



HAL
open science

Vers une approche comportementale de distinction des phases d'apprentissage procédural: le cas d'une procédure d'assemblage en environnement virtuel

Anais Raison, Nathalie Le Bigot, Olivier Augereau, Franck Ganier

► To cite this version:

Anais Raison, Nathalie Le Bigot, Olivier Augereau, Franck Ganier. Vers une approche comportementale de distinction des phases d'apprentissage procédural: le cas d'une procédure d'assemblage en environnement virtuel. 12ème Colloque de Psychologie Ergonomique (EPIQUE 2023), Jul 2023, Paris, France. pp.242-250. hal-04227978

HAL Id: hal-04227978

<https://hal.science/hal-04227978v1>

Submitted on 4 Oct 2023

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.

ÉPIQUE 2023

Vers une approche comportementale de distinction des phases d'apprentissage procédural : le cas d'une procédure d'assemblage en environnement virtuel

Anaïs Raison, Nathalie Le Bigot, Olivier Augereau, Franck Ganier
Univ Brest, Lab-STICC, CNRS, UMR 6285, F-29238 Brest Cedex 3, France
anaïs.raison@univ-brest.fr
Univ Brest, Lab-STICC, CNRS, UMR 6285, F-29238 Brest Cedex 3, France
nathalie.lebigot@univ-brest.fr
ENIB, Lab-STICC, CNRS, UMR 6285, F-29238 Brest Cedex 3, France
augereau@enib.fr
Univ Brest, Lab-STICC, CNRS, UMR 6285, F-29238 Brest Cedex 3, France
franck.ganier@univ-brest.fr

RÉSUMÉ

Les environnements virtuels exploités pour acquérir des procédures et les transférer à des situations réelles manquent souvent d'adaptabilité face au rythme d'apprentissage de chaque apprenant. L'objectif de la présente étude était d'analyser le déroulement de l'apprentissage de procédure et d'examiner la pertinence d'un indicateur comportemental pour repérer en temps réel et de façon automatique les phases d'apprentissage procédural. L'identification de la progression de chaque apprenant permettrait d'adapter les scénarios pédagogiques. Soixante-trois individus ont participé à l'expérience afin d'apprendre une procédure d'assemblage du cube de Soma en environnement virtuel à partir d'instructions graphiques. L'analyse des traces de l'activité ainsi que de la charge de travail mental ont montré une progression des performances et une diminution du coût cognitif au fur et à mesure de la pratique de la tâche. Une proposition de découpage de l'activité des apprenants par phases est analysée et des perspectives d'amélioration sont fournies.

MOTS-CLÉS

Apprentissage de procédure, charge de travail mental, données comportementales, environnement virtuel d'apprentissage humain, phases d'apprentissage

1 INTRODUCTION

Dans divers domaines d'activité, la réalisation de certaines tâches est effectuée par des professionnels faisant preuve d'un niveau de compétence élevé atteint après une formation souvent longue. Aujourd'hui, certaines formations utilisent des Environnements Virtuels d'Apprentissage Humain (EVAH) afin de réduire les coûts, de garantir la sécurité des apprenants ou encore de permettre l'acquisition de « savoir-faire » par la pratique (Ganier, Hoareau & Devillers, 2013). Ces EVAH ont par exemple déjà été exploités pour acquérir des procédures et les transférer à des situations réelles (Ganier, Hoareau & Tisseau, 2014). Cependant, les scénarios pédagogiques proposés sont souvent prototypiques alors que les différences interindividuelles en termes de capacités et de rythmes d'apprentissage sont importantes lors de l'acquisition d'une compétence (Anderson, Lohse, Lopes & Williams, 2021). Il faudrait donc exploiter le potentiel d'adaptabilité des EVAH afin de permettre la personnalisation du scénario pédagogique aux progrès réalisés par chaque individu. Par ailleurs, les EVAH facilitent le suivi de l'activité des apprenants puisqu'ils offrent la possibilité d'enregistrer automatiquement de nombreuses données comportementales (Deeva, Bogdanova, Serral, Snoeck &

De Weerdt, 2021). Ces données quantitatives, recueillies en temps réel, ont déjà été utilisées dans un but d'adaptation de la formation aux apprenants avec par exemple la génération de *feedback* (Deeva et al., 2021). Dans une perspective d'amélioration de formations liées à l'acquisition de savoir-faire en *e-learning* par la réalité virtuelle (RV), la présente étude s'intéresse aux situations d'apprentissage procédural par traitement d'instructions (Heurley & Ganier, 2006). L'objectif principal est d'examiner la pertinence d'un indicateur comportemental pour repérer dans quelle phase d'apprentissage se situe un individu. Ce travail s'appuie sur la théorie ACT-R (*Adaptive Control of Thought Rational*) proposée par Anderson (1982; Corbett & Anderson, 1994) et qui explique le passage d'un traitement conscient de connaissances déclaratives à l'application automatique d'habiletés en distinguant trois phases.

