



HAL
open science

Le cursus académique personnalisé dans une approche par compétences avec érosion : étude d'un nouveau problème fondamental

Alexis Lebis, Jérémie Humeau, Anthony Fleury, Mathieu Vermeulen

► To cite this version:

Alexis Lebis, Jérémie Humeau, Anthony Fleury, Mathieu Vermeulen. Le cursus académique personnalisé dans une approche par compétences avec érosion : étude d'un nouveau problème fondamental. 10e Conférence sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, Marie Lefevre, Christine Michel, Jun 2021, Fribourg, Suisse. pp.94-105. hal-03292785

HAL Id: hal-03292785

<https://hal.science/hal-03292785>

Submitted on 24 Jul 2021

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.

Le cursus académique personnalisé dans une approche par compétences avec érosion : étude d'un nouveau problème fondamental

Alexis Lebis, Jérémie Humeau, Anthony Fleury et Mathieu Vermeulen

IMT Lille Douai, Institut Mines-Télécom, Univ. Lille, Centre for Digital Systems
F-59000 Lille, France
`alexis.lebis@imt-lille-douai.fr`

Résumé. De plus en plus, les universités et les écoles d'ingénieurs tendent à adopter une approche par compétences et à proposer aux étudiants la personnalisation de leur cursus pour correspondre à leurs attentes de carrière, au détriment de cursus prédéfinis. Une telle personnalisation de cursus soulève d'importantes problématiques, comme une répartition convenable des compétences en son sein, l'assurance que les étudiants conservent bien leurs acquis, l'ordonnancement des cours entre eux ou encore gérer la non validation d'un cours dans le cursus. Ce papier pose les fondements théoriques de ce nouveau problème qu'est la personnalisation d'un cursus académique avec érosion des compétences, en propose les toutes premières modélisation et tentative de résolution.

Mots-clés : Modélisation, Cursus, Personnalisation, Compétences

Abstract. Nowadays in education, more and more universities and engineering schools tend to remove predefined specialization curriculum in order to promote student ability to construct their own personalized training, matching their career goal. This leads to several major problems such as knowledge dissemination, courses ordering to satisfy knowledge prerequisite, courses congestion and recommendation, or even handling student's non-validation of courses in the curriculum. In this paper, we introduce an ecological definition of the personalized university curriculum organization problem.

Keywords: Modelisation, Curriculum, Personnalisation, Competencies

1 Introduction et contexte

Les structures académiques modifient leurs pratiques d'enseignement afin d'exploiter les nouvelles technologies et les avancées dans le domaine des EIAH, et plus généralement pour répondre aux besoins de la société. Ainsi, il est primordial

d'étudier ces changements pour mieux les comprendre et assister correctement les acteurs pédagogiques (*e.g.* étudiants, enseignants, institutionnels).

Une transformation majeure de ces institutions est le remplacement progressif de cursus pré-définis en faveur d'un modulaires [13]. Dans ce paradigme, un étudiant doit choisir une certaine quantité de cours chaque semestre pour construire son propre parcours, lui donnant la liberté d'être en accord avec ses attentes (*e.g.* objectifs professionnels). Cela introduit de nombreuses problématiques pour tous les acteurs pédagogiques. En effet, l'accroissement du volume des étudiants, combiné aux nouvelles structurations des enseignements [4], requiert d'apporter des outils automatisés afin d'aider les acteurs académiques à proposer un support personnalisé et adapté aux étudiants [5].

Du point de vue des étudiants, la personnalisation du cursus nécessite une capacité de planification importante sur plusieurs années ; et une phase de formation en amont qui l'est tout autant afin de s'assurer que les cours choisis correspondent à leurs attentes et leur apportent les compétences nécessaires. Lors d'un échec ou d'un nouvel objectif de carrière, ils doivent également s'assurer que leur objectif de formation reste atteignable, que les cours choisis sont adéquats, et que les compétences qu'ils ont su acquérir le leur permettent. De plus, cette personnalisation subit une explosion combinatoire plus le nombre de cours à prendre et le catalogue de cours sont volumineux.

Du point de vue des enseignants, une telle variété de cursus existants rend certaines pratiques difficilement exploitables, comme les rattrapages. Cela conduit aussi à des recommandations extrêmement personnalisées, nécessitant de fait que les compétences acquises par les étudiants soient correctement analysées et évaluées [9]. De plus, outre que la notion de maîtrise d'une compétence soit difficile à estimer, cette maîtrise est susceptible de décroître dans le temps lorsque la compétence n'est pas sollicitée [6] : c'est cela que l'érosion. Cette érosion rend alors la tâche de remédiation encore plus complexe puisque chaque cursus, autrement dit l'enchaînement des cours, est par essence différent.

