HAL open science

Vers une plateforme sémantique pour l'apprentissage adaptatif et collaboratif en ligne

Massra Sabeima, Myriam Lamolle, Azziz Anghour, Mohamedade Farouk Nanne

To cite this version:

Massra Sabeima, Myriam Lamolle, Azziz Anghour, Mohamedade Farouk Nanne. Vers une plateforme sémantique pour l'apprentissage adaptatif et collaboratif en ligne. 2021. hal-03322271v3

HAL Id: hal-03322271

https://hal.science/hal-03322271v3

Preprint submitted on 26 Nov 2021 (v3), last revised 21 Nov 2022 (v5)

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.

Vers une plateforme sémantique pour l'apprentissage adaptatif et collaboratif en ligne.

Massra SABEIMA[*1,2], **Myriam LAMOLLE**[2], **Azziz ANGHOUR**[2], **Mohamedade Farouk NANNE**[1]

[1]CSIDS-Université de Nouakchott Al-AsriyaNouakchott, Mauritanie
[2]LIASD-Université Paris8, IUT de Montreuil

*E-mail : m.sabeima@iut.univ-paris8.fr

Résumé

Dans le monde de la formation en ligne, les systèmes d'apprentissage ont cherché à adapter le profil de l'utilisateur et le contenu qui lui est proposé. Cette adaptation a comme objectif général de permettre à l'apprenant de tirer le meilleur parti du contenu exposé des ressources d'apprentissage. Cependant, du point de vue de la collaboration entre apprenants selon l'adaptation au profil des apprenants, cette adaptation n'a pas été suffisamment explorée comme un aspect important du processus d'apprentissage en ligne. L'adaptation va permettre de grouper des utilisateurs de profil similaire ou très proche pour apprendre en harmonie tout en gardant la motivation et l'engagement envers l'apprentissage. Cela devrait augmenter le taux de réussite des apprenants. Cet état de fait nous permettra aussi de réutiliser les parcours d'apprentissage avec de bons taux de réussite pour de futures recommandations aux utilisateurs ayant le même profil.

Dans cet article, nous mettons l'accent sur cet aspect et proposons un système d'apprentissage qui recommande des parcours d'apprentissage adaptés au profil des utilisateurs et qui permet un apprentissage collaboratif des utilisateurs de façon synchrone. Après un tour d'horizon de l'existant dans le domaine de l'apprentissage adaptatif en ligne, nous proposerons une architecture pour le pilotage de ce type d'apprentissage adaptatif collaboratif basé sur des ontologies et orchestrée par un système multi-agents. Ce dernier est responsable du pilotage des parcours d'apprentissage, de la recommandation de parcours en mode collaboratif ou non par le biais d'une communication entre les différents agents intervenants et de la gestion des événements captés par le système.

Mots-Clés

E-learning ; apprentissage adaptatif ; Système multi-agents ; apprentissage collaboratif ; personnalisation de parcours ; ontologies

I INTRODUCTION

Le contexte actuel mondial lié à la crise sanitaire a révélé la nécessité d'avoir un accès à toute forme de formation à distance de façon à acquérir de nouvelles compétences qu'elles touchent au savoir, au savoir-faire ou au savoir-être ; et ce, tout au long de la vie et pour différents métiers.

Dans le domaine du l'*e-learning*, les premiers MOOCs ont été une des réponses à cet accès massif à distance [20]. Sous ces formes traditionnelles d'apprentissage en ligne, les parcours d'apprentissage sont principalement uniformes. Or, cette uniformité est souvent une cause d'échec d'acquisition de compétences des apprenants [39]. Un néophyte ou une personne qui a déjà une

expérience dans le domaine concerné mais qui veut renforcer son savoir-faire n'auront pas les mêmes attendus sur les ressources pédagogiques et sur le parcours de formation. Bien souvent, les profils des apprenants contenus dans une base de données ou une base de connaissances sont ignorés. Ceci a pour conséquence que les ressources pédagogiques sont proposées à tous les apprenants de la même façon selon un parcours de formation bien défini construit par un formateur. L'adaptation des ressources pédagogiques et des parcours d'apprentissage aux profils des utilisateurs, au domaine de formation, etc., est donc primordiale pour amener l'apprenant dans de bonnes conditions de réussite. Cependant, dans les systèmes de recommandation, la question de l'adaptation reste un point prépondérant lors de la génération d'un parcours d'apprentissage adaptatif [19, 30, 43], voire collaboratif.

Il est à noter que Neto *et al.* soulignent dans [44] quelques limites présentes dans les systèmes de recommandation basés sur les systèmes multi-agents dans différents domaines d'application y compris l'*e-learning*.

D'autre part, l'aspect social n'est pas à négliger. En effet, les premiers MOOCs, s'ils ont démocratisé l'accès au formation, ont fait apparaître un autre écueil à savoir l'isolement social qui causait bien souvent une certaine forme de découragement et l'abandon de l'apprenant [5, 37]. Ni les progrès, ni les centres d'intérêt de l'utilisateur, ni le style d'apprentissage qui convient à ce dernier n'ont été considérés. Par conséquent, le système échoue dans sa mission de persuader l'utilisateur de rester connecté pour suivre une formation tout au long du parcours d'apprentissage.

Une évolution est alors apparue en proposant des formes collectives d'apprentissage par la mise en place de "classes virtuelles". Pour ce faire, des forums de discussion, des blogs, etc., ont été ajoutés [21]. Cette forme d'entraide a diminué le nombre d'abandon mais des améliorations sont encore à faire pour avoir une vraie collaboration entre les participants.

De prime abord, compte-tenu des avantages de l'adaptation de l'apprentissage à tout individu et du mode collaboratif qui engendre une certaine émulation et synergie entre les apprenants, il semble intéressant de faire évoluer l'apprentissage en ligne vers des systèmes adaptatifs collaboratifs. Cependant, la mise en place de tels systèmes nécessite de répondre à un certain nombre de questions telles que :

— Comment former des groupes d'apprenants pour avoir une collaboration effective entre leurs membres ?
— Sur quelles ressources pédagogiques ou activités doit-on créer des « points de rencontre » entre apprenants compte-tenu des parcours de formation générés pour chacun des membres ?
— Quelle sera la forme de collaboration la plus adaptée pour un groupe donné (chat, visio-conférence, etc.) ?
— Comment sera cette collaboration entre membres d'un groupe, notamment dans le cas de membres de différents niveaux de compétence ?
— ...

Ces questions liées à la collaboration « directe » nécessite une synchronisation entre apprenants lors de ce type de collaboration, par l'intermédiaire de leur avancée dans leur parcours de formation.

Après un tour d'horizon de différentes approches, de leurs avantages et inconvénients, nous proposons une solution par la mise en place d'une plate-forme sémantique d'apprentissage adaptatif et collaboratif fondée sur des ontologies pour la modélisation des profils utilisateurs, des

ressources et des domaines de formation, le tout piloté par un système multi-agents facilitant le travail collaboratif [12].

Le reste de cet article est organisé de la manière suivante : la prochaine section présente un ensemble de travaux traitant différents aspects des situations d'apprentissage en ligne. Les systèmes d'apprentissage correspondant sont détaillés dans la section 2.2. Une discussion s'en suivra dans la section V concernant une comparaison des plates-formes existantes selon les critères essentiels que toute plate-forme d'apprentissage devrait intégrer pour faciliter l'apprentissage adaptatif collaboratif. La section III sera consacrée à notre proposition de solution pour intégrer une plus forte collaboration entre apprenants. L'architecture de la plate-forme et les modèles ontologiques y seront présentés ainsi que les différentes étapes du processus d'apprentissage adaptatif et collaboratif grâce à un système multi-agents (SMA). Nous terminerons par une conclusion et les perspectives envisagées.