A partir de ce découpage de l'activité des apprenants, plusieurs méthodes d'identification des phases d'apprentissage ont émergé telles que le lien entre des indicateurs graphiques des courbes d'apprentissage et les phases d'apprentissage (Taylor & Ivry, 2012). Plus récemment, des travaux utilisant à la fois des données comportementales et des données d'imagerie cérébrale ont révélé des changements dans le niveau d'activation des aires cérébrales pouvant caractériser le passage d'une phase d'apprentissage à l'autre (Tenison, Fincham & Anderson, 2016; Tenison & Anderson, 2016). D'autres approches d'identification des phases d'apprentissage ont été proposées, dont celles de Ganier et al. (2013) et Hubert et al. (2007) qui proposent des indicateurs comportementaux et des règles associées pour déterminer les transitions d'une phase à l'autre de manière individuelle. Par exemple, Hubert et al. (2007) ont utilisé le nombre de mouvements et Ganier et al. (2013) ont, quant à eux, proposé le nombre de consultations de consigne afin de distinguer les trois phases d'apprentissage. Ces travaux offrent un moyen intéressant de suivre en temps réel l'évolution de chaque apprenant dans les trois phases d'apprentissage.

Les résultats de l'ensemble de ces travaux présentent l'avantage de caractériser les phases à la fois au niveau comportemental, cognitif et cérébral. Les données comportementales restent toutefois les plus utilisées et présentent l'avantage de pouvoir détecter l'évolution des apprenants en temps réel, sans méthode intrusive. De plus, seuls Ganier et al. (2013) ont abordé une situation d'apprentissage par traitement d'instructions. La présente étude analyse le déroulement de l'apprentissage de procédure en environnement virtuel et examine la proposition d'identification des phases d'apprentissage procédural évoquée par ces derniers. Plusieurs hypothèses ont été formulées : H1 : une pratique répétée de la tâche devrait induire de meilleures performances jusqu'à l'atteinte de performances optimales ; H2 : la charge de travail mental devrait être élevée au début de l'apprentissage puis diminuer au fur et à mesure des exécutions de la tâche pour enfin aboutir à une absence de fluctuations ; H3 : l'exécution de la procédure après un délai de plusieurs jours devrait conduire à des performances et à un niveau de charge de travail mental proches de ceux recueillis lors des derniers essais précédant l'interruption ; H4 : le nombre de consultations des instructions devrait permettre de repérer une évolution des apprenants par trois phases de l'apprentissage. Plus précisément, la phase cognitive se caractériserait par un recours systématique aux instructions (i.e., nombre de consultations des instructions similaire au nombre d'étapes de la procédure) voire même des re-consultations. Au cours de la phase associative, la consultation d'une seule instruction devrait induire la réalisation de plusieurs actions consécutives (processus de compilation, Anderson, 1982). Enfin, la phase autonome est atteinte lorsque les individus ne consultent plus les instructions puisque les connaissances acquises sont directement récupérées en mémoire à long terme (MLT).

2 METHODE

2.1 Participants

L'expérience s'est déroulée au Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV), situé à Plouzané. Soixante-trois individus (18 femmes) ont participé à l'expérience (âge $M \approx 24$, $min = 19$, $max = 32$). Tous étaient titulaires d'un baccalauréat et avaient poursuivi leurs études dans des spécialisations différentes. Plusieurs variables ont été mesurées comme l'utilisation antérieure des casques de RV ou encore la pratique des casse-têtes et la connaissance du cube de Soma. Préalablement à la réalisation

de l'expérience et conformément aux principes éthiques, les participants ont été informés qu'ils pouvaient se retirer de l'étude à tout moment, que leur anonymat était préservé et qu'il existe des risques secondaires potentiels de la RV, puis, ils ont signé un formulaire de consentement éclairé.