Du point de vue institutionnel, cette érosion de la compétence dans le temps vient renforcer la difficulté de valider le cursus personnalisé d'un étudiant. En effet, un *pensum* de l'institution est de prémunir les étudiants d'un éventuel cursus mal-formé : l'enchaînement des cours doit être possible, notamment en terme d'apports de ces derniers et de leur pré-requis. Or, dans des catalogues de cours importants, cette tâche devient manuellement peu, voire non, réalisable. Aussi, dans ce paradigme, les problèmes d'emploi du temps et de logistique (*e.g.* salles, enseignants) sont naturellement renforcés. De plus, il est du devoir de l'institution de garantir l'égalité entre tous les étudiants, notamment en certifiant que tous les objectifs de formations professionnels proposés au sein de la structure sont atteignables et que les compétences requises sont enseignées dans le parcours de l'étudiant. La conséquence de cela est la nécessité, avec l'aide du corps enseignant, de correctement cataloguer les compétences apportées par chacun des cours et les prérequis de ces derniers. Ce catalogage est également complexifié par le fait que certaines compétences sont transverses par nature [8].

De tout cela, il apparaît clairement que permettre à l'étudiant de personnaliser entièrement son cursus afin d'atteindre ses objectifs professionnels, tout en tenant compte de son profil (*e.g.* compétences initiales, propension de dé-mobilisation des compétences), est certes extrêmement complexe, mais crucial à comprendre et à résoudre. Ce papier, à notre connaissance, fait la toute première contribution à ce problème en éducation. Nous apportons les fondamentaux théoriques quant à sa modélisation et sa compréhension, et nous investiguons également l'effet de certaines propriétés éducationnelles dans sa résolution et les recommandations qui en découlent.

Toutefois, bien que ce problème du cursus personnalisé avec érosion des compétences n'ait pas été traité dans la littérature, il existe certains travaux allant dans ce sens. Ebbinghaus, et des travaux subséquents [6] arrivent à quantifier la manifestation de l'oubli des acquis des étudiants, qui survient notamment lorsque les étudiants ne les mobilisent pas. Récemment, l'on observe des travaux proposant d'exploiter des techniques d'apprentissages semi-supervisées ou non supervisées sur des corpus de données d'étudiants et de formations, afin de produire des recommandations de cursus – notamment sous la forme de graphes probabilistes [2,14]. Bien que de tels travaux ne résolvent pas notre problème, ils mettent en valeur l'existence de propriétés exploitables et discriminantes pour l'élaboration de cursus personnalisé. Aussi, le travail réalisé par Molontay, *et al.* [11] mettent en évidence l'importance et l'effet des prérequis dans un cursus, les caractérisent et proposent différentes métriques pour quantifier leurs impacts.

Dans la section 2 suivante, nous formalisons le problème du cursus personnalisé avec érosion des compétences comme un problème de satisfaction de contraintes. Dans la section 3, nous proposons une application de ce modèle pour trouver une solution valide à ce problème. La section 4 présente l'implémentation de cette proposition et les résultats expérimentaux. À partir de ces résultats, nous suggérons dans la section 5 des recommandations prescriptives et des pistes de réflexions sur la mise en place de tel cursus.

2 Formalisation

Afin de correctement définir le problème du cursus personnalisé, nous faisons la double hypothèse que les aspects logistiques (*e.g.* disponibilité des salles) sont indépendants et n'influencent pas la qualité d'un cursus personnalisé, et que le catalogue de cours est correctement formé. Un cursus personnalisé \mathcal{P} est donc défini comme un ensemble temporellement ordonné de cours C qui aboutis aux objectifs \mathcal{O} des étudiants (*e.g.* objectif professionnel). Les cours le constituant sont prélevés au sein d'un catalogue de cours¹ et ne peuvent être repris par la suite. Ces cours ont des prérequis \mathcal{K}^- afin de les suivre correctement, et apportent aux étudiant des compétences \mathcal{K} . Ces mêmes compétences font face à une dé-mobilisation δ dans le temps lorsque apprises par les étudiants.

1. Même s'il s'agit d'une tâche extrêmement difficile, il est du ressort de l'institution et des enseignants d'établir les catalogues à la fois de cours, et de compétences.

2.1 Cours, apport, prérequis et ordonnancement

Un cours c peut être considéré comme le principal vecteur de diffusion d'un ensemble de compétences \mathcal{K}_c . Chaque compétence k enseignée dans un cours c ($k \in \mathcal{K}_c$) est associée à une valeur de maîtrise m_k . Chaque compétence k est acquise par l'étudiant à un degré m_k lorsqu'il réussit le cours c (cf. subsection 2.3).

De plus, un cours peut également nécessiter des prérequis pour pouvoir être suivi. Ces prérequis forment l'ensemble \mathcal{K}_c^- constitué des compétences $k \in \mathcal{K}$ dont la maîtrise attendue m_k est supérieure au seuil $\lambda_{(c,k)}$:

$$\mathcal{K}_c^- = \begin{cases} \emptyset \\ \{k \mid k \in \mathcal{K}, \mu(m_k) \geq \lambda_{(c,k)}\} \end{cases} \quad (1)$$

où $\mu(x)$ est une fonction de *fuzzification* (cf. subsection 2.2) pour tenir compte de la difficulté d'évaluation de ces compétences.

