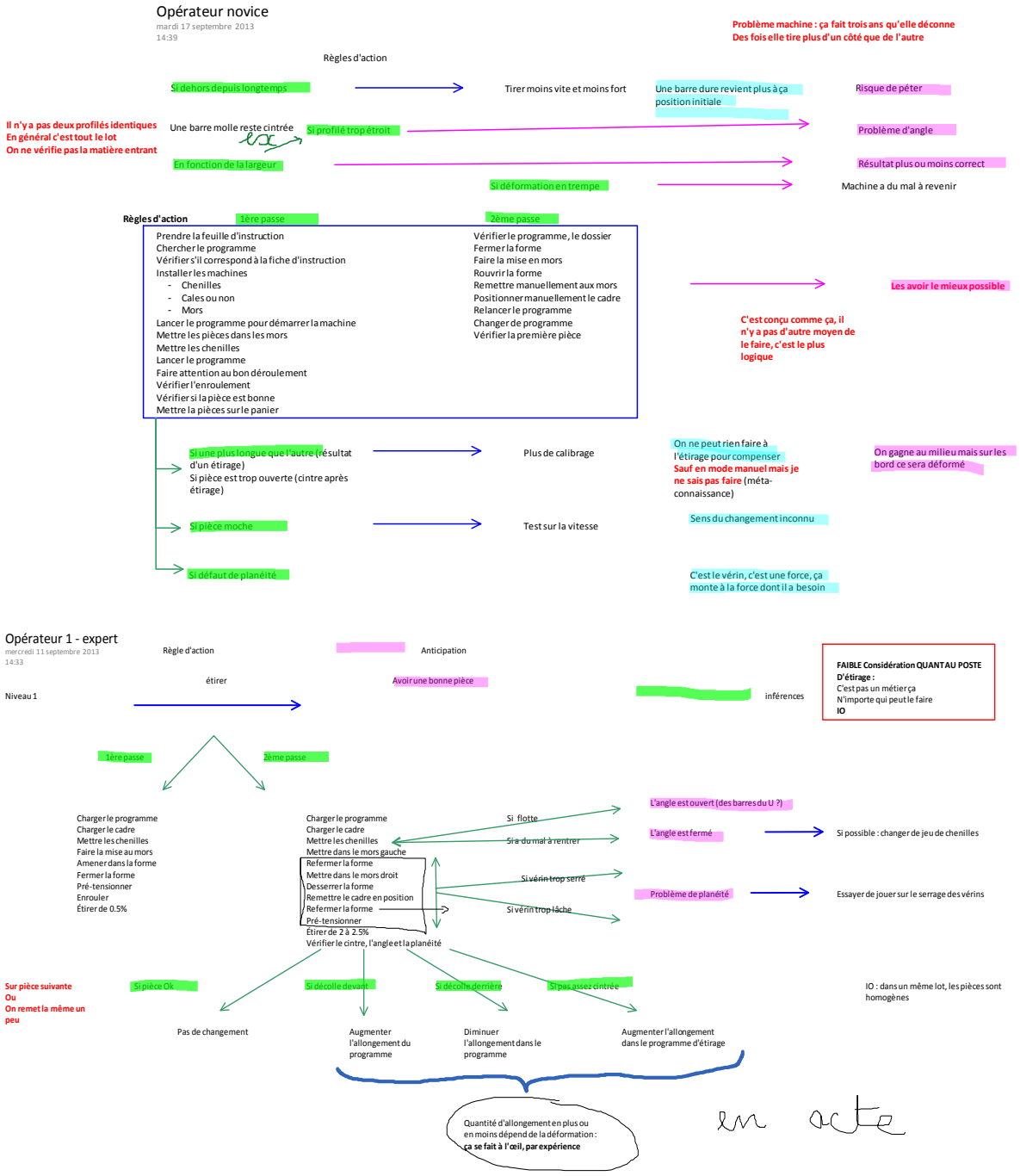
Technicien d'industrialisation

NUM	Verbatim	SCHEME	THEME
1	c'est sur les cadres forts que vous voulez voir ? Les cadres forts, oui… […] et les T qu'on appelle, ouais oui.	ALT	PROFILE
2	On part du processus	RA	PROCESSUS
3	euh une fois que j'ai le plan officiel du BE	INF	PLAN
4	à partir de là ou ?	ALT	ETAPE
5	Donc euh, par rapport à un cadre fort, euh, donc euh, avec un plan officiel,	INF	PLAN
6	si on a des cadres forts à étirer	INF	PROFILE
7	donc, ben, on fait une gamme hein,	RA	OUTILLAGE
8	c'est certain	IO	CERTITUDE
9	Déjà	INF	ETAPE
10	On va […] faire l'appro matière	RA	APPROVISIONNEMENT
11	il y a l'appro matière à faire en priorité,	IO	APPROVISIONNEMENT
12	pour se faire livrer la matière	ANT	APPROVISIONNEMENT
13	[appro matière ?] C'est, c'est la grande barre,	IO	APPROVISIONNEMENT
14	on demande, on demande euh, un fournisseur,euh	RA	APPROVISIONNEMENT
15	il nous faut la… la SN, la BS maintenant,	IO	PROFILE
16	avec telle longueur de euh, d'appro pour les barres	IO	PROFILE
17	et donc euh, on commence par ça	RA	ETAPE
18	il y a un délai de euh, trois, trois, trois-quatre mois à peu près de livraison de, de matière.	IO	APPROVISIONNEMENT
19	une fois qu'on a fait ça ben	INF	ETAPE
20	ben on va, on va faire nos, nos outillages aussi	RA	OUTILLAGE
21	par rapport à, au plan officiel	INF	PLAN
22	On va lancer nos outillages, nos outillages d'étirage, nos outillagegs d'ajustage, les che, les chenilles	RA	OUTILLAGE
23	pour étirer nos profilés	ANT	PROFILE
24	les mors qui peuvent aussi, euh, dans les têtes de, euh, dans les têtes de, des machines, de la 100T ou 60T, euh,	IO	OUTILLAGE
25	après ça dépend de, le, ça dépend quelle machine on, on choisit pour étirer cette pièce-là.	INF	MACHINE
26	Donc euh,… euh… on fait une commande aussi au niveau de l'outillage pour, euh,	RA	OUTILLAGE
27	pour se faire livrer le plus vite possible ces, ces outillages	ANT	OUTILLAGE
28	[l'outillage ?] Pour la 100T ça va être, euh, la forme d'étirage, euh… ça va être euh, les chenilles, et les mors, hein, c'est ça qui… voilà	IO	OUTILLAGE
29	[pourquoi choisir la 100T ou la 60T?]	INF	MACHINE
30	C'est par rapport euh, à la section du profilé.	INF	PROFILE
31	on a des règles, donc euh…	IO	REGLEMENT
32	par rapport à la section du profilé	INF	PROFILE
33	on a un p'tit abaque	IO	REGLEMENT
34	Mais ça dépend de la, la… de l'épaisseur après, de l'épaisseur…	INF	PROFILE
35	[tolérances ?] Oui, on peut pas aller plus loin que… que, ben, que 100T, c'est sûr et certain que voilà.	IO	PROFILE
36	Mais en général, pff, entre la 60T et la 100T, euh, tous les… toutes les pièces qui passent sur la 100T peuvent aller sur la 60T quoi.	IO	MACHINE
37	Le plus difficile, le plus embêtant, ce sera sur la CB10, la CB… 10, 10T et la 60T.	IO	MACHINE
38	Euh… la CB 10, on peut pas aller avec une force de plus de 10T quoi.	IO	MACHINE
39	donc euh, là, là c'est de la petite section, des profilés, des petits, petites cornières.	INF	PROFILE
40	Tandis que là, les grosses sections,	INF	PROFILE
41	on les passe sur la 60T et la 100T	RA	MACHINE
42	Il y a qu'un seul profilé, euh, qui peut, qui passe sur la 100T qui peut pas	IO	MACHINE

NUM	Verbatim	SCHEME	THEME
	passer sur la 60T, la 60T quoi.		
43	C'est la classe une, qu'on appelle ça. Ouais, ouais	IO	PROFILE
44	[Alors pourquoi 60 ou 100t?] Ça après, c'est une charge, euh, de travail, c'est par rapport à la charge de travail	INF	CHARGE DE TRAVAIL
45	[Mais ils peuvent étirer les mêmes pièces ?] Oui	IO	MACHINE
46	[Programmes identiques ?] Non, parce que, euh… sur la 100t, c'est euh… c'est siemens	IO	PROGRAMME
47	C'est le… et sur, sur la 60t, c'est la num760, ce sont des num760	IO	PROGRAMME
48	Non, c'est pas, c'est pas pareil, c'est pas le même programme	IO	PROGRAMME
49	[Faire un programme pour le deux machines] non	IO	PROGRAMME
50	Après, on fait les programmes	RA	PROGRAMME
51	Au besoin, euh… si si y a des programmes à faire quoi, des programmes à faire quoi.	INF	PROGRAMME
52	En général, euh, on privilégie, les tss, on fait le programme par rapport, euh, où, là, où, les pièces vont passer quoi, sur la 60t ou la 100t	INF	MACHINE
53	Donc on a des… on a des normes là-dessus,	IO	REGLEMENT
58	Euh, alors là, les programmes, euh… on en fait beaucoup par euh, par apprentissage,	RA	PROGRAMME
59	donc, c'est, euh… apprentissage, c'est euh, au fur et à mesure, on fait les programmes au fur et à mesure, c'est du manuel quoi.	IO	PROGRAMME
60	Autrement, on a, on a un logiciel, euh… un logiciel russe, qui nous permet aussi de,… qui nous permet de faire euh… nos programmes.	IO	PROGRAMME
62	Ben fait, on n'en a pas fait beaucoup de programme, euh, logiciel russe, on n'en a pas fait trop.	RA	PROGRAMME
69	Mais c'est sûr et certain, que ce serait plus intéressant de travailler avec un logiciel, euh, qui nous permette de faire directement le programme, quoi, ce s'rait.	IO	PROGRAMME
84	[ensuite] Ben ça part,	RA	ETIRAGE
85	euh… y a un cycle normale après	IO	ETIRAGE
86	ça part en ajustage, en calibrage	RA	CALIBRAGE
87	Il y a tout le temps un peu de calibrage un peu derrière quand même, hein.	IO	CALIBRAGE
88	On n'arrive pas à faire des pièces euh… euh, sans calibrage derrière quoi, faut, faut tout le temps avoir un p'tit calibrage derrière, de mise en forme, quoi, mise en forme.	IO	CALIBRAGE
89	Et après	INF	ETAPE
90	soit ajustage, soit perçage, soit, voilà	RA	CALIBRAGE
91	[connaissances indidspensables ?] ben déjà, faut avoir la connaissance du, ben pour le logiciel, faut avoir la connaissance du, du logiciel, comment ça marche exactement…	IO	PROGRAMME
92	Et là, euh… y a des données qu'on arrive pas non plus à… à saisir complétement quoi… […] sur le logiciel.	IO	PROGRAMME
93	Euh, les données, euh… par exemple, euh… euh, les vitesses, on n'arrive pas à, y a, y a des, y a des petits problèmes sur les vitesses, on sait pas trop quoi, comment, comment, figer une vitesse et tout ça.	IO	VITESSE
94	Moi, je, on n'a pas été trop, trop, trop guidés, trop, là-dessus, quoi, donc euh...	ALT	VITESSE
95	C'est vraiment en tâtonnant qu'on, enfin, qu'on arrive à faire quelque chose quoi, enfin…	RA	ETIRAGE
96	après c'est, c'est une histoire, de, de, euh… une fois qu'on a fait le programme,	INF	PROGRAMME
97	on teste une pièce quand même,	RA	ETIRAGE
98	et on voit par rapport, euh,	RA	CALIBRAGE
99	on vient la positionner sur la, sur une table de calibrage, qui est à la forme,	RA	CALIBRAGE
100	voir si elle est bien	ANT	CALIBRAGE
101	si les angles ne sont pas trop fermés,	ANT	CALIBRAGE
102	, si euh, le profil est bien	ANT	CALIBRAGE

