



Architecture et modèles génériques pour la génération adaptative des scénarios de jeux sérieux.

Application : Jeu d'évaluation et de rééducation cognitives

► **Karim SEHABA** (LIRIS, Lyon 2),
Aarij Mahmood HUSSAAN (IQRA University, Pakistan)

■ **RÉSUMÉ** • Notre travail de recherche porte sur les jeux sérieux adaptatifs. Précisément, il vise le développement d'une plate-forme générique et évolutive permettant la génération de scénarios adaptés aux caractéristiques et besoins des utilisateurs. Pour cela, nous avons proposé une architecture permettant d'organiser les connaissances du domaine en trois couches : concepts du domaine, ressources pédagogiques et ressources du jeu. Les traces d'interaction sont utilisées pour faire évoluer le profil de l'utilisateur à partir de ses performances. L'architecture ainsi que ses modèles associés ont été développés dans la plate-forme GOALS (*Generator Of Adaptive Learning Scenarios*). Afin de valider nos contributions, nous avons évalué GOALS dans plusieurs expérimentations dans le cadre du projet CLES (*Cognitive Linguistic Elements Stimulations*). Ce projet, en partenariat avec plusieurs équipes spécialisées dans les jeux, l'ergonomie des IHM et les mécanismes cognitifs, porte sur le développement d'un jeu sérieux pour l'évaluation et la rééducation cognitives.

■ **MOTS CLÉS** • *Serious game*, scénario, générateur adaptatif, trace, situation de handicap.

■ **ABSTRACT** • *Our research work focuses on adaptive serious games. More precisely, our work aims at the development of a generic and evolutive platform, which allows the generation of pedagogical scenarios adapted to the characteristics and needs of users. For that purpose, we have proposed an architecture that organizes the domain knowledge in three layers: domain concepts, pedagogical resources and game resources. The interaction traces are used in order to update the learner profile. The architecture and its associated models were developed into the platform GOALS (Generator of Adaptive Learning Scenarios). To validate our contributions, we have evaluated GOALS in various experimentations in the context of project CLES (Cognitive Linguistic Elements Stimulations). This project, in partnership with many teams specializing in video games, ergonomics of HCI and cognitive mechanisms, focuses on the development of a serious game for the cognitive stimulation.*

■ **KEYWORDS** • *Serious games, scenario, adaptive generator, trace, handicap*

1. Introduction

Un jeu sérieux est défini comme étant un défi intellectuel lancé sur un dispositif numérique selon des règles spécifiques. Selon Zyda (2005), tout jeu vidéo conçu avec un objectif autre que le simple divertissement peut être considéré comme un jeu sérieux. Les jeux sérieux ont été utilisés dans plusieurs domaines tels que la santé (Green *et al.*, 2010), la sécurité, le recrutement (Susi, 2007), etc.

Nous nous intéressons dans un cet article à un type particulier de jeux sérieux : *les jeux d'apprentissage (learning game)*. Il s'agit des jeux qui utilisent le divertissement comme valeur ajoutée pour favoriser l'apprentissage. Ainsi, ce type de jeux rend l'apprentissage plus attractif et amusant à travers des défis ludiques qui suscitent la motivation et l'engagement des apprenants. Dans ce cadre, notre travail porte sur la génération automatique de scénarios pédagogiques dans les jeux d'apprentissage. La notion de scénario pédagogique a plusieurs acceptions (Peter & Vantroys, 2005 ; Schneider *et al.*, 2003 ; Pernin & Lejeune, 2006). Par scénario, nous entendons une suite d'activités pédagogiques, intégrées dans une activité ludique, permettant à l'apprenant d'atteindre un ou plusieurs objectifs d'apprentissage. Dans la majorité des jeux d'apprentissage actuels, le scénario de jeu est identique quelque soit l'apprenant, ses spécificités et ses objectifs pédagogiques. Ces jeux souffrent de nombreux problèmes car ils ne s'adaptent pas aux profils et besoins de leurs utilisateurs.

L'objectif général de notre recherche est de définir des modèles de représentation et de raisonnement permettant la génération adaptative de scénario pédagogique dans le cadre des jeux d'apprentissage. Il s'agit de faciliter l'intégration des scénarios dans les jeux vidéo. Les scénarios générés doivent tenir compte du profil de l'utilisateur, ses objectifs d'apprentissage ainsi que ses traces d'interaction. Afin de réaliser cet objectif, nous avons retenu deux propriétés : *généricité* et *évolutivité*.

Par *généricité*, nous entendons la capacité du générateur à être indépendant du domaine d'application, donc en mesure d'être utilisé dans plusieurs domaines et plusieurs jeux sérieux. En effet, les jeux sérieux dont les aspects ludiques sont fortement couplés aux éléments pédagogiques présentent plusieurs inconvénients. Ces approches ne supportent pas la réutilisation d'un même jeu dans plusieurs domaines d'apprentissage et *vice-versa*. Également, tout changement dans les connaissances du domaine d'apprentissage implique des modifications des éléments du jeu, ce qui peut être très contraignant pour les concepteurs. Pour répondre

à ces limites, nous proposons une architecture générique permettant d'organiser les connaissances du domaine en trois couches : concepts du domaine, ressources pédagogiques et ressources du jeu. Cette organisation permet, d'une part, de faire évoluer les éléments d'une couche donnée sans remettre en cause les éléments des autres couches, d'autre part de mettre en relation les mêmes connaissances du domaine avec différents jeux.

L'évolutivité est la capacité du générateur à faire évoluer ses connaissances à partir de ses interactions avec les utilisateurs. Dans la majorité des jeux actuels, les interactions entre le apprenants et le jeu sont prédéfinies par le concepteur durant la phase de conception selon un certain nombre d'hypothèses. Ces jeux ne tiennent pas compte de l'historique de l'utilisateur et de son évolution. Ils souffrent ainsi de nombreux inconvénients, car ils ne s'adaptent pas facilement aux différentes situations rencontrées dans la pratique. En outre, la conception d'un jeu disposant, avant sa mise en œuvre, d'une représentation complète des besoins et spécificités de ses utilisateurs n'est pas chose facile pour le concepteur. Pour combler ces lacunes, notre approche consiste à exploiter les traces d'interaction afin de mettre à jour le profil de l'utilisateur et les connaissances du domaine. D'une manière générale, une trace (Clauzel *et al.*, 2009) est définie comme un historique des actions de l'utilisateur collectées à partir de son interaction avec le système informatique.

Notre travail de recherche s'inscrit dans le cadre du projet CLES (*Cognitive Linguistic Elements Stimulations*) dont l'objectif est de développer un jeu sérieux pour l'évaluation et la rééducation des troubles cognitifs. Il s'agit des troubles de perception, d'attention, de mémoire, de langage oral et écrit, de raisonnement logique, de visuo-spatial et de compétences transversales. Précisément, le projet CLES vise, d'une part, à réaliser pour chaque pathologie une brique logicielle qui soit ciblée sur une lacune bien précise tout en optimisant, à travers des techniques de jeux vidéo, leur ergonomie cognitive. D'autre part, il s'agit de développer un module permettant de générer des *parcours de jeux personnalisés* à chaque patient en l'orientant suivant ses difficultés et ses progrès.

Cet article est organisé comme suit : la section 2 présente un état de l'art sur les générateurs de scénarios dans le cadre des jeux sérieux et des environnements informatiques pour l'apprentissage humain en général. La section 3 décrit le projet CLES dans lequel se situe notre travail. Cette section présente le contexte et l'objectif de ce projet, le principe de fonctionnement du jeu développé et quelques exemples d'exercices, sous

forme de mini-jeux, de stimulation cognitive. Les sections 4 et 5 détaillent l'architecture générale du générateur, ses modèles ainsi que son fonctionnement. La section 6 illustre l'utilisation de ces modèles à travers la modélisation des connaissances du projet CLES. La section 7 s'intéresse aux évaluations de nos contributions. L'objectif de ces évaluations est de valider les modèles de connaissances que nous avons proposés ainsi que d'étudier l'impact des scénarios générés par plate-forme GOALS (*Generator Of Adaptive Learning Scenarios*) sur les apprenants. Pour chacun de ces deux objectifs, un protocole d'évaluation et les résultats d'une expérimentation seront détaillés. Enfin, la section 8 présente une conclusion et quelques perspectives.

2. État de l'art

2.1. Générateur de scénarios dans les jeux

La génération de scénarios dans les jeux sérieux a fait l'objet de plusieurs recherches (Bieliková *et al.*, 2008 ; Bikovska & Merkuryeva, 2007 ; Carron, Marty, France, *et al.*, 2007 ; Moreno-Ger, Burgos, *et al.*, 2007). Carron *et al.* (2008) proposent un environnement d'apprentissage basé sur une représentation graphique des activités éducatives. Il s'agit d'un donjon pédagogique permettant à chaque apprenant de collecter des connaissances relatives à l'activité d'apprentissage. Les traces d'interaction sont utilisées afin de permettre à l'enseignant de contrôler et de réguler le déroulement du scénario. Ce contrôle peut se faire en temps réel par l'enseignant.

Bikovska et Merkuryeva (2007) proposent une méthodologie de formalisation et de génération de scénarios dédiée aux jeux d'entreprise. Le scénario, représenté sous forme d'un arbre, peut être paramétré manuellement ou automatiquement afin de régler son niveau de difficulté. Dans (Hodhod *et al.*, 2009), les auteurs présentent un jeu sérieux dédié à l'enseignement de l'éthique. Ce jeu est destiné aux élèves entre 8 et 11 ans. La génération de scénarios est basée sur une planification STRIPS (*STanford Research Institute Problem Solver*). Le système développé, appelé AEINSⁱ, est capable d'analyser les actions des utilisateurs afin de contrôler et de personnaliser dynamiquement le scénario d'apprentissage.

Moreno-Ger, Sierra, *et al.* (2007) proposent une approche de scénarisation à base de documents. Le principe consiste à décrire le scénario de jeu dans un langage, appelé *e-game*, basé sur une représentation XML. Les auteurs ont ensuite développé le langage *e-adventure* (Moreno-Ger, Burgos, Martínez-Ortiz, *et al.*, 2008 ; Moreno-Ger, Burgos, *et al.*, 2007). Ce dernier

permet une génération dynamique des scénarios à partir des *chemins* pré-définis a priori par un expert du domaine. La génération ici consiste à sélectionner le bon chemin sur la base d'un pré-test auquel les élèves doivent répondre.

Le système SMILEⁱⁱ (Bieliková *et al.*, 2008) permet aux enseignants de créer des scénarios de jeu d'une manière simple et intuitive. Il s'agit d'associer à chaque objectif pédagogique les chemins qui permettent de l'atteindre. Néanmoins, ce système nécessite un important effort de modélisation.