À cela se rajoute les contraintes temporelles dans la modélisation d'un cours, afin de savoir à quelles périodes \mathcal{T}_c il peut être choisi (e.g. semestre 2 et 4). Nous définissons la disponibilité d'un cours c comme $\mathcal{T}_c = \{t_i \mid t_i \in T, i \in [0, n], 1 \leq n \leq |T|\}$, où T représente l'ensemble ordonné² de toute les périodes t du cursus et où $|T|$ vaut la durée maximale du cursus (e.g. 5 ans). Une année académique est déterminée par un nombre τ de périodes consécutives : dans une année académique classique, il y a deux semestres $\tau = 2$ (e.g. $\{t_0, t_1\}$).

En sus, nous considérons que les crédits ECTS conditionnent aussi la validité d'une solution. Dans ce standard, lorsqu'un cours est validé, il rapporte des points (crédit ECTS) à l'étudiant ; une année correspond à 60 crédit ECTS. Aussi, chaque cours c se voit attribué une contribution en crédit ECTS $\epsilon \in \mathbb{N}$. Une année académique dans un cursus personnalisé est donc considérée valide lorsque l'affectation des cours est telle que :

$$\sum_{i=0}^{\tau} \sum_{c_j=0}^{|C_{(\mathcal{P}, t+i)}|} \epsilon_{c_j} \geq 60 \quad (2)$$

s.t. $t = \min(Y)$

Finalement, un cours c est un 4-tuples défini comme suit :

$$c = \langle \mathcal{K}_c, \mathcal{K}_c^-, \mathcal{T}_c, \epsilon \rangle \quad (3)$$

Comme contrainte supplémentaire, notons qu'un cours s'étend sur toute la période dans laquelle il a été sélectionné. De fait, un étudiant est limité par le nombre maximal de cours γ qu'il peut suivre dans une période t , tel que dans l'absolue $|C_t| = \gamma$, avec $C_t = \{c \mid t \in \mathcal{T}_c\}$ les cours sélectionnés en t . Incidemment, cela englobe un ensemble de sous-problèmes intéressants, comme le cursus possédant le moins de cours possible. En conclusion, un cursus \mathcal{P} est un ensemble de cours C exprimés par un T -uplets tel que $\mathcal{P} = (C_{t_0}, \dots, C_{t_T})$.

2. Une période t_i est avant une autre t_j ssi. $\forall i, j \in \mathbb{N}, i < j \iff t_i \cap t_j = \emptyset, \forall x \in t_i, \forall y \in t_j, x < y$.

2.2 La compétence et sa maîtrise

Dans notre problème du cursus personnalisé, les compétences k sont les entités utilisées pour identifier si un étudiant respecte les attendus de ses objectifs \mathcal{O} ainsi que ceux des cours *via* les prérequis (cf. Equation 1). Pour ne pas souffrir d'une définition de la compétence – sujet controversé – peu inclusive des différentes institutions, nous ne considérerons k que comme un artefact informatique générique et facilement dérivable pour introduire de nouveaux concepts (*e.g.* savoir-faire). Néanmoins, même s'il est possible d'attacher explicitement une sémantique à une compétence (*e.g.* la gestion de projet), évaluer son degré de maîtrise par un étudiant n'est pas un processus formel.

Les acteurs pédagogiques en charge de cette quantification réalise souvent une projection des notes des étudiants dans des échelles de représentation de maîtrise des compétences. Un exemple est l'échelle *MAPI* [10], utilisé dans certains établissements français comme des écoles d'ingénieurs. Elle permet de définir une compétence comme étant **Maîtrisé**, **Acquis**, **Partiellement acquis** ou **Insuffisant**. Ces échelles, d'une manière générale, sont un outil de décision important pour ces acteurs, mais aussi pour les institutionnels, grâce à la sémantique inhérentes qu'elles véhiculent : elles permettent l'encodage de la maîtrise m_k d'une compétence dans des espaces flous interprétable par l'humain.

Ainsi, nous définissons une fonction $\mu(m_k) : [0; 1] \rightarrow \mathbb{S}$ projetant le score de maîtrise d'une compétence m_k dans un ensemble ordonné \mathbb{S} d'échelles. Par exemple, l'échelle de notation *MAPI* se définit comme un ensemble ordonné $\{\mathbf{i}, \mathbf{p}, \mathbf{a}, \mathbf{m}\}$ où $\mathbf{i} < \mathbf{p} < \mathbf{a} < \mathbf{m}$. Une instanciation d'une telle échelle de notation pourrait être telle que $\mu(m_k) = \mathbf{i}$ pour $0 \leq m_k < 0.25$, $\mu(m_k) = \mathbf{p}$ pour $0.25 \leq m_k < 0.5$, $\mu(m_k) = \mathbf{a}$ pour $0.5 \leq m_k < 0.75$ et $\mu(m_k) = \mathbf{m}$ pour $0.75 \leq m_k \leq 1$.