NUM	Verbatim	SCHEME	THEME
103	donc après, euh,	INF	ETAPE
104	on ajuste, soit la, l'allongement, le, l'enroulement, euh, la pièce quoi. Hein ?	RA	*PROGRAMME*
105	, [l'allongement et…] l'enroulement, oui, c'est surtout ça qu'on change.	IO	*PROGRAMME*
106	Oui, l'allongement, euh, la vitesse, euh, l'enroule… ben, euh, l'enroulement, euh, ça, il y a plusieurs paramètres après, euh, c'est sûr et certain que, euh… non c'est surtout ça qu'on joue.	IO	*PROGRAMME*
107	Ah, oui, l'avancement des axes, tout ça, oui, bien sûr.	IO	*PROGRAMME*
130	On rentre la matière	RA	PROGRAMME
131	On rentre la longueur euh, de la pièce.	RA	PROFILE
132	Euh, qu'est-ce qu'on rentre comme données ?	ALT	PROGRAMME
133	La matière, la longueur	RA	PROFILE
134	Et donc y a un fichier GDO aussi à faire, euh,… donc ça c'est l'outillage qui euh, nous fournit ça. Un fichier GDO de la pièce pour, euh, pour euh,	IO	PROFILE
135	pour que le programme puisse mouliner un peu le… euh… puis nous sortir la forme d'étirage quoi	ANT	OUTILLAGE
136	Ben le profil quoi !	ANT	OUTILLAGE
144	C'est fourni par le, euh, c'est fourni par… ben par les méthodes, donc qui nous donnent ça.	IO	ENTREPRISE
145	C'est le logiciel qui va chercher ça dans, dans un fichier qui est…	IO	PROGRAMME
146	[par apprentissage]	INF	PROGRAMME
155	On fait	RA	ETIRAGE
156	Par rapport à l'allongement après	INF	PROFILE
157	On essaie de mettre le moins de retour élastique que possible	RA	PROFILE
158	pour, euh, pour que la pièce soit, soit moins chaudronnée derrière	ANT	CALIBRAGE
159	et qu'elle soit bien au profil, on va dire.	ANT	CALIBRAGE
160	Par contre, avec le le logiciel, on voit un peu le retour élastique, euh, de, de la pièce	IO	PROGRAMME
259	[formation ?] J'ai commencé dans l'atelier.	ALT	FORMATION
260	Ben la formation, ben j'ai appris sur le, le tas, donc j'ai appris aussi la, le métier de préparateur, mais c'est plutôt sur le tas que j'ai appris ça oui	ALT	FORMATION
261	[Chaudronnier ?] Oui	ALT	FORMATION
262	[et les autres TI ?] Ben faut savoir euh… il y a peut-être une FORMATION un p'tit peu plus complète que celle de l'ajustage ou un truc comme ça ouais.	ALT	FORMATION
263	Comprendre l'étirage, et la, la rétreinte, tout ça, tout ça… Tout le monde ne comprend pas hein, c'est ça.	IO	FORMATION
264	Ben la façon d'étirer, l'allongement, en étirant de telle façon euh, avec les angles, pourquoi l'angle bouge dans ça… va se refermer… voilà c'est ça le plus important.	IO	FORMATION
265	On risque d'être un peu embêté au départ. Ça, ça vient…	ALT	FORMATION
266	après ça peut venir, après c'est, ça peut venir de, de la chenille, qu'est…	IO	OUTILLAGE
267	Normalement, c'est des chenilles mais, qui, qui viennent rentrer dans le, la forme d'étirage, dans pardon dans le profilé.	IO	OUTILLAGE
268	Si la chenille n'est pas assez large,	INF	OUTILLAGE
269	ça peut coucher l'angle	ANT	PROFILE
270	Après ça peut venir de l'outillage aussi, l'angle de l'outillage qu'est pas bon	INF	OUTILLAGE
271	[Objectif détecter un problème] et puis le remonter rapidement	RA	PROFILE
272	et puis essayer de le résoudre assez rapidement quand même	RA	PROGRAMME
273	D'essayer de sortir des pièces, euh… qui soit bonnes quoi !	ANT	PROFILE
274	[nombre d'opérateur sur la 100T] Non je pense pas non. Y a, c'est les opérateurs qui savent	ALT	ENTREPRISE
275	Parce que moi je ne travaille pas beaucoup d'ssus donc, euh, je pense euh…	ALT	INCERTITUDE
276	non il y a, y a un… y a p't-être une dizaine d'opérateurs quoi.	ALT	ENTREPRISE
277	Je pense qu'ils apprennent assez vite quand même	ALT	ENTREPRISE
278	Pour moi, il n'y a pas beaucoup plus de problèmes que, que les autres machines.	IO	MACHINE

ANNEXE 3 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES SCHÈMES RELATIFS À L'ÉTIRAGE DES OPÉRATEURS



ANNEXE 4 : TABLEAUX DES MODÈLES SÉLECTIONNÉS PAR LES ANALYSES.

Les tableaux présentent les modèles sélectionnés, les valeurs obtenues et prédites par le modèle pour l'analyse des actions suite aux observations de l'étude 1. Seuls les actions pour lesquelles on constate des différences entre les opérateurs sont présentées.

Angle

Variables retenues	Coefficient	Opérateur	Moyenne observée	SD	Valeur prédite
(Intercept)	-21,68000	expert	0,26087	0,54082	0,26185
PASSEpasse 2	20,34000				
CATEGORIEmid-exp	-20,96000	mid-exp	0,00000	0,00000	0,00000
CATEGORIEnovice	-20,12000	novice	0,00000	0,00000	0,00000
CATEGORIEstudent	-20,96000	student	0,00000	0,00000	0,00000

Changement de vitesse

Variables retenues	Coefficient	Opérateur	Moyenne observée	SD	Valeur prédite
(Intercept)	-1,98100	expert	0,13793	0,43595	0,13793
CATEGORIEmid-exp	1,90700	mid-exp	0,92857	0,91687	0,92867
CATEGORIEnovice	1,66600	novice	0,72973	1,01086	0,72979
CATEGORIEstudent	2,13500	student	1,16667	1,15045	1,16649

Regarder ailleurs

Variables retenues	Coefficient	Opérateur	Moyenne observée	SD	Valeur prédite
(Intercept)	-0,80235	expert	0,44828	0,84576	0,44827
CATEGORIEmid-exp	-1,14356	mid-exp	0,14286	0,53452	0,14286
CATEGORIEnovice	-0,06773	novice	0,41892	0,79393	0,41892
CATEGORIEstudent	-16,50024	student	0,00000	0,00000	0,00000

Utiliser les commandes manuelles

Variables retenues	Coefficient	Opérateur	Moyenne observée	SD	Valeur prédite
(Intercept)	-19,61540	expert	0,56522	0,94514	0,56524
PASSEpasse 2	19,04490				
CATEGORIEmid-exp	1,10950	mid-exp	1,71429	1,85757	1,71429
CATEGORIEnovice	0,85280	novice	1,32609	1,33424	1,32618
CATEGORIEstudent	1,17670	student	1,83333	1,50489	1,83345

Discuter

Variables retenues	Coefficient	Opérateur	Moyenne observée	SD	Valeur prédite
(Intercept)	0,3624	expert	1,43678	1,35287	1,43677
CATEGORIEmid-exp	-1,392	mid-exp	0,35714	0,63332	0,35715
CATEGORIEnovice	-1,2992	novice	0,39189	0,71802	0,39188
CATEGORIEstudent	-3,2528	student	0,05556	0,23570	0,05555

ANNEXE 5 : QUESTIONNAIRE ADMINISTRÉ AUX PARTICIPANTS À L'ÉTUDE 2 ET 3

Questionnaire participant : numéro participant ……

Nom : …… **Prénom :** ……

Tel : ……..

Adresse mail : ……

Sexe : ☐ Masculin ☐ Féminin

Age : ……..

Profession : ……..

Vous êtes : ☐ Gaucher ☐ Droitier ☐ Ambidextre

1. **Avez-vous un ordinateur ?** ☐ Oui ☐ Non
2. **Avez-vous une console de jeu ?** ☐ Oui ☐ Non

   Si oui laquelle ? ……..

3. **Comment situeriez-vous votre pratique des jeux vidéo** :

   ☐ Ne pratique pas du tout
   ☐ Quelques fois par an
   ☐ Une à deux fois par mois
   ☐ Une à deux fois par semaine
   ☐ Tous les jours

   Si oui de quels types de jeux s'agit-il ? ……..

4. **Avez-vous des connaissances concernant la physique des matériaux ?**

   ☐ Oui ☐ Non

   Si oui précisez le contexte (ex. cours, formation, intérêts…) :

   ……..

Plus particulièrement avez-vous des connaissances sur la physique des poutres ? ☐ Oui ☐ Non

Connaissez-vous le module de Young ?
☐ Oui, je peux le définir avec précision
☐ Oui, j'ai déjà entendu ce terme
☐ Non

Connaissez-vous la différence entre phase plastique et phase élastique ? ☐ Oui ☐ Non

ANNEXE 6 : GRILLE D'ENCADREMENT DES PARTICIPANTS À L'ÉTUDE 2 DU GROUPE « ENTRAINÉS »

	Scénario 1	**Scénario 2**
Séance 1	*Objectif : identifier les sources d'aléas apparaissant dans le monde virtuel* Explorer l'environnement Passe 1 : étirer les deux premiers cadres avec le programme par défaut et mesure ➢ *On constate une différence entre les deux éléments* ➢ *Mémoriser les valeurs atteintes* Envoyer en trempe Étirer deux autres cadres en augmentant la vitesse entre le premier et le second cadre ➢ *Les différences observées ⇔ celles observées entre les deux premiers cadres, pas d'effet vitesse* Passe 2 : étirer les deux premiers cadres sans les mettre en chambre froide et les mesurer ➢ *On observe une différence plus importante entre les deux cadres* Étirer les deux derniers cadres en les mettant en chambre froide immédiatement après la tremper ➢ *Trempe modifie limite d'élasticité* ➢ *Frigo limite effet de la trempe*	*Objectif : identifier effet de lot et schème trompeur* Passe 1 : étirer deux cadres ➢ *On constate que les valeurs sont différentes de celles du scénario 1* ➢ *On constate qu'il y a une petite variabilité entre les cadre* ➢ *Il faut adapter le programme à la mesure obtenue en passe 1* Étirer les autres cadres et envoyer en trempe Passe 2 : étirer un cadre avec les valeurs par défaut ➢ *On constate que le cadre est trop grand* Modifier les programmes (on ne donne pas de valeur, les participants cherchent eux-mêmes) ➢ *On constate que l'on ne peut pas entrer de valeurs négatives pour l'angle* ➢ *On constate que les mesures à l'issue de P1 permettent d'ajuster P2* ➢ *Souligner la différence entre chaque cadre*
	Scénario 3	**Scénario 4**
Séance 2	*Objectif : reprendre en main le micromonde* Le participant réalise sans conseils mais sous surveillance. En cas de problème, on intervient notamment : Rappel chaque cadre est différent même si les différences sont minimes. Prendre mesure après P1 et ajuster P2 en fonction dès le premier cadre sinon celui-ci sera perdu ➢ *Éviter le schème trompeur*	*Objectif : tester un scénario pour lequel le schème trompeur ne fonctionne jamais* Après P1 : mesurer chaque cadre (si pas déjà fait) ➢ *On constate que les différences entre cadres sont plus importantes : un même programme ne suffira pas à rester dans les tolérances* Avant P2 : relire ou reprendre mesure cadre et se demander quel est pour ce cadre le programme adéquat. ➢ *Sans donner de valeur on incite le participant à réfléchir cadre par cadre*

ANNEXE 7 : TABLEAUX DES PROGRAMMES ET MESURES DE L'ÉTUDE 2

Participant 1

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
1	1 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
1	2 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
1	2 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
1	3 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
1	4 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
1	5 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
1	6 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
1	7 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
1	8 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
1	2 : : 1	10,45	0	0	0	0	0	2
1	3 : : 1	10	0	0	0	5,49837	45,04970	2
1	1 : : 1	10	0	0	0	5,49837	45,04970	2
1	4 : : 1	9	0	0	0	5,53256	45,07512	2
1	8 : : 1	9	0	0	0	5,45102	45,07512	2
1	5 : : 1	8,7	0	0	0	5,46236	45,05029	2
1	6 : : 1	8,4	0	0	0	5,49211	45,05029	2
1	7 : : 1	8,4	0	0	0	5,49211	45,05029	2

Participant 2

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
2	1 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
2	2 : : 1	5	45	0	0	5,2936	45,0751	1
2	3 : : 1	5	45,9	0	0	5,2682	43,8165	1
2	1 : : 1	7	0	5,2936	45,0751	5,2513	44,6771	2
2	3 : : 1	7,5	0	5,2513	44,6771	5,4435	45,0751	2
2	2 : : 1	8	0	5,2682	43,8165	5,3908	44,6771	2
2	4 : : 1	5	45,9	0	0	5,4343	43,8165	1
2	5 : : 1	5	46,3	0	0	5,2607	44,6864	1
2	6 : : 1	5	46,1	0	0	5,2906	45,1063	1
2	7 : : 1	5	46,2	0	0	5,2574	44,8782	1
2	8 : : 1	5	46,2	0	0	5,2967	45,0149	1
2	5 : : 1	8	0	5,2906	45,1063	5,2967	44,9871	2
2	6 : : 1	7,8	0	5,2574	44,8782	5,4736	44,9871	2
2	7 : : 1	7,85	0	5,2967	45,0149	5,4157	44,9871	2
2	8 : : 1	7,85	0	5,2688	44,9871	5,4797	45,0149	2
2	4 : : 1	7,87	0	5,2607	44,6864	5,4337	45,0149	2