Marne *et al.*, (2013) proposent un modèle permettant d'aider le tuteur à adapter le scénario du jeu à ses besoins spécifiques. Le scénario dans ce modèle est découpé en séquences d'activités définies par des objectifs pédagogiques et ludiques. Ces activités comportent des *états d'entrées* (caractérisés par des prérequis pédagogiques et ludiques) capables de déclencher un mode précis, et des *états de sortie* (caractérisés également par des objectifs pédagogiques et ludiques). Ainsi, ce modèle permet de construire des parcours avec des branchements de précédence plus ou moins complexes. La connaissance des objectifs atteints et des prérequis sur les aspects ludiques et pédagogiques permet de maintenir la cohérence des parcours.

2.2. Générateur de scénarios dans les EIAH

Vassileva et Deters (1998a) proposent un outil de génération de scénarios adaptatifs appelé « *Dynamic Courseware Generator* ». En fonction des objectifs pédagogiques et du profil de l'apprenant, ce générateur, basé sur un planificateur intelligent, identifie l'ensemble des chemins qui relient les concepts maîtrisés par l'apprenant et les concepts cibles. Ensuite, il sélectionne parmi tous les chemins possibles une suite de concepts. Cette dernière est mise en relation avec des ressources pédagogiques.

Le moteur d'adaptation d'AHA! (De Bra & Calvi, 1998 ; De Bra & Ruiter, 2001) permet de guider l'utilisateur dans sa navigation hypertextuelle. Pour cela, à partir du modèle utilisateur, ce système détermine les *fragments* qui devraient être montrés à l'utilisateur. Il s'agit des liens hypertextes et des informations les plus pertinentes pour l'utilisateur.

Pixedⁱⁱⁱ (J. Heraud *et al.*, 2004 ; J. Heraud & Mille, 2000) est basé sur la réutilisation de scénarios. Il s'agit de proposer aux apprenants, consultant un cours en ligne, de réutiliser les parcours d'apprentissage d'autres apprenants. L'utilisation de Pixed peut se faire selon trois modes : linéaire, assisté et libre. Dans le mode linéaire, le système choisit les concepts (ap-

pelés *notions*) à apprendre, les mets dans le bon ordre, puis il les associe aux ressources pédagogiques. Le mode assisté propose à l'apprenant un chemin linéaire où l'apprenant a la possibilité de choisir des concepts proches de ceux du chemin linéaire. Dans le mode libre, l'apprenant peut choisir les concepts qui l'intéressent ainsi que les ressources pédagogiques associées.

Le projet de recherche WINDS (*Web-based Intelligent Design and Tutoring System*) (Kracik & Specht, 2004 ; Specht *et al.*, 2001a) porte sur la construction d'un environnement d'apprentissage intégrant un système tutoriel intelligent, un système de gestion de cours et un ensemble d'outils coopératifs. Dans ce cadre, l'environnement ALE (*Adaptive Learning Environment*) permet de produire des cours personnalisés, basés sur des hypermédias éducatifs adaptatifs, en fonction de l'état courant de l'apprenant, ses préférences et son style d'apprentissage.

ActiveMath (Libbrecht *et al.*, 2001) est un système d'apprentissage en ligne qui génère dynamiquement des cours (de mathématique) interactifs adaptés aux objectifs, préférences, capacités et connaissances de l'élève. Les objets d'apprentissage sont représentés dans un format XML. Pour chaque utilisateur, un contenu approprié est sélectionné à partir d'une base de connaissances selon des règles pédagogiques. Le cours est ensuite présenté à l'utilisateur via un navigateur Web.

Le générateur de scénarios de la plate-forme *Paigos* (Ullrich & Melis, 2010) est basé sur un planificateur HTN. La planification est effectuée en appliquant des méthodes sur des tâches principales pour les décomposer en sous-tâches, puis en appliquant des opérateurs sur des tâches primitives (tâches réalisables par des opérateurs) pour produire des actions.

2.3. Synthèse

Dans le domaine des EIAH, les générateurs de scénarios sont caractérisés par leur capacité à produire des suites d'activités pédagogiques personnalisées à chaque utilisateur. Pour cela, ces générateurs prennent en compte les connaissances du domaine ainsi que le profil de l'utilisateur. Certains de ces générateurs, notamment (De Bra & Calvi, 1998 ; De Bra & Ruiters, 2001; Heraud & Mille, n.d. ; Vassileva & Deters, 1998b), sont génériques, néanmoins leur utilisation pour des jeux d'apprentissage nécessite un effort considérable dans la mesure où ils ne prennent pas en compte les aspects ludiques.

Dans le cadre des jeux d'apprentissage, les approches de génération de scénarios étudiées modélisent les ressources de jeux et leurs relations avec

les ressources pédagogiques, néanmoins certaines de ces approches sont dépendantes du domaine d'application ((Chang & Chou, 2008) ou (Hodhod *et al.*, 2009)) ou nécessitent le contrôle de l'utilisateur humain dans le processus de génération ((Bieliková *et al.*, 2008 ; Carron, Marty, & Heraud, 2007 ; Chang & Chou, 2008). Le contrôle manuel peut être très contraignant dans des jeux en ligne où le nombre d'utilisateurs est généralement très important (tel que c'est le cas dans le projet CLES).

Les approches proposées dans (Hodhod *et al.*, 2009 ; Moreno-Ger, Sierra, *et al.*, 2007) sont capables de générer dynamiquement des scénarios personnalisés. Ces générateurs sont basés sur des systèmes à base de règles (Hodhod *et al.*, 2009) ou des scénarios prédéfinis (Moreno-Ger, Sierra *et al.*, 2007), elles nécessitent donc un effort important de modélisation. Également, la mise à jour des connaissances est difficile.

Le tableau 1 montre une synthèse comparative des différents systèmes que nous avons étudiés par rapport aux critères retenus : (1) Généricité : la capacité du générateur à être indépendant du domaine d'application ; (2) Évolutivité : sa capacité à mettre à jour ses connaissances à partir de ses interactions.

Tableau 1: Synthèse comparative des générateurs existants

Références	Généricité	Évolutivité
Dynamic Courseware Generator (DCG) (Vassileva, 1995)	Oui	Oui
AHA ! (De Bra & Calvi, 1998; De Bra & Ruiters, 2001)	Oui	Non
ACE (Specht & Oppermann, 1998)	Oui	Oui
WINDS (Kravcik & Specht, 2004; Specht <i>et al.</i> , 2001b)	Oui	Oui
ActiveMaths (Libbrecht <i>et al.</i> , 2001)	Oui	Non
(Karampiperis & Sampson, 2005)	Oui	Oui
(Bouzeghoub <i>et al.</i> , 2005; Duitama <i>et al.</i> , 2005)	Oui	Non
PAIGOS (Ullrich & Melis, 2009; Ullrich, 2007)	Oui	Oui
SeLeNe (Keenoy <i>et al.</i> , 2004)	Oui	Non
PIXED (J. Heraud <i>et al.</i> , 2004; J. Heraud & Mille, 2000)	Oui	Non
(Marne <i>et al.</i> , 2013)	Oui	Non

3. Projet CLES

Dans cette section, nous présentons brièvement le projet CLES dans lequel se situe notre travail. Ensuite, nous décrivons le principe du jeu Tom Oconnor développé dans ce projet ainsi que quelques activités éducatives, sous forme de mini-jeux.

3.1. Description du projet

L'évaluation et la rééducation des troubles cognitifs ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Ces travaux, généralement basés sur des tests cliniques, portent sur différentes fonctions cognitives telles que la mémoire de travail (Diamond & Goldman-Rakic, 1989), l'attention (Manly *et al.*, 2001), la perception auditive (Mody *et al.*, 1997), etc. Avec l'avènement de l'informatique, se sont développées des solutions numériques de remédiation cognitive et linguistique. Ainsi, les auteurs dans (Garcia-Palacios *et al.*, 2002) utilisent un système de réalité virtuelle pour le traitement des personnes atteintes de claustrophobie. LAGUNTXO (Conde *et al.*, 2009) est un système d'apprentissage à base de règles dont l'objectif est de faciliter l'intégration des personnes en situation de handicap cognitif dans les environnements de travail. *Tutor Informatico* est un système destiné aux personnes souffrant du syndrome de Down. Ce système, basé sur les nouvelles technologies mobiles, permet d'aider ces personnes à surmonter leur handicap et à acquérir davantage d'autonomie. (Sehaba *et al.*, 2005) propose un système à base de jeux ludo-éducatifs pour l'aide à la structuration des enfants autistes.

Ces systèmes ont l'avantage d'être plus flexibles et facilement accessibles. Ils sont également capables d'enregistrer les traces des utilisateurs, ce qui permet aux praticiens de suivre les réalisations et l'évolution de leurs patients (Sehaba, 2005). Cependant, la plupart de ces systèmes ne s'adaptent pas aux spécificités et besoins de chaque utilisateur. Cette adaptation est particulièrement importante dans ce contexte dans la mesure où les personnes en situation de handicap cognitif n'ont pas les mêmes compétences, capacités ou préférences.

Afin de répondre à cette limite, le projet CLES (*Cognitive Linguistic Elements Stimulations*) a été proposé. L'objectif général de ce projet est de développer un jeu sérieux adaptatif permettant l'évaluation et la rééducation de huit fonctions cognitives (Hussaan *et al.*, 2011) : perception, attention, mémoire, langage oral, langage écrit, raisonnement logique, visuo-spatial et compétences transversales. Pour cela, CLES vise, d'une part, à développer pour chacune de ces fonctions plusieurs mini-jeux de stimulation cognitive. D'autre part, à développer un générateur de *scénario adaptatif*. Il s'agit ainsi de personnaliser le scénario de jeux et son niveau de difficulté en fonction des capacités, compétences et historique de chaque personne. En effet, le jeu développé dans le cadre de ce projet est accessible en ligne et le nombre de ses utilisateurs est trop important pour pouvoir envisager une génération manuelle.

3.2. Principe du jeu *Tom Oconnor*

Le jeu sérieux développé dans le cadre de ce projet, appelé *Tom Oconnor et la statuette sacrée*, est un jeu d'aventure accessible en ligne. Le protagoniste de ce jeu est un personnage nommé *Tom* dont la tâche est de chercher une statuette sacrée dissimulée dans un manoir. En fonction des sessions, ce personnage est placé successivement dans plusieurs pièces du manoir. Chaque pièce contient plusieurs objets (chaise, bureau, écran, etc.). Derrière certains de ces objets se cachent des défis sous forme de *mini-jeux*. L'utilisateur doit interagir avec ces objets pour lancer ces mini-jeux. Pour accéder à d'autres pièces et avancer dans le jeu, l'utilisateur doit lancer tous les mini-jeux de la pièce.