2.2 Tâche et Environnement Virtuel d'Apprentissage Humain

La tâche consistait à apprendre une procédure d'assemblage d'un puzzle 3D monochrome couleur bois, le cube de Soma, comprenant sept pièces de formes différentes. Une modélisation des pièces du cube était présente au sein de l'EVAH développé (Figure 1). Des instructions graphiques étaient disponibles sur un panneau divisé en plusieurs cases correspondant chacune à une étape de la procédure. Une instruction était donc l'équivalent d'une action avec une pièce du cube. Afin de consulter une instruction, le participant devait passer la manette sur la case souhaitée pour rendre visible le schéma de montage. Ce schéma de montage comprenait l'ensemble des pièces placées précédemment en gris transparent et la pièce à prendre et à positionner couleur bois. L'EVAH comprenait également un interrupteur essentiel à l'enregistrement automatique des données comportementales puisqu'en allumant la lumière de l'atelier virtuel un chronomètre était déclenché. Une grille d'assemblage marquait l'emplacement de construction du cube.

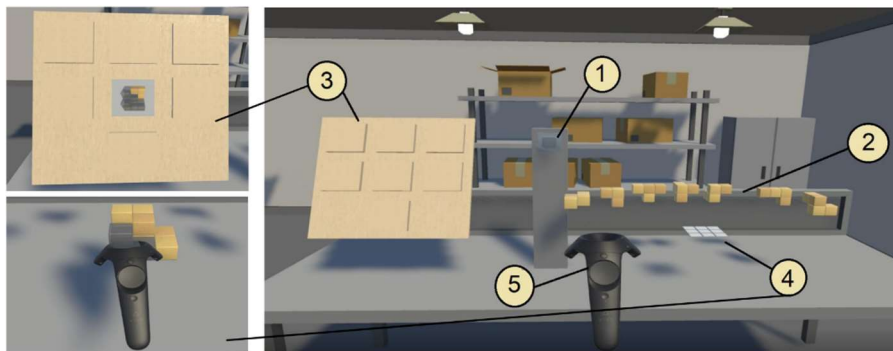


Figure 1. Vue de l'EVAH. (1) Interrupteur. (2) Les sept pièces du cube de Soma. (3) Panneau d'instructions. (4) Grille d'assemblage. (5) Représentation virtuelle de la manette.

2.3 Matériel et Données recueillies

Un casque de RV, HTC VIVE Pro Eye, a été utilisé afin d'immerger les participants dans l'EVAH et un contrôleur Vive leur permettait d'interagir. Ce contrôleur était représenté au sein de l'EVAH (Figure 1). Un ordinateur portable avec les logiciels LimeSurvey et Tholos (Cegarra & Chevalier, 2008) permettait d'afficher différents questionnaires : questionnaire sociodémographique, *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ) (Kennedy, Lane, Berbaum & Lilienthal, 1993), et NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988). Une grille d'observation, version papier, a également été utilisée lors de l'expérience.

Des mesures comportementales ont été enregistrées de façon automatique par l'EVAH. Elles correspondaient au temps de manipulation des pièces du cube (TM), au temps de consultation des instructions (TC), au temps d'inactivité ou de latence (TL), au temps de réalisation de la tâche (TRT, i.e., somme des TM, TC et TL), au nombre de manipulations des pièces, au nombre de consultations des instructions et au nombre d'erreurs (i.e., une action qui ne correspond pas à l'instruction en cours en terme de pièce et/ou de position attendue). Ces mesures étaient complétées par une mesure subjective de la charge de travail obtenue via l'échelle NASA-TLX.

2.4 Procédure

L'expérience a duré au total environ 1h30 pour chaque participant et était divisée en deux sessions individuelles espacées d'une semaine (plus ou moins un jour). Chaque session se terminait lorsque le participant atteignait un critère d'arrêt défini au préalable (ou un temps de passation supérieur à 1h00) afin d'amener chaque participant à un niveau de performance similaire. Le critère était de réaliser trois fois de façon successive la procédure d'assemblage sans erreurs et sans consultations d'instructions.

La première session, d'une durée d'environ 1h00, était subdivisée en cinq phases : (i) le briefing : les participants remplissaient un formulaire de consentement, un questionnaire sociodémographique et le *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ). (ii) La démonstration : une présentation de l'EVAH, de la tâche et des interactions par l'expérimentatrice via des consignes formelles. (iii) La familiarisation avec le matériel via une procédure conçue à cet effet lors de deux essais successifs dans l'EVAH. (iv) L'apprentissage : le participant équipé du casque de RV, devait exécuter plusieurs fois la procédure d'assemblage du cube de Soma jusqu'à l'atteinte du critère d'arrêt. Entre chaque essai, le participant enlevait le casque de RV et remplissait le questionnaire NASA-TLX. (v) Le débriefing : le participant répondait au questionnaire SSQ puis discutait avec l'expérimentatrice.