II ÉTAT DE L'ART

Généralement, les plates-formes d'apprentissage suivent une démarche simple pour tout processus d'apprentissage en ligne selon le principe de la figure 1. L'apprenant saisit le titre de la formation qu'il souhaite. Ensuite, le système central traite sa demande par l'intermédiaire d'un moteur d'analyse qui va lui renvoyer le résultat pour un affichage sous une forme lisible et compréhensible par l'utilisateur.

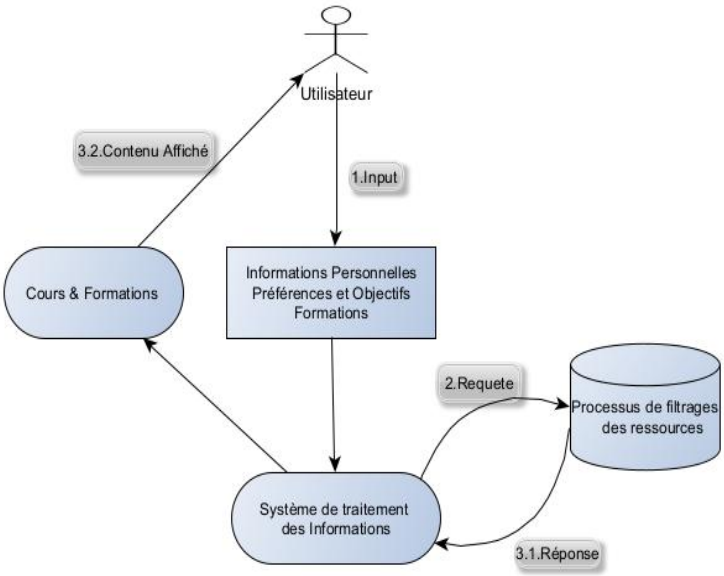

FIGURE 1 – Processus général d'apprentissage en ligne.

Les situations d'apprentissage varient selon le contexte, le type d'apprentissage et l'accessibilité aux ressources pédagogiques ainsi que par la forme de leurs présentations. À l'heure actuelle, trois types de situation prédominent [28, 30, 32] à savoir :

— un apprentissage individuel,
— un apprentissage individuel avec recommandation de ressources pédagogiques,
— un apprentissage adaptatif et collaboratif.

De façon générale, la recommandation d'un produit à un utilisateur peut être définie comme un processus de propositions se fondant sur son profil [30]. Par exemple, la recommandation de films dans Netflix tient compte de ses caractéristiques propres mais aussi des films déjà vus,

des films vus par d'autres utilisateurs qui ont les mêmes goûts, etc. Dans notre contexte, la recommandation de ressources pédagogiques dans un système d'apprentissage adaptatif sera réalisée par le système tout au long du parcours de formation et en tenant compte du profil de l'utilisateur.

Certaines méthodes se focalisent sur l'utilisateur en enregistrant le résultat de ses interactions avec le navigateur mettant en exergue ses centres d'intérêts ou la durée passée sur un sujet précis [31].

Parmi les techniques utilisées pour représenter un modèle de profil d'utilisateur, les ontologies ont fait une percée ces dernières années. En effet, elles sont particulièrement intéressantes car elles peuvent être utilisées pour représenter les relations sémantiques entre les unités informationnelles exprimant par exemple le profil de l'utilisateur [31]. Elles sont d'ailleurs prépondérantes pour porter toute la richesse des standards ou normes liées à l'apprentissage telles que IEEE LOM [1], XAPI (anciennement SCORM [2]), IMS-SS [3] pour l'organisation des activités et intégré dans SCORM4 *profile*, etc. À titre d'exemple concret, l'ontologie *COMP2* a été conçue à partir de cinq modèles provenant de différents standards pour la représentation des compétences [45].

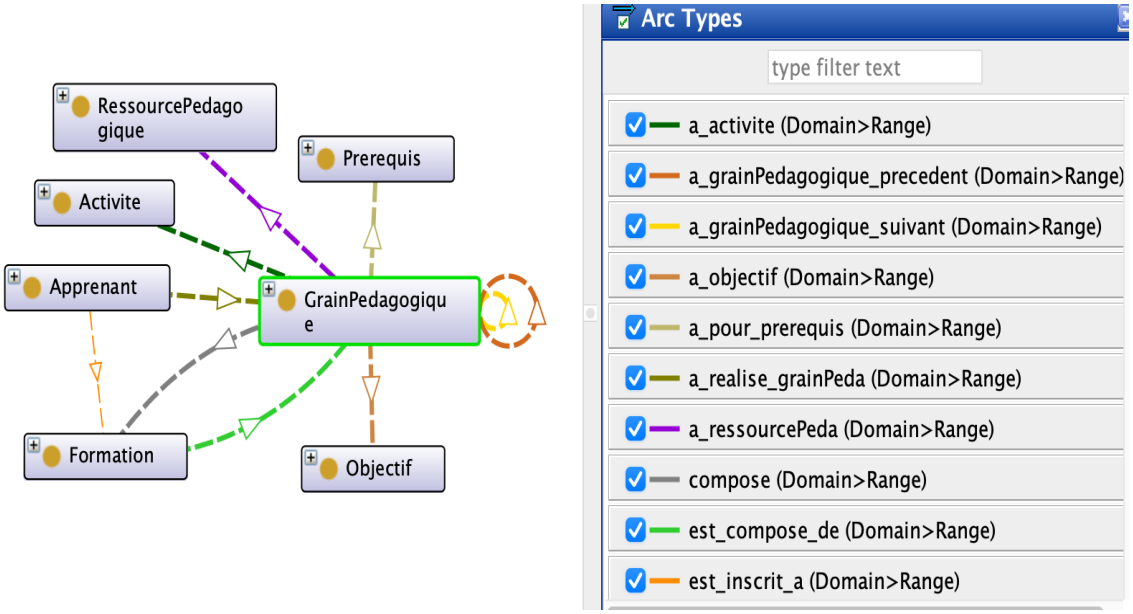

FIGURE 2 – Vue partielle d'une ontologie d'apprentissage.

Dans une ontologie, les relations sont de deux types distincts à savoir (i) une relation hiérarchique (dite de subsumption) de classes définissant une taxonomie de concepts et dans laquelle chaque classe est une représentation d'un domaine d'intérêts, (ii) les rôles (notés *Arc Types* dans la figure 2) qui sont des relations binaires entre classes portant des propriétés mathématiques comme la réflexivité, la symétrie, la transitivité, etc. Grâce à cela, des raisonneurs vont vérifier la cohérence de la base de connaissance et inférer de nouvelles connaissances qui étaient jusque-là tacites. Par ce biais, il est alors possible de faire des recommandations plus pertinentes.

1. Learning Object Metadata, voir standards.ieee.org/standard
2. Sharable Content Object Reference Model, voir /scorm.com
3. Instructional Management System Simple Sequencing, voir edutechwiki.unige.ch/en/IMS_Simple_Sequencing

2.1 Situation d'apprentissage collaboratifve

De façon générale, la collaboration consiste à impliquer un groupe de personnes ayant un objectif commun pour effectuer, compléter ou créer une activité [6, 22]. On parle aussi parfois de communauté de pratique CHOMIENNE et LEHMANS [11] où la notion d'engagement de ses membres est prépondérante.