Participant 3

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
3	1 : : 1	4	46,15	5,2000	0	0	0	1
3	2 : : 1	4	46,2	0	0	0	44,9632	1
3	3 : : 1	4	46,2	0	0	0	44,9865	1
3	4 : : 1	4	46,25	0	0	0	44,9696	1
3	5 : : 1	4	46,225	0	0	5,2683	45,0277	1
3	6 : : 1	4	46,225	0	0	5,2683	45,0277	1
3	7 : : 1	4	46,225	0	0	5,2683	45,0000	1
3	8 : : 1	4	46,225	0	0	5,2683	45,0393	1
3	1 : : 1	6,5	0	5,2683	44,9632	5,2260	45,0114	2
3	1 : : 1	1,1	0	5,4111	44,9632	5,2260	45,0114	2
3	1 : : 1	1,1	0	5,4111	44,9632	5,2260	45,0114	2
3	1 : : 1	1,4	0	5,4111	44,9632	5,2260	45,0114	2
3	1 : : 1	2	0	5,4111	44,9632	5,2260	45,0114	2
3	1 : : 1	2	0	5,4178	44,9632	5,2260	45,0114	2
3	1 : : 1	2	0	5,4191	44,9632	5,2260	45,0114	2
3	1 : : 1	2	0	5,4191	44,9632	5,2260	45,0114	2
3	2 : : 1	7	0	5,2429	44,9865	5,5275	45,0114	2
3	2 : : 1	2	0	5,3808	44,9865	5,5275	45,0114	2
3	2 : : 1	2	0	5,3835	44,9865	5,5275	45,0114	2
3	2 : : 1	2	0	5,3835	44,9865	5,5275	45,0114	2
3	2 : : 1	2,5	0	5,3835	44,9865	5,5275	45,0114	2
3	4 : : 1	9	0	5,2353	45,0277	5,3835	45,0114	2
3	3 : : 1	9,3	0	5,2260	44,9696	5,4249	45,0114	2
3	3 : : 1	2	0	5,4187	44,9696	5,4249	45,0114	2
3	3 : : 1	2	0	5,4187	44,9696	5,4249	45,0114	2
3	3 : : 1	2	0	5,4187	44,9696	5,4249	45,0114	2
3	3 : : 1	2	0	5,4187	44,9696	5,4249	45,0114	2
3	2 : : 1	0,5	0	5,3835	44,9865	5,5271	45,0114	2
3	2 : : 1	0,5	0	5,3835	44,9865	5,5271	45,0114	2
3	2 : : 1	0,5	0	5,4104	44,9865	5,5271	45,0114	2
3	2 : : 1	0,5	0	5,4104	44,9865	5,5271	45,0114	2
3	6 : : 1	8	0	5,2321	45,0000	5,4374	45,0114	2
3	6 : : 1	0,5	0	5,3934	45,0000	5,4374	45,0114	2
3	6 : : 1	0,5	0	5,3934	45,0000	5,4374	45,0114	2
3	6 : : 1	0,1	0	5,4204	45,0000	5,4374	45,0114	2
3	6 : : 1	0,1	0	5,4204	45,0000	5,4374	45,0114	2
3	7 : : 1	6	0	5,2713	45,0393	5,4258	45,0114	2
3	7 : : 1	0,4	0	5,4075	45,0393	5,4258	45,0114	2
3	7 : : 1	0,4	0	5,4075	45,0393	5,4258	45,0114	2
3	7 : : 1	0,4	0	5,4075	45,0393	5,4258	45,0114	2
3	8 : : 1	5	0	5,2435	45,0114	5,4508	45,0393	2
3	8 : : 1	0,5	0	5,3378	45,0114	5,4508	45,0393	2
3	8 : : 1	0,5	0	5,3378	45,0114	5,4508	45,0393	2
3	8 : : 1	0,5	0	5,3645	45,0114	5,4508	45,0393	2
3	8 : : 1	0,5	0	5,3645	45,0114	5,4508	45,0393	2
3	8 : : 1	0,25	0	5,3913	45,0114	5,4508	45,0393	2
3	8 : : 1	0,25	0	5,3913	45,0114	5,4508	45,0393	2
3	8 : : 1	0,25	0	5,4048	45,0114	5,4508	45,0393	2
3	8 : : 1	0,25	0	5,4048	45,0114	5,4508	45,0393	2
3	8 : : 1	0,15	0	5,4183	45,0114	5,4508	45,0393	2
3	8 : : 1	0,15	0	5,4183	45,0114	5,4508	45,0393	2

Participant 4

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
4	1 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
4	2 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
4	3 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
4	4 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
4	5 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2607	45,0421	1
4	6 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2607	45,0421	1
4	7 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2574	45,0389	1
4	8 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2574	45,0389	1
4	1 : : 1	10,45	0	5,2936	45,0751	5,2688	45,0389	2
4	5 : : 1	8	0,5	5,2906	45,0720	5,5386	45,0751	2
4	7 : : 1	8	0,5	5,2967	45,0782	5,4713	45,5340	2
4	6 : : 1	6	0,5	5,2574	45,0389	5,4837	45,0782	2
4	8 : : 1	7	0,5	5,2688	45,0503	5,3678	45,0389	2
4	2 : : 1	7,5	0,5	5,2682	45,0497	5,4146	45,0503	2
4	4 : : 1	8	0,5	5,2607	45,0421	5,4188	45,0503	2
4	6 : : 1	2	0,5	5,3678	45,0389	5,4199	45,0503	2
4	6 : : 1	2	0,5	5,3678	45,0389	5,4199	45,0503	2
4	3 : : 1	9	0,5	5,2513	45,0328	5,4752	45,0503	2

Participant 5

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
5	1 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
5	2 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2936	45,0751	1
5	3 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2682	45,0751	1
5	4 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2513	45,0751	1
5	5 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2936	45,0751	1
5	6 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2906	45,0751	1
5	7 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2574	45,0751	1
5	8 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2574	45,0751	1
5	1 : : 1	5	46,2411	5,2936	45,0751	5,2513	0	1
5	2 : : 1	10,4500	0	5,2682	0	5,2513	0	2
5	4 : : 1	9,4500	0	5,2607	0	5,4960	0	2
5	3 : : 1	8,4500	0	5,2513	0	5,4587	0	2
5	5 : : 1	7,4500	0	5,2906	0	5,2688	0	2
5	6 : : 1	9,4500	0	5,2574	0	5,4550	0	2
5	7 : : 1	7,4500	0	5,2967	0	5,4498	0	2
5	8 : : 1	845, 00	0	5,2688	0	5,4693	0	2

Participant 6

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
6	1 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
6	2 : : 1	5	46,2640	0	0	5,2936	45,0751	1
6	3 : : 1	5	46,2600	0	0	5,2682	45,0489	1
6	4 : : 1	5	46,2200	0	0	5,2513	45,0281	1
6	5 : : 1	5	46,2200	0	0	5,2607	44,9984	1
6	6 : : 1	5	46,2000	0	0	5,2906	45,0283	1
6	7 : : 1	5	46,1000	0	0	5,2574	44,9757	1
6	8 : : 1	5	46,1000	0	0	5,2967	44,9174	1
6	2 : : 1	8,5	0	5,2682	45,0489	5,2688	44,8896	2
6	3 : : 1	8,5	0	5,2513	45,0281	5,4456	45,0489	2
6	4 : : 1	8,5	0	5,2607	44,9984	5,4199	45,0281	2
6	5 : : 1	8,5	0	5,2906	45,0283	5,4377	44,9984	2
6	6 : : 1	8	0	5,2574	44,9757	5,4815	44,9984	2
6	7 : : 1	8	2	5,2967	44,9174	5,4162	44,9757	2
6	8 : : 1	8	0,1	5,2688	44,8896	5,4847	46,8489	2

Participant 7

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
7	1 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
7	2 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2936	45,0751	1
7	3 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2936	45,0497	1
7	4 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2513	45,0328	1
7	5 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2607	45,0421	1
7	6 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2906	45,0720	1
7	7 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2574	45,0389	1
7	8 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2574	45,0389	1
7	4 : : 1	10,45	0	5,2607	45,0421	5,2688	45,0503	2
7	3 : : 1	9	0	5,2513	45,0328	5,4824	45,0503	2
7	2 : : 1	9	0	5,2682	45,0497	5,4329	45,0503	2
7	8 : : 1	8	0	5,2688	45,0503	5,4625	45,0497	2
7	7 : : 1	7	0	5,2967	45,0782	5,4303	45,0503	2
7	6 : : 1	8	0	5,2574	45,0389	5,4555	45,0782	2
7	5 : : 1	6	0	5,2906	45,0720	5,4141	45,0389	2
7	5 : : 1	2	0	5,4211	45,0720	5,4141	45,0389	2
7	1 : : 1	6,5	0	5,2936	45,0751	5,4389	45,0389	2

Participant 8

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
8	1 : : 1	5	45,2648	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1
8	2 : : 1	5	45,2648	0,0000	0,0000	5,2936	44,1001	1
8	3 : : 1	5	45,2648	0,0000	0,0000	5,2936	44,1001	1
8	4 : : 1	5	45,2648	0,0000	0,0000	5,2936	44,1001	1
8	5 : : 1	5	45,2648	0,0000	0,0000	5,2936	44,1001	1
8	6 : : 1	5	45,2648	0,0000	0,0000	5,2936	44,1001	1
8	7 : : 1	5	45,2648	0,0000	0,0000	5,2936	44,1001	1
8	8 : : 1	5	45,2648	0,0000	0,0000	5,2936	44,1001	1
8	4 : : 1	10,45	0,0000	5,2607	44,0671	5,2936	44,1001	2
8	5 : : 1	10,45	1,0000	5,2906	44,0970	5,4268	44,0671	2
8	6 : : 1	7,45	1,0000	5,2574	44,0639	5,5090	45,0210	2
8	7 : : 1	7,45	1,0000	5,2967	44,1032	5,3487	44,9392	2
8	8 : : 1	11	1,0000	5,2688	44,0753	5,4464	45,0355	2
8	3 : : 1	9	1,0000	5,2513	44,0578	5,4830	44,9819	2
8	3 : : 1	9	1,0000	5,2513	44,0578	5,4830	44,9819	2
8	3 : : 1	9	1,0000	5,2513	44,0578	5,4830	44,9819	2
8	3 : : 1	9	1,0000	5,2573	44,0578	5,4830	44,9819	2
8	3 : : 1	9	1,0000	5,2573	44,0578	5,4830	44,9819	2
8	3 : : 1	9	1,0000	5,2573	44,0578	5,4830	44,9819	2
8	2 : : 1	9	1,0000	5,2682	44,0747	5,4830	44,9819	2
8	1 : : 1	7	1,0000	5,2936	44,1001	5,4386	44,9889	2

Participant 9

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
9	1 : 1	5,00	46,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1
9	2 : 1	5,00	46,00	0,0000	0,0000	5,2936	44,8169	1
9	3 : 1	5,00	46,00	0,0000	0,0000	5,2936	44,8169	1
9	4 : 1	5,00	46,00	0,0000	0,0000	5,2936	44,8169	1
9	5 : 1	5,00	46,00	0,0000	0,0000	5,2936	44,8169	1
9	6 : 1	5,00	46,00	0,0000	0,0000	5,2936	44,8169	1
9	7 : 1	5,00	46,00	0,0000	0,0000	5,2936	44,8169	1
9	8 : 1	5,00	46,00	0,0000	0,0000	5,2936	44,8169	1
9	1 : 1	7,00	0,50	5,2936	44,8169	5,2688	44,8138	2
9	2 : 1	4,50	0,20	5,2682	44,7915	5,6642	45,3169	2
9	8 : 1	8,00	0,25	5,2688	44,7921	5,3488	44,9515	2
9	5 : 1	7,50	0,20	5,2906	44,8138	5,4309	44,9924	2
9	7 : 1	7,00	0,20	5,2967	44,8199	5,4587	44,9835	2
9	6 : 1	8,00	0,30	5,2574	44,7807	5,4578	44,9953	2
9	3 : 1	8,50	0,30	5,2513	44,7746	5,4188	45,0295	2
9	3 : 1	0,10	0,30	5,4254	45,0236	5,4188	45,0295	2
9	4 : 1	8,50	0,25	5,2607	44,7839	5,4254	45,0295	2

Participant 10

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
10	1 :: 1	5	45	0	0	0	0	1
10	1 :: 1	5	45	0	0	0	0	1
10	2 :: 1	5	45	0	0	5,2936	43,8419	1
10	3 :: 1	5	45	0	0	5,2936	43,8419	1
10	4 :: 1	5	45	0	0	5,2936	43,8419	1
10	5 :: 1	5	45	0	0	5,2936	43,8419	1
10	6 :: 1	5	45	0	0	5,2936	43,8419	1
10	7 :: 1	5	45	0	0	5,2936	43,8419	1
10	8 :: 1	5	45	0	0	5,2936	43,8419	1
10	1 :: 1	7	1,25	5,2936	43,8419	5,2688	43,8171	2
10	5 :: 1	7	1,25	5,2906	43,8388	5,2688	43,8171	2
10	7 :: 1	7	1,25	5,2967	43,8449	5,2607	45,0320	2
10	8 :: 1	7,46	1,25	5,2688	43,8171	5,2607	45,0320	2
10	6 :: 1	8	1,3	5,2574	43,8057	5,4104	45,0320	2
10	4 :: 1	8	1,3	5,2607	43,8089	5,4101	45,0208	2
10	3 :: 1	8	1,3	5,2513	43,7996	5,4101	45,0208	2
10	2 :: 1	8	1,3	5,2682	43,8165	5,4101	45,0208	2