3.3. Exemples de mini-jeux

La figure 1 montre l'interface d'un mini-jeu sur la mémoire appelé *disparition grille*. Ce jeu affiche une série d'images que l'utilisateur doit mémoriser. Après un laps de temps, les images disparaissent, l'utilisateur est alors invité à les sélectionner parmi plusieurs propositions. Ce jeu dispose de plusieurs paramètres : le nombre d'images à mémoriser et leur complexité, la durée d'affichage de ces images, le nombre de propositions et le temps de réponse de l'utilisateur.



Figure 1 • Exemple d'un mini-jeu sur la mémoire

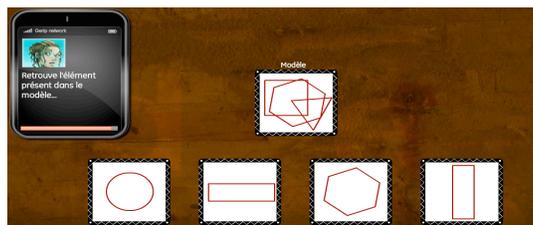


Figure 2 • Exemple d'un mini-jeu sur la perception visuelle

La figure 2 présente une interface du jeu *Objets entremêlés à identifier*. L'objectif de ce jeu est de développer et d'évaluer la perception visuelle

des enfants entre 6 à 12 ans. Pour cela, ce jeu affiche à l'écran un *modèle* contenant plusieurs objets entremêlés et un ensemble d'objets simples. L'apprenant doit identifier, parmi cet ensemble, les objets qui composent le modèle dans un laps de temps bien déterminé. Les paramètres de ce jeu sont le nombre et le type d'objet (chiffres, lettres, formes géométriques, etc.), le nombre de propositions et le temps de réponse. Les paramètres des mini-jeux permettent de régler leurs niveaux de difficulté en fonction des capacités et des besoins de chaque utilisateur.

Pour chacune des huit fonctions cognitives, une douzaine de mini-jeux ont été développés, chaque mini-jeu possède neuf niveaux de difficulté. Le rôle du générateur de parcours est de sélectionner, en fonction du profil de l'utilisateur, ses traces et les objectifs thérapeutiques de la session, les mini-jeux et leurs niveaux de difficulté, puis de les mettre en relations avec les objets des différentes pièces du manoir.

4. Représentation des connaissances du domaine

4.1. Architecture générale

Comme le montre la figure 3, l'architecture du système permet d'organiser les connaissances du domaine en trois couches, à savoir :

- 1) *Concepts du domaine* : il s'agit d'une représentation abstraite modélisant les connaissances du domaine d'apprentissage sous forme de graphe de concepts. Par exemple, dans le cadre du projet CLES, les concepts peuvent être : perception, mémoire, raisonnement logique...
- 2) *Ressources pédagogiques* : il s'agit des ressources qui permettent de véhiculer, de transmettre ou d'appréhender les concepts du domaine. Par exemple : les jeux disparition grille et Objets entremêlés à identifier, présentés dans la section précédente, sont des ressources pédagogiques relatives aux concepts mémoire et perception visuelle respectivement.
- 3) *Ressources du jeu* : elles représentent les objets du jeu avec lesquels l'utilisateur peut interagir. Par exemple, les objets du jeu *Tom Oconnor* derrière lesquels se cachent des défis sont des ressources du jeu

Cette organisation permet de faire évoluer les éléments d'une couche donnée sans remettre en cause les éléments des autres couches. Également, elle permet de mettre en relation les concepts d'un domaine donné avec différentes ressources pédagogiques, de même que les relations entre les ressources pédagogiques et de jeux.

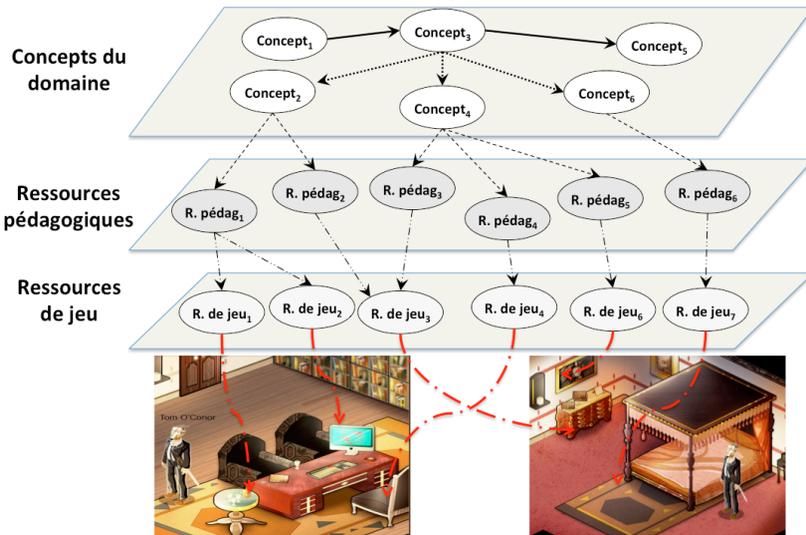


Figure 3 • : Représentation des connaissances

Dans les sous-sections suivantes, nous présentons les modèles que nous proposons pour la modélisation des concepts, ressources pédagogiques et ressources de jeu.

4.2. Modélisation des concepts

Comme son nom l'indique, la première couche contient les concepts du domaine. Ces derniers sont organisés sous forme d'un graphe sans cycle où les nœuds du graphe correspondent aux concepts, et les liens entre les nœuds correspondent aux relations entre concepts. Chaque concept est caractérisé par un identifiant unique et un ensemble de propriétés (nom, description, auteur, etc.) et chaque relation est caractérisée par son concept source, ses concepts cibles, un ensemble de propriétés et une fonction permettant de propager l'information dans le graphe afin de mettre à jour le profil de l'utilisateur. Ce dernier est représenté par un ensemble de propriétés de la forme « attribut, valeur » où chaque *attribut* correspond à un concept du domaine et sa *valeur* correspond à la compétence de l'utilisateur concernant ce concept.

Formellement, le modèle des concepts du domaine (CD) est défini comme suit : $CD = \langle N, L \rangle$ où N et L représentent respectivement l'ensemble des concepts du domaine pédagogique et l'ensemble des relations entre les différents concepts. Pour chaque concept $C \in N$: $C = \langle id, P \rangle$ où id est un identifiant unique du concept C et P est un ensemble de

propriétés décrivant le concept C . Ces propriétés sont sous la forme <attribut, valeur> où *attribut* est le nom de la propriété et *valeur* est la description de la propriété. Par exemple : < auteur, "Martin Michel" >, < date-de-création, "1-09-2013" >, <description, "la perception permet à un individu d'interpréter les signaux de l'environnement perçus par ses sens...">.

De même, pour chaque relation $R \in L : R = \langle C_{From}, T, RC \rangle$ où C_{From} est le concept source de la relation. T est le type de la relation, avec : $T = \langle Nom, Description, F_{Type} \rangle$ où *Nom* est le nom de la relation. *Description* une description textuelle de la relation. F_{Type} est une fonction qui permet de calculer les dépendances entre les concepts cibles C_{To} et leur concept source C_{From} . Cette fonction est utilisée pour mettre à jour le profil de l'utilisateur à partir de ses performances.

$RC = \langle C_{To}, F, Value \rangle$ où C_{To} est le concept cible dans la relation R . F et *Valeur* expriment l'impact de C_{To} sur C_{From} . Elles sont utilisées par F_{Type} pour calculer les dépendances entre les concepts de la relation en question.

Dans le cadre du projet CLES, nous avons créé, à partir des huit fonctions cognitives, plusieurs concepts. Nous avons également créé plusieurs types de relations (Hussaana *et al.*, 2011) à partir de la formalisation d'au-dessus. Pour l'exemple, nous présentons quatre types de relation :

Fait-partie ($x, y_1 \dots y_n$) : indique que les concepts cibles $y_1, y_2, \dots y_n$ sont des sous-concepts du concept x . Par exemple, *Fait-partie* (Perception, perception-auditive, perception-visuelle).

Pré-requis (x, y) : indique que pour apprendre le concept y il est nécessaire d'avoir une connaissance suffisante du concept x . Par exemple, *Pré-requis* (perception visuelle, langage écrit) signifie que le langage écrit nécessite des capacités de perception visuelle.

Type-de (x, y) : signifie que le concept y est un type du concept x . Cette relation peut être considérée comme une spécialisation.

Parallèle (x, y) : indique que les concepts x et y doivent être dans un même scénario. Autrement dit, si le générateur inclut un des deux concepts, il doit forcément inclure l'autre.

4.3. Modélisation des ressources pédagogiques

La deuxième couche contient les ressources pédagogiques. D'une manière générale, une ressource pédagogique est une entité utilisée dans un processus d'enseignement, de formation ou d'apprentissage permettant de véhiculer, de transmettre ou d'appréhender des concepts pédagogiques. Les ressources peuvent être de différentes natures : définition, exemple,

exercice, qcm, etc. Chaque ressource pédagogique est définie par un identifiant unique, un type, des paramètres, une fonction d'évaluation et un ensemble de caractéristiques (nom de la ressource, son auteur, sa description, etc.). Comme le montre la figure 3, chaque ressource pédagogique peut être en relation avec un ou plusieurs concepts du domaine. Cette relation exprime que la ressource en question permet d'appréhender le concept avec lequel elle est liée.

Formellement, une ressource pédagogique (*RP*) est définie comme suit :

RP : $\langle id, Type, Paramètres, Fonction-d'évaluation, Solution, Caractéristiques, Concepts-en-relation \rangle$

- *Id* : un identifiant unique de la ressource pédagogique ;
- *Type* : ce champ spécifie la nature de la ressource pédagogique, qui peut être une *description* (définition, exemple, illustration, etc.), une *démonstration* (preuve, théorème, etc.) ou un *test* (exercice, problème, qcm, etc.) ;
- *Paramètres* : il s'agit des paramètres qui fixent le niveau de difficulté de la ressource pédagogique. La section 3.3 présente les paramètres des mini-jeux « objets entremêlés à identifier » et « identification grille » ;
- *Fonction-d'évaluation* (optionnelle) : elle concerne les ressources pédagogiques de type test. Elle est utilisée pour évaluer la réponse de l'apprenant ;
- *Solution* (optionnelle) : contient la réponse au test des ressources pédagogiques de type test ;
- *Caractéristiques* : Il s'agit des méta-informations concernant la ressource telle son auteur, sa date de création, etc. ;
- *Concepts-en-relation* : contient la liste des concepts en relation avec la ressource pédagogique en question. Pour chacun de ces concepts, il est associé la compétence requise (représentée par une valeur appartenant à l'intervalle $[0,1]$) pour pouvoir accéder à la ressource. Ainsi, cette liste est représentée comme suit : $\langle c_1, compétence-requise_{c_1} \rangle, \langle c_2, compétence-requise_{c_2} \rangle \dots$ En plus, pour chacun de ces concepts, on associe une valeur représentant l'impact de la ressource sur le concept.