Li, dans [38], définit un environnement de travail collaboratif basé sur le Web comme un environnement qui permet la collaboration numérique en offrant des services qui permettent cette collaboration dans le temps et l'espace, en maintenant les différentes activités des utilisateurs soit dans des temps différents (collaboration asynchrone), soit en même temps ou en temps réels (collaboration synchrone). De même, pour [1], toute activité collaborative asynchrone est faisable à tout moment par tout utilisateur indépendamment temporellement des autres utilisateurs faisant partie du groupe de collaboration. Dans le cas de la collaboration synchrone, l'activité nécessite des rendez-vous en temps réel entre les membres du groupe de collaboration. Ici, il s'agit de regrouper plusieurs individus partageant des intérêts pédagogiques similaires pour accomplir une activité (par exemple, résoudre une situation-problème) [10] à distance de façon synchrone.

La collaboration peut être catégorisée selon le type des services de collaboration qu'offre l'environnement de travail distant [38] par :

— les mails,
— les wiki,
— les forums,
— les discussions,
— l'édition de fichiers partagés.

Toutes ces activités et services numériques catégorisent l'environnement de la collaboration comme un espace de travail asynchrone, indépendants du temps et de la disponibilité des participants qui permet un temps de réflexion et une liberté temporelle. D'autres part, les activités comme :

— les chats et discussions instantanées,
— les documents et présentations partagés,
— le partage des écrans,
— les vidéo-conférences,
— les audio-conférences,
— les tableaux blancs (ou *Whiteboard*) pour décrire des objets qui sont difficiles à verbaliser,
— les alertes pour indiquer la présence d'autres utilisateurs ou de leur intention de collaborer lors de la manipulation d'une ressource partagée.

sont des activités et services qui définissent un environnement de collaboration synchrone [2, 8].

Cependant, dans la plupart des systèmes d'apprentissage, les contraintes à prendre en compte lors de la phase de collaboration ne sont pas complètement intégrées comme le format de la ressource, le niveau d'avancement d'un apprenant, les points temporels pour organiser la rencontre entre les utilisateurs, le profil des utilisateurs souhaitant travailler en collaboration, etc. Remarquons qu'il n'est pas nécessaire que les collaborateurs aient le même niveau de compétence car cette diversité offre la possibilité d'avoir des échanges plus riches et une entraide plus importante.

2.2 Système d'apprentissage adaptatif collaboratif

Un système d'apprentissage adaptatif est un système qui s'adapte automatiquement au profil de l'apprenant, au contenu de la ressource et du domaine de formation, et ce, à chaque instant durant l'activité d'apprentissage. Un système d'apprentissage adaptatif collaboratif est par définition un système d'apprentissage adaptatif qui prend en considération l'aspect collaboratif entre apprenants durant l'activité d'apprentissage tout en tenant compte de l'adaptation mentionnée précédemment à l'addition de la synchronisation entre utilisateurs. C'est-à-dire pour les apprenants et/ou tuteurs qui peuvent et souhaitent collaborer, le système non seulement générera un parcours d'apprentissage selon le domaine de compétence propre à chacun d'eux, leurs préférences, leur culture (par exemple, leur province géographique), mais aussi l'historique de leurs parcours d'apprentissage déjà accomplis ou en cours de réalisation tout en ajoutant des activités collaboratives synchrones.

Plusieurs travaux de recherche ont été consacrés à l'étude de l'adaptation et la personnalisation de parcours dans un système d'apprentissage adaptatif et collaboratif en ligne.

Dans [42], les auteurs proposent un système d'apprentissage en ligne adaptatif personnalisé fondé sur trois modèles à savoir le modèle d'utilisateur, le modèle de contenu et un modèle d'adaptation. Le système met en oeuvre l'adaptation de la structuration des cours, de leurs contenu et l'adaptabilité de la séquences des sujets acquis.

Les auteurs, dans [4], décrivent les étapes pour la conception d'une activité d'apprentissage collaboratif en ligne, et définissent le modèle collaboratif comme une composition de trois grandes division à savoir, l'engagement vers le groupe de la collaboration, la communication entre les membres du groupe qui collaborent, et la coordination entre ces membres et leurs idées partagées.

D'autre part, la majorité des systèmes de recommandation se fonde sur la collecte d'information concernant un utilisateur (comme son historique de navigation ou ses interactions avec le site) pour l'adaptation du contenu et pour la personnalisation du parcours. Or, cela soulève un problème de confidentialité des données des utilisateurs selon [44]. Les auteurs dans [7] ont pu résoudre ce problème par la présentation d'une approche de recommandation basée sur les systèmes multi-agents, tout en gardant la confidentialité des données utilisateurs. Remarquons que ces propositions ne prenaient pas en compte les problématiques liées à la RGPD [4].

Dans une autre approche, Boyinbode *et al.* présentent dans [36] un système d'apprentissage en ligne basée sur les technologies du Web sémantique notamment les ontologies où les préférences, les connaissances et le style d'apprentissage qui seront détectés par le système en sus du profil personnel de l'utilisateur formerons les paramètres essentiels pour délivrer du contenu personnalisé à tout utilisateur. Les auteurs dans [33] proposent un cadriciel d'apprentissage adaptatif, dit *e-learning framework adaptative*, capable d'assurer l'accès aux contenus qui sont adéquats à un utilisateur donné selon son style d'apprentissage en se basant sur le modèle *filder-silverman*. Ce modèle, largement utilisé dans les systèmes d'apprentissage en ligne, définit quatre dimensions qui sont pré-traitement, perception, saisie, compréhension, et huit catégories d'apprenants à savoir sensible, global, actif, verbal, visuel, intuitif, réflexif, séquentiel [24, 34]. Ils existent des systèmes adaptatifs d'apprentissage collaboratif. Par exemple, Blanchard et Frasson [3] ont implémentée une architecture multi-agents pour des session d'apprentissage en ligne. Cependant, l'aspect collaboration est basique. En effet, une fois le groupe homogène

4. Règlement Général sur la Protection des Données. Voir www.cnil.fr

d'apprenants créé, ses membres peuvent collaborer seulement au travers de discussions. Citons aussi les travaux d'Ajhoun *et al.* [5] qui proposent un système pour l'apprentissage en ligne qui adapte le contenu du cours au profil de l'apprenant et qui permet la création de discussions spécifiques à un cours.

L'interaction et la collaboration entre différents utilisateurs dans un système d'enseignement à distance est difficilement réalisable [23]. Cependant, après étude de la bibliographie et des systèmes d'apprentissage adaptatifs existants, remarquons que le concept d'adaptation demeure nébuleux [46] dans le milieu académique.

III MÉTHODOLOGIE

Suite à nos constatations quant aux avantages et inconvénients des systèmes adaptatifs et collaboratifs actuels, nous proposons une nouvelle architecture de pilotage et de personnalisation des parcours d'apprentissage adaptatifs, tout en considérant le profil des utilisateurs, le domaine de formation et les ressources pédagogiques disponibles, et en ajoutant la synchronisation dans le mode collaboratif entre des apprenants souhaitant travailler en collaboration.

3.1 Architecture de pilotage d'apprentissage adaptatif et collaboratif

Cette architecture est composée d'un système multi-agents (SMA), qui contient un *agent manager* représentant le point d'entrée de la plate-forme (partie centrale de la figure 3). Ce dernier analyse les requêtes, les traite et gère la communication entre les agents de recommandations (RA), responsable de la gestion de la création des parcours d'apprentissage et de la recommandation des ressources pédagogiques.