Considérant cela, chaque compétence $k \in \mathcal{K}_c$ apporte un score de maîtrise $m_k \in [0; 1]$. Formellement, le maîtrise d'une compétence k par un étudiant à un instant t se définit par l'accumulation des maîtrises $\mathcal{M}^k = \{m_k \mid k \in \mathcal{K}_c, c \in C\}$ érodées au fil du cursus d'une quantité \mathcal{Q}_k (cf. subsection 2.4), tel que :

$$\forall k \in \mathcal{K}, t \in T, m_{(k,t)} = \sum_{i=0}^{|\mathcal{M}^k|} m_i - \sum_{j=0}^t \mathcal{Q}_k \quad (4)$$

2.3 Profil de l'étudiant

Outre la manière dont les compétences d'un étudiant s'érodent dans le temps – que nous traitons séparément dans la section 2.4 suivante – les éléments ci-après nous permettent de définir le profil de l'étudiant, qui intervient inexorablement dans la résolution du problème pour consolider la personnalisation du cursus.

Un étudiant possède, à une période t_i , un ensemble de compétences apprises $\mathcal{I}_i \subseteq \mathcal{K}$ qui, lorsqu'il débute son cursus (*i.e.* $i = 0$) représente de fait ses compétences initiales – celles acquises en amont de son entrée dans le cursus. Le profil est aussi défini par les objectifs $\mathcal{O} \subseteq \mathcal{K}$ de l'étudiant. Chacune de ces compétences $k \in (\mathcal{I}_i \cup \mathcal{O})$ est quantifiée par le niveau de maîtrise m_k . Aussi, lorsqu'un

étudiant suit un cours c , son ensemble de compétences apprises évoluent en accord avec les compétences apportées, tel que $\mathcal{I}_{i+1} = \mathcal{I}_i \cup \{\mathcal{K}_c \mid c \in C_{t_i}\}$. Ceci est important, en cela que si l'étudiant change ses objectifs \mathcal{O} sans avoir terminé son cursus (*e.g.* redoublement, reconversion) il devient alors possible de recalculer un nouveau cursus optimal en accord avec ses compétences acquises.

Finalement, un cursus personnalisé \mathcal{P} peut être considéré comme solution lorsque l'ensemble des compétences acquises par l'étudiant à la fin du cursus $\mathcal{I}_{|T|}$ contient les compétences requises par l'objectif \mathcal{O} de l'étudiant, avec au moins le niveau de maîtrise m_k attendu :

$$\forall i \in \mathcal{O}, \exists i \in I_{|T|}, m_i^{k_{\mathcal{O}}} \leq m_i^{k_{\mathcal{I}_{|T|}}} \quad (5)$$

Ainsi, deux étudiants ayant un même objectif \mathcal{O} mais un profil différent pourront possiblement se voir recommander deux cursus différents $\mathcal{P}_1 \neq \mathcal{P}_2$. La raison étant que l'ensemble \mathcal{I}_i est propre à un étudiant : il est vraisemblable que $\mathcal{I}_0^1 \neq \mathcal{I}_0^2$, ou qu'au moins le niveau de maîtrise des compétences soit différent.

2.4 Modélisation de l'érosion de la compétence

Il est captieux de penser la compétence comme binaire (*i.e.* possédée ou perdue). Comme le montre plusieurs travaux [6], la maîtrise d'une compétence peut changer au fil du temps : diminuer lorsqu'elle n'est pas sollicitée, et inversement, indépendamment du contexte pédagogique. Prédire cette évolution dans le temps est complexe mais important pour favoriser l'apprentissage, comme l'illustre les travaux dans les systèmes de répétitions espacées (SRS) [12].

De ce fait, il est nécessaire de prendre en compte cette érosion de la compétence dans la recherche d'un cursus personnalisé pour l'étudiant. Autrement, le risque majeur est de lui fournir des cursus extrêmement difficiles ou irréalisables au vue de ses capacités. En effet, même si une compétence est acquise par l'étudiant à un instant t , sa maîtrise m_k peut décroître au point où l'on peut considérer qu'il ne la maîtrise plus suffisamment pour respecter les prérequis $\mu(m_c)$ des cours planifiés, tel que $\mu(m_k) < \mu(m_c)$. Pour cela, nous définissons un modèle prédictif de l'érosion de la compétence k d'un étudiant tel que :

$$\begin{aligned} \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ t &\mapsto \delta_k(t) \end{aligned} \quad (6)$$