Participant 11

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
11	1 : : 1	5	45,2648	0	0	0	0	1
11	2 : : 1	5	45,2648	0	0	5,2936	44,1001	1
11	3 : : 1	5	45,2648	0	0	5,2682	44,0747	1
11	4 : : 1	5	45,2648	0	0	5,2513	44,0578	1
11	5 : : 1	5	45,2648	0	0	5,2607	44,0671	1
11	6 : : 1	5	45,2648	0	0	5,2906	44,0970	1
11	7 : : 1	5	45,2648	0	0	5,2906	44,0970	1
11	8 : : 1	5	45,2648	0	0	5,2574	44,0639	1
11	1 : : 1	6,8	0,9	5,2936	44,1001	5,2688	44,0753	2
11	2 : : 1	6,8	0,95	5,2682	44,0747	5,4482	44,9567	2
11	3 : : 1	6,9	0,97	5,2513	44,0578	5,4080	44,9660	2
11	4 : : 1	6,9	0,97	5,2607	44,0671	5,3844	44,9600	2
11	5 : : 1	6,8	0,92	5,2906	44,0970	5,4011	44,9763	2
11	6 : : 1	7,1	0,93	5,2574	44,0639	5,4420	44,9700	2
11	7 : : 1	6,8	0,9	5,2967	44,1032	5,3954	44,9266	2
11	8 : : 1	6,9	0,95	5,2688	44,0753	5,4540	44,9624	2

Participant 12

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
12	1 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
12	2 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2936	45,0751	1
12	3 : : 1	5	46,2448	0	0	5,2682	45,0497	1
12	4 : : 1	5	46,2448	0	0	5,2513	45,0133	1
12	5 : : 1	5	46,2448	0	0	5,2607	45,0226	1
12	6 : : 1	5	46,2248	0	0	5,2906	45,0525	1
12	7 : : 1	5	46,2248	0	0	5,2574	44,9999	1
12	8 : : 1	5	46,2248	0	0	5,2967	45,0392	1
12	1 : : 1	6,45	0	5,2936	45,0751	5,2688	45,0113	2
12	2 : : 1	7,95	0	5,2682	45,0497	5,4408	45,0113	2
12	3 : : 1	7,95	0	5,2513	45,0133	5,4370	45,0113	2
12	4 : : 1	7,45	0	5,2607	45,0226	5,4068	45,0113	2
12	5 : : 1	6,45	0	5,2906	45,0525	5,4074	45,0113	2
12	6 : : 1	8,45	0	5,2574	44,9999	5,4314	45,0113	2
12	7 : : 1	6,45	0	5,2967	45,0392	5,4227	45,0113	2
12	8 : : 1	7,45	0	5,2688	45,0113	5,4404	45,0392	2

ANNEXE 8 : EXEMPLES D'IDENTIFICATION DE SCHÈMES

Exemple 1 : participant 12 utilise le schème pertinent

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
12	1 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
12	2 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2936	45,0751	1
12	3 : : 1	5	46,2448	0	0	5,2682	45,0497	1
12	4 : : 1	5	46,2448	0	0	5,2513	45,0133	1
12	5 : : 1	5	46,2448	0	0	5,2607	45,0226	1
12	6 : : 1	5	46,2248	0	0	5,2906	45,0525	1
12	7 : : 1	5	46,2248	0	0	5,2574	44,9999	1
12	8 : : 1	5	46,2248	0	0	5,2967	45,0392	1
12	1 : : 1	6,45	0	5,2936	45,0751	5,2688	45,0113	2
12	2 : : 1	7,95	0	5,2682	45,0497	5,4408	45,0113	2
12	3 : : 1	7,95	0	5,2513	45,0133	5,4370	45,0113	2
12	4 : : 1	7,45	0	5,2607	45,0226	5,4068	45,0113	2
12	5 : : 1	6,45	0	5,2906	45,0525	5,4074	45,0113	2
12	6 : : 1	8,45	0	5,2574	44,9999	5,4314	45,0113	2
12	7 : : 1	6,45	0	5,2967	45,0392	5,4227	45,0113	2
12	8 : : 1	7,45	0	5,2688	45,0113	5,4404	45,0392	2

Valeur du programme faible et ajustée au résultat du premier étirage

Augmentation du programme cohérent avec résultat de passe 2 mais pas avec résultat cadre précédent : **schème pertinent.**

Résultat bon mais légèrement au dessus de la valeur cible

On observe le même processus pour la suite : il utilise toujours le schème pertinent

Exemple 2 : le participant 6 utilise le schème trompeur

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
6	1 : : 1	5	46,2411	0	0	0	0	1
6	2 : : 1	5	46,2640	0	0	5,2936	45,0751	1
6	3 : : 1	5	46,2600	0	0	5,2682	45,0489	1
6	4 : : 1	5	46,2200	0	0	5,2513	45,0281	1
6	5 : : 1	5	46,2200	0	0	5,2607	44,9984	1
6	6 : : 1	5	46,2000	0	0	5,2906	45,0283	1
6	7 : : 1	5	46,1000	0	0	5,2574	44,9757	1
6	8 : : 1	5	46,1000	0	0	5,2967	44,9174	1
6	2 : : 1	8,5	0	5,2682	45,0489	5,2688	44,8896	2
6	3 : : 1	8,5	0	5,2513	45,0281	5,4456	45,0489	2
6	4 : : 1	8,5	0	5,2607	44,9984	5,4199	45,0281	2
6	5 : : 1	8,5	0	5,2906	45,0283	5,4377	44,9984	2
6	6 : : 1	8	0	5,2574	44,9757	5,4815	44,9984	2
6	7 : : 1	8	2	5,2967	44,9174	5,4162	44,9757	2
6	8 : : 1	8	0,1	5,2688	44,8896	5,4847	46,8489	2

Mêmes valeurs d'étirage pour tous les cadres quelques soit les résultats de la première passe.

Diminution du programme alors que le résultat en première passe a également diminué : **schème trompeur**

Résultat trop grand

Exemple 3 : le participant 4 change de schème

			46,2411	0	0	0		
			46,2411	0	0	0		
4	3 : : 1	5	46,2411	0	0	0		
4	4 : : 1	5	46,2411	0	0	0		
4	5 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2607	45,0421	1
4	6 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2607	45,0421	1
4	7 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2574	45,0389	1
4	8 : : 1	5	46,2411	0	0	5,2574	45,0389	1
4	1 : : 1	10,45	0	5,2936	45,0751	5,2688	45,0389	2
4	5 : : 1	8	0,5	5,2906	45,0720	5,5386	45,0751	2
4	7 : : 1	8	0,5	5,2967	45,0782	5,4713	45,5340	2
4	6 : : 1	6	0,5	5,2574	45,0389	5,4837	45,0782	2
4	8 : : 1	7	0,5	5,2688	45,0503	5,3678	45,0389	2
4	2 : : 1	7,5	0,5	5,2682	45,0497	5,4146	45,0503	2
4	4 : : 1	8	0,5	5,2607	45,0421	5,4188	45,0503	2
4	6 : : 1	2	0,5	5,3678	45,0389	5,4199	45,0503	2
4	6 : : 1	2	0,5	5,3678	45,0389	5,4199	45,0503	2
4	3 : : 1	9	0,5	5,2513	45,0328	5,4752	45,0503	2

Au début il diminue les programmes même quand la longueur mesurée en passe 1 diminue : **schème trompeur**

Alors qu'il obtenait des résultats trop grands, il obtient soudainement un résultat trop petit.

Il augmente ensuite les programmes même en ayant obtenu des résultats correctes en prenant en compte le résultat de la passe 1 : **schème pertinent**

ANNEXE 9 : ANALYSES STATISTIQUES DE L'ÉTUDE 2

Angle

Analyse de variance (27 avis) (L'algorithme n'a pas convergé)

Variables	Df	Deviance	Resid. Df	Resid. Dev	Pr(>Chi)	
NULL			92	118,391635		
groupe	1	1,74833582	91	116,643299	0,18608608	
participant	10	20,8998453	81	95,7434542	0,02180288	*
Young	1	15,0424096	80	80,7010446	0,00010512	***
ElasticiteI	1	0,11992294	79	80,5811216	0,72911808	
ElasticiteF	0	0	79	80,5811216		
Ecartement	1	4,10374479	78	76,4773768	0,04278834	*
Réglage2Lréel	1	1,73516938	77	74,7422075	0,18775206	
TpsApTrempe	1	2,75018331	76	71,9920242	0,09724328	.
SchPertL	1	4,26557881	75	67,7264453	0,038892	*
SchPertA	0	0	75	67,7264453		
SchTromL	1	1,5222587	74	66,2041866	0,217278	
SchTrompA	0	0	74	66,2041866		
SchRegroupe	0	0	74	66,2041866		
Réactif	0	0	74	66,2041866		
StartProgram1	1	0,05693655	73	66,1472501	0,81140505	
FrameMonitoringCard	1	0,85531168	72	65,2919384	0,35505402	
Fault.Track	1	2,57962616	71	62,7123123	0,10824722	
Measurment.Angle1	1	1,09181863	70	61,6204936	0,29606861	
Measurment.Angle1.value	1	6,17798687	69	55,4425068	0,01293494	*
Measurment.Lengthening1	1	0,01907777	68	55,423429	0,89014376	
Measurment.Lengthening1.value	1	1,88595171	67	53,5374773	0,16965924	
Measurment.Angle2	1	0,01141854	66	53,5260587	0,91490196	
Measurment.Angle2.value	1	19,4618809	65	34,0641778	1,03E-05	***
Measurment.Lengthening2	1	4,46107164	64	29,6031062	0,03467574	*
Measurment.Lengthening2.value	1	0,29752326	63	29,3055829	0,5854393	
Omission.Track	1	0	62	720,873068	1	
Program1.length.value	0	0	62	720,873068		
Program1Change.Speed	1	692,280575	61	28,5924932	1,43E-152	***
Program1.speed.value	1	0	60	792,960375	1	
Winding1.value	1	72,0873068	59	720,873068	2,06E-17	***
Program2.Change.Length	1	216,26192	58	504,611147	5,91E-49	***
Program2.Length.value1	1	480,104743	57	24,5064043	2,03E-106	***
Program2.Change.Speed	1	4,78254019	56	19,7238641	0,02874968	*
Speed2.value	1	1,46E-08	55	19,7238641	0,99990357	
Program2Change.Winding	1	0,8588848	54	18,8649793	0,35405096	
Winding2.value1	1	0	53	792,960375	1	
Winding2.value2	1	792,960374	52	5,43E-07	1,83E-174	***

Choix du meilleur modèle par le BIC.
BIC(M0) [1] 128.1147
> BIC(M1) [1] 185.8366
> BIC(M2) [1] 158.0297
> BIC(M3) [1] 163.7642
> BIC(M4) [1] 134.6843
Modèles d'interaction
> BIC(M0) [1] 128.1147
> BIC(MIa1) [1] 136.5216
> BIC(MIa2) [1] 133.7931
> BIC(MIa3) [1] 134.5425
> BIC(MIa4) [1] 126.579

Description du meilleur modèle : glm(formula = angle.fault ~ 1 + groupe * Réactif, family = binomial, data = Angle)

Coefficients:

(Intercept)	groupe3	Réactif1	groupe3:Réactif1
-0.04879	-0.94161	-17.51728	NA

Degrees of Freedom: 95 Total (i.e. Null) ; 93 Residual
Null Deviance: 123.6 Residual Deviance: 112.9 AIC: 118.9

Distance angle

Meilleur modèle M1 (modèle complet) mais pas d'Anova possible
> BIC(M0gamma) [1] -133.0149
> BIC(M0gaussian) [1] 440.4594
> BIC(M1gamma) [1] -199.239
> BIC(M1gaussian) [1] 110.9113
> BIC(MI1) [1] -154.2504
> BIC(MI2) [1] -150.8898
> BIC(MI3) [1] -149.8602
> BIC(MI4) [1] -162.2554
> BIC(MSc1) [1] -129.1872
> BIC(MSc2) [1] -135.8591
> BIC(MSc3) [1] -137.0184
> BIC(MSc4) [1] -137.3798
glm(formula = abs(difference.angle) ~ 1 + groupe + participant + Young + ElasticiteI + ElasticiteF + Ecartement + Réglage2Lréel + TpsApTrempe + SchPertL + SchPertA + SchTromL + SchTrompA + SchRegroupe + Réactif + StartProgram1 + FrameMonitoringCard + Fault.Track + Measurment.Angle1 + Measurment.Angle1.value + Measurment.Lengthening1 + Measurment.Lengthening1.value + Measurment.Angle2 + Measurment.Angle2.value + Measurment.Lengthening2 + Measurment.Lengthening2.value + Omission.Track + Program1.length.value + Program1Change.Speed + Program1.speed.value + Winding1.value + Program2.Change.Length + Program2.Length.value1 + Program2.Change.Speed + Speed2.value + Program2Change.Winding + Winding2.value1 + Winding2.value2, family = Gamma, data = Angle2)