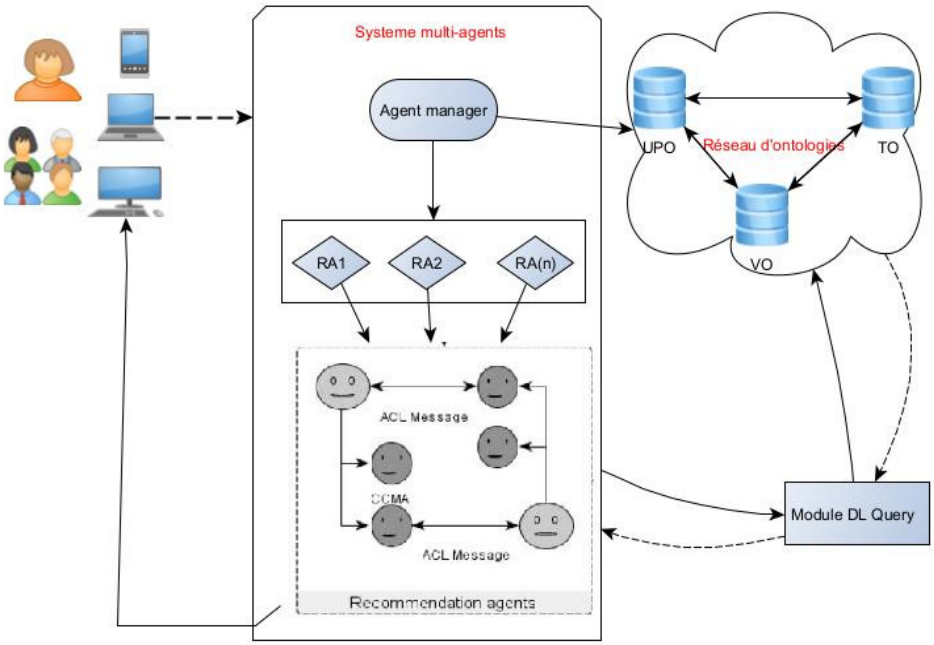

FIGURE 3 – Architecture de SPACe-L

En point d'appui du système multi-agents, responsable de la génération des parcours personnalisés et du calcul des recommandations ainsi que de la synchronisation des utilisateurs lorsqu'ils passent en mode collaboratif, des bases de connaissance de SPACe-L est constituée de trois modèles ontologiques qui sont interrogées par le SMA régulièrement.

3.2 Bases de connaissance

Le noyau central de la plate-forme *SPACe-L* (pour *Semantic Platform for Adaptative and Collaborative e-Learning*) est sa représentation des connaissances par un réseau d'ontologies décrivant trois modèles représentant les utilisateurs, les domaines de formation et les ressources elles-mêmes. Ce découpage a pour but de faciliter l'interopérabilité avec d'autres ontologies. À titre d'exemple, en ce qui concerne le modèle des utilisateurs, cela permet d'intégrer des données provenant du modèle ontologique FOAF [5]. Pour le domaine des formations, nous pouvons intégrer des ontologies décrivant les compétences comme celle proposée par G. Paquette [29] issue de l'étude de différents standards comme celui de l'IEEE RCD [6] ou l'ontologie COMP [18], voire COMP2 [45].

— L'ontologie des profils-utilisateur (dite UPO), dont une vue partielle est présentée dans la figure 4, contient les informations personnelles et les préférences de tout utilisateur. Elle décrit principalement les apprenants (*cf.* classe *Learner*), les formateurs (*cf.* classe *Teacher*), les experts (*cf.* classe *Expert*), etc., les compétences initiales ou acquises de chacun d'eux et les parcours d'apprentissage personnalisés déjà réalisés ou en cours (*i.e.* les ressources pédagogiques déjà utilisées, les évaluations faites, les compétences acquises ou en cours d'acquisition par un parcours formant un graphe) ;

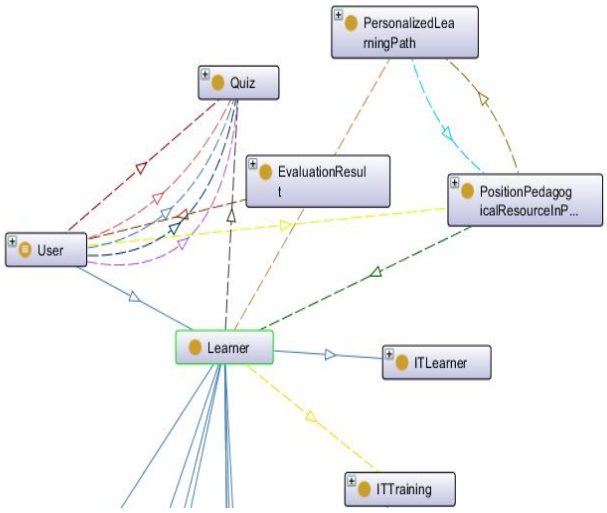

FIGURE 4 – Vue partielle de l'ontologie UPO

— l'ontologie des domaines de formation, dite TO (*cf.* figure 5) décrivant les compétences à acquérir pour un métier, les objets et les ressources pédagogiques utilisables dans les différents grains pédagogiques (*cf.* classe *LearningObject* de la figure 5) rattachés à une formation disponibles permettant de construire des parcours d'apprentissage ; pour que les utilisateurs quel que soit leur niveau puissent acquérir les compétences nécessaires à ces métiers. Elle contient la classe *Training*) avec un certains nombres de sous-classes (par exemple, *BakerTraining* pour le domaine de la boulangerie) permettant d'avoir une taxonomie des domaines de formation. Chaque instance de *Training* est associé à un ensemble de grains pédagogiques ayant chacun un seul objectif (*cf.* classe *LearningObjectObjective* de la figure 5) et un ensemble de compétences et un ensemble de ressources pédagogiques, etc. ;

5. *Friend Of A Friend*, voir sa spécification à xmlns.com/foaf/spec/
6. www.cetis.org.uk/inloc/IEEE-RCD

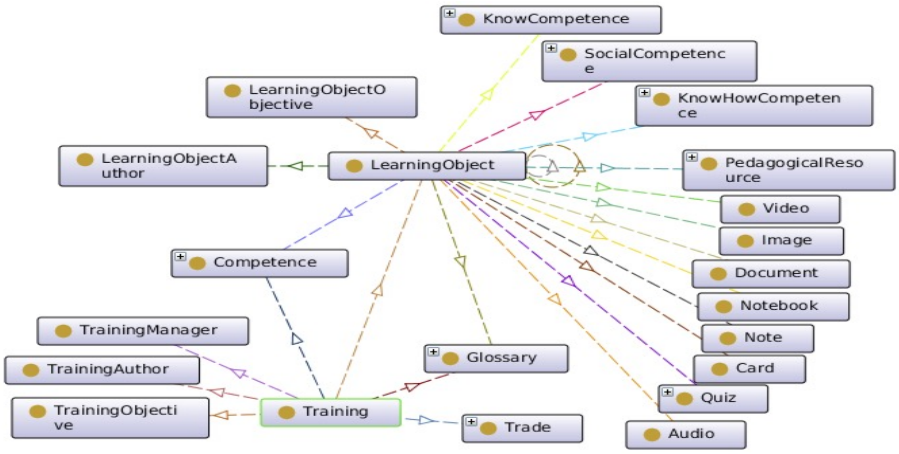

FIGURE 5 – Vue partielle de l'ontologie Training (TO)

— l'ontologie de description des ressources pédagogiques (VO), notamment des vidéos montrant des gestes techniques contenant principalement la classe *Video* liées à des classes telles que *Annotation, motClé, Audio*.