δ_k prédit la valeur de la perte de maîtrise de la compétence k à une période donnée $t_s \in T$ dans le cursus, depuis sa dernière mobilisation en $t_r \in T$. Ainsi, si un cours possède une compétence k en prérequis, et qu'il est planifié à un instant t_s dans le cursus, et que la compétence k n'a pas été renforcée (ou même nouvellement acquise) depuis t_r , alors la perte à ce moment t_s précis est prédit par $\delta(\Delta_t)$, avec $\Delta_t = t_s - t_r$ et $t_r \leq t_s$. Par conséquent, et parce que nous discrétisons le temps, la quantité \mathcal{Q}_k de perte de maîtrise (*i.e.* l'érosion) d'une compétence k à un instant t_s se définit comme suit :

$$Q_k = \sum_{t=0}^{\Delta_k} \delta_k(t) \quad (7)$$

Pour conclure cette section sur la formalisation du problème, il faut noter que nous avons opéré certaines simplifications. Parmi celles-ci, nous considérons un cours comme une entité holistique, en cela que les compétences qu'elle apporte est l'union des compétences enseignées par ces différents constituants (*e.g.* cours magistraux, travaux dirigés, pratiques, etc.) ; nous considérons aussi que la fonction d'érosion est la même tout au long du cursus (*i.e.* $\delta_{(k,t)} = \delta_k$), or il est envisageable que ce ne soit pas le cas plus l'étudiant apprend à apprendre.

3 Méthode de résolution

Dans cette section, nous présentons une méthode de résolution du problème de cursus académique personnalisé, comme décrit dans la section 2. De par la morphologie du problème, adopter une approche par satisfaction de contraintes est une première étape nécessaire pour explorer sa topologie et le comprendre correctement [3]. Néanmoins, ce problème revêt une complexité importante³ et peut vite devenir non solvable avec des approches exactes. Pour palier à cela, nous faisons les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 *Une année académique est constituée de deux semestres (*i.e.* $\tau = 2$). La somme des crédits ECTS d'un semestre doit toujours être supérieure ou égale à la moitié des crédits d'une année (*i.e.* 30) : cela permet de résoudre le problème pour des situations où l'étudiant arrive en cours d'année.*

Hypothèse 2 *L'érosion est exactement la même, quelque soit la compétence : $\forall k_i, k_j \in \mathcal{K}, \delta_{k_i}(x) = \delta_{k_j}(x)$. De plus, il n'existe pas d'érosion à l'intérieur d'un semestre, soit $\delta_k(0) = 0$, puisque $t_s = t_r$. Enfin, inspiré par les travaux sur l'oubli [1] – et notamment ceux d'Ebbinghaus dans le domaine des neurosciences [6] – nous définissons la fonction d'érosion comme :*

$$\delta(x) = \frac{e^{\frac{x}{s}} + 5}{100}, 1 \leq x \leq 10 \quad (8)$$

*Cette équation traduit le fait que moins un étudiant utilise sa compétence, plus il en perd la maîtrise. Attention toutefois, cette fonction est définie principalement pour un cursus de 5 ans. Pour une autre durée, il convient d'en modifier le coefficient de stabilité mémoriel s proposé par Ebbinghaus (*ici*, $s = 2$).*

Hypothèse 3 *Il n'est pas possible d'avoir deux fois le même cours dans \mathcal{P} .*

3. Ce problème est très probablement au moins NP-Complet ; nous finalisons la preuve de complexité réalisée *a posteriori* des premières expérimentations.

Pour résoudre notre problème, prenons $\mathcal{D} = \{c_1, \dots, c_n\}$ l'ensemble des tous les cours disponibles (*i.e.* le catalogue de cours). Prenons \mathcal{O} l'ensemble des compétences nécessaires pour l'objectif de l'étudiant. Soit un ensemble de m variables $X = \{x_1, \dots, x_m\}$, où $x \in \mathcal{D}$, et l'ensemble \mathcal{C} de contraintes suivant :

- Chaque compétence de l'objectif doit être présent dans le profil de l'étudiant final, et sa maîtrise supérieure ou égale à celle attendue ;
- Chaque semestre doit apporter au moins 30 crédits ECTS ;
- Chaque cours dans le cursus doit être unique ;
- Un cours ne peut être sélectionné que si tout ses prérequis sont satisfaits ;
- Un cours ne peut être sélectionné que lorsqu'il est disponible dans la période en question ;
- Le nombre de cours d'un semestre doit être strictement égal au nombre maximum de autorisé par semestre.

Ainsi, le problème du cursus personnalisé avec érosion des compétences consiste à trouver une affectation totale $\alpha : X \rightarrow \mathcal{D}$ qui satisfasse toutes les contraintes dans \mathcal{C} , dénoté $\alpha(\mathcal{C}) = 1$. Le problème est non solvable lorsque, quelque soit les affectations α , $\alpha(\mathcal{C}) = 0$.