Dans le cadre du projet CLES, les mini-jeux du jeu *Tom Oconnor* sont des ressources pédagogiques.

4.4. Modélisation des ressources du jeu

La troisième et dernière couche contient les ressources de jeux. Il s'agit des objets statiques ou munis de comportement interactif ou proactif. Dans notre modèle, nous ne considérons que les ressources du jeu en

relation avec les ressources pédagogiques. Chaque ressource du jeu est définie par un identifiant, des relations avec les ressources pédagogiques et un ensemble de caractéristiques.

Formellement, chaque ressource du jeu (RJ) est définie comme suit :

$$RJ = \langle Id, \text{Caractéristiques}, \text{Relations-Pédagogiques} \rangle$$

Où,

- *Id* : un identifiant unique de la ressource du jeu ;
- *Caractéristiques* : sont des méta-informations concernant la ressource telles que son auteur, sa date de création, son type, etc. ;
- *Relations-Pédagogiques* : contient toutes les ressources pédagogiques en relation avec la ressource du jeu en question.

Dans le cadre du projet CLES, les objets du jeu *Tom Oconnor* derrière lesquels se cachent les mini-jeux sont représentés par des ressources du jeu.

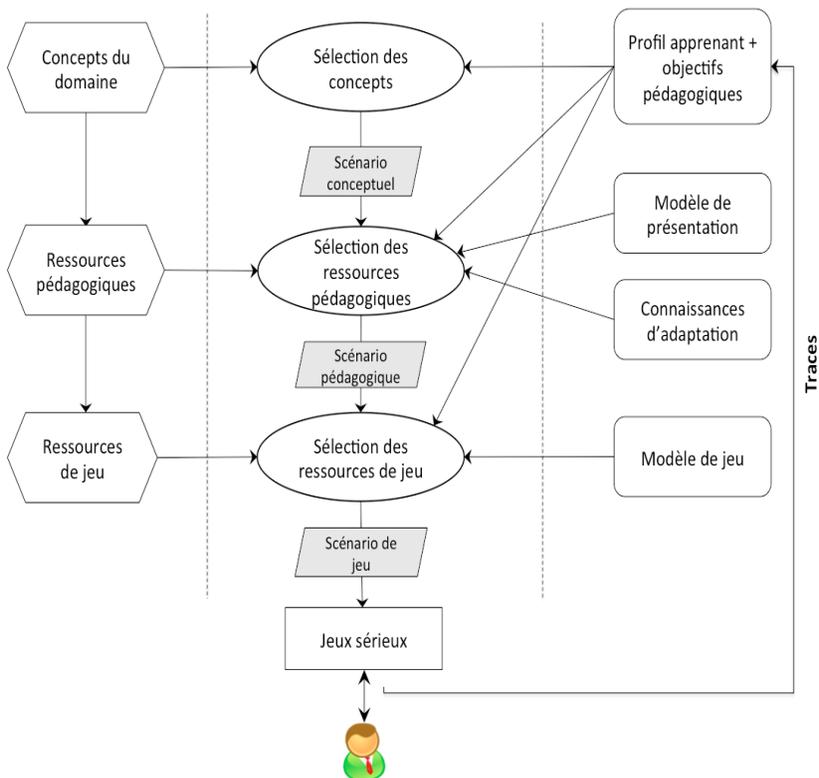


Figure 4 • Principe du générateur de scénarios

5. Principe du générateur de scénarios

Comme le montre la figure 4, la génération de scénario passe par trois étapes successives.

Il s'agit, à partir du profil de l'utilisateur et de ses objectifs pédagogiques, de générer un *scénario conceptuel*. Ce dernier est ensuite transformé en scénario pédagogique. Pour cela, le générateur sélectionne pour chaque concept du scénario conceptuel une ou plusieurs ressources en relation avec celui-ci. Cette sélection tient compte du *modèle de présentation* et des *connaissances d'adaptation*. Le premier permet de structurer les ressources pédagogiques en fonction de leur type. Les connaissances d'adaptation permettent de fixer le niveau de difficulté pour chaque ressource du scénario pédagogique. La troisième et dernière étape consiste à mettre en relation les ressources du scénario pédagogique avec les ressources de jeu en se basant sur le modèle de jeu.

Dans les sous-sections suivantes, nous présentons le principe de fonctionnement de chacune de ces trois étapes ainsi que le mécanisme de mise à jour du profil.

5.1. Génération de scénario conceptuel

Dans un premier temps, l'expert du domaine alimente le système par des connaissances du domaine et des profils utilisateurs (dans certains domaines d'application, le profil peut être défini par l'utilisateur lui-même). Durant chaque session, l'utilisateur sélectionne les objectifs qu'il souhaite atteindre. Il s'agit d'un certain nombre de *concepts cibles* parmi l'ensemble des concepts de la première couche. En fonction de ces objectifs et du profil de l'utilisateur, le générateur crée un scénario conceptuel.

Il s'agit de sélectionner les concepts du domaine, et leurs niveaux respectifs, qui satisfassent la liste des concepts cibles $Concept-cibles = \{<concept-cible_i, niveau-cible_i>\}$. Pour chaque concept cible $concept-cible_i$ de cette liste, le générateur compare le niveau cible ($niveau-cible_i$) avec le niveau de l'utilisateur pour ce même concept. Si le niveau de l'utilisateur est supérieur à celui du niveau requis, le générateur ignore le concept $concept-cible_i$ puis traite le concept suivant $concept-cible_{i+1}$. Dans le cas contraire, il détermine l'ensemble des concepts en relation avec le concept $concept-cible_i$. La sélection de ces concepts est définie en fonction du type de relation qui les lie avec $concept-cible_i$. En effet, nous avons défini pour chaque *type de relation*, une *stratégie de sélection*. Par exemple, si l'utilisateur choisit le concept cible A et que ce dernier est en relation de type *prérequis* avec un autre concept B (*prérequis* (B, A)), alors le générateur va vérifier si

l'utilisateur maîtrise suffisamment le concept B. Si ce n'est pas le cas, il va l'ajouter dans le scénario conceptuel.

Une fois que l'algorithme traite tous les concepts de la liste *Concepts-cibles*, il retourne un scénario conceptuel répondant aux profil et objectifs de l'apprenant. Ce scénario est ensuite envoyé au générateur de scénario pédagogique. Le principe de fonctionnement de dernier est présenté dans la section suivante.

5.2. Génération de scénario pédagogique

Le rôle du module « générateur de scénario pédagogique » est de sélectionner pour chaque concept du scénario conceptuel une ou plusieurs ressources pédagogiques appropriées en tenant compte du *module de présentation*, des *connaissances d'adaptation* et du *profil de l'utilisateur*. Le rôle du module de présentation est d'organiser les ressources pédagogiques en fonction de leurs types. Les connaissances d'adaptation, basées sur un système à base de traces, permettent de fixer le niveau de difficulté de chaque ressource pédagogique. Le profil de l'utilisateur contient les compétences de l'utilisateur pour les différents concepts du domaine ainsi que l'historique de ses interactions stockées dans une base de traces.

Formellement, pour chaque concept c_i du scénario conceptuel, le générateur recherche les ressources pédagogiques avec lesquelles c_i est en relation et dont le *type* correspond au *modèle de présentation*. Si plusieurs ressources y existent, il sélectionne la ressource la moins utilisée par l'utilisateur. Pour cela, il consulte les traces d'interaction de l'utilisateur. Pour chaque ressource pédagogique sélectionnée, l'algorithme fixe les valeurs de ses paramètres à partir des connaissances d'adaptation. Ces dernières sont représentées sous forme de règles de la forme :

si $\{ \text{compétence-concept}_i \text{ OP valeur} \}_{i=1 \dots N}$ alors $\{ \text{param}_j = \text{valeur}_j \}_{j=1 \dots M}$

Où *compétence-concept_i* est la compétence de l'apprenant concernant le *concept_i*, *OP* est un opérateur de comparaison ($<$, \leq , $>$, \geq , $=$, \neq), *N* est la cardinalité de *Concepts-relation* de la ressource (correspond au nombre de concepts en relation avec la ressource pédagogique) et *M* est la cardinalité des *Paramètres* de la ressource (correspond au nombre de paramètres de la ressource pédagogique).

5.3. Génération de scénario de jeu

Le scénario pédagogique est, ensuite, envoyé au module « générateur de scénarios de jeu ». Le rôle de ce module est d'associer à chaque res-

source pédagogique une ou plusieurs ressources du jeu en se basant sur le modèle du jeu sérieux.

Le choix de la ressource du jeu peut prendre en compte les préférences de l'utilisateur et son historique.

Durant l'interaction entre l'utilisateur et le jeu, toutes les actions de l'utilisateur sur les objets du jeu et les ressources pédagogiques sont stockées dans des traces. Ces traces vont permettre au générateur de faire évoluer le profil de l'utilisateur en fonction de ses performances. Dans la section suivante, nous présentons les mécanismes de mise à jour du profil.

5.4. Traces d'interaction et mise à jour des connaissances

En plus des informations générales de l'utilisateur (nom, prénom, date de naissances, organisation, etc.), le profil de l'utilisateur est caractérisé par un ensemble de propriétés de la forme <attribut, valeur> où *attribut* correspond à un concept du domaine et *valeur* au niveau de maîtrise de l'utilisateur. Le profil contient aussi les *traces d'interaction* laissées par l'utilisateur.

D'une manière générale, une trace est définie comme un ensemble d'observés temporellement situés (Clauzel *et al.*, 2011). Les observés représentent les actions de l'utilisateur sur l'environnement informatique. Dans notre contexte, une trace représente l'activité de l'utilisateur sur un scénario de jeu.

Formellement, une trace T est représentée comme suit :

$$T = \langle \text{date-début}, \text{date-fin}, \text{méta-données}, o_1, o_2 \dots o_n \rangle$$

date-début et *date-fin* sont la date et l'heure de début et de fin de la trace respectivement ;

méta-données : le modèle de présentation et les objectifs pédagogiques de la session ;

Chaque action de l'utilisateur sur une ressource du jeu est représentée par un observé dans la trace. Formellement, un observé o_i est caractérisé par les propriétés suivantes :

Ressource du jeu : la ressource du jeu avec laquelle l'utilisateur a interagi ;

Ressource pédagogique : la ressource pédagogique en relation avec la ressource du jeu ;

Concept : le concept avec lequel la ressource pédagogique est en relation ;

Réponse de l'apprenant (optionnelle) : concerne les ressources pédagogiques de type un *test*. Cette propriété contient la réponse de l'utilisateur ;

Temps de réponse (optionnel): c'est la durée entre la présentation de la ressource pédagogique, de type *test*, et la réponse de l'apprenant ;

Évaluation de la réponse utilisateur : Il s'agit d'une fonction qui attribue une valeur ($\in [0,1]$) à la réponse de l'utilisateur.