Les différentes ontologies sont exploitables en utilisant un moteur de révision pour les opérations d'écriture sur les ontologies et une interface de services de consultation des données. Le moteur de révision *ontoRev* [7] permet d'ajouter de nouveaux concepts, de nouvelles propriétés, de peupler les ontologies, etc., tout en gardant la cohérence des ontologies. L'interface de consultation offre un ensemble de services de lecture des données tels que la recherche des individus d'une classe ou d'un ensemble de classes associées. L'interface développée utilise OWL API [8] et DL-Query pour trouver les données pertinentes sauvegardées dans les ontologies. Par exemple, pour trouver la formation d'un apprenant qui a comme identifiant $ID_Learner1$, la requête DL-Query est la suivante :

$$Training\ and \\ inverse(hasTraining)\ some\ (Learner\ and\ idLearner\ value\ "ID_Learner1"). \quad (1)$$

Pour favoriser, l'interopérabilité, les trois ontologies sont utilisables indépendamment mais cela nécessite de gérer des alignements entre elles lorsque l'on utilise le réseau global. Par exemple, le concept atomique $Video$ est aligné directement par équivalence mais nous pouvons aussi aligner des concepts complexes par la construction de sous-graphes comme exprimé dans la formule 2 où la partie gauche est un concept complexe définissant l'ensemble des vidéos vues ou suggérées au moins une fois par des utilisateurs d'UPO comme étant un sous-ensemble des vidéos déclarées dans TO.

$$(UPO{:}Video \sqcap \geqslant 1UPO{:}isSeenVideo.UPO{:}User \\ \sqcup UPO{:}Video \sqcap \geqslant 1UPO{:}isSuggestedBy.UPO{:}User) \\ \sqsubseteq TO{:}Video \quad (2)$$

7. utilisable à linc.iut.univ-paris8.fr:8080/ontorev/ et par services web
8. http ://owlapi.sourceforge.net/

3.3 Apprentissage adaptatif collaboratif par SMA

Une fois l'utilisateur connecté à la plate-forme, le système stockera les informations de ce premier qui vont par la suite définir son profil. Ces informations sont les informations liées au préférences personnelles comme la langue, l'âge et le format préféré de ressources pédagogique, ainsi que les informations liées à la compétence qu'il souhaite acquérir, et enfin les informations liées à sa progression et à ses interactions avec le système durant le parcours d'apprentissage mettant à jour automatiquement son profil pour optimiser le calcul de la prochaine recommandation de ressource ou de parcours.

Le système multi-agents (SMA) gère les événements qui surviennent dans le système, sous la surveillance du gestionnaire d'agents (dit *Agent Manager*) qui analyse les requêtes reçues et gère la situation selon la nature de cette dernière. Il joue un double rôle selon la situation d'apprentissage, soit individuelle par l'intermédiaire d'un agent de recommandation (*"Recommandation Agent"*), soit collaborative. Il gère alors un réseau d'agents de recommandation pour la synchronisation des apprenants. L'agent de recommandation (RA) est associé à un utilisateur. Le RA va s'occuper de la génération du parcours personnalisé sous la forme d'un graphe en associant des ressources pédagogiques pertinentes à chaque noeud. La génération du graphe se fait en fonction du profil-utilisateur et la recommandation des ressources pédagogiques en fonction de plusieurs critères dont les préférences des apprenants, la durée de la session, mais aussi des évaluations qualitatives des autres apprenants ou formateurs.

L'objectif ici est de maximiser une fonction de fitness 3 qui permet de générer dynamiquement un parcours personnalisé selon :

$$F = \sum_{i=1}^{n} W_i C_i \tag{3}$$

où W_i est le poids qui définit l'importance du critère C_i et n est le nombre de critères retenus d'une ressource pédagogique. Trois possibilités sont offertes pour faire varier ces poids : (i) ils sont fixés par l'équipe pédagogique, (i) ils sont déterminés par le système après une étape d'apprentissage impliquant un minimum d'apprenants ou (iii) ils sont calculés dynamiquement et modifié d'un noeud du graphe du parcours d'apprentissage à l'autre selon le niveau de priorité des critères tout au long de la session d'apprentissage. Par exemple, le critère du format des ressources pédagogiques est calculé à partir de la formule 4 :

$$C_i = \alpha T + \beta V + \gamma A \tag{4}$$

où T, V et A représente respectivement un document textuel, une vidéo et un enregistrement audio tel que :

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \text{ et } T, V, A = \begin{cases} 1 & \text{si } F_u \cap F_r \neq \varnothing \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

où α, β, γ sont les coefficients à appliquer selon l'importance de chaque format que l'apprenant préfère, F_u est l'ensemble des formats préférés des apprenants et F_r l'ensemble des formats disponibles pour une ressource pédagogique donnée dans le contexte du grain pédagogique d'un parcours de formation créé dans TO. Bien d'autres critères comme la langue, la pertinence à favoriser l'acquisition d'une compétence, la difficulté, l'appréciation, la popularité, la suggestion entre en ligne de compte.

3.4 Génération de parcours pédagogiques

Plusieurs solutions sont possibles pour générer des parcours d'apprentissage personnalisés à partir d'algorithmes et de techniques provenant de l'intelligence artificielle et du web sémantique telles que l'optimisation par colonie de fourmis [16], les réseaux bayésiens [15], les machines à vecteur de support (SVM) [9], les ontologies [17], etc.

SPACe-L génère un parcours en deux étapes par : (1) la génération d'un graphe de grains pédagogiques (notée LO), instance de la classe *LearningObject* de l'ontologie TO, en fonction du profil de chaque apprenant et en fonction de la formation ou de la compétence choisie par cet apprenant. Cette première étape est la même dans les deux situations d'apprentissage individuelle ou collaborative ; (2) le calcul d'une recommandation des ressources pédagogiques pour chaque nœud du graphe (vidéos, document textuel, etc.) pour un apprenant ou pour un groupe d'apprenants s'il s'agit d'un apprentissage collaboratif (*e.g.* mini-jeux multi-utilisateurs, etc.). Dans une même session d'apprentissage, l'architecture permet aux apprenants d'alterner entre l'apprentissage individuel et l'apprentissage collaboratif en fonction de leurs préférences et en fonction des disponibilités en terme de ressources pédagogiques connues dans l'ontologie des formations.

IV EXPÉRIMENTATION

Pour expérimenter le fonctionnement de notre système, nous avons utilisé une formation sur l'apprentissage des bases du langage JAVA, nommée "Developpement". Le tableau suivant décrit les différents LOs de la formation "Developpement" et leurs pré-requis.

LO	**Titre**	**Pré-requis**
LO1	Install JDK	-
LO2	Install Eclipse IDE	LO1
LO3	Les variables	LO2
LO4	Les opérateurs	LO2
LO5	Les sorties	LO3, LO4
LO6	Les entrées	LO3, LO4
LO7	Les conditinos if..else	LO5, LO6
LO8	Les conditinos switch	LO5, LO6
LO9	Boucle for	LO7
LO10	Boucle while	LO7
LO11	Boucle do..while	LO7

La figure 6 représente le graphe de la formation « Developpement » conçu par un formateur.

Lors de l'affichage d'un parcours en cours de réalisation, des nœuds colorés représentent les LOs qui sont accessibles par un apprenant. Par exemple, si les niveaux 0 et 1 avaient été passés par un apprenant, il aurait accès au niveau 2, les LO3 et LO4 seraient colorés et donc accessibles. Il n'y a aucune contrainte d'ordre sur ces deux LOs et l'apprenant est libre de commencer par l'un ou l'autre. Les nœuds du niveau suivant sont grisés indiquant qu'ils sont inaccessibles à l'apprenant. Par exemple, dans la figure 7, l'ensemble des nœuds du niveau 5 ont comme prérequis les LO7 et LO8 (*i.e.* resp. les conditions *if ... else* et *switch*), l'apprenant doit donc valider ces LOs pour avoir accès au niveau suivant.