4 Implémentation et résultats expérimentaux

En accord avec les propositions précédentes, nous avons développé deux solveurs de contraintes prolog⁴ pour résoudre le problème du cursus personnalisé avec érosion des compétences. Le *Solver 1* utilise des heuristiques de résolution issues du modèle prédictif induit par l'érosion pour conditionner les cours à choisir en priorité, et le *Solver 2* qui évalue la validité d'une solution une fois l'affectation réalisée. L'intérêt de ce solveur est d'être similaire à une démarche utilisateur : l'affectation étant vérifiée *a posteriori*. Les objectifs principaux de cette expérimentation étaient d'une part d'étudier la faisabilité de trouver une solution à ce problème, et d'autre part d'étudier l'effet de ses propriétés (*e.g.* érosion, nombre de cours). Avant de présenter les résultats globaux, précisons que ces expérimentations ont été réalisées avec un processeur Intel i5-8250 à 2.0 GHz et 8 Go de RAM. Dans la suite, nous considérons plutôt les inférences logiques (LI) réalisées par les solveurs plutôt que le temps pris pour trouver une solution⁵. De plus, en raison de l'application prévue de notre problème dans le monde académique, nous avons défini une limite de 12h de calcul au delà de la quelle le problème est considéré comme non solvable en un temps raisonnable.

Définition des jeux de test (i.e. catalogue de cours). Pour palier l'absence de catalogues de cours publiquement disponibles, nous avons été obligés de générer ces catalogues de manières aléatoires⁶ pour chaque instance du problème, tout

4. Le code source, les jeux de tests utilisés et leur configuration sont disponibles sur Software Heritage à l'adresse suivante : archive.softwareheritage.org/swh:1:dir:1eba2c7a6dbee16774a59a0988e6101f3e99851f

5. $9 \times 10^5 \text{LI} \approx 1 \text{s}$.

6. Il n'y a donc aucune assurance *a priori* quant à l'existence d'une solution.

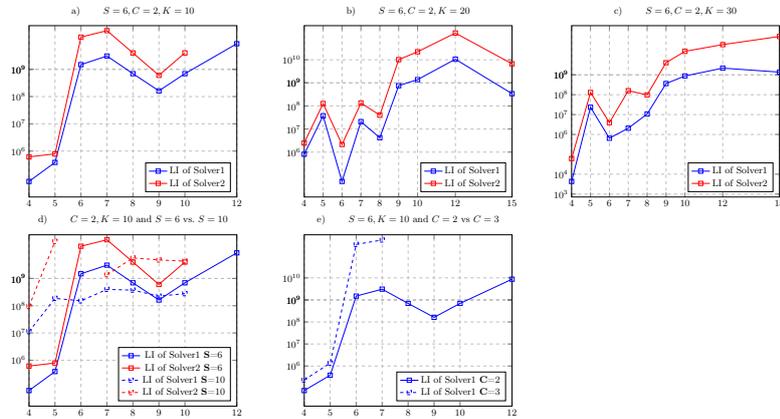


FIG. 1 – Comparaison des inférences logiques (LI) (ordonnée) réalisés par nos deux solveurs lorsque le nombre de cours augmente de $N = 4$ à $N = 15$ (abscisse) dans des configurations différentes du problème.

comme l'objectif \mathcal{O} à trouver. Dans ces instances du problème, nous avons changé le nombre de semestres S , le nombre de cours disponibles à chaque semestre N , le nombre de compétences totales existantes K ou le nombre de cours C qu'un étudiant doit choisir à chaque semestre. Indépendamment de l'instance du problème, le nombre de prérequis pour chaque cours fut tiré aléatoirement dans l'intervalle $[0; 4]$ et, pour chacun, leur valeur le fut dans l'ensemble flou $\{\emptyset, i, p, a, m\}$. De même, le nombre de compétences \mathcal{K}_c apportées par un cours fut tiré aléatoirement dans l'intervalle $[1; 4]$, leur valeur m pour chacune l'étant dans l'intervalle $[10; 90]$. Pour l'objectif, nous avons fixé $|\mathcal{O}| = 2$; leur valeur se prenant aléatoirement dans $\{i, p, a, m\}$. L'apport d'un cours concernant les crédits ECTS se prenant dans l'intervalle $[2; 6]$.

Nous avons autant que possible tenté de nous rapprocher de situations réelles, mais la difficulté du problème nous a obligé à restreindre l'espace explorable, notamment pour les cours par semestre C . Dans ces expérimentations, nous commençons au premier semestre $S = 0$ et l'étudiant n'a aucune compétence initiale ($\mathcal{I}_0 = \emptyset$), ceci afin de diminuer les biais de parcours. Les résultats expérimentaux sont présentés dans la Figure 1.

Résultats généraux Notons tout d'abord qu'au regard des inférences logiques (LI) réalisées, le solveur 1 utilisant l'érosion pour guider la recherche présente de meilleur résultat que le solveur 2 dans tous les cas testés. Ce résultat montre qu'un modèle pédagogique prédictif peut être efficacement utiliser pour guider la recherche lors d'un problème de satisfaction par contraintes.