Dans les sous-sections suivantes, nous présentons le principe de mise à jour du profil et des connaissances du domaine à partir des traces. L'article (Hussaan & Sehaba, 2014) détaille notre approche de mise à jour à partir de trace.

5.4.1. Mise à jour du profil

La mise à jour du profil de l'utilisateur se fait en fonction de ses performances sur les ressources de type *test*. Le processus de mise à jour repose sur trois étapes : (1) évaluation de la réponse de l'utilisateur, (2) mesure de l'impact de la réponse de l'utilisateur sur les concepts en relation avec la ressource pédagogique en questions, puis (3) propagation de l'information dans le réseau des concepts.

Durant la première étape, le système évalue la réponse de l'utilisateur, sur les ressources de type *test*, en prenant en compte le temps de réponse. Ensuite, il s'agit de calculer l'impact de cette réponse sur les concepts auxquels la ressource pédagogique est liée. Pour cela, le système prend en compte l'évaluation de la réponse, calculé dans la première étape, et le niveau de difficulté de la ressource. La troisième étape consiste à propager l'information dans le réseau de concepts à travers les fonctions de dépendance F_{Type} . Rappelons que F_{Type} est une fonction qui permet de calculer les dépendances entre les concepts cibles C_{To} et leur concept source C_{From} .

5.4.2. Mise à jour des connaissances du domaine

La mise à jour des connaissances du domaine consiste à ajouter ou supprimer des concepts ou des relations à partir des traces d'interaction. Pour cela, le principe de notre méthode, détaillée dans (Hussaan & Sehaba, 2014), est d'analyser les éléments observés des traces en utilisant une méthode de classification basée sur trois étapes :

- 1) Préparation des données : les données sont représentées dans une matrice où les lignes correspondent aux ressources pédagogiques, de type *test*, et les colonnes correspondent aux évaluations des réponses de l'utilisateur. Rappelons que la fonction d'évaluation retourne une valeur appartenant à $[0, 1]$.

- 2) Choix d'une fonction de distance: Il s'agit de sélectionner une fonction de similarité permettant de mesurer la proximité des évaluations des réponses utilisateurs. Nous avons utilisé la distance de Manhattan.
- 3) Détermination du nombre de classes : afin de déterminer le nombre de classes à partir des traces. Nous avons utilisé l'algorithme K-Means avec différentes valeurs de K.

Le résultat de la classification peut permettre de créer de nouveaux concepts ou d'en supprimer d'autres. La mise à jour effective des connaissances ne peut se faire que sur validation de l'expert.

6. Illustration : Modélisation des connaissances du projet CLES

Rappelons que le jeu *Tom O'connor* et la statuette sacrée, développé dans le cadre du projet CLES, porte sur l'évaluation et la rééducation des troubles cognitifs. Pour cela, ce jeu propose à l'utilisateur un ensemble de mini-jeux de différents niveaux de difficulté où chaque mini-jeu est ciblé sur une lacune bien précise. Pour lancer les mini-jeux, l'utilisateur doit interagir avec certains objets du jeu.

Dans notre modèle de connaissances, les objets du jeu sont représentés par des ressources du jeu. Les mini-jeux sont représentés par des ressources pédagogiques et les fonctions cognitives sont représentées par des concepts du domaine.

Dans les prochaines sections, nous présentons la modélisation des concepts et des ressources pédagogiques du projet CLES.

6.1. Modélisation des concepts

Le tableau 2 donne une description des fonctions cognitives du projet. Chaque fonction peut avoir plusieurs sous-fonctions. Ainsi, nous avons créé pour chaque fonction ou sous fonction un concept du domaine. Ces concepts ont été ensuite mis en relations selon les types suivants : prérequis, fait-partie, type-de et parallèle. Les sémantiques de ces relations ont été présentées dans la section 4.

La figure 5 montre les concepts de base (correspondant aux huit fonctions cognitives) et les relations, de type *prérequis*, qui existent en eux. On peut distinguer trois niveaux de concepts. Le premier niveau contient les concepts de base, à savoir : perception, attention et visuo-spatial. Le deuxième niveau contient les concepts langage oral et mémoire qui nécessitent des compétences de tous les concepts de base. Le troisième niveau contient le langage écrit et le raisonnement logique.

Tableau 2 • Fonctions cognitives du projet CLES

Fonction	Description	Sous-fonctions
Percep-tion	C'est la capacité d'interprétation des signaux de l'environnement que l'individu perçoit avec ses sens.	visuelle, auditive, schéma corporel.
Attention	C'est la capacité de se concentrer sur quelque chose ou quelqu'un pour recueillir des informations, les traiter puis effectuer une tâche spécifique (Schacter <i>et al.</i> , 2010).	Visuelle (barrage, sé-quence et complétude), auditive, partagée.
Mémoire	la capacité d'absorber, de stocker et réuti-liser des informations (Schacter <i>et al.</i> , 2010).	Visuelle, auditive, verbale, rappel.
Langage oral	C'est un système de symboles oraux utilisés par deux ou plusieurs personnes à des fins de communication.	Réception, expression, compréhension, lexique, phonologique, morpho-syntaxe, dénomination évocation, fluence.
Langage écrit	C'est la capacité à récupérer et organiser des symboles orthographiques de la mé-moire et de transcrire cela...	Lecture, orthographe.
Raisonnement logique	C'est la capacité de raisonner à partir des jugements des opérations concrètes de propositions verbales ou non verbales (Schmeichel <i>et al.</i> , 2003).	
Visuo-spatial	C'est la capacité d'explorer le champ visuel, pour représenter l'espace, la coordination œil et la main, imaginez les liens entre les éléments de l'environnement, et de se déplacer dans le temps et dans l'espace.	
Compé-tences transver-sale	C'est le jugement, pragmatique, inférence, planification, vitesse de traitement de l'information.	

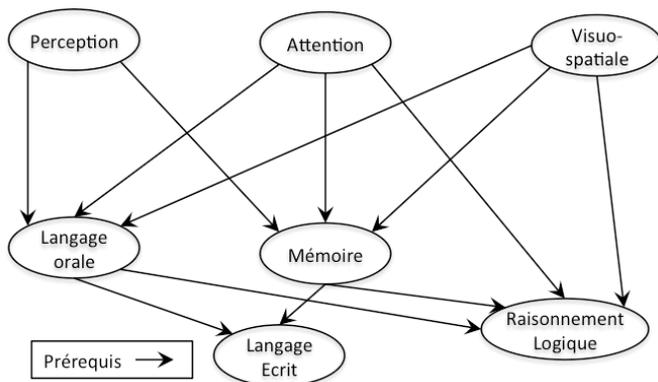


Figure 5 • Les concepts de base du projet CLES

6.2. Modélisation des ressources pédagogiques

Nous avons créé 91 ressources que nous avons mises en relation avec les concepts de la première couche. Les figures 6 et 7 page suivante montrent une partie des concepts *perception et mémoire* ainsi que leurs ressources pédagogiques associées.

Le concept *perception* est en relation, de type *fait-partie*, avec ses trois sous-concepts (visuelle, auditive et schéma corporel). Chacun de ces sous-concepts est en relation avec une ou plusieurs ressources pédagogiques. Par exemple, la *perception visuelle* (représentée par le concept *Visuel* en relation avec le concept *Perception*) est en relation avec les ressources représentant les mini-jeux *complément d'images*, *discrimination* et *objets entremêlés à identifier*. Cette relation exprime le fait que ces mini-jeux permettent d'évaluer et de stimuler la perception visuelle.

Le concept *mémoire* contient plusieurs sous-concepts dont certains possèdent des sous-sous-concepts (par exemple : mémoire→auditive→séquentiel). Toutes les relations entre le concept mémoire et ses sous-concepts sont de type *fait-partie*. Comme la perception, chaque concept de la première couche est appréhendé par une ou plusieurs mini-jeux représentés dans le modèle par des ressources pédagogiques.

7. Évaluations

Afin de valider nos contributions, nous avons développé GOALS. GOALS acronyme de *Generator Of Adaptive Learning Scenarios*, est une plate-forme en ligne permettant de générer des scénarios de jeu adaptés à chaque utilisateur. Pour cela, GOALS permet à l'expert de représenter les connaissances du domaine suivant les modèles que nous avons présentés au-dessus. Les connaissances dans GOALS sont organisées sous forme de *projet*. Un projet, relatif à un domaine d'apprentissage donné, contient les connaissances du domaine (modélisées en trois couches : concepts, ressources pédagogiques, ressources du jeu), un ensemble d'apprenants caractérisés par des profils, des modèles de présentation et des connaissances d'adaptation.

L'objectif des évaluations est, d'une part, de valider les modèles de notre générateur de scénarios, d'autre part, d'étudier l'impact des scénarios générés par GOALS sur les apprenants. Nous avons ainsi défini deux protocoles d'évaluation que nous avons mis en œuvre dans le cadre de deux expérimentations sur le terrain.

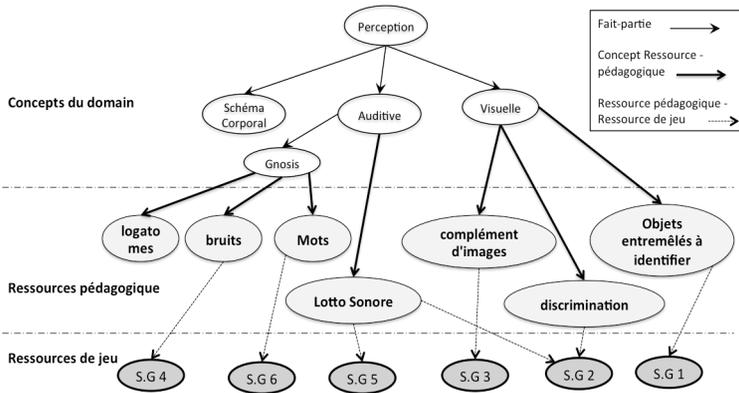


Figure 6 • Modélisation du concept « perception »

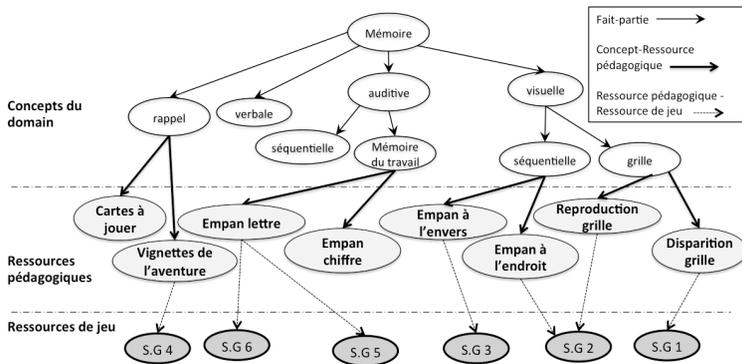


Figure 7 • Modélisation du concept « mémoire »

7.1. Validation du générateur

7.1.1. Protocole d'évaluation

L'objectif de cette première évaluation est de déterminer si :

- le générateur de scénarios fonctionne correctement. Il s'agit de valider les stratégies de sélection que nous avons définies pour les différents types de relation.
- les connaissances que nous avons introduites dans le système sont correctes.