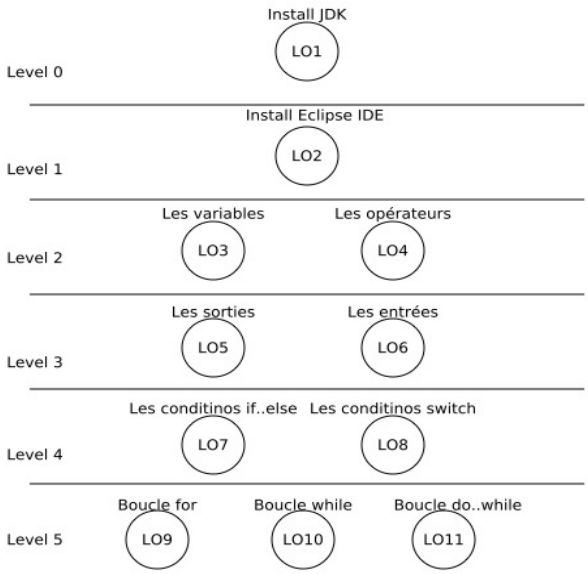

FIGURE 6 – Graphe de la formation "Developpement".

À chaque LO, un ensemble de ressources pédagogiques est associé. Par exemple, les principales informations des ressources pédagogiques du *LO7* sont indiqués dans le tableau 1.

Dans le mode d'apprentissage collaboratif, le moteur de génération de parcours calcule des recommandations de ressources pédagogiques pour des groupes d'apprenants. Dans notre exemple sur le parcours "Developpement", nous avons quatre apprenants connectés : "dong", "anghour" et "tata" sur le *LO9* (*i.e. Boucle for*) et "alaya" sur le *LO11* (*i.e. Boucle do..while*). La figure 8 montre le résultat d'exécution côté serveur.

Le moteur gère alors un groupe de deux apprenants en binôme ("dong", "anghour") en mode collaboratif. Pour tous les apprenants connectés en temps réel sur un même LO, le système construit des groupes sur la base des profils de ces apprenants. Si un apprenant se trouve dans un des cas critiques (ici "tata"), le moteur dirige l'apprenant en question vers le LO de même niveau où il y a plus d'apprenants en attente (d'après la figure 8, le SMA propose à "tata" de collaborer avec "alaya") ou, le cas échéant, lui propose de travailler en individuel.

À l'heure actuelle, la plate-forme peut gérer un certain nombre de participants en mode collaboratif synchrone mais une optimisation des générations de parcours pour diminuer les temps d'attente est nécessaire lors du passage à l'échelle (par exemple, "alaya" pourrait avoir un temps d'attente trop long par rapport au temps de connexion dont elle dispose pour la session en cours).

V DISCUSSION

Nous avons comparé les plate-formes existantes selon les critères que nous avons retenus pour répondre aux problématiques issues des questions posées lors de notre introduction.

5.1 Intégration de l'adaptabilité

L'adaptabilité par définition est la capacité de s'adapter à de nouveaux milieux ou à de nouvelles situations [9], et la personnalisation est l'adaptation d'un produit, d'un service, etc., à la

9. voir www.larousse.fr/dictionnaires/francais/adaptabilité

FIGURE 7 – Apprenant au niveau 4 de la formation "Developpement".

```
##############___ Receiver listening ___##############

        New connection => DONG on the LO : Boucle for

        New connection => ANGHOUR on the LO : Boucle for
        Creating a Binom => (DONG, ANGHOUR)
        Calculating recommendation for => (DONG, ANGHOUR)
        New connection => TATA on the LO : Boucle for
        New connection => ALAYA on the LO : Boucle do..while
        tata@gmail.com is in CRITICAL CASE on the LO => Boucle for
        The BEST PROPOSITION for  tata@gmail.com is => Boucle do..while
```

FIGURE 8 – Exemple d'exécution côté serveur.

personnalité de celui à qui il est destiné [10]. Ceci dit un système d'apprentissage en ligne adaptatif personnalisé doit permettre aux utilisateurs de prendre le contrôle de leurs propre processus d'apprentissage et offrir un contenu adapté à leurs besoins spécifiques [41].

Les critères essentiels pris en compte dans le tableau 2 sont l'adaptabilité que ce soit au profil de l'apprenant ou au domaine d'apprentissage ou aux ressources pédagogiques, la personnalisation du parcours d'apprentissage, l'accessibilité aux ressources pédagogiques.

Nous remarquons qu'une plate-forme d'apprentissage contient une forme d'adaptation intermédiaire par rapport aux autres. En effet, *Coursera* est la seule à demander aux utilisateurs de fournir un ensemble d'informations personnelles qui pourront être prises en compte lors de leur apprentissage sur la plate-forme ; par exemple la profession de l'utilisateur, la durée qu'il est prêt à consacrer à l'apprentissage d'un cours donnée, la langue du cours souhaitée, un questionnaire sous forme de devoir servant de diagnostic de niveau avant de commencer le cours, etc.

D'autre part, nous pouvons constater que la plupart des plates-formes d'accès payant ou limité fournissent une forme d'adaptation même si cette dernière est basique. Nous pouvons cependant supposer qu'elles offrent un aspect plus adaptatif après paiement...

Enfin, la personnalisation du parcours d'apprentissage n'a été mise en place que dans deux systèmes (*Udacity* et *Edraak*) de façon basique. En général, ces plates-formes verrouillent un cours par défaut selon des compétences à obtenir lors d'un cours précédent. Bien souvent, elles nous laissent y accéder si nous réussissons à passer les tests d'évaluation du précédent afin que les compétences que l'apprenant est supposé avoir soient effectivement atteintes.

10. www.larousse.fr/dictionnaires/francais/personnalisation

Ressource	Titre	URL	Format	Langue	Niveau difficulté	Durée
PR30	If-Else and If-Else-If Statements in Java	www.youtube.com/watch ?v=FJiX-XCzJxc	V	en	1	5
PR31	Java Control Structure - if and if else Statements	www.youtube.com/watch ?v=3YQ-ZOc4huu0	V	en	0	8
PR32	The if-then and if-then-else Statements	docs.oracle.com/javase/tutorial/-java/nutsandbolts/if.html	T	en	1	5
PR33	Building Java Programs	courses.cs.washington.edu/courses /-cse142/07wi/handouts/slides/ ch04.pdf	T	en	0	17
PR34	Les tests et les conditions java	www.gecif.net/articles/linux/pdf/-test_et_condition.pdf	T	fr	1	7

TABLE 1 – Ressources pédagogiques associées au *LO7*.

Cette première analyse met en exergue le peu de solutions qui intègrent réellement une adaptation à l'utilisateur. Ceci a pour conséquence une personnalisation du parcours d'apprentissage pratiquement inexistante.

5.2 Intégration des formes de collaboration synchrone/asynchrone

Une activité de collaboration regroupe plusieurs individus pour accomplir un objectif précis. Cependant, cette activité se divise en deux types selon que cette activité de collaboration est asynchrone comme nous pouvons le pratiquer par les chats, les forums de discussion, les wikis, etc., indépendamment du temps, ou synchrone quand cette activité est réalisé en temps réel ; c'est-à-dire que les utilisateurs doivent impérativement se retrouver en même temps sur la plate-forme, accéder à l'activité et agir ensemble pour la réaliser. Pour ce faire, il faut *a minima* soit mettre en place un agenda partagé qui enverra des alertes avant les dates de rendez-vous, soit mettre en attente les utilisateurs arrivés les premiers sur l'activité collaborative synchrone programmée dans un parcours d'apprentissage.

Le tableau 3 contient les résultats d'une comparaison entre des plates-formes d'apprentissage en ligne par rapport à l'aspect collaboratif entre utilisateurs. Remarquons que nous nous limitons à des solutions gratuites, seul moyen pour nous de vérifier les modes synchrones. Il est évident que les activités en collaboration synchrone sont quasiment absentes dans les MOOCs. Mais elles figurent sous certaines formes dans les plate-formes de type LMS ou LCMS/CMS présents dans le tableau 3. La plupart de ces systèmes utilisent des plugins pour les visio/audio conférences hormis la plate-forme Opigno. Cependant, cette dernière ne contient pas de formes d'activités asynchrones.