La deuxième session, élaborée afin de vérifier l'acquisition de la procédure, était réalisée après un délai d'une semaine et durait environ 30 minutes. Elle comportait également une phase de briefing et de débriefing, puis une phase d'évaluation similaire à la phase d'apprentissage de la session 1.

3 RESULTATS

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R avec les packages « lmerTest », « multcomp » (Bretz, Hothorn & Westfall, 2016; Kunzetsova, Brockhoff & Christensen, 2017) ainsi que « Kendall » et « cocor » (Hipel & McLeod, 1994; Steiger, 1980). La méthode d'approximation de Satterthwaite a été utilisée pour le calcul des degrés de liberté du dénominateur ainsi que de la statistique F. Si nécessaire, des tests post-hoc par paire (avec ajustement de Bonferroni) ont été effectués, seules les différences significatives ($p < .05$) sont discutées. Trois individus aux données extrêmes en termes de nombre d'essais en session 1 ont été exclus des analyses.

3.1 Evaluation de l'apprentissage procédural

Les participants réalisent en moyenne 6 essais lors de la session 1 pour atteindre le critère d'arrêt ($SD = 1.32$, $min = 4$, $max = 9$) et 4 essais en moyenne lors de la session 2 avant d'atteindre ce critère ($SD = 1.20$, $min = 3$, $max = 9$). Les mesures chronométriques liées à la réalisation de la tâche présentent l'allure classique d'une courbe d'apprentissage (Figure 2). Concernant la Figure 2, l'essai 9 de la session 1 ne correspond pas au dernier essai de l'ensemble des participants puisque la session s'arrête lors de l'atteinte d'un critère d'arrêt.

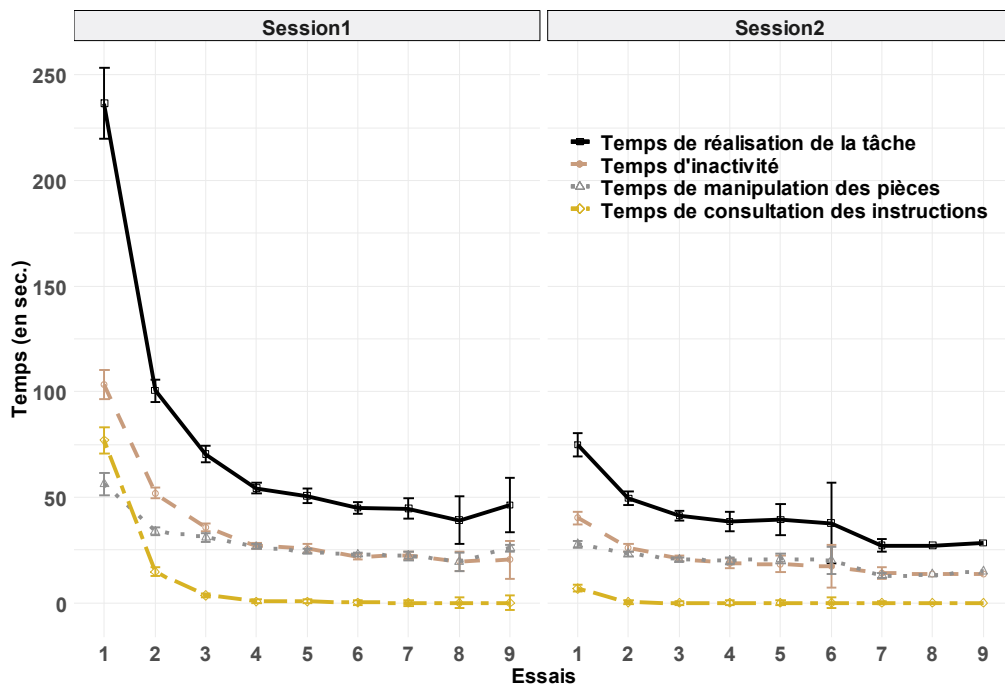


Figure 2. Mesures comportementales chronométriques moyennes pour les essais des deux sessions (en sec.) avec les barres d'erreurs correspondant à l'erreur standard de la moyenne calculée pour les modèles intra-participants (Cousineau, 2005).