Longueur

Analyse de variance (27 avis)

Variables	Df	Deviance	Resid. Df	Resid. Dev	Pr(>Chi)	
NULL			92	116,956687		
groupe	1	3,9930889	91	112,963598	0,04568724	*
participant	10	10,2801932	81	102,683405	0,41626452	
Young	1	2,02639833	80	100,657007	0,15458657	
ElasticiteI	1	0,04332665	79	100,61368	0,83511143	
ElasticiteF	0	0	79	100,61368		
Ecartement	1	0,15410295	78	100,459577	0,69464487	
Réglage2LréeI	1	5,46266215	77	94,9969152	0,01942703	*
TpsApTrempe	1	0,32254307	76	94,6743721	0,57008334	
SchPertL	1	1,42788212	75	93,24649	0,23211039	
SchPertA	0	0	75	93,24649		
SchTromL	1	4,93409318	74	88,3123968	0,02633188	*
SchTrompA	0	0	74	88,3123968		
SchRegroupe	0	0	74	88,3123968		
Réactif	0	0	74	88,3123968		
StartProgram1	1	6,19806317	73	82,1143336	0,01278902	*
FrameMonitoringCard	1	4,63285149	72	77,4814822	0,03136539	*
Fault.Track	1	0	71	77,4814822	1	
Measurment.Angle1	1	0,61844434	70	76,8630378	0,43162597	
Measurment.Angle1.value	1	0,42556762	69	76,4374702	0,5141719	
Measurment.Lengthening1	1	0,27219495	68	76,1652753	0,60186317	
Measurment.Lengthening1.value	1	13,1634823	67	63,001793	0,00028546	***
Measurment.Angle2	1	0,17002253	66	62,8317705	0,68009179	
Measurment.Angle2.value	1	2,21331778	65	60,6184527	0,13682413	
Measurment.Lengthening2	1	5,21649247	64	55,4019602	0,02237363	*
Measurment.Lengthening2.value	1	0,30691447	63	55,0950457	0,57957979	
Omission.Track	1	0,08952332	62	55,0055224	0,76478404	
Program1.length.value	0	0	62	55,0055224		
Program1Change.Speed	1	8,9037017	61	46,1018207	0,00284593	**
Program1.speed.value	1	0,64783576	60	45,453985	0,42088752	
Winding1.value	1	0	59	1009,22229	1	
Program2.Change.Length	1	980,554121	58	28,6681735	3,03E-215	***
Program2.Length.value1	1	1,03442662	57	27,6337468	0,30912125	
Program2.Change.Speed	1	0	56	1009,22229	1	
Speed2.value	1	144,174614	55	865,047681	3,25E-33	***
Program2Change.Winding	1	0	54	1009,22229	1	
Winding2.value1	1	0	53	1009,22229	1	
Winding2.value2	1	0	52	1009,22229	1	

Choix du modèle avec le BIC

> BIC(M0) [1] 128.1147
> BIC(M1) [1] 1195.059
> BIC(M2) [1] 143.2611
> BIC(M3) [1] 137.6796
> BIC(M4) [1] 136.3139
Modèle interaction :
> BIC(M0) [1] 128.1147
> BIC(MI1) [1] 126.6422
> BIC(MI2) [1] 132.0454
> BIC(MI3) [1] 135.1808
> BIC(MI4) [1] 130.5562

Description du meilleur modèle :

glm(formula = length.fault ~ 1 + groupe * SchTromL, family = binomial, data = Longueur

Coefficients:

(Intercept)	groupe3	SchTromL1	groupe3:SchTromL1
0.09531	-2.14300	-0.47000	2.67185

Degrees of Freedom : 95 Total (i.e. Null) ; 92 Residual
Null Deviance : 123.6 Residual Deviance : 108.4 AIC : 116.4

Distance à la longueur cible

Analyse de variance

Variables	Df	Deviance	Resid. Df	Resid. Dev	Pr(>Chi)	
NULL			92	0,69459828		
groupe	1	0,0110096	91	0,68358868	2,71E-07	***
participant	10	0,08377892	81	0,59980976	8,85E-38	***
Young	1	0,00260868	80	0,59720108	0,01230451	*
ElasticiteI	1	0,00623415	79	0,59096693	0,00010892	***
ElasticiteF	0	0	79	0,59096693		
Ecartement	1	0,00546925	78	0,58549768	0,00028937	***
Réglage2Lréel	1	0,5132703	77	0,07222738	4,20E-270	***
TpsApTrempe	1	0,00116422	76	0,07106317	0,09446227	.
SchPertL	1	0,00069623	75	0,07036693	0,19592991	
SchPertA	0	0	75	0,07036693		
SchTromL	1	0,00146507	74	0,06890187	0,06065745	.
SchTrompA	0	0	74	0,06890187		
SchRegroupe	0	0	74	0,06890187		
Réactif	0	0	74	0,06890187		
StartProgram1	1	0,00759251	73	0,06130936	1,95E-05	***
FrameMonitoringCard	1	0,00471697	72	0,05659239	0,00076228	***
Fault.Track	1	0,00127506	71	0,05531733	0,080099	.
Measurment.Angle1	1	0,00052643	70	0,0547909	0,26078805	
Measurment.Angle1.value	1	0,00047197	69	0,05431893	0,28697728	
Measurment.Lengthening1	1	0,0009794	68	0,05333953	0,12506891	
Measurment.Lengthening1.value	1	0,00369701	67	0,04964252	0,00288184	**
Measurment.Angle2	1	0,00044328	66	0,04919924	0,30211659	
Measurment.Angle2.value	1	0,00118947	65	0,04800977	0,0909605	.
Measurment.Lengthening2	1	0,00044581	64	0,04756396	0,30073957	
Measurment.Lengthening2.value	1	0,00103783	63	0,04652612	0,11435074	
Omission.Track	1	0,00013535	62	0,04639078	0,56854425	
Program1.length.value	0	0	62	0,04639078		
Program1Change.Speed	1	0,00353786	61	0,04285292	0,00355442	**
Program1.speed.value	1	0,00020167	60	0,04265125	0,48641666	
Winding1.value	1	0,00064555	59	0,0420057	0,21303035	
Program2.Change.Length	1	0,00531616	58	0,03668954	0,00035217	***
Program2.Length.value1	1	0,00046305	57	0,03622649	0,29158068	
Program2.Change.Speed	1	0,01107715	56	0,02514934	2,49E-07	***
Speed2.value	1	0,00097987	55	0,02416947	0,12497749	
Program2Change.Winding	1	0,00223212	54	0,02193735	0,02058119	*
Winding2.value1	1	0,00016418	53	0,02177316	0,53000137	
Winding2.value2	1	0,00012595	52	0,02164721	0,58228106	

Sélection du modèle par le BIC

> BIC(M0gamma) [1] -409.734
> BIC(M0gaussian) [1] -187.2131
> BIC(M1gamma) [1] -343.658
> BIC(M1gaussian) [1] -323.6977
> BIC(M2) [1] -381.2129
> BIC(M4) [1] -391.0369
> BIC(M5) [1] -398.5592
Interaction
> BIC(M0gamma) [1] -409.734
> BIC(MI1) [1] -423.7503
> BIC(MI2) [1] -416.0633
> BIC(MI3) [1] -406.7417
> BIC(MI4) [1] -411.2825

Description du meilleur modèle

Call: glm(formula = abs(difference.length) ~ 1 + groupe * SchTromL, family = Gamma, data = longueur2)

Coefficients :

(Intercept)	groupe3	SchTromL1	groupe3:SchTromL1
11.51	37.15	20.19	-48.27

Degrees of Freedom: 95 Total (i.e. Null); 92 Residual
Null Deviance: 144.4 Residual Deviance: 113.5 AIC: -436.6

Réussite

Des probabilités ont été ajustées numériquement à zéro

Analyse de variance (14 avis)

Variables	Df	Déviance	Resid. Df	Resid. Dev	Pr(>Chi)	
NULL			92	120,972659		
groupe	1	2,99012988	91	117,982529	0,08377345	.
participant	10	17,163431	81	100,819098	0,07082499	.
Young	1	4,87274782	80	95,9463505	0,02728402	*
ElasticiteI	1	1,23496209	79	94,7113884	0,2664442	
ElasticiteF	0	0	79	94,7113884		
Ecartement	1	2,54251901	78	92,1688694	0,11081786	
Réglage2LréeI	1	0,80516976	77	91,3636997	0,36955218	
TpsApTrempe	1	0,49883165	76	90,864868	0,48001394	
SchPertL	1	0,48284378	75	90,3820242	0,48713702	
SchPertA	0	0	75	90,3820242		
SchTromL	1	1,62650702	74	88,7555172	0,20218686	
SchTrompA	0	0	74	88,7555172		
SchRegroupe	0	0	74	88,7555172		
Réactif	0	0	74	88,7555172		
StartProgram1	1	0,77054881	73	87,9849684	0,38004733	
FrameMonitoringCard	1	1,53998626	72	86,4449821	0,21461985	
Fault.Track	1	0,0812342	71	86,3637479	0,77563178	
Measurment.Angle1	1	2,6113617	70	83,7523862	0,10610062	
Measurment.Angle1.value	1	0,509976	69	83,2424102	0,47514924	
Measurment.Lengthening1	1	0,04237268	68	83,2000376	0,83691102	
Measurment.Lengthening1.value	1	0,28034643	67	82,9196911	0,59647424	
Measurment.Angle2	1	0,00455397	66	82,9151372	0,94619711	
Measurment.Angle2.value	1	0,68754925	65	82,2275879	0,40699923	
Measurment.Lengthening2	1	0,00721333	64	82,2203746	0,93231601	
Measurment.Lengthening2.value	1	0	63	1658,00806	1	
Omission.Track	1	1595,49345	62	62,5146075	0	***
Program1.length.value	0	0	62	62,5146075		
Program1Change.Speed	1	4,82E-09	61	62,5146075	0,99994463	
Program1.speed.value	1	0,08689496	60	62,4277125	0,76816232	
Winding1.value	1	0,100119	59	62,3275936	0,75168688	
Program2.Change.Length	1	0	58	1297,57152	1	
Program2.Length.value1	1	0	57	1297,57152	1	
Program2.Change.Speed	1	0	56	1585,92075	1	
Speed2.value	1	216,26192	55	1369,65883	5,91E-49	***
Program2Change.Winding	1	0	54	1513,83344	1	
Winding2.value1	1	0	53	1730,09536	1	
Winding2.value2	1	360,436534	52	1369,65883	2,26E-80	***

Choix du meilleur modèle par les BIC

> BIC(M0) [1] 128.1147
> BIC(M1) [1] 1555.495
> BIC(M2) [1] 161.1963
> BIC(M3) [1] 129.0919
> BIC(M4) [1] 131.1695

Modèles imbriqués.

> BIC(M0) [1] 128.1147
> **BIC(MIS1) [1] 126.3777**
> BIC(MIS2) [1] 136.5283
> BIC(MIS3) [1] 134.6396
> BIC(MIS4) [1] 132.9122

Description du meilleur modèle

Call : glm(formula = Succès ~ 1 + groupe * SchTromL, family = binomial, data = Succès)

Coefficients :

(Intercept)	**groupe3**	**SchTromL1**	**groupe3:SchTromL1**
-1.4469	1.7346	0.5819	-3.3545

Degrees of Freedom: 95 Total (i.e. Null) ; 92 Residual

Null Deviance : 123.6 Residual Deviance : 108.1 AIC: 116.1

ANNEXE 10 : ANALYSES PLS DE L'ÉTUDE 2

Afin de déterminer le lien entre performances et tous les facteurs identifiés, nous avons également réalisé des analyses PLS. Les résultats de cette analyse vont dans le même sens que les résultats présentés dans le corps de la thèse, ils ont cependant été mis en annexes afin de ne pas complexifier d'avantage la lecture de la partie résultat de l'étude 2.

La régression PLS est particulièrement adaptée à la sélection de variables lorsque le nombre de participants est plus faible que le nombre de variables à analyser (Cornillon et al., 2008).