5.3 Limitations des systèmes actuels

Si l'on considère les tableaux 2 et 3, nous pouvons voir que seules les plates-formes *Chamilo* et *Sakai* intègrent les activités de la collaboration synchrone et asynchrone.

	Adaptation	Personnalisation	Accès aux ressources
LinkedIn Learning	basic	-	limité
EDX	basic	-	limité
Coursera	intermédiaire	-	limité
Kajabi	basic	-	payant
Udemy	-	-	payant
MyMooc	-	-	gratuit
Udacity	basic	basic	payant
SkillShare	-	-	limité
Podia	basic	-	payant
Moodle	-	-	gratuit
Claroline	basic	-	limité
Open University	basic	-	payant
Edraak	basic	basic	gratuit
fun	-	-	payant
Google Classroom	basic	-	gratuit

TABLE 2 – Étude comparative des plates-formes d'apprentissage en ligne.

Cependant, ce sont des systèmes hybrides comportant des niveaux des deux types de collaboration en ligne. Par exemple, nous pouvons noter que l'adaptation se fait au moment où l'on demande une formation pour générer un parcours de formation prenant en compte le profil-utilisateur ou des mots-clés. Or, il est nécessaire, à l'heure actuelle, d'avoir une adaptation tout au long du parcours lui-même prenant en compte les événements survenant au fur et à mesure de la progression. C'est-à-dire que le parcours devrait être recalculé au fur et à mesure de l'avancement de l'apprenant dans son parcours de formation et de sa compréhension des concepts à apprendre. D'autre part, la collaboration synchrone nécessite non seulement un environnement de travail permettant l'interaction en temps réel, une communication de façon visuelle et auditive mais aussi le partage des fichiers et écrans et des moyens de discussion instantanées pour le partage des idées.

Les systèmes actuels mériteraient d'être améliorés pour avoir une meilleure génération de parcours d'apprentissage, une meilleure émulation et une meilleure entraide entre les apprenants ; notamment, afin de lutter contre l'isolement social et favoriser l'acquisition des compétences de façon sereine.

VI CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article, une solution pour un système sémantique d'apprentissage adaptatif collaboratif en ligne a été proposée. La plate-forme, elle-même, est fondée sur : (i) l'intégration d'ontologies modélisant le profil des utilisateurs, les domaines de formations et les ressources pédagogiques. Grâce à la sémantique qu'elles portent, il est possible d'exploiter la connaissance explicite mais aussi implicite qui a été sauvegardée ; (ii) un système multi-agents pour piloter les apprenants et leurs parcours de formation, notamment la gestion des modes individuel/collaboratif, la gouvernance de l'adaptation entre les apprenants et les ressources pédagogiques à recommander, tout en tenant compte de l'avancement des apprenants. Un premier prototype a été construit et testé sur les métiers concernant la boulangerie/pâtisserie avec des principalement des ressources pédagogiques multimédia. Une étude doit être entreprise avec des formations universitaires construites autour de la notion de compétence comme le bachelor universitaire de technologies, nouveau diplôme universitaire de trois ans.

	Type	Disc. /chat	FAQ /Forums	Visio /audio-confs.	Écrans /Fichiers Partagés
LinkedIn Learning	MOOC	X	X	-	-
EDX	MOOC	X	X	-	-
Coursera	MOOC	X	X	-	-
Udemy	MOOC	X	X	-	-
MyMooc	MOOC	X	X	-	-
Udacity	MOOC	X	-	-	-
Edraak	MOOC	-	-	-	-
Claroline	LMS	OUI	OUI	OUI	-
Didacte	LMS	-	-	Youtube Live	-
Chamilo	LMS	OUI	OUI	BBB/ZOOM	via BBB
Sakai	LMS	OUI	OUI	BBB/AdobeConnect.	via BBB
Moodle	LCMS/CMS	X	X	plugin BBB [11]	via BBB
Opigno	LMS/LCMS	-	-	Solution integreé	partage des fichiers

TABLE 3 – Intégration des formes de collaboration synchrone/asynchrone

Plusieurs points sont encore à améliorer pour obtenir un système adaptatif collaboratif évolué. En premier lieu, il est important d'enrichir notre réseau d'ontologies par des ontologies issues de certains standards ou normes des sciences de l'éducation comme COMP2, des ontologies des métiers, des données du LOD [12]. En ce sens, l'interopérabilité est incontournable et nous amène à concevoir de nouveaux alignements d'ontologies par des systèmes d'alignement (semi-)automatiques. En ce qui concerne le système multi-agents, il faut améliorer les temps de réponse pour les recommandations de parcours d'apprentissage et de ressources pédagogiques lors des synchronisations d'utilisateur. Ceci passe par des algorithmes plus efficaces pour l'agent de recommandation capable de gérer des graphes partiels de connaissance. Une anticipation sur les trajectoires pédagogiques des apprenants serait une plus-value non seulement pour les apprenants mais aussi pour les formateurs. En effet, une aide pourrait être apporter à ces derniers lors de la construction du parcours de formation sur les difficultés du parcours, des évaluations que pourraient rencontrer les apprenants. Une voie envisageable serait la construction de *pattern* de parcours à partir de parcours déjà réalisés.

BIBLIOGRAPHIE

[1] O. MARJANOVIC. « Learning and teaching in a synchronous collaborative environment ». In : *Journal of Computer Assisted Learning* 15.2 (1999), pages 129-138.

[2] G. BAFOUTSOU et G. MENTZAS. « Review and functional classification of collaborative systems ». In : *International journal of information management* 22.4 (2002), pages 281-305.

[3] E. BLANCHARD et C. FRASSON. « Une architecture multi-agents pour des sessions d'apprentissage collaboratif ». In : *Technologies de l'Information et de la Communication dans les Enseignements d'ingénieurs et dans l'industrie*. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2002, pages 283-287.

[4] F. HENRI et J. BASQUE. « Conception d'activités d'apprentissage collaboratif en mode virtuel ». In : (2003).

12. Linked Open Data

[5] R. AJHOUN, A. BENKIRAN et D. BOUZIDI. « A system for an adaptative and collaborative e-learning SMART-Learning ». In : *IADIS International Conference e-Society*. 2004, pages 284-291.

[6] A. BAUDRIT. « Apprentissage coopératif/Apprentissage collaboratif : d'un comparatisme conventionnel à un comparatisme critique ». In : *Les Sciences de l'éducation-Pour l'Ère nouvelle* 40.1 (2007), pages 115-136.

[7] R. CISSÉE et S. ALBAYRAK. « An agent-based approach for privacy-preserving recommender systems ». In : *Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*. 2007, pages 1-8.

[8] M. A. MARTINEZ-CARRERAS, A. RUIZ-MARTINEZ, F. GOMEZ-SKARMETA et W. PRINZ. « Designing a generic collaborative working environment ». In : *IEEE International Conference on Web Services (ICWS 2007)*. IEEE. 2007, pages 1080-1087.

[9] E. A. OURAIBA, A. CHIKH, A. TALEB-AHMED et Z. EL YEBDRI. « Automatic Personalization of Learning Scenarios Using SVM ». In : *Proceedings of the 2009 Ninth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies*. ICALT'09. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2009, pages 183-185.

[10] D. CLAUZEL, K. SEHABA et Y. PRIÉ. « Enhancing synchronous collaboration by using interactive visualisation of modelled traces ». In : *Simulation Modelling Practice and Theory* 19.1 (2011), pages 84-97.

[11] E. CHOMIENNE et A. LEHMANS. « Réseaux sociaux et apprentissages collaboratifs à l'université ». In : *Colloque international de l'université à l'ère du numérique 2012*. Lyon, France, avr. 2012, Actes du CIUEN.