Pour cela, notre protocole d'évaluation est basé sur une méthode comparative qui consiste à comparer, pour les mêmes profils et objectifs pédagogiques, les scénarios créés manuellement par l'expert avec les scénarios générés par GOALS. Cette évaluation a été menée avec un expert orthophoniste, partenaire du projet CLES.

Nous avons limité notre étude à la comparaison des scénarios conceptuels et pédagogiques. Les scénarios du jeu sérieux n'ont pas été considérés, car dans le jeu *Tom Oconnor* l'association entre les ressources pédagogiques et les objets du jeu est faite d'une manière arbitraire.

La figure 8 montre les différentes étapes du protocole d'évaluation. Dans un premier temps, (1) l'expert définit des profils types et fixe pour chacun de ces profils un certain nombre d'objectifs éducatifs. Ensuite, pour chacun de ces cas, l'expert crée manuellement un scénario (conceptuel et pédagogique). Ce dernier est ensuite comparé, par l'expert, avec le scénario généré par GOALS. Durant cette étape de comparaison (2), l'expert est filmé et est invité à verbaliser ses pensées.

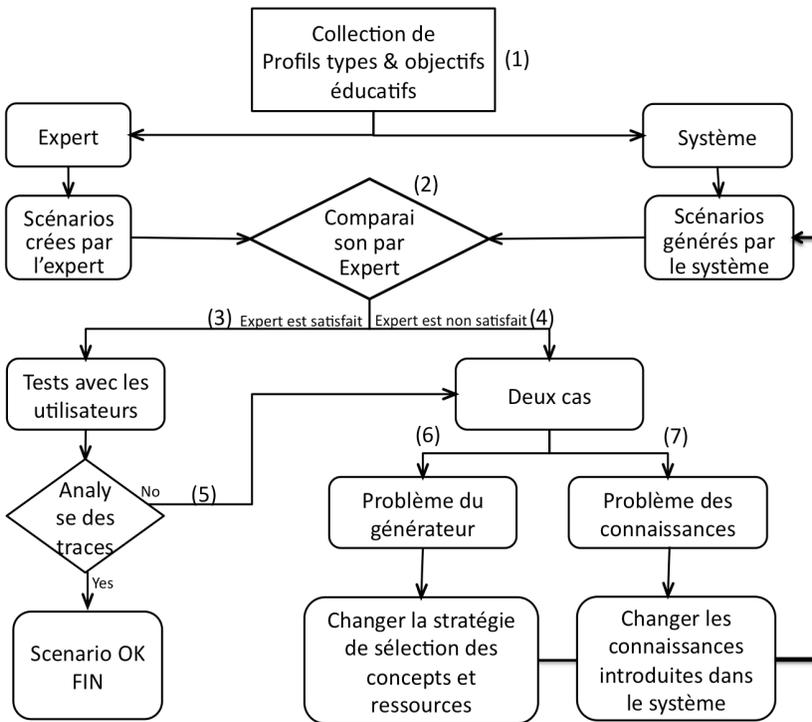


Figure 8 • Expérimentation 1 : Protocole d'évaluation

À l'issue de cette comparaison, deux cas se présentent : soit l'expert estime que les scénarios sont similaires, soit il les juge différents. Dans le premier cas (3), le protocole prévoit une évaluation avec des utilisateurs sur le terrain. L'intérêt de cette évaluation est de déterminer, à partir de

l'analyse des traces d'interaction, si les scénarios générés par le système sont adaptés aux profils des utilisateurs.

Dans le cas où l'expert juge les scénarios différents, on modifie les stratégies de sélection des concepts et/ou les connaissances du domaine, puis on réitère le protocole jusqu'à ce que les scénarios soient similaires.

7.1.2. Expérimentation et résultats

Avec l'aide de l'expert, nous avons défini les connaissances du projet CLES. Pour la couche concepts du domaine, nous avons créé 40 concepts et 44 relations. Pour la couche ressources pédagogiques, 91 mini-jeux ont été développés.

Ensuite, nous avons créé douze profils (tableau 3) :

Tableau 3 • Expérimentation 1 : Profils des participants

Age\profil	Sans déficience	Déficience de la perception	Déficience de la mémoire	Déficience du langage écrit
8 ans	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4
12 ans	Profil 5	Profil 6	Profil 7	Profil 8
14 ans	Profil 9	Profil 10	Profil 11	Profil 12

Pour chacun de ces profils, l'expert a défini les valeurs des différents concepts et a fixé certains objectifs thérapeutiques. Ensuite, nous avons introduit les connaissances et les profils dans GOALS, puis généré pour chaque cas (profil + objectif) un scénario. En parallèle, l'expert a créé manuellement pour chacun de ces cas un scénario. Par la suite, nous avons demandé à l'expert de comparer les deux types de scénarios (expert/ système).

Le tableau 4 montre deux exemples : le premier concerne des scénarios, GOALS et expert, destinés à un enfant âgé de 8 ans présentant une déficience de perception. Les scénarios du deuxième exemple concernent un enfant de 14 ans ayant des troubles de la mémoire. Dans le premier exemple, l'expert a constaté que les deux scénarios (GOALS et experts) sont similaires. En effet, soit les mini-jeux sélectionnés sont identiques (par exemple, *Bruit* et *Logatome*), soit ils portent sur la même fonction cognitive (par exemple, *Objets entremêlés*, *Compléments d'images* et *Discrimination* qui concernent la perception visuelle). En outre, les niveaux de difficulté des mini-jeux, GOALS et expert, sont identiques.

Tableau 4 • Exemples de comparaison de scénarios

Exemple 1		Exemple 2	
Profil Âge de l'enfant : 8 ans Déficience de perception Objectif d'apprentissage : Perception		Profil Âge de l'enfant : 14 ans Déficience de mémoire Objectif d'apprentissage : mémoire	
GOALS	Expert	GOALS	Expert
Mini-jeu (niveau)	Mini-jeu (niveau)	Mini-jeu (niveau)	Mini-jeu (niveau)
Objets entremêlés (4)	Complément d'images (4)	Identification Grille (7)	Reproduction grille (5)
Complément d'images (4)	Discrimination (4)	Disparition (7)	Identification (5)
Bruit (6)	Bruit (6)	Mémoire verbale Support Visuel (8)	Mémoire verbale - Visuel auditive (5)
Logatome (6)	Logatome (6)	Empan Reproduction - A l'endroit (8)	Mémoire verbale - Support visuel (5)

Dans le deuxième exemple, les mini-jeux des deux scénarios sont similaires, néanmoins les niveaux de difficulté sont différents.

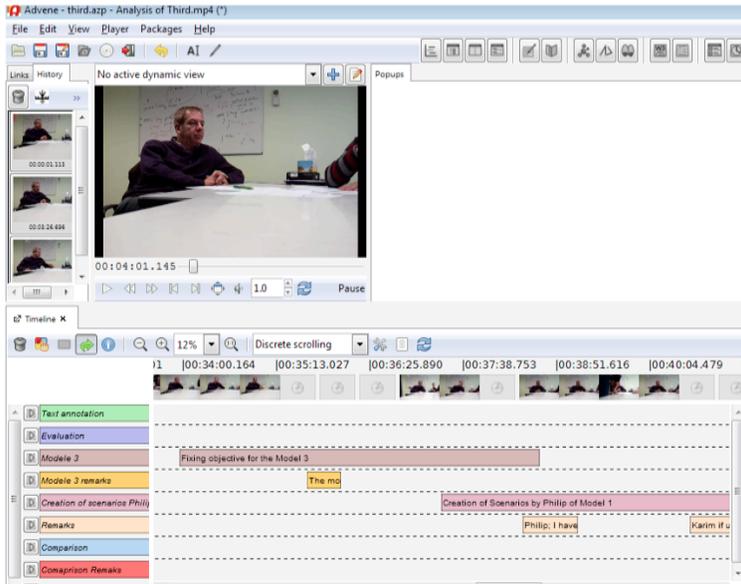


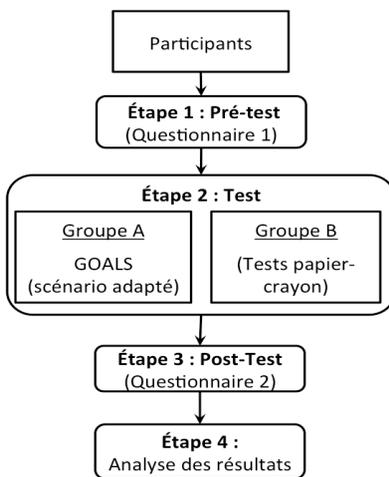
Figure 9 • Interface d'Advene

Durant toute l'expérimentation, l'expert a été filmé afin d'analyser ses réalisations a posteriori. Ainsi, nous avons analysé environ 2 heures de

vidéo en utilisant Advene^{iv} (figure 9). Cette analyse nous a permis de détecter quelques erreurs concernant les connaissances et le générateur. Nous avons ainsi ajouté un nouveau concept, 5 relations entre concepts et un nouveau type de relation. Concernant le fonctionnement du générateur, et comme le montrait l'exemple 2 du tableau 4, les niveaux de difficulté de certains mini-jeux issus du générateur GOALS ne correspondaient pas aux niveaux des mini-jeux fixés par l'expert. L'origine de cette erreur venait du fait que l'algorithme adopté par le générateur ne prenait en compte que le profil de l'utilisateur alors que l'expert prenait en compte l'écart entre le profil et les objectifs de la session. Cette erreur a été corrigée.

7.2. Impact des scénarios sur les apprenants

7.2.1. Protocole d'évaluation



**Figure 10 • Expérimentation 2 :
Protocole d'évaluation**



**Figure 11 • Déroulement de
l'expérimentation 2**

Afin d'étudier l'impact des scénarios GOALS sur les apprenants, nous avons défini un protocole (figure 10) basé sur deux groupes d'apprenants (A et B) et quatre étapes : pré-test, test, post-test et analyse de résultats.

Durant la première étape, un même questionnaire est soumis à tous les apprenants (groupes A et B). Ce pré-test permet de connaître le niveau des apprenants. Durant la deuxième étape, les apprenants du groupe A utilisent des scénarios générés par GOALS et les apprenants du groupe B utilisent des activités d'apprentissage classiques. La troisième étape consiste à

soumettre un deuxième questionnaire à tous les apprenants (groupes A et B). La quatrième étape consiste à comparer les résultats des questionnaires 1 et 2 afin d'étudier la progression des apprenants des deux groupes. Naturellement, les deux questionnaires, des étapes une et trois, et le contenu des activités d'apprentissage de l'étape deux doivent être cohérents avec le domaine d'apprentissage (stimulation cognitive dans notre contexte).