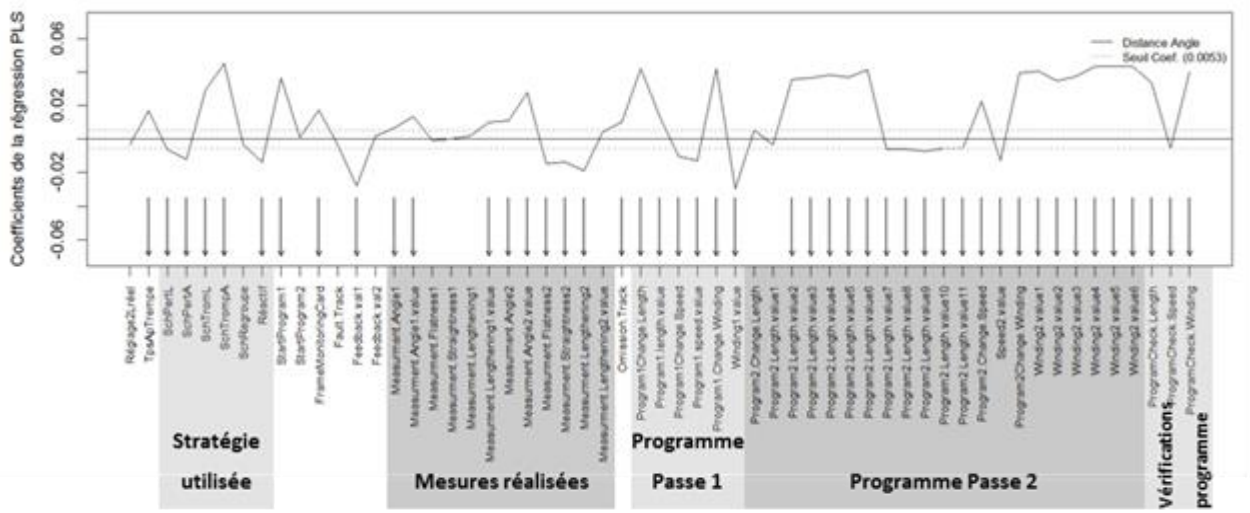
Cette analyse crée un modèle qui prédit une variable quantitative à partir d'autres variables elles aussi quantitatives en créant des composantes orthogonales entre elles mais ayant une covariance maximale avec la variable à prédire. Les composantes sont des variables sous-jacentes créées à partir des variables initiales. L'analyse cherche, dans un premier temps, le nombre de composantes permettant de réduire au maximum l'erreur de prédiction. À partir de ces composantes, l'analyse sélectionne alors les variables constitutives des composantes, qui ont donc un lien avec la variable à prédire.

En particulier, nous avons utilisé la procédure « *leave one out* » qui consiste à prédire le résultat d'un individu statistique à partir des valeurs qu'il a obtenues et des résultats de tous les autres individus statistiques. Ainsi, le modèle prédictif est créé avec tous les individus statistiques sauf un, le modèle doit alors prédire son résultat à partir des variables comprises dans le modèle. Les résultats des individus statistiques sont alors prédits les uns après les autres. Au final, on garde le modèle qui produit le moins d'erreurs.

Ici, cette analyse nous permet de lier performances, stratégie et actions. Cependant, elle n'inclut pas les facteurs repérés avant : le groupe, l'habitude des jeux vidéo, les connaissances antérieures et le participant. Le modèle complet compte 54 variables, incluant les facteurs individuels et expérimentaux, les stratégies et toutes les actions faites pendant le scénario 6.

En ce qui concerne les résultats de l'analyse PLS pour l'angle comme motif de rebut, aucun élément n'est conservé.

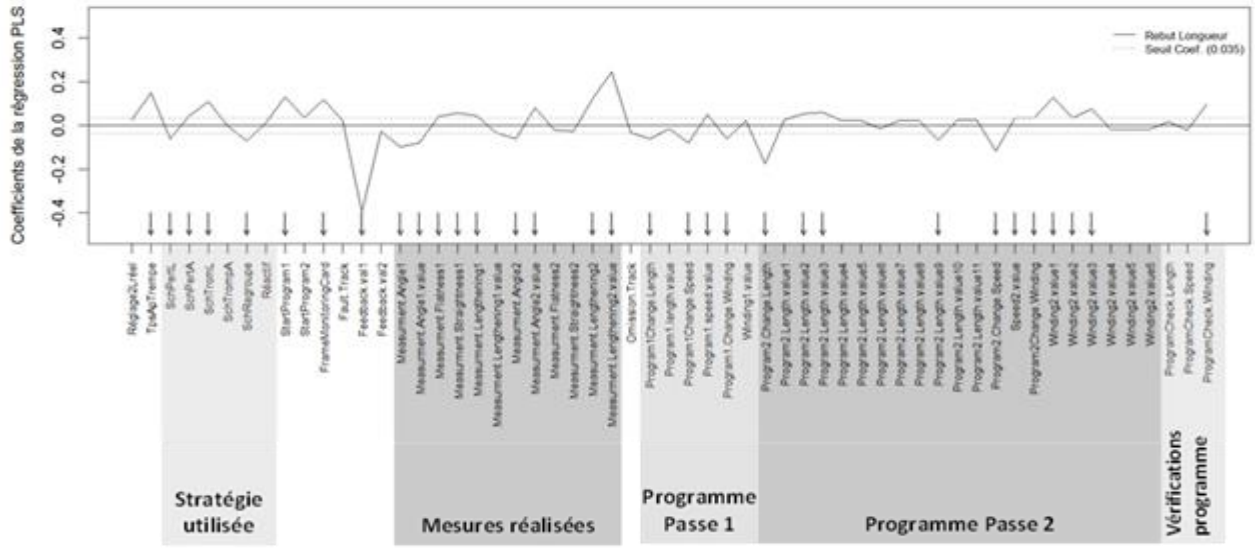
Résultat PLS concernant la distance à l'angle cible



Pour la distance à l'angle en revanche, l'analyse PLS conserve beaucoup d'éléments : les mesures prises, les programmes utilisés et les vérifications effectuées, l'oubli des chenilles, mais également les différentes stratégies liées aux schèmes présentées ci-avant (variance expliquée avant sélection de variables : 24,720 et après : 24,834).

La courbe va notamment en dessous du seuil sélectionné pour les schèmes pertinents concernant l'angle et la longueur, ainsi que pour la stratégie réactive. Ainsi les cadres étirés avec ces stratégies sont plus proches de l'angle idéal. En revanche, les cadres étirés avec les schèmes trompeurs sont plus éloignés de l'angle idéal. La stratégie qui consiste à regrouper les cadres en fonction de la première passe n'a pas d'effet sur l'angle.

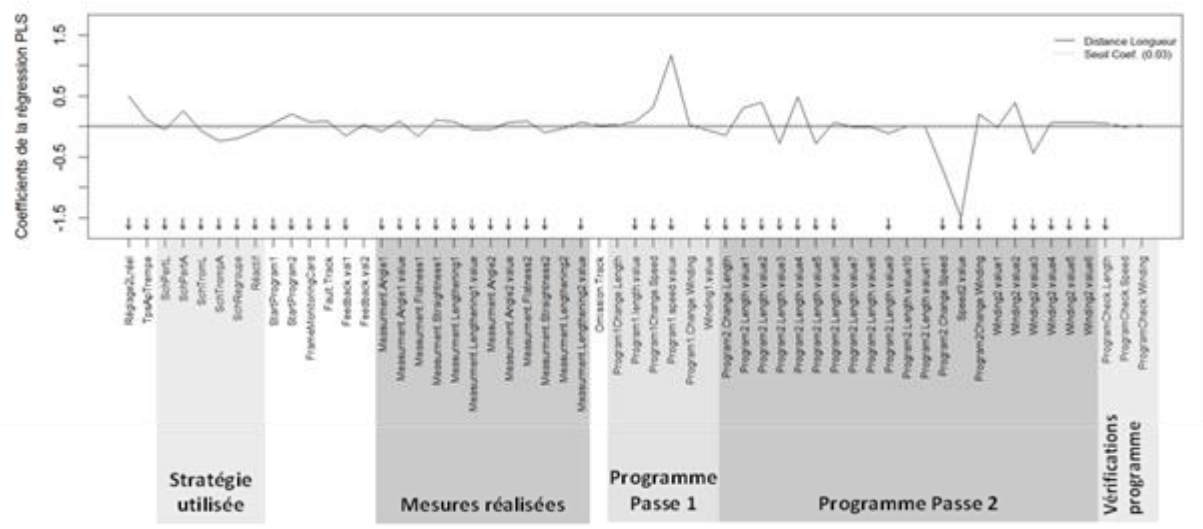
Rebuts liés à la longueur



L'analyse PLS garde les variables liées aux mesures prises et aux programmes utilisés, mais également les variables liées à la stratégie utilisée.

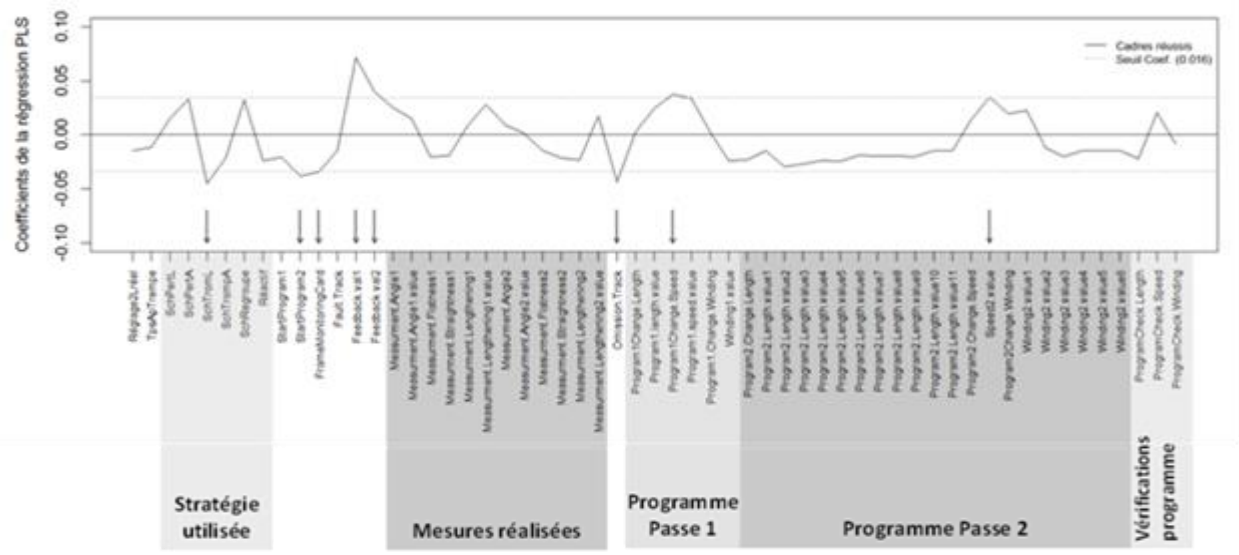
Ainsi, l'utilisation du schème pertinent pour la longueur ou de la stratégie « regroupement » diminue le nombre de rebuts à cause de la longueur. En revanche, le schème pertinent pour l'angle et le schème trompeur pour la longueur augmentent le nombre de cadres rebutés à cause de la longueur. La variance expliquée avant sélection de variables est de 23,180, après sélection, elle est de 30,865.

Distance à la longueur cible



L'analyse PLS conserve les variables liées aux stratégies suivantes : le schème pertinent pour la longueur, le schème trompeur pour l'angle, le schème trompeur pour la longueur, la stratégie de regroupement et la stratégie réactive qui toutes diminuent la distance à la longueur cible. Ces stratégies améliorent donc la précision pour la longueur. En revanche, le schème pertinent pour l'angle augmente cette distance. Les autres variables gardées concernent les programmes utilisés et les mesures prises (variance expliquée avant sélection de variables = 82,868, et après sélection de variables = 83,193).

Résultats concernant la réussite du cadre



L'analyse PLS pour ce critère de performance, où l'on regarde pour chaque cadre si oui ou non il est réussi, ne garde qu'un nombre limité de facteurs (variance expliquée avant sélection de variable = 18,505, et après sélection de variables = 24,272). On remarque notamment le fait d'oublier les chenilles : cet oubli va provoquer un rebut du cadre à cause de la rectitude et de la planéité. Il est donc logique de le voir apparaître.

L'action « Start program 2 » correspond au nombre de fois où le programme 2 est lancé. Ainsi, plus il est lancé, moins le cadre est réussi. Cela est cohérent avec la façon dont le micromonde fonctionne : à chaque fois que l'on étire un cadre, l'écartement des branches diminue. Si le participant procède à un nombre trop important d'essais, les outils ne seront plus adaptés, et le cadre sera rebuté à cause de la rectitude et de la planéité.

La valeur de la vitesse en deuxième passe et le fait de changer la vitesse en première passe semblent moins logique, la vitesse ne devant pas avoir d'impact sur les résultats. Cependant, on peut penser que les participants jouant sur la vitesse sont également ceux qui se sentent le plus à l'aise dans le micromonde. De même, nous voyons que ceux qui consultent plus les fiches de suivi réussissent moins.

Pour ce qui est des stratégies mobilisées, seule la stratégie qui consiste à utiliser le schème trompeur diminue la réussite du cadre. Ainsi, les cadres étirés avec le schème trompeur sont moins bien réussis que les autres.