[12] V. DA FROTA et J. MAGALHAES NETTO. « Improving collaborative learning by personalization in Virtual Learning Environments using agents and competency-based ontology ». In : oct. 2012, pages 1-6. ISBN : 978-1-4673-1353-7.

[13] M. LAAL et M. LAAL. « Collaborative learning : what is it ? » In : *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 31 (2012), pages 491-495.

[14] D. BOUNEFFOUF. « Towards user profile modelling in recommender system ». In : *arXiv preprint arXiv :1305.1114* (2013).

[15] J. EL BOUHDIDI, M. GHAILANI et A. FENNAN. « An Intelligent Architecture For generating Evolutionary Personalized Learning Paths Based On Learner Profiles ». In : *Journal of Theoretical and Applied Information Technology (JATIT)* 57.2 (2013), pages 294-304.

[16] A. NAJI et M. RAMDANI. « Using the Ant Colony Algorithm to Establish the Best Path of Learning Activities ». In : *International Journal of Multimedia Technology* 7.78 (2013), pages 3873-3881.

[17] M. GHAILANI, J. EL BOUHDIDI et A. FENNAN. « Towards an Adaptive e-Learning Solution based on Ontologies and Competencies Approach ». In : *International Journal of Computer Applications (IJCA)* 98.21 (2014), pages 42-52.

[18] G. PAQUETTE. « A Competency-Based Ontology for Learning Design Repositories ». In : *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)* 5.1 (2014), pages 55-62.

[19] A. ANGHOUR, G. DELMAS et M. LAMOLLE. « Éléments pour le pilotage de parcours personnalisés ». In : *7ème Conférence sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH 2015)*. 2015, pages 423-425.

[20] M. H. BATURAY. « An overview of the world of MOOCs ». In : *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 174 (2015), pages 427-433.

[21] M. BLAGOJEVIĆ et D. MILOŠEVIĆ. « Massive open online courses : EdX vs Moodle MOOC ». In : *Proc. 5th International Conference on Information Society and Technology, Kopaonik, Serbia*. 2015, pages 346-351.

[22] C. REVERDY. « La coopération entre élèves : des recherches aux pratiques ». In : *Dossier de veille de l'IFÉ* 114 (2016), pages 1-32.

[23] A. EL MHOUTI, A. NASSEH, M. ERRADI et J. M. VASQUÈZ. « Enhancing collaborative learning in Web 2.0-based e-learning systems : A design framework for building collaborative e-learning contents ». In : *Education and Information Technologies* 22.5 (2017), pages 2351-2364.

[24] L. JOSEPH et S. ABRAHAM. « Instructional design for learning path identification in an e-learning environment using felder-silverman learning styles model ». In : *2017 International Conference on Networks Advances in Computational Technologies (NetACT)*. 2017, pages 215-220.

[25] A. E. LABIB, J. H. CANÓS et M. C. PENADÉS. « On the way to learning style models integration : a Learner's Characteristics Ontology ». In : *Computers in Human Behavior* 73 (2017), pages 433-445.

[26] B. MALESZKA. « A method for determining ontology-based user profile in document retrieval system ». In : *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 32.2 (2017), pages 1253-1263.

[27] M. RAMDANE et al. « Les systèmes multi-agents dynamiquement adaptables ». In : (2017).

[28] A. ANGHOUR, M. LAMOLLE, F. BELHADJ et V. BOYER. « Appprentissage adaptatif temps réels par système multi-agent. Gestion de parcours individuels et collaboratifs ». In : *Ingenierie des Systemes d'Information* 23.2 (2018), page 89.

[29] G. PAQUETTE. *Une ontologie intégrée au Web de données liées pour décrire les compétences et personnaliser l'apprentissage*. Communication présentée lors du colloque *Le web sémantique au Québec - Des données aux connaissances*, Montréal, https://websemantique.ca/2018/programme/ontologie-competences-personnaliser-apprentissage/. Page consultée le 6 août 2021. Juin 2018.

[30] Y. DU, S. RANWEZ, N. SUTTON-CHARANI et V. RANWEZ. « Apports des ontologies aux systèmes de recommandation : état de l'art et perspectives ». In : *30es Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances, IC 2019*. 2019, pages 64-77.

[31] C. I. EKE, A. A. NORMAN, L. SHUIB et H. F. NWEKE. « A survey of user profiling : State-of-the-art, challenges, and solutions ». In : *IEEE Access* 7 (2019), pages 144907-144924.

[32] S. GÉRIN-LAJOIE, C. PAPI et I. PARADIS. « De la formation en présentiel à la formation à distance : comment s'y retrouver ? » In : (2019).

[33] S. S. KHANAL, P. PRASAD, A. ALSADOON et A. MAAG. « A systematic review : machine learning based recommendation systems for e-learning ». In : *Education and Information Technologies* (2019), pages 1-30.

[34] S. V. KOLEKAR, R. M. PAI et M. P. MM. « Rule based adaptive user interface for adaptive E-learning system ». In : *Education and Information Technologies* 24.1 (2019), pages 613-641.

[35] O. ALLEGRE. « Évolution du diagnostic cognitif de l'apprenant à l'aide d'une approche numérique et symbolique ». In : *Actes des huitièmes rencontres jeunes chercheur-e-s en EIAH (RJC-EIAH) - Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain*. 2020, pages 11-17.

[36] O. BOYINBODE, P. OLOTU et K. AKINTOLA. « Development of an ontology-based adaptive personalized e-learning system ». In : *Applied Computer Science* 16.4 (2020).

[37] O. EL AISSAOUI et L. OUGHDIR. « A learning style-based Ontology Matching to enhance learning resources recommendation ». In : *2020 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*. IEEE. 2020, pages 1-7.

[38] S. LI, M.-H. ABEL et E. NEGRE. « MEMORAe-CWE : un système collaboratif de systèmes d'information à base d'ontologies ». In : *31ème Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC 2020)*. 2020.

[39] A. H. NABIZADEH, J. P. LEAL, H. N. RAFSANJANI et R. R. SHAH. « Learning path personalization and recommendation methods : A survey of the state-of-the-art ». In : *Expert Systems with Applications* (2020), page 113596.

[40] B. RAWAT, J. K. SAMRIYA, N. PANDEY et S. C. WARIYAL. « A comprehensive study on recommendation systems their issues and future research direction in e-learning domain ». In : *Materials Today : Proceedings* (2020).

[41] V. VAGALE, L. NIEDRITE et S. IGNATJEVA. « Application of the Recommended Learning Path in the Personalized Adaptive E-learning System ». In : *Baltic Journal of Modern Computing* 8.4 (2020), pages 618-637.

[42] V. VAGALE, L. NIEDRITE et S. IGNATJEVA. « Implementation of Personalized Adaptive E-learning System ». In : *Baltic Journal of Modern Computing* 8.2 (2020), pages 293-310.

[43] U. JAVED, K. SHAUKAT, I. A. HAMEED, F. IQBAL, T. M. ALAM et S. LUO. « A review of content-based and context-based recommendation systems ». In : *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)* 16.3 (2021), pages 274-306.

[44] J. NETO, A. J. MORAIS, R. GONÇALVES et A. L. COELHO. « Multi-Agent based Recommender Systems : A Literature Review ». In : (2021).

[45] G. PAQUETTE, R. BEJAOUI et O. MARINO. *A Competency Ontology for Learning Environments Personalization*. Smart Learning Environment, https://websemantique.ca/2018/programme/ontologie-competences-personnaliser-apprentissage/. Page consultée le 2 août 2021. Mai 2021.

[46] J. RYOO et K. WINKELMANN. *Innovative Learning Environments in STEM Higher Education : Opportunities, Challenges, and Looking Forward*. 2021.