



Rétroactions épistémiques dans une plateforme d'entraînement aux mathématiques : apports croisés de l'informatique et de la didactique

Sébastien Jolivet, Amel Yessad, Mathieu Muratet, Vanda Luengo, Benjamin Reiter, Brigitte Grugeon-Allys, Elann Lesnes-Cuisiniez

► To cite this version:

Sébastien Jolivet, Amel Yessad, Mathieu Muratet, Vanda Luengo, Benjamin Reiter, et al.. Rétroactions épistémiques dans une plateforme d'entraînement aux mathématiques : apports croisés de l'informatique et de la didactique. 10e Conférence sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, Marie Lefevre, Christine Michel, Jun 2021, Fribourg, Suisse. pp.82-93. hal-03292754

HAL Id: hal-03292754

<https://hal.science/hal-03292754>

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.

Rétroactions épistémiques dans une plateforme d'entraînement aux mathématiques : apports croisés de l'informatique et de la didactique

Sébastien Jolivet^{1,3}, Amel Yessad¹, Mathieu Muratet^{1,4}, Vanda Luengo¹, Benjamin Reiter¹, Brigitte Grugeon-Allys², Elann Lesnes-Cuisiniez³

¹ Sorbonne Université, LIP6
[sebastien.jolivet][amel.yessad] [mathieu.muratet]
[vanda.luengo]@lip6.fr
reiter.benjamin.rb@gmail.com

² Université Paris Est Créteil, LDAR
brigitte.grugeon-allys@u-pec.fr

³ Université de Paris, LDAR
elann.lesnes@gmail.com

⁴ INS HEA

Résumé. Cet article porte sur la conception de rétroactions épistémiques pour une plateforme d'entraînement aux mathématiques. Nous explicitons les fondements didactiques (incluant une modélisation du savoir à enseigner et des profils cognitifs prédéfinis d'apprenants), la modélisation informatique des rétroactions et un processus de décision de ces rétroactions, pour lequel nous détaillons les facteurs pris en compte. Nous montrons alors l'algorithme qui formalise ce processus. Enfin, nous discutons les apports et limites du travail réalisé et présentons la suite du travail engagé.

Mots-clés : rétroaction, rétroaction épistémique, modèle de rétroaction, algorithme de décision, didactique des mathématiques.

Abstract. We present the design and the modeling of epistemic feedbacks for a mathematics training platform. We explain the didactic basis (including the modeling of didactic knowledge and predefined learner's profiles), the computer modeling of feedbacks and a decision process for these feedbacks, a process for which we detail the factors taken into account. We then present the algorithm formalizing this process. Finally, we then discuss the contributions and limitations of the work carried out and present the continuation of the work undertaken.

Keywords: feedback, epistemic feedback, feedback modeling, decision algorithm, didactic of mathematics.

1 Introduction et état de l'art

Le projet MindMath¹ vise à la construction d'une plateforme d'entraînement aux mathématiques du collège (algèbre et géométrie). Il regroupe deux laboratoires de recherche (LDAR et LIP6) et trois entreprises (Tralalère, CabriLog et Domoscio). Une spécificité du projet est d'articuler les expertises, en didactique du LDAR, en IA du LIP6 et de Domoscio et éditoriale de Tralalère et CabriLog. Dans la plateforme l'élève réalise des exercices, organisés au sein de parcours d'entraînement adaptatifs, durant lesquels il bénéficie de rétroactions. La production des exercices, des parcours, le contenu et la décision des rétroactions sont fondés épistémologiquement et didactiquement. C'est sur la dimension rétroaction du projet que nous centrons cette contribution.

Les rétroactions sont largement identifiées comme un moyen important pour l'apprentissage et de nombreux travaux interrogent les conditions de leur efficacité. Ainsi, Wisniewski & al (2020) signalent, dans une revisite de l'article « *The power of Feedback* » (Hattie & Timperley, 2007), que les rétroactions ont un impact plus important sur l'apprentissage que sur la motivation et le comportement. Nous ne visons pas à agir sur ces deux derniers éléments dans le travail que nous réalisons. Nous considérons des rétroactions formatives telles que définies dans Shute « (...) [an] information communicated to the learner that is intended to modify his or her thinking or behavior for the purpose of improving learning » (Shute, 2008, p.154). Encore plus précisément, nous nous intéressons à la dimension épistémique des rétroactions, au sens proposé par Luengo (2009), c'est-à-dire qui porte sur le savoir enjeu d'apprentissage.

Il existe de multiples approches pour décrire le contenu et catégoriser les finalités des rétroactions. Leibold & Schwarz (2015) signalent quatre types de rétroactions selon la nature des informations qu'elles contiennent (rétroaction corrective, rétroaction épistémique, rétroaction suggestive, rétroaction épistémique et suggestive). Shute (2008, p.160), synthétisant de nombreux travaux, propose de multiples critères qui l'amène à une typologie des rétroactions ordonnées par complexité. Nous retenons les critères relatifs à l'objectif des rétroactions (*directive feedback* et *facilitative feedback*) et à la caractérisation du contenu en termes de niveaux d'information (*feedback specificity*).

Du point de vue de la modélisation informatique, tel qu'introduit précédemment, les connaissances didactiques (liées aux connaissances à enseigner et à la modélisation des connaissances de l'apprenant) et pédagogiques (temps, intention pédagogique, forme...) semblent nécessaires pour la conception des rétroactions épistémiques. Cependant les connaissances sur la rétroaction la plus pertinente à donner pour un apprenant donné à un moment donné restent un verrou. Une piste est donc de faire évoluer ce type de modèle centré experts vers un modèle capable d'apprendre des interactions avec les apprenants pour adapter ses rétroactions. Les techniques informatiques pour produire des rétroactions adaptées à partir des théories cognitives, des connaissances sur le domaine ou sur l'apprenant sont variées : production des règles, réseaux bayésiens, traitement automatique de la langue, etc. (Bimba et al., 2017). Cependant, l'évolution de ces systèmes peut être difficile ou fastidieuse à mettre en place (Luengo, 2009). Il est donc nécessaire de concevoir un modèle capable de produire des rétroactions à partir

¹ Projet lauréat du Fond Unique Interministériel 23. <http://mindmath.education/>

des connaissances expertes mais également capable d'évoluer, de façon informée, au fur et à mesure des interactions avec les apprenants. Une approche permettant de représenter le processus de décision de la rétroaction (Murray et al 2001), et le type de rétroaction, de façon explicite et découplée peut permettre ces deux types d'évolutions.

Nous visons, dans le projet, à proposer de manière automatique des rétroactions avec un contenu épistémique et adaptées à l'apprenant. Notre problématique est donc de concevoir une modélisation informatique et de déterminer un processus permettant au système de décider les rétroactions, avec prise en compte de l'apprenant, tout en fondant didactiquement l'ensemble de ces éléments. Pour y répondre nous avons :

- défini le contenu des rétroactions et leur modélisation en appui sur une modélisation didactique du savoir et de l'apprenant.
- identifié les facteurs de décision et produit l'algorithme permettant leur mise en œuvre.

Dans cette contribution nous présentons ces éléments