Le modèle linéaire mixte confirme l'effet du nombre d'essais sur les variations des mesures comportementales chronométriques : pour le temps total de réalisation de la tâche : $F(18,633.42) = 51.03, p < .001, \eta^2_p = .59$, pour le temps d'inactivité : $F(18,632.02) = 45.57, p < .001, \eta^2_p = .56$, pour le temps de manipulation des pièces : $F(18,630.95) = 15.96, p < .001, \eta^2_p = .31$ et pour le temps de consultation des instructions : $F(18,641.64) = 60.74, p < .001, \eta^2_p = .63$. Les tests post-hoc montrent que les participants réalisent plus rapidement la tâche, avec un temps d'inactivité, de manipulation des pièces et de consultation des instructions moindre entre les essais 1 et 2 de la session 1 ($p < .001$). L'analyse montre également une différence significative entre l'essai 2 et l'essai 3 pour le temps d'inactivité ($p < .01$). Les tests post-hoc ne révèlent pas de différences significatives entre le dernier essai des participants en session 1 et leur premier essai lors de la session 2 sauf pour le temps de réalisation de la tâche ($p < .05$) avec une augmentation moyenne de 35 secondes et le temps d'inactivité ($p < .001$) avec une augmentation de 20 secondes en moyenne lors de la nouvelle exécution après le délai d'une semaine.

Les mesures comportementales non chronométriques liées à l'exécution de la procédure diminuent également au fur et à mesure des répétitions de la tâche. Le modèle linéaire mixte confirme l'effet du nombre d'essais sur les variations des mesures non chronométriques : pour le nombre de manipulations des pièces : $F(18,630.21) = 15.05, p < .001, \eta^2_p = .30$, pour le nombre de consultations des instructions : $F(18,641.2) = 65.51, p < .001, \eta^2_p = .65$, et pour le nombre d'erreurs : $F(18,642.62) = 14.96, p < .001, \eta^2_p = .30$. Les tests post-hoc montrent qu'entre les essais 1 et 2 de la session 1, les participants réalisent la procédure avec moins de consultations d'instructions (essai 1 : $M = 41.48, SD = 26.33$; essai 2 : $M = 11.47, SD = 11.32$), une manipulation des pièces plus précise (essai 1 : $M = 31.42, SD = 19.17$; essai 2 : $M = 22.03, SD = 10.71$) et commettent moins d'erreurs (essai 1 : $M = 11.18, SD = 14.24$; essai 2 : $M = 3.60, SD = 6.43$) ($p < .001$). Les analyses révèlent également une diminution du nombre de consultations entre l'essai 2 et l'essai 3 (Essai 3 : $M = 3.07, SD = 5.17$) ($p < .001$). Toutefois, il y a une augmentation du nombre de consultations des instructions entre le dernier essai de la session 1 et le premier essai de la session 2 ($p < .05$). En effet, lors du dernier essai de la session de formation les participants ne consultaient pas les instructions alors qu'après un délai d'une semaine, ils consultaient en moyenne 6 fois les instructions ($SD = 10.4$). Ce nombre de consultations diminue ensuite dès la deuxième exécution en session 2 ($p < .08$) atteignant une moyenne de 0.42 ($SD = 1.28$). Les différences observées entre le dernier essai de la session 1 et le premier essai de la session 2 peuvent être le reflet de difficultés rencontrées lors d'une exécution de la procédure après un délai de plusieurs jours d'interruptions telles que des doutes, de l'oubli (Ganier et al., 2013). Il est également possible que les connaissances ne soient pas stabilisées en MLT. Les analyses de la session 2 montrent que l'ensemble des indicateurs comportementaux sont proches des résultats obtenus à la fin de la session 1. Ceci suggère que les connaissances de la procédure ont été stockées en mémoire à long terme (Ganier et al., 2013). Ces résultats confirment H1 puisqu'une amélioration puis une stabilisation des performances sont observées avec la pratique en session 1. Toutefois, il semble que la procédure ne soit pas suffisamment intégrée en MLT pour permettre aux individus d'exécuter la procédure sans consulter les instructions après un délai d'une semaine, ne confirmant H3 que partiellement.