Durant toute l'expérimentation, les apprenants ont été filmés afin d'analyser leurs réalisations *a posteriori*.

7.2.2. Expérimentation et résultats

Nous avons mené une expérimentation avec huit participants, en situations de handicap, membres de l'association Handica Réussir^v. Avec l'aide des responsables de cette association, nous avons organisés les participants en deux groupes relativement équivalents en terme de compétences et capacités. Le tableau 5 montre un aperçu des profils de ces participants.

Tableau 5 • Expérimentation 2 : Profils des participants

Participants	Age	Sexe	Situation de handicap	
Participant 1	30	M	Dysphasie	Groupe A
Participant 2	26	M	Epilepsie	
Participant 3	21	F	Syndrome Asperger	
Participant 4	21	M	Physique	
Participant 5	21	F	Multi-dys	Groupe B
Participant 6	16	M	Troubles attentionnels	
Participant 7	17	M	Syndrome Asperger	
Participant 8	18	M	Dyspraxie	

Cette expérimentation a été focalisée sur trois fonctions cognitives : perception, mémoire et raisonnement logique. Pour chacune de ces fonctions, nous avons préparé les questionnaires des trois étapes : pré-test, test et post-test. Nous avons également introduit dans GOALS les connaissances du projet CLES et les profils des apprenants avec l'aide d'un expert.

Durant l'étape de pré-test, les apprenants des deux groupes ont répondu au même questionnaire. Durant l'étape de test, les participants du groupe A ont utilisé les scénarios adaptatifs générés par GOALS et les participants du groupe B ont utilisé des activités d'apprentissage papier-crayons. Dans ce dernier cas, les mêmes scénarios ont été fournis aux participants du groupe B. Naturellement, les exercices papier-crayons sont

de même niveau des mini-jeux et portent sur les mêmes fonctions cognitives. La seule différence est qu'elles ne sont pas paramétrables/adaptables. La figure 12 donne un exemple d'un exercice sur la perception. Durant l'étape de post-test, les participants des deux groupes ont répondu aux mêmes questionnaires.

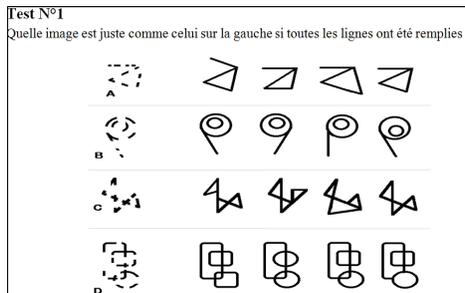


Figure 12 • Exemple d'un exercice sur la perception

Le tableau 6 montre les résultats des questionnaires pré et post-tests sur la perception. Dans l'ensemble, ces résultats montrent que la progression du groupe A est plus importante que celle du groupe B. Néanmoins, il est prématuré d'affirmer que cet écart s'explique par les seuls jeux. Il faudrait plusieurs d'autres expérimentations, dans la durée, pour démontrer cela.

Tableau 6 • Expérimentation 2 : résultats de l'évaluation

Perception							
Gr	Participants	Pre-test	Moyenne	Ecart-type	Post-Test	Moyenne	SD
Group A	P1	4	6,25	2,63	10	8,875	1,03
	P2	5			7,5		
	P3	6			9		
	P4	10			9		
Group B	P5	7	8	1,41	10	8,5	1,22
	P6	7			7,5		
	P7	8			7,5		
	P8	10			9		

En plus des deux expérimentations, la dernière version de GOALS, antérieure à ces expérimentations, a été testé par douze orthophonistes praticiens. Les retours que nous avons obtenu, suite à ces tests, sont très positifs dans l'ensemble, en particulier sur le principe de construction de connaissances (domaine, profils...) et sur la génération de scénarios. Néanmoins, les orthophonistes ont trouvé une certaine difficulté à mani-

puler l'éditeur de connaissances lorsque ces dernières sont assez denses (voir l'exemple de la figure 13-A).

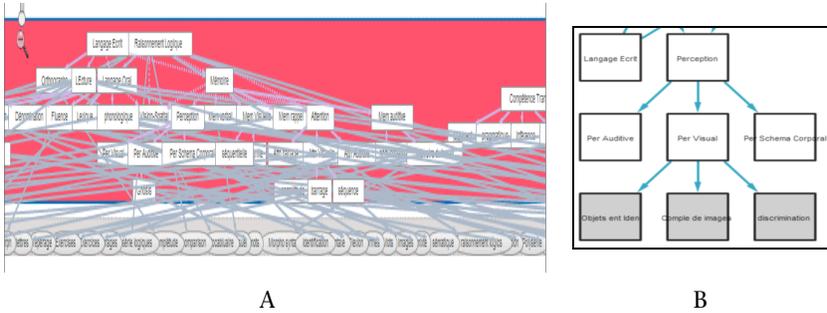


Figure 13 • Exemple d'un exercice sur la perception

Pour remédier à ce problème, nous avons proposé une visualisation interactive multi-échelle. Le principe consiste à visualiser que les concepts de haut niveau (les 12 concepts de base du projet CLES par exemple). Si l'utilisateur veut visualiser les sous-concepts d'un concept donnée, il doit clic dessous (figure 13-B).

8. Conclusion et perspectives

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre du projet CLES dont l'objectif est de développer un jeu sérieux adaptatif pour l'évaluation et la rééducation des troubles cognitifs. Dans cet article, nous avons présenté un système permettant de personnaliser le parcours de jeux à chaque patient suivant ses capacités et ses compétences. L'architecture de ce système organise les connaissances en trois couches : concepts du domaine, ressources pédagogiques et ressources de jeux. Cette architecture permet au système d'être utilisé dans différents domaines d'application et jeux sérieux.

Les traces sont utilisées pour mettre à jour le profil de l'utilisateur. Le profil est défini par un ensemble de propriétés de la forme attribut valeur où chaque attribut correspond à un concept du domaine et sa valeur correspond à la compétence de l'apprenant concernant ce concept. Notre approche de mise à jour consiste à propager l'information dans le graphe de concepts à partir des performances de l'apprenant.

Afin de valider nos modèles, nous avons proposé un protocole d'évaluation qui permet de comparer, pour les mêmes cas, les scénarios générés par le système avec les scénarios créés par l'expert du domaine. Ce protocole a été mis en œuvre avec un expert orthophoniste dans une

expérimentation qui nous a permis de valider les connaissances du domaine du projet CLES et le fonctionnement du générateur. Les difficultés que nous avons rencontrées portaient sur la détermination de l'origine des erreurs lorsque l'expert trouvait les deux types de scénarios (expert/système) différents : s'agit-il d'un problème au niveau des connaissances du domaine, de la stratégie adoptée par le générateur ou les deux à la fois. Pour contourner cette difficulté, nous avons étudié les trois possibilités à chaque fois que la question était posée. Nous avons également mené une deuxième expérimentation afin d'étudier l'impact des scénarios GOALS sur l'apprentissage des apprenants. Les premiers résultats sont positifs. Il est néanmoins prématuré de tirer des conclusions définitives. Nous souhaitons mener d'autres expérimentations avec un grand nombre d'utilisateurs, dans d'autres contextes, afin de confirmer ces résultats.

-
- 1 Adaptive Educational Interactive Narrative System
 - 2 *Smart Multi-purpose Interactive Learning Environment*
 - 3 Project Integrating eXperience in Distance Learning
 - 4 Advene (<http://liris.cnrs.fr/advene/>) est un outil d'analyse video a base d'annotations.
 - 5 <http://www.handicareussir.com>

BIBLIOGRAPHIE

BIELIKOVÁ, M., DIVÉKY, M., JURNEČKA, P., KAJAN, R., & OMELINA, L. (2008). Automatic generation of adaptive, educational and multimedia computer games. *Signal, Image and Video Processing*, Vol. 2 n° 4, 371–384. Disponible sur internet : <http://www.springerlink.com/index/YT74146082529122.pdf>

BIKOVSKA, J., & MERKURYEVA, G. (2007). Scenario-based planning and management of simulation game: a review. In *21st European Conference on Modelling and Simulation* (Vol. 4). Disponible sur internet : http://www.scs-europe.net/conf/ecms2007/ecms2007-cd/ecms2007/ecms2007.pdf/lt_0154.pdf

BOUZEGHOUB, A., CARPENTIER, C., DEFUDE, B., & DUITAMA, F. (2005). A model of reusable educational components for the generation of adaptive courses. In *Proc. First International Workshop on Semantic Web for Web-Based Learning in conjunction with CAISE* (Vol. 3). Citeseer. Disponible sur internet : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.102.1589&rep=rep1&type=pdf>

CARRON, T., MARTY, J.-C., FRANCE, L., & HERAUD, J.-M. (2007). Matching the Performed Activity on an Educational Platform with a Recommended Pedagogical Scenario: A Multi-Source Approach. *Journal Of Interactive Learning Research*, Vol. 18, 267–283.

CARRON, T., MARTY, J.-C., & HERAUD, J.-M. (2007). Teaching with game-based learning management systems: Exploring a pedagogical dungeon. *Simulation & Gaming*, Vol. 39 n° 3, 353–378. doi:10.1177/1046878108319580

CARRON, T., MARTY, J.-C., & HERAUD, J.-M. (2008). Teaching with Game Based Learning Management Systems: Exploring and observing a pedagogical. *Simulation & Gaming*, Vol. 39 n° 3, 353–378. doi:<http://dx.doi.org/10.1177/1046878108319580>

CHANG, W.-C., & CHOU, Y.-M. (2008). Introductory C Programming Language Learning with Game-Based Digital Learning. *Advances in Web Based Learning-ICWL 2008*, p. 221-231. Disponible sur internet : <http://www.springerlink.com/index/54324ml517612176.pdf>

CLAUZEL, D., SEHABA, K., & PRIÉ, Y. (2009). Modelling and visualising traces for reflexivity in synchronous collaborative systems. In *International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS 2009)* (p. 16–23).