ANNEXE 11 : TABLEAUX DES PROGRAMMES ET MESURES DE L'ÉTUDE 3

Participant 31

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
31	1	5	45	0	0	0	0	1
31	2	5	45	5,2	0	5,2936497	43,8419	1
31	1	7	1,23	5,2936497	43,8419	5,2	0	2
31	3	5	45	0	0	5,2682304	43,816483	1
31	4	5	45	0	0	5,251333	43,799583	1
31	5	5	45	0	0	5,2606754	43,808926	1
31	6	5	45	0	0	5,290558	43,83881	1
31	7	5	45	0	0	5,2574205	43,80567	1
31	8	5	45	0	0	5,296684	43,844933	1
31	5	7,1	1,23	5,290558	43,83881	5,2688203	43,81707	2
31	7	6,5	1,22	5,296684	43,844933	5,4517264	45,01611	2
31	4	8	1,26	5,2606754	43,808926	5,446137	45,01605	2
31	6	8,2	1,26	5,2574205	43,80567	5,427492	44,999077	2
31	8	7,8	1,25	5,2688203	43,81707	5,428998	44,995583	2
31	2	7,75	1,25	5,2682304	43,816483	5,435976	45,00263	2
31	3	8,5	1,26	5,251333	43,799583	5,43138	44,99934	2

Participant 32

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
32	1	5	46,26484	0	0	0	0	1
32	2	5	46,21	0	0	0	45,07512	1
32	3	5	46,212	0	0	0	44,99623	1
32	4	5	46,216	0	0	0	44,981285	1
32	5	5	46,22	0	0	0	44,994526	1
32	6	5	46,217	0	0	0	45,02831	1
32	7	5	46,217	0	0	0	44,992245	1
32	8	5	46,216	0	0	0	45,03151	1
32	4	10,45	0	5,2606754	44,994526	0	45,00267	2
32	3	9,2	0	5,251333	44,981285	5,4781737	45,00267	2
32	2	9	0	5,2682304	44,99623	5,4323125	45,00267	2
32	1	7	0	5,2936497	45,07512	5,4560637	45,00267	2
32	8	8,6	0	5,2688203	45,00267	5,452884	45,03151	2
32	7	6,5	0	5,296684	45,03151	5,4479628	45,00267	2
32	6	9,2	0	5,2574205	44,992245	5,444095	45,00267	2
32	5	7	0	5,290558	45,02831	5,439875	45,00267	2

Participant 33

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
33	1	4	46,26	0	0	0	0	1
33	2	4	46,2	0	0	5,2682996	45,070396	1
33	3	4	46,2	0	0	5,2428803	44,98648	1
33	4	4	46,2	0	0	5,225983	44,969585	1
33	5	4	46,2	0	0	5,2353253	44,978928	1
33	6	4	46,2	0	0	5,265208	45,00881	1
33	7	4	46,2	0	0	5,2320704	44,97567	1
33	8	4	46,2	0	0	5,271334	45,014935	1
33	1	7,4	0	5,2682996	45,070396	5,24347	44,987072	2
33	7	7,2	0	5,271334	45,014935	5,4349837	45,070396	2
33	5	7,2	0	5,265208	45,00881	5,4370465	45,014935	2
33	8	7,4	0	5,24347	44,987072	5,42427	45,00881	2
33	2	8,5	0	5,2428803	44,98648	5,39071	44,987072	2
33	4	9	0	5,2353253	44,978928	5,4204965	44,98648	2
33	6	9,3	0	5,2320704	44,97567	5,4257216	44,978928	2
33	3	9,5	0	5,225983	44,969585	5,42296	44,97567	2

Participant 34

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
34	1	5	46,26484	0	0	0	0	1
34	2	5	46,17	0	0	5,2936497	45,07512	1
34	3	5	46,2	0	0	5,2682304	44,95723	1
34	1	10	0	5,2936497	45,07512	5,2682304	44,969585	2
34	4	5	46,21	0	0	5,534011	44,969585	1
34	5	5	46,215	0	0	5,534011	44,988674	1
34	6	5	46,215	0	0	5,2606754	44,988674	1
34	2	9	0	5,2682304	44,95723	5,2606754	45,023434	2
34	7	5	46,212	0	0	5,468379	45,023434	1
34	8	5	46,212	0	0	5,468379	45,023434	1
34	3	8	0	5,251333	44,969585	5,2574205	44,990295	2
34	4	8,2	0	5,2606754	44,988674	5,2688203	44,99877	2
34	5	8,2	0	5,290558	45,023434	5,431135	44,99877	2
34	6	8,2	0	5,2574205	44,990295	5,431135	44,99877	2
34	7	8,2	0	5,296684	45,026634	5,431135	44,99877	2
34	8	8,2	0	5,2688203	44,99877	5,4809504	45,026634	2

Participant 35

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
35	1	10,15	46,26484	0	0	0	0	1
35	2	10,15	46,26484	0	0	5,4242024	45,07512	1
35	3	10,15	46,26484	0	0	5,4242024	45,07512	1
35	4	10,35	46,26484	0	0	5,381886	45,07512	1
35	5	11	46,26484	0	0	5,396298	45,07512	1
35	6	11	46,26484	0	0	5,442658	45,07512	1
35	7	11,2	46,26484	0	0	5,4242024	45,07512	1
35	8	11,1	46,26484	0	0	5,453854	45,07512	1
35	4	1,5	0	5,396298	0	5,423455	45,07512	2
35	4	5	0	5,396298	0	5,423455	45,07512	2
35	3	4	0	5,381886	0	5,474809	45,07512	2
35	2	4	0	5,3987827	0	5,440346	45,07512	2

Participant 36

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
36	1	4,42	45	0	0	0	0	1
36	2	10	46	0	0	5,278947	43,8419	1
36	3	12	46,5	0	0	5,3949804	44,79148	1
36	4	12,1	46,2	0	0	5,428783	45,262085	1
36	5	12,05	46,3	0	0	5,44066	44,978928	1
36	6	11	46	0	0	5,4692755	45,106308	1
36	7	11,5	46,2	0	0	5,4095206	44,78067	1
36	8	11,2	46,2	0	0	5,461459	45,014935	1
36	1	1	4	5,278947	43,8419	5,42599	44,987072	2
36	2	7	0,1	5,3949804	44,79148	5,286091	47,72331	2
36	6	2	0,3	5,4095206	44,78067	5,5448084	44,854706	2
36	8	2,5	0,25	5,42599	44,987072	5,4188914	45,029797	2

Participant 37

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
37	1	5	46,26484	0	0	0	0	1
37	2	5	46,26484	0	0	0	0	1
37	4	5	46,26484	0	0	0	0	1
37	3	5	46,26484	0	0	0	0	1
37	5	5	46,26484	0	0	0	0	1
37	6	5	46,26484	0	0	0	0	1
37	8	5	46,26484	0	0	0	0	1
37	7	5	46,26484	0	0	0	0	1
37	1	6,25	0	5,2936497	45,07512	5,251333	45,032803	2
37	2	7,83	0	5,2682304	45,049698	5,251333	45,032803	2
37	2	7,83	0	5,40558	45,049698	5,251333	45,032803	2
37	4	8,1	0	5,2606754	45,042145	5,5331736	45,032803	2
37	3	8,35	0	5,251333	45,032803	5,5331736	45,042145	2
37	7	6,25	0	5,296684	0	5,290558	45,032803	2
37	5	6,25	0	5,290558	0	5,2688203	45,032803	2
37	8	8,3	0	5,2688203	0	5,2574205	45,032803	2
37	6	8,3	0	5,2574205	0	5,4119134	45,032803	2
37	6	3,4	0	5,370169	0	5,335213	45,032803	2
37	6	3,4	0	5,370169	0	5,335213	45,032803	2
37	3	5	0	5,335213	45,032803	5,370169	45,042145	2
37	3	4,1	0	5,335213	45,032803	5,370169	45,042145	3

Participant 38

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
38	1	5	46,26484	0	0	0	0	1
38	2	5	46,26484	0	0	5,2936497	45,07512	1
38	3	5	46,26484	0	0	5,2936497	45,07512	1
38	1	10,45	0	5,2936497	45,07512	5,251333	45,032803	2
38	4	4,8	46,26484	0	0	5,5452566	45,07512	1
38	2	10,4	0	5,2682304	45,049698	5,255605	45,042145	2
38	3	10,3	0	5,251333	45,032803	5,5007124	45,049698	2
38	4	10,3	0	5,255605	45,042145	5,470965	45,032803	2
38	5	4,8	46,26484	0	0	5,4818664	45,042145	1
38	6	4,8	46,26484	0	0	5,2854877	45,072025	1
38	7	4,,8	46,26484	0	0	5,2523503	45,038887	1
38	5	10,25	0	5,2854877	45,072025	5,291614	45,07815	2
38	8	4,8	46,26	0	0	5,530148	45,101326	1
38	6	10,3	0	5,2523503	45,038887	5,26375	45,050293	2
38	7	10,3	0	5,291614	45,07815	5,476832	45,050293	2
38	8	10,25	0	5,26375	45,050293	5,5407667	45,07815	2

Participant 40

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
40	1	5	46,26484	0	0	0	0	1
40	2	5	46	0	0	5,2936497	45,07512	1
40	2	5	46,27	5,2682304	44,79148	5,2936497	45,07512	1
40	3	5	46,27	0	0	5,2682304	44,79148	1
40	4	5	46,28	0	0	5,251333	45,037834	1
40	5	5	46,28	0	0	5,2606754	45,056923	1
40	6	4,8	46,28	0	0	5,290558	45,086807	1
40	1	10,45	0	5,2936497	45,07512	5,2523503	45,05367	2
40	3	9,5	0	5,251333	45,037834	5,5425596	45,07512	2
40	7	4,8	46,28	0	0	5,426177	45,037834	1
40	8	4,8	46,28	0	0	5,291614	45,092934	1
40	4	9	0	5,2606754	45,056923	5,26375	45,06507	2
40	5	7	0	5,290558	45,086807	5,456234	45,056923	2
40	6	9	0	5,2523503	45,05367	5,442921	45,086807	2
40	7	7	0	5,291614	45,092934	5,442921	45,07512	2
40	8	8,5	0	5,26375	45,06507	5,456234	45,092934	2

Participant 41

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
41	1	5	46,26484	0	0	0	0	1
41	2	5	46	0	0	5,2936497	45,07512	1
41	1	10,45	0	5,2936497	45,07512	5,2682304	44,79148	2
41	3	5	46,15	0	0	5,544406	45,07512	1
41	2	10	0,3	5,2682304	44,79148	5,251333	44,920834	2
41	4	5	46,21	0	0	5,4916034	45,05053	1
41	3	8	0,1	5,251333	44,920834	5,2606754	44,988674	2
41	5	4,5	46,21	0	0	5,406903	44,9691	1
41	4	9	0,1	5,2606754	44,988674	5,406903	44,9691	2
41	6	4,5	46,21	0	0	5,277883	45,01856	1
41	7	4,5	46,21	0	0	5,2447453	44,98542	1
41	8	4,5	46,21	0	0	5,284009	45,024685	1
41	5	9	0,1	5,277883	45,01856	5,2561455	45,024685	2
41	6	8,8	0	5,2447453	44,98542	5,2561455	44,99682	2
41	8	8,8	0,1	5,2561455	44,99682	5,4256096	44,98542	2
41	7	8,6	0,1	5,284009	45,024685	5,4465637	45,05925	2

Participant 42

Participant	Cadre	Prog. Longueur	Prog. Angle	Mesure longueur	Mesure Angle	Dernière longueur	Dernier Angle	Passe
42	1	5	46,26484	0	0	0	0	1
42	2	5	46,26484	0	0	0	0	1
42	3	5	46,26484	0	0	0	0	1
42	4	5	46,26484	0	0	0	0	1
42	5	5	46,26484	0	0	0	0	1
42	6	5	46,26484	0	0	0	0	1
42	7	5	46,26484	0	0	0	0	1
42	8	5	46,26484	0	0	0	0	1
42	1	5	46,26484	0	0	0	0	2
42	2	10,45	0	0	0	0	0	2
42	3	10,45	0	0	0	0	0	2
42	4	10,45	0	0	0	0	0	2
42	5	10,45	0	0	0	5,4747424	45,032803	2
42	6	10,45	0	0	0	5,4747424	45,032803	2
42	7	10,45	0	0	0	5,4747424	45,032803	2
42	8	10,45	0	0	0	5,4747424	45,032803	2

ANNEXE 12 : MÉTHODOLOGIE STATISTIQUE UTILISÉE DANS L'ÉTUDE 3

Afin d'alléger la lecture du manuscrit de thèse, nous présentons ici le détail de l'analyse statistique utilisée dans l'étude 3 pour le paragraphe sur et modèles utilisés pour le paragraphe « 4.2.2 facteurs ayant un effet sur les performances ».

Afin d'identifier les facteurs ayant un effet sur les performances, cinq critères de performances sont étudiés : rebut lié à la longueur, rebut lié à l'angle, réussite du cadre, distance à la longueur cible, distance à l'angle cible. Ici, les analyses sont réalisées cadre par cadre, c'est-à-dire que les sujets statistiques sont les cadres et non les participants. Ainsi, si un participant a changé de stratégie au cours de la session, on peut attribuer au cadre la stratégie adéquate. Pour chacun de ces critères de performance, un modèle complet comprenant l'ensemble des variables identifiées est créé.