Un score de charge de travail mental multidimensionnel a été calculé sans prendre en compte le critère d'exigence physique. Les scores obtenus à l'échelle du NASA-TLX évoluent au fur et à mesure de la pratique. Le modèle linéaire mixte confirme l'effet du nombre d'essais sur le score de charge de travail mental calculé : $F(18,625.07) = 26.77, p < .001, \eta^2_p = .44$. Les tests post-hoc montrent qu'au fil des répétitions de l'exécution de la procédure, l'indice de charge de travail mental évolue entre certains essais successifs. Les analyses montrent une diminution significative entre l'essai 1 ($M = 41.80, SD = 17.41$) et l'essai 2 ($M = 34.34, SD = 16.72$) ($p < .01$) et entre l'essai 2 et l'essai 3 ($M = 27.67, SD = 17.12$) ($p < .05$) puis une absence de fluctuations (i.e., un plateau). Toutefois, lors de la première exécution après un délai d'une semaine, le score de charge de travail mental est plus élevé ($M = 26.4, SD = 18.9$) par rapport au dernier essai de la session 1 ($M = 15.9, SD = 13.6$) ($p < .001$). Ces résultats confirment H2 et partiellement H3. En effet, le niveau de charge de travail mental ressenti est élevé

au début de l'apprentissage puis diminue jusqu'à aboutir à une absence de variations en session 1. De manière similaire aux mesures comportementales, il y a une augmentation après une semaine pour la charge de travail mental estimée, ce qui pourrait être interprété comme une trace du coût cognitif de récupération de la procédure en MLT (Ganier et al., 2013). Ce résultat suggère que certaines étapes de la procédure aient pu être oubliées nécessitant la consultation des instructions lors de la première exécution en session 2.

3.2 Approche comportementale de distinction des phases d'apprentissage

L'ensemble des résultats concernant les indicateurs comportementaux chronométriques indique que les participants améliorent leurs performances grâce à la pratique de la procédure et montre qu'une récupération de la procédure en MLT est possible suite à une interruption d'une semaine malgré quelques difficultés lors de la première exécution. Ces indicateurs temporels prennent donc l'allure d'une courbe d'apprentissage mais les caractéristiques de celle-ci ne permettent pas un repérage précis des trois phases d'apprentissage. Ganier et al. (2013) proposent de s'appuyer sur le nombre de consultations des instructions, un indicateur comportemental non chronométrique afin d'identifier les trois phases d'apprentissage (Anderson, 1982). Une catégorisation de l'activité des apprenants dans ces trois phases est donc effectuée sur les essais de la session 1 à partir des travaux de Ganier et al. (2013).

La procédure du cube de Soma est constituée de sept instructions. Toutefois, la dernière instruction étant relativement intuitive puisqu'il reste une pièce et un seul endroit disponible dans le cube, elle présente une moindre utilité dans la réalisation de la tâche. Ainsi, nous considérons une procédure à six instructions pour effectuer le découpage de l'activité des apprenants. La phase cognitive se caractériserait par un nombre de consultations des instructions égal ou supérieur au nombre d'instructions utiles (i.e., six). Au cours de la phase associative, le nombre de consultations des instructions devrait être strictement supérieur à zéro et inférieur à six. Enfin, la phase autonome est définie par une absence de consultations des instructions (Ganier et al., 2013). L'atteinte de chacune de ces phases, c'est-à-dire le nombre d'essais nécessaire pour passer d'une phase à l'autre, serait variable selon les individus (Ganier et al., 2013). Le Tableau 1 montre une identification de la progression de chaque apprenant au sein des trois phases. Tous n'ayant pas effectué le même nombre d'essais, c'est le pourcentage d'apprenants qui est calculé et présenté dans le Tableau 1.

Tableau 1. Répartition des apprenants dans les trois phases d'apprentissage décrites par Anderson (1982) en prenant en compte le nombre de consultations des instructions.

Essais	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nombre de participants	60	60	60	60	58	46	26	12	7
Pourcentage d'apprenants dans la phase cognitive	100%	67%	22%	7%	3%	2%	-	-	-
Pourcentage d'apprenants dans la phase associative	-	22%	28%	12%	3%	2%	-	-	-
Pourcentage d'apprenants dans la phase autonome	-	11%	50%	81%	94%	96%	100%	100%	100%

Au premier essai, tous les participants se situent dans la phase cognitive. Ensuite, 22% d'entre eux passent en phase associative dès le deuxième essai tandis que 11% d'entre eux sont en phase autonome. Ce passage directement de la phase cognitive à la phase autonome pourrait s'expliquer par un manque de précision de l'indicateur pour rendre compte de l'ensemble du processus d'apprentissage (H4 partiellement confirmée). Le Tableau 1 montre également que la moitié des participants atteignent la phase autonome lors du troisième essai tandis que 22% des apprenants sont encore en phase cognitive. Cette variabilité interindividuelle de progression pourrait être expliquée par différents facteurs tels que la capacité de la mémoire de travail.