Dans la Figure 1 a), b) et c), nous tentons de trouver un cursus de licence (L1, L2 et L3) personnalisé ($S = 6$) où deux cours doivent être suivis par semestre

($C = 2$). Nous y augmentons le nombre de cours N disponible à chaque semestre (en abscisse) : aux alentours de $N = 15$, le problème devient généralement non solvable en un temps raisonnable. Nous y faisons aussi varier le nombre de compétences existantes K à 10 pour a), 20 pour b) et 30 pour c). On observe que le problème a) devient insolvable à partir de $N = 10$ pour le solveur 2 et à partir de $N = 12$ pour le solveur 1. Dans d), nous comparons la résolution d'un cursus de licence a) avec la résolution du problème concernant un cursus allant jusqu'au master dans les mêmes conditions – excepté $S = 10$ pour ce dernier. On observe que, dû à l'explosion combinatoire, le problème devient non solvable en temps raisonnable pour $N = 10$ (courbes en pointillées). Dans la Figure e), nous comparons l'effet du nombre de cours à prendre $C = 2$ et $C = 3$. Les résultats montrent clairement que lorsque $C = 3$, le problème devient non solvable en un temps raisonnable beaucoup plus tôt ($N = 7$).

Nos résultats expérimentaux sur ce nouveau problème mettent en exergue sa difficulté de résolution, le rendant non praticable pour un humain. Aussi, l'utilisation des méthodes exactes pour trouver une affectation α tel que $\alpha(C) = 1$ ne semble pas recommandée, tout du moins sans heuristiques efficaces pour explorer l'arbre de recherche. Néanmoins, grâce aux observations et aux résultats obtenus, il nous est possible d'énoncer de premières recommandations prescriptives, pouvant ainsi servir d'aides à la décision pour les différents acteurs concernés.

5 Recommandations prescriptives

Compétences et submersion. Une observation intéressante qui résulte de la Figure 1 a), b) et c) est l'évolution des inférences logiques nécessaires en fonction de la quantité de compétence K disponible. Lorsque $C < 8$, plus cette quantité est importante, plus le problème semble facile à résoudre pour le solveur. D'ailleurs, le problème est également solutionné lorsque $N = 15$ pour $K = 20$ et $K = 30$. Ce comportement, que nous appelons *submersion* et qui consiste en un accroissement important des chances de retrouver dans les cours les compétences nécessaires à l'objectif, peut avoir deux explications. La première tient à la distribution probabiliste des compétences au sein des cours lors de la création aléatoire du problème. La deuxième explication résonne avec un caractère d'avantage naturel : plus la granularité des compétences est faible – autrement dit moins elles sont nombreuses et donc précises – et plus ces dernières seront enclines à être associées à des cours, même si elles ne recouvrent pas entièrement la portée pédagogique de ces cours. De fait, les acteurs pédagogiques et institutionnels doivent faire montre d'une grande vigilance dans l'identification des compétences existantes dans leurs formations, au risque sinon de compromettre la pertinence des cursus solutions.

De l'effet de la quantité des cours et de la taille du cursus. Dans d), où nous nous intéressons à l'effet de la durée du cursus dans la résolution en comparant $S = 6$ et $S = 10$, on observe que le problème est plus difficile pour $S = 10$ – c'est d'autant plus flagrant avec le solveur 2. Aussi, ces résultats tendent à confirmer

que plus un cursus personnalisé est long, plus il devient difficile de trouver une affectation α qui puissent satisfaire les attentes des acteurs : cela motive d'autant plus la nécessité de fournir un outil d'aide à la décision pour ce type de problème. Nous pensons donc qu'en absence d'outils efficaces il est préférable d'offrir des cursus personnalisables sur des périodes courtes, comme le master (où $S = 4$), afin de pouvoir assurer une éducation de qualité aux étudiants. La Figure 1 e) nous a permis d'observer que lorsque le nombre de cours à prendre augmente, plus le problème devient difficile à résoudre. Cela s'explique conjointement par l'augmentation du nombre de variables $x \in X$ affecté et l'augmentation de la probabilité d'enfreindre les contraintes. Aussi, au vue des résultats, nous pensons que les cours doivent être correctement équilibrer au sein des formations, quitte à devoir y proposer un même cours également plus tard lorsque possible : il n'est plus besoin de conditionner l'étudiant par son année d'étude, portant la réflexion selon nous sur l'établissement d'une hiérarchie de cours cohérente.

Consolider l'établissement de référentiels taxonomiques des compétences. Il n'est pas besoin de rappeler que l'établissement d'un référentiel de compétences pour une institution est une tâche extrêmement complexe, surtout si une notion taxonomique y intervient (*e.g.* dépendances, niveaux). De manière intéressante, nos premiers résultats expérimentaux montrent qu'il n'y a pas besoin d'une telle organisation pour pouvoir répondre au problème du cursus. Plus encore, et à partir de l'Equation 1, l'on remarque qu'il est possible de fournir un outil d'aide à ces institutions pour établir un CbKST (Competence-based Knowledge Space Theory) [7] à partir d'un catalogue de cours \mathcal{C} disponible de manière automatique une fois ce dernier construit. En effet, puisqu'il est possible d'organiser tous les cours les uns par rapport aux autres dans le cursus, une relation d'ordre partielle apparaît : il devient alors possible d'identifier automatiquement quelles compétences intervient avant quelles autres, et quelles sont leurs prérequis.