CLAUZEL, D., SEHABA, K., & PRIÉ, Y. (2011). Enhancing synchronous collaboration by using interactive visualisation of modelled traces. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 19 n° 1, 84–97. doi:10.1016/j.simpat.2010.06.021

CONDE, A., DE IPIÑA, K., LARRAÑAGA, M., GARAY-VITORIA, N., IRIGOYEN, E., EZEIZA, A., & RUBIO, J. (2009). LAGUNTXO: a rule-based intelligent tutoring system oriented to people with intellectual disabilities. *Visioning and Engineering the Knowledge Society. A Web Science Perspective*, p. 186-195. Disponible sur internet : <http://www.springerlink.com/index/R54G5881K1276855.pdf>

DE BRA, P., & CALVI, L. (1998). AHA! An open adaptive hypermedia architecture. *New Review of Hypermedia and Multimedia*, 1-18. Disponible sur internet : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13614569808914698>

DE BRA, P., & RUITER, J. (2001). AHA! Adaptive hypermedia for all. In *proceedings of WebNet*. Disponible sur internet : http://pdf.aminer.org/000/656/494/aha_adaptive_hypermedia_for_all.pdf

DIAMOND, A., & GOLDMAN-RAKIC, P. S. (1989). Comparison of human infants and rhesus monkeys on Piaget's AB task: Evidence for dependence on dorsolateral prefrontal cortex. *Experimental Brain Research*, Vol. 74 n° 1, 24-40. Disponible sur internet : <http://www.springerlink.com/index/R1W035487M75357R.pdf>

DUITAMA, F., DEFUDE, B., BOUZEGHOUB, A., & CARPENTIER, C. (2005). A framework for the generation of adaptive courses based on semantic metadata. *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 25 n° 3, 377–390. Disponible sur internet : <http://www.springerlink.com/index/T1U98Q05N271751P.pdf>

GARCIA-PALACIOS, A., HOFFMAN, H., CARLIN, A., FURNESS, T. a, & BOTELLA, C. (2002). Virtual reality in the treatment of spider phobia: a controlled study. *Behaviour Research and Therapy*, Vol. 40 n° 9, 983-93. Disponible sur internet : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12296495>

GREEN, C. S., LI, R., & BAVELIER, D. (2010). Perceptual Learning During Action Video Game Playing. *Topics in Cognitive Science*, Vol. 2 n° 2, 202–216. doi:10.1111/j.1756-8765.2009.01054.x

HERAUD, J., FRANCE, L., & MILLE, A. (2004). Pixed: An ITS that guides students with the help of learners' interaction logs. In *7th International Conference on Intelligent Tutoring Systems* (p. 57-64).

HERAUD, J., & MILLE, A. (2000). Pixed: vers le partage et la réutilisation d'expériences pour assister l'apprentissage. *Proceedings of International Symposium*

TICE . Disponible sur internet :

<http://liris.cnrs.fr/~amille/publications/Tice2000.zip>

HERAUD, J.-M., & MILLE, A. (2002.). Pixed : Projet d'Intégration de l'eXpérience en Enseignement à Distance, p. 120.

HODHOD, R., KUDENKO, D., & CAIRNS, P. (2009). Serious Games to Teach Ethics. In *proceedings of AISB* (Vol. 9, p. 6-9). Disponible sur internet : <http://www.cs.york.ac.uk/gidy/articles/AISB2009Hodhod.pdf>

HUSSAAN, A. M., SEHABA, K., & MILLE, A. (2011). Helping children with cognitive disabilities through serious games: project CLES. In *The proceedings of the 13th ...* (p. 2-3). Disponible sur internet : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2049592>

KARAMPIPERIS, P., & SAMPSON, D. (2005). Adaptive learning resources sequencing in educational hypermedia systems. *Educational Technology & Society*, Vol. 8 n° 4, 128-147. Disponible sur internet : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.98.5688&rep=rep1&type=pdf>

KEENOY, K., LEVENE, M., & PETERSON, D. (2004). Personalisation and Trails in Self e-Learning Networks, project: SeLeNe-Self E-Learning Networks. *Deliverable*, p. 1-51. Disponible sur internet : <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Personalisation+and+Trails+in+Self-e-learning+Networks+The+SeLeNe+Project#2>

KRAVCIK, M., & SPECHT, M. (2004). Flexible navigation support in the winds learning environment for architecture and design In *Third International Adaptive Hypermedia and Adaptive Webbased Systems Conference*, (Vol. 3137, p. 156-165). Disponible sur internet : <http://www.springerlink.com/index/lx00bp1ebfn5bwp0.pdf>

LIBBRECHT, P., MELIS, E., & ULLRICH, C. (2001). Generating personalized documents using a presentation planner. In *ED-MEDIA 2001-World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications, 2001*. MEDIA. Disponible sur internet : <http://www.carstenullrich.net/pubs/edmedia01.pdf>

MANLY, T., ANDERSON, V., & NIMMO-SMITH, I. (2001). The differential assessment of children's attention: The Test of Everyday Attention for Children (TEA-Ch), normative sample and ADHD performance. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, Vol. 42 n° 8, 1065-1081. doi:10.1111/1469-7610.00806

MARNE, B., CARRON, T., & MARC-LABAT, J. (2013). MoPPLiq: A Model For Pedagogical Adaptation of Serious Gams Scenarios. In *ICALT 2013* (p. 291-293).

MODY, M., STUDDERT-KENNEDY, M., & BRADY, S. (1997). Speech perception deficits in poor readers: auditory processing or phonological coding? *Journal of Experimental Child Psychology*, Vol. 64 n° 2, 199-231. doi:10.1006/jecp.1996.2343

MORENO-GER, P., BURGOS, D., MARTINEZORTIZ, I., SIERRA, J. L., & FERNANDEZ-MANJON, B. (2008). Educational game design for online education. *Computers in Human Behavior*, Vol. 24 n° 6, 2530-2540. doi:10.1016/j.chb.2008.03.012

MORENO-GER, P., BURGOS, D., MARTÍNEZ-ORTIZ, I., SIERRA, J. L., & FERNANDEZ-MANJON, B. (2008). Educational game design for online education. *Computers in Human Behavior*, Vol. 24 n° 6, 2530-2540. doi:10.1016/j.chb.2008.03.012

MORENO-GER, P., BURGOS, D., & SIERRA, J. L. (2007). A game-based adaptive unit of learning with ims learning design and. In *Second European Conference on Technology Enhanced Learning, EC-TEL 2007* (p. 247-261). doi:10.1007/978-3-540-75195-3_18

MORENO-GER, P., SIERRA, J. L., MARTINEZORTIZ, I., & FERNANDEZ-MANJON, B. (2007). A documental approach to adventure game development. *Science of Computer Programming*, Vol. 67 n° 1, 3-31.
doi:10.1016/j.scico.2006.07.003

PERNIN, J.-P., & LEJEUNE, A. (2006). MODELES POUR LA REUTILISATION DE SCENARIOS D'APPRENTISSAGE. In *actes du colloque TICE*.

PETER, Y., & VANTROYS, T. (2005). Platform support for pedagogical scenarios *Journal of Educational Technology and Society*, Vol. 8 n° 3, 122. Disponible sur internet : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.78.3981&rep=rep1&type=pdf>

SCHACTER, D. L., GILBERT, D. T., & WEGNER, D. M. (2010). *Psychology*, 800. Worth Publishers.

SCHMEICHEL, B. J., VOHS, K. D., & BAUMEISTER, R. F. (2003). Intellectual performance and ego depletion: Role of the self in logical reasoning and other information processing. *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 85 n° 1, 33-46. doi:10.1037/0022-3514.85.1.33

SCHNEIDER, D. K., PARASKEVI SYNTETA, FRÉTÉ, C., GIRARDIN, F., & MORAND, S. (2003). Conception and implementation of rich pedagogical scenarios through collaborative portal sites: clear focus and fuzzy edges. In *International Conference on Open and Online Learning* (p. 1–40). Citeseer. Disponible sur internet : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.88.6169&rep=rep1&type=pdf>

SEHABA, K. (2005). Exécution adaptative par observation et analyse de comportements Application à des logiciels interactifs pour des enfants autistes. Université de La Rochelle. Disponible sur internet : http://liris.cnrs.fr/~ksehaba/THESE_Sehaba.pdf

SEHABA, K., ESTRAILLIER, P., & LAMBERT, D. (2005). Interactive educational games for autistic children with agent-based system. *4th International Conference on Entertainment Computing (ICEC'05)*, p. 422–432. Disponible sur internet : <http://www.springerlink.com/index/5076QTRQCW0PF6YW.pdf>

SPECHT, M., KRAVCIK, M., PESIN, L., & KLEMKE, R. (2001a). Authoring adaptive educational hypermedia. In *WINDS Proceedings of ABIS2001, Dortmund, Germany*, Vol. 3 n° 3, p. 1-8. doi:10.1504/IJLT.2007.015443

SPECHT, M., KRAVCIK, M., PESIN, L., & KLEMKE, R. (2001b). Authoring adaptive educational hypermedia. In *WINDS Proceedings of ABIS2001, Dortmund, Germany*, p. 1-8. Disponible sur internet : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.92.7967&rep=rep1&type=pdf>

SPECHT, M., & OPPERMAN, R. (1998). ACE-adaptive courseware environment. *New Review of Hypermedia and Multimedia*, Vol. 4, n° 1, 141-161. Disponible sur internet : <http://www.informaworld.com/index/776268563.pdf>

SUSI, T. (2007). *Serious games—An overview ... Report HS-IKI-TR-07-001*. Citeseer. Disponible sur internet : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.105.7828&rep=rep1&type=pdf>

ULLRICH, C. (2007). *Course Generation as a Hierarchical Task Network Planning Problem*.

ULLRICH, C., & MELIS, E. (2009). Pedagogically founded courseware generation based on HTN-planning. *Expert Systems with Applications*, Vol. 36 n° 5, 9319-9332. doi:10.1016/j.eswa.2008.12.043

ULLRICH, C., & MELIS, E. (2010). Complex Course Generation Adapted to Pedagogical Scenarios and its Evaluation. *Educational Technology & Society*, Vol. 13,

n° 2, 102-115. Disponible sur internet : <http://www-ags.dfki.uni-sb.de/~melis/Pub/CG-EducTechnologyAndSociety2009.pdf>

VASSILEVA, J. (1995). Dynamic courseware generation: at the cross point of CAL, ITS and authoring. In *Proceedings of ICCE* (Vol. 95, p. 290-297). Disponible sur internet : <http://julita.usask.ca/Texte/ICCE95.pdf>

VASSILEVA, J., & DETERS, R. (1998a). Dynamic courseware generation on the WWW. *British Journal of Educational Technology*, Vol. 29, n° 1, 5-14. Disponible sur internet : <http://www3.interscience.wiley.com/journal/119103357/abstract>

VASSILEVA, J., & DETERS, R. (1998b). Dynamic courseware generation on the WWW. *British Journal of Educational Technology*, Vol. 29, n° 1, 5-14. Disponible sur internet : <http://julita.usask.ca/Texte/BJET-print.pdf>

ZYDA, M. (2005). From visual simulation to virtual reality to games. *Computer*, Vol. 38 n° 9, 25-32. doi:<http://dx.doi.org/10.1109/MC.2005.297>