Les variables identifiées comme pouvant avoir un effet sur les performances sont :

- les connaissances antérieures concernant la physique des poutres,
- les habitudes de jeux vidéo des participants, et,
- les quatre schèmes utilisés par les participants : les schèmes trompeurs, les schèmes pertinents, le regroupement ou la stratégie réactive.

Le modèle complet est étudié à l'aide d'une analyse de variance afin de déterminer si les variables « jeux vidéo » et « connaissances antérieures » ont un effet. Si ces variables sont gardées par l'analyse de variance, des modèles linéaires généralisés sont ensuite créés avec ces variables comme variables prédictives. Ces modèles sont ensuite comparés à des modèles correspondants à notre hypothèse qui stipule un effet du croisement des variables concernant le schème et le groupe expérimental.

Ces modèles reprennent le même schéma que lors des autres analyses réalisées lors de l'étude 3 : on crée un modèle stipulant que les trois groupes sont différents, un modèle qui stipule que le groupe « autonome » est équivalent au groupe « compagnon virtuel », un dernier modèle stipule que le groupe « compagnon virtuel » est équivalent au groupe « entrainé » (cf. Tableau 23).

Dans nos modèles, les schèmes trompeurs et pertinents liés à la longueur sont utilisés pour les critères de performances liés à la longueur (rebut et distance), ceux pour l'angle sont utilisés pour les performances liés à l'angle. Pour la réussite, les deux types de schèmes ont été utilisés pour le modèle complet, utilisé dans l'analyse de variance, mais seuls les schèmes trompeurs liés à la longueur sont croisés au groupe.

On ne retrouve un effet combiné du schème et de la performance que pour les critères liés à la longueur.

En effet, le Tableau 24 montre que pour les rebuts liés à l'angle, le modèle gardé indique que les connaissances antérieures et les habitudes de jeux vidéo ont un effet. En ce qui concerne la réussite, c'est la stratégie de regroupement qui a un effet. Enfin, pour la distance à l'angle cible, les habitudes de jeu vidéo et la stratégie de regroupement ont un effet.

Pour la longueur comme motif de rebut ou pour la distance à la longueur cible, ce même tableau indique que le modèle choisi stipule à chaque fois d'un effet croisé du schème trompeur et du groupe expérimental, lors que les participants des groupes « compagnon virtuel » et « entrainé » sont confondus.

Tableau 23 : description des modèles comparés

Nom du modèle	Description du modèle			Nombre de paramètres
M0	Modèle nul			0
MG1	3 groupes différents	croisé à	Schème trompeur	2
MG2	3 groupes différents	croisé à	Schème pertinent	2
MG3	3 groupes différents	croisé à	Regroupement	2
MG4	3 groupes différents	croisé à	Réactif	2
MA1	« compagnon virtuel » ⇔ « autonome »	croisé à	Schème trompeur	2
MA2	« compagnon virtuel » ⇔ « autonome »	croisé à	Schème pertinent	2
MA3	« compagnon virtuel » ⇔ « autonome »	croisé à	Regroupement	2
MA4	« compagnon virtuel » ⇔ « autonome »	croisé à	Réactif	2
ME1	« compagnon virtuel » ⇔ « entrainé »	croisé à	Schème trompeur	2
ME2	« compagnon virtuel » ⇔ « entrainé »	croisé à	Schème pertinent	2
ME3	« compagnon virtuel » ⇔ « entrainé »	croisé à	Regroupement	2
ME4	« compagnon virtuel » ⇔ « entrainé »	croisé à	Réactif	2

Tableau 24 : BIC des différents modèles pour les cinq critères de performances retenus

Modèle / Critère de performance	M0	MG1	MG2	MG3	MG4	MA1	MA2	MA3	MA4	ME1	ME2	ME3	ME4	Autre modèle
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	
Rebut lié à l'angle	208,29	227,76	224,22	222,30	212,69	220,04	220,30	216,06	210,85	220,46	214,35	212,44	207,84	JV+CA 205,97*
Réussite du cadre	214,63	221,23	233,71	224,66	225,16	216,26	226,30	218,93	221,77	214,02	225,53	214,92	220,33	Regr. 209,90*
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	
Distance à l'angle cible	-301,84	-372,18	-345,70	-347,82	-355,52	-315,18	-317,29	-319,34	-313,94	-377,39	-354,79	-349,53	-360,25	JV+Regr. -380,63*

**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.*

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 : présence ou absence d'invariants opératoires concernant l'élément de la hiérarchie d'abstraction pour chaque opérateur 63
Tableau 2 : synthèse des résultats obtenus selon les phases de l'étude et le cadre théorique mobilisé 73
Tableau 3 : répartition des participants dans les groupes expérimentaux en fonction de leurs connaissances antérieures et de leurs habitudes en jeux vidéo. 82
Tableau 4 : caractéristiques du micromonde 83
Tableau 5 : actions, effets sur les performances et mesures possibles 86
Tableau 6 : nombre de participants ayant répondu à l'exercice d'explicitation 2 par le schème trompeur, le schème pertinent ou de façon indéterminée pour chaque question par groupe expérimental 96
Tableau 7 : distribution des participants en fonction de leurs résultats à la question 1 de l'exercice d'explicitation et de leur activité dans le micromonde. 97
Tableau 8 : nombre de participants par modèle statistique pour l'angle et la longueur en fonction du groupe expérimental, des connaissances antérieures et de l'habitude des jeux vidéo 99
Tableau 9 : distribution du nombre de cadres rebutés ou non pour la longueur par groupe expérimental en fonction de la présence ou de l'absence du schème trompeur 106
Tableau 10: liste des modèles testés et BIC associés 106
Tableau 11 : distribution du nombre de cadres réussis par groupe expérimental en fonction de la présence ou de l'absence du schème trompeur 108
Tableau 12 : liste des modèles testés et BIC associés 108
Tableau 13 : distribution des participants de chaque groupe en fonction de leurs connaissances antérieures sur la mécanique des poutres et de leurs habitudes de jeux vidéo 117
Tableau 14 : description des modèles comparés 126
Tableau 15 : BIC des différents modèles pour chaque schème et stratégie repérés. 126
Tableau 16 : fréquence d'apparition du schème étudié en fonction du groupe expérimental. 126
Tableau 17 : description des modèles comparés 129
Tableau 18 : BIC des différents modèles pour les cinq critères de performances retenus ... 129
Tableau 19 : moyenne par groupe expérimental pour chaque critère de performance considéré 129
Tableau 20 : fréquence des cadres rebutés à cause de la longueur en fonction du groupe expérimental et de la présence du schème trompeur 131
Tableau 21 : moyenne de la distance à la longueur cible en fonction du groupe expérimental et de la présence du schème trompeur 131
Tableau 22 : résumé des profils des participants, des schèmes qu'ils ont manifestés et de leurs résultats. 139
Tableau 23 : description des modèles comparés 203
Tableau 24 : BIC des différents modèles pour les cinq critères de performances retenus ... 203

INDEX DES FIGURES

Figure 1 : le contrôle cognitif selon Hoc et Amalberti (2007) (traduction personnelle) 22
Figure 2 : effet de l'expertise sur le contrôle cognitif selon Hoc et Amalberti (2007) (traduction personnelle) 30
Figure 3 : représentation schématique de l'organisation de l'atelier étudié 51
Figure 4 : hiérarchie fin-moyen obtenue pour la tâche d'étirage..... 57
Figure 5 : représentations graphiques des moyennes du nombre d'actions observées par pas temporel et des valeurs prédites par les modèles par opérateur pour les actions « mesurer la rectitude », « changer la vitesse », « utiliser les commandes manuelles », « regarder ailleurs » et « parler ». 69
Figure 6 : le micromonde avec de gauche à droite a) l'environnement virtuel avec le poste de commande et la machine d'étirage, b) panneau de gestion des programmes, c) outils de mesures et fiche de poste. 84
Figure 7 : représentation schématique des deux types de cadres présents dans le micromonde. 84
Figure 8 : représentation schématique du protocole expérimental..... 90
Figure 9 : exemples de questionnaires 95
Figure 10 : nombre de cadres rebutés ou non à cause de l'angle en fonction de la présence ou de l'absence de la stratégie "réactif" 105
Figure 11 : distance moyenne à la longueur cible en fonction de la présence du schème trompeur et du groupe expérimental 107
Figure 12 : compagnon virtuel, présentation faite aux participants présente dans l'aide du compagnon virtuel 120
Figure 13 : distribution des fréquences d'apparition de chaque schème en fonction du groupe expérimental 126
Figure 14 : nombre moyen de cadres rebutés pour la longueur et l'angle ou réussis, par participant en fonction du groupe 128
Figure 15 : distance moyenne à la longueur et à l'angle cible en fonction du groupe expérimental 130
Figure 16 : fréquence des rebuts liés à la longueur en fonction du groupe expérimental et de la présence du schème trompeur 132
Figure 17 : distance moyenne à la longueur cible en fonction du groupe expérimental et de la présence du schème trompeur 132
Figure 18 : fréquence de rebut lié à l'angle en fonction de l'habitude des jeux vidéo et des connaissances antérieures 133
Figure 19 : distance moyenne à l'angle cible en fonction de la présence de la stratégie de regroupement et de l'habitude des jeux vidéo..... 133
Figure 20 : fréquence des cadres réussis en fonction de la présence de la stratégie regroupement 134
Figure 21 : résultats de chaque participant pour le scénario 6 pour les cinq critères d'évaluation retenus : a) rebuts liés à la longueur, b) rebut liés à l'angle, c) cadres réussis, d) distance à la longueur cible, e) distance à l'angle cible 140

PRÉSENCE D'UN SCHÈME TROMPEUR DANS UN ATELIER D'AÉRONAUTIQUE : MANIFESTATIONS ET REMÉDIATION

Résumé

L'évolution des technologies et la mutation du rôle attribué aux opérateurs de l'industrie suscitent un essor de la littérature concernant l'assistance aux procédés de fabrication. Cette thèse de psychologie s'inscrit dans cette littérature. Son objectif est de concevoir un assistant de contrôle aux procédés de fabrication, le compagnon virtuel, qui permette de maintenir à la fois les performances et les compétences des opérateurs. Le système étudié, une usine aéronautique, nécessite le recours à la simulation de processus physiques dynamiques. Deux champs de la littérature sont mobilisés : les cadres théoriques autour de la conception d'interfaces pour les environnements dynamiques et ceux sur le développement des compétences. Une méthodologie en trois parties est utilisée : (1) analyse de l'activité des opérateurs dans l'atelier réel, (2) validation d'un micromonde et (3) test d'un compagnon virtuel dans le micromonde. Les résultats montrent que les opérateurs de l'atelier réel mobilisent un schème trompeur lors de leur activité. Ce schème trompeur est également présent chez des participants tout-venants et il a un effet sur les performances des participants entrainés dans le micromonde. Enfin, le compagnon virtuel, conçu selon les principes de l'EID, ne permet pas de faire disparaitre le schème trompeur. Cependant, il permet aux participants qui n'utilisent pas le schème trompeur d'obtenir de bonnes performances. Les résultats obtenus étayent l'idée qu'il est pertinent de vérifier si des opérateurs ne mobilisent pas des schèmes trompeurs qui pourraient être un frein à l'utilisation des interfaces proposées pour les assister.

Mots clés : schème trompeur, situations dynamiques, contrôle cognitif, conception d'interface écologique, simulation, micromonde, analyse de l'activité, industrie aéronautique.

PRESENCE OF A MISLEADING SCHEME IN AN AERONAUTICAL FACTORY: MANIFESTATIONS AND REMEDIATION

Abstract

The evolution of technology and the shift in the role devoted to operators in industry, from simple task execution to complex system control, provoke a development of the literature concerning assistance to fabrication process. This thesis of psychology joins this literature. It aims at designing an assistant to fabrication process, called the virtual companion, which would both support performances and maintain or improve competences. In particular, the virtual companion would be addressed to operators in an aeronautical factory. The case study requires in line simulation of dynamic physical processes. Two fields of the literature were used: frameworks concerning interface design for dynamic situations and those concerning competences. A three-parts methodology was used: (1) activity analysis of the operators in the real factory, (2) conception and validation of a microworld, and (3) design and test of a virtual companion in the microworld. Results show that the operators of the factory use a misleading scheme during their activity. This misleading scheme is also used by random participants. Moreover, this misleading scheme has an effect on the performances of random participants trained in the microworld. Finally, the virtual companion, whose interface is design based on EID principles, does not eliminate the misleading scheme. However, the participants who did not use the misleading scheme performed better after using the virtual companion. This results leads to the conclusion that studying the operators' use of misleading schemes seems accurate as such schemes may impair the use of interfaces designed to support their activity.

Keywords: *misleading schemes, dynamic situations, cognitive control, Ecological Interface Design (EID), simulation, microworld, activity analysis, aeronautical industry.*