6 Conclusion et perspectives

Dans ce papier, nous avons proposé les premières formalisation et résolution du problème du cursus personnalisé avec érosion de compétences en milieu académique. Nous avons montré que ce problème est très difficile dû à sa combinatoire, et qu'il n'est pas envisageable de demander sa résolution par les acteurs académiques sans outils d'aides à la décision adéquates. C'est pour cela que nous avons présenté une première ébauche d'un tel outil, utilisant une méthode de résolution exacte. Bien que les premiers résultats expérimentaux montrent que ce type de méthode n'est pas adapté sans heuristiques plus performantes, nous avons pu identifier de précieuses recommandations pour l'établissement de ces cursus, et avoir une meilleure compréhension de la topologie du problème.

Nous continuons activement nos travaux concernant ce problème. Nous finalisons conjointement la preuve de complexité du problème et sa résolution par des méthodes métaheuristiques, afin de mieux le comprendre et trouver des solutions pertinentes. Ces travaux permettront d'aboutir un outil exploitable par

les étudiants, les acteurs pédagogiques et les institutions. Les étudiants pourront ainsi élaborer et personnaliser leur cursus de manière assistée ; les enseignants gagneront un outil capable de les aider dans l'accompagnement de l'étudiant, dans ses efforts de rémédiation et de recommandation en temps réel ; et les institutions pourront vérifier l'intégrité des parcours sélectionnés par les étudiants et les points de congestions, ainsi que vérifier la cohérence de leur catalogue de formation, et favoriser les collaborations avec d'autres établissements.

Remerciement

Cette contribution scientifique a été réalisée dans le cadre du projet de recherche APACHES, financé par l'i-SITE ULNE (FIPE18-007-VERMEULEN).

Références

1. Averell, L., Heathcote, A. : The form of the forgetting curve and the fate of memories. *Journal of Mathematical Psychology* **55**(1), 25 – 35 (2011), special Issue on Hierarchical Bayesian Models
2. Backenköhler, M., Scherzinger, F., Singla, A., Wolf, V. : Data-driven approach towards a personalized curriculum. International EDM Society (2018)
3. Brailsford, S.C., Potts, C.N., Smith, B.M. : Constraint satisfaction problems : Algorithms and applications. *European Journal of Operational Research* **119**(3), 557 – 581 (1999)
4. Cappellari, L., Lucifora, C. : The “bologna process” and college enrollment decisions. *Labour Economics* **16**(6), 638–647 (2009)
5. Desmarais, M.C., Baker, R.S. : A review of recent advances in learner and skill modeling in intelligent learning environments. *User Modeling and User-Adapted Interaction* **22**(1-2), 9–38 (2012)
6. Ebbinghaus, H. : Memory : A contribution to experimental psychology. *Annals of neurosciences* **20**(4), 155 (2013)
7. Heller, J., Steiner, C., Hockemeyer, C., Albert, D. : Competence-based knowledge structures for personalised learning. *Int. Journal on E-learning* **5**(1), 75–88 (2006)
8. Lebis, A., Prior, E., Mandran, N., Karami, A., Vermeulen, M. : Promouvoir et soutenir la Pédagogie Par Projet Centré Humain dans le supérieur : le projet APACHES. In : DIDAPRO 8 - DIDASTIC. Lille, France (Feb 2020)
9. Lefevre, M., Jean-Daubias, S., Guin, N. : An approach for unified personalization of learning. In : Perez-Marin, M.K.O.S.J.B.D. (ed.) International Workshop on Personalization Approaches in Learning Environments - Conference User Modeling, Adaptation, and Personalization. pp. 5–10. Montreal, Canada (Jul 2012)
10. Ministère de l'éducation nationale : Evaluer la maîtrise du socle commun aux cycles 2, 3 et 4. <https://eduscol.education.fr/cid103803/evaluer-la-maitrise-du-socle-commun-du-cycle-2-au-cycle-4.html> (2016), accessed : Jan. 19, 2020
11. Molontay, R., Horváth, N., Bergmann, J., Szekrényes, D.L., Szabó, M. : Characterizing curriculum prerequisite networks by a student flow approach. *IEEE Transactions on Learning Technologies* (2020)
12. Settles, B., Meeder, B. : A trainable spaced repetition model for language learning. In : Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1 : Long Papers). pp. 1848–1858. Association for Computational Linguistics, Berlin, Germany (Aug 2016)
13. University of Reading : The modular system at reading explained. https://student.reading.ac.uk/essentials/_study/course-and-departments/the-modular-system-at-reading-explained.aspx (2019), accessed : Jan. 19, 2020
14. Wong, C. : Sequence based course recommender for personalized curriculum planning. In : Int. Conference on A.I. in Education. pp. 531–534. Springer (2018)