3.3 Caractérisation des phases d'apprentissage par les niveaux d'exigence mentale et de performance ressentis

D'après Ganier et al. (2013), le coût cognitif associé à la phase cognitive peut se traduire par un niveau d'exigence mentale élevé et un niveau de performance estimé comme faible. Lors de la phase associative, la mesure subjective du niveau d'exigence mentale diminue alors que le niveau de performance ressenti augmente progressivement. Enfin, la phase autonome se caractérise par un niveau d'exigence mentale estimé comme faible tandis que le niveau de performance est élevé. Une présentation des scores moyens de ces deux critères de l'échelle NASA-TLX et du temps de réalisation moyen caractérisant les phases d'apprentissage distinguées précédemment est donnée Tableau 2. Les scores d'exigence mentale et de performance semblent suivre l'évolution évoquée par Ganier et al. (2013) lors des phases d'apprentissage (puisque dans NASA-TLX l'échelle du critère de performance est inversée : plus le score de performance est élevé plus l'apprenant juge son niveau comme faible).

Tableau 2. Caractérisation des phases d'apprentissage procédural (présentation des moyennes avec écarts-types donnés entre parenthèses).

Mesures	Temps de réalisation de la tâche	Score d'exigence mentale	Score de performance
Phase cognitive	177.08 (128.96)	50.72 (25.44)	39.47 (26.55)
Phase associative	70.07 (30.45)	28.10 (22.80)	24.48 (22.51)
Phase autonome	46.36 (19.56)	19.61 (19.95)	13.76 (18.69)

Les corrélations de Kendall entre ces deux critères NASA-TLX et le temps de réalisation des apprenants par phases d'apprentissage sont analysées. Le temps de réalisation de la tâche présente une corrélation statistiquement significative avec le score d'exigence mentale pour la phase cognitive ($\tau = 0.37, p < .001$) et la phase autonome ($\tau = 0.16, p < .001$). Le test de Steiger révèle une différence significative entre ces corrélations ($z = 2.30, p < .05$) indiquant une corrélation plus forte en phase cognitive. Les corrélations entre le temps de réalisation de la tâche et le score de performance sont significatives pour toutes les phases (phase cognitive : $\tau = 0.28, p < .001$; phase associative : $\tau = 0.27, p < .05$; phase autonome : $\tau = 0.19, p < .001$). Les tests de Steiger ne révèlent pas de différences significatives entre ces corrélations. Les scores de performance sont donc liés aux temps de réalisation de la tâche obtenus dans chacune des phases d'apprentissage procédural.

4 DISCUSSION

Les résultats montrent qu'une pratique répétée de la tâche en EVAH induit de meilleures performances. La charge de travail mental diminue également au fil des répétitions suivant des profils de résultats similaires à l'évolution comportementale.

Après avoir constaté qu'il y avait bien eu un apprentissage de la procédure en EVAH par la progression puis la stabilisation des performances avec la pratique, l'objectif était d'examiner la méthode d'identification des phases d'apprentissage procédural proposée par Ganier et al. (2013). Les résultats montrent que l'approche mériterait d'être affinée puisque certains apprenants ne passeraient pas par une phase associative. Par ailleurs, les hypothèses de découpage des phases peuvent être précisées afin de ne pas permettre la catégorisation d'un individu dans une phase précédente une fois celui-ci identifié comme ayant passé cette phase. Cette approche présente toutefois l'avantage de pouvoir suivre en temps réel l'évolution des apprenants par phases lors d'une formation en EVAH. En effet, ces environnements de formation recueillent automatiquement les données comportementales, ce qui permet une analyse en temps réel de la progression des apprenants. Cette perspective de suivi individuel pourrait notamment permettre d'envisager des adaptations personnalisées selon la phase d'apprentissage atteinte en fournissant par exemple des guidages ou des aides supplémentaires. Un environnement d'apprentissage adaptatif à l'apprenant permettrait également de réduire le coût cognitif induit par l'acquisition d'une nouvelle procédure. Toutefois, la proposition basée sur le nombre de consultations des instructions doit être complétée pour un meilleur suivi de la progression des apprenants car un seul indicateur comportemental peut ne pas refléter l'ensemble du processus d'apprentissage (e.g. changement de stratégies d'apprentissage). De futurs travaux sont envisagés afin de trouver une combinaison d'indicateurs

comportementaux pertinents dans la reconnaissance des phases d'apprentissage avec par exemple l'ajout du nombre d'actions (Hubert et al., 2007). Il s'agirait donc par la suite de développer et d'évaluer un modèle de reconnaissance en temps réel des phases de l'apprentissage procédural.

5 REMERCIEMENTS ET FINANCEMENTS

Ce travail a été soutenu par un financement du gouvernement français géré par l'ANR, numéro de subvention ANR-21- ESRE-0030 (CONTINUUM) et également grâce au soutien de Brest Métropole.

6 BIBLIOGRAPHIE

Anderson, D. I., Lohse, K. R., Lopes, T. C. V., & Williams, A. M. (2021). Individual differences in motor skill learning : Past, present and future. *Human Movement Science*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2021.102818>

Anderson, J. R. (1982). Acquisition of cognitive skill. *Psychological review*, 89(4), 369-406.

Bretz, F., Hothorn, T., & Westfall, P. (2016). *Multiple comparisons using R*. Londres: Chapman and Hall/CRC.

Cegarra, J., & Chevalier, A. (2008). The use of Tholos software for combining measures of mental workload : Toward theoretical and methodological improvements. *Behavior Research Methods*, 40(4), 988-1000.

Corbett, A. T., & Anderson, J. R. (1994). Knowledge tracing : Modeling the acquisition of procedural knowledge. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 4, 253-278. <https://doi.org/10.1007/BF01099821>

Cousineau, D. (2005). Confidence intervals in within-subject designs : A simpler solution to Loftus and Masson's method. *Tutorials in quantitative methods for psychology*, 1(1), 42-45.

Deeva, G., Bogdanova, D., Serral, E., Snoeck, M., & De Weerd, J. (2021). A review of automated feedback systems for learners : Classification framework, challenges and opportunities. *Computers & Education*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104094>

Ganier, F., Hoareau, C., & Devillers, F. (2013). Évaluation des performances et de la charge de travail induits par l'apprentissage de procédures de maintenance en environnement virtuel. *Le travail humain*, 76(4), 335-363. <https://doi.org/10.3917/th.764.0335>

Ganier, F., Hoareau, C., & Tisseau, J. (2014). Evaluation of procedural learning transfer from a virtual environment to a real situation : A case study on tank maintenance training. *Ergonomics*, 57(6), 828-843. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.899628>

Hart, S., & Staveland, L. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*, 52, 139-183. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)

Heurley, L., & Ganier, F. (2006). L'utilisation des textes procéduraux : Lecture, compréhension et exécution d'instructions écrites. *Intellectica*, 44(2), 45-62. <https://doi.org/10.3406/intel.2006.1291>

Hipel, K. W., & McLeod, A. I. (1994). *Time series modelling of water resources and environmental systems*. Amsterdam: Elsevier.

Hubert, V., Beaunieux, H., Chételat, G., Platel, H., Landeau, B., Danion, J.-M., Viader, F., Desgranges, B., & Francis Eustache. (2007). The dynamic network subserving the three phases of cognitive procedural learning. *Human Brain Mapping*, 28(12), 1415-1429. <https://doi.org/10.1002/hbm.20354>

Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire : An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3

Kunzetsova, A., Brockhoff, P., & Christensen, R. (2017). lmerTest package : Tests in linear mixed effect models. *J. Stat. Softw*, 82, 1-26.

Steiger, J. H. (1980). Tests for comparing elements of a correlation matrix. *Psychological bulletin*, 87(2), 245-251.

Taylor, J. A., & Ivry, R. B. (2012). The role of strategies in motor learning. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1251(1), 1-12. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06430.x>

Tenison, C., & Anderson, J. R. (2016). Modeling the distinct phases of skill acquisition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 42(5), 749-767. <https://doi.org/10.1037/xlm0000204>

Tenison, C., Fincham, J. M., & Anderson, J. R. (2016). Phases of learning : How skill acquisition impacts cognitive processing. *Cognitive psychology*, 87, 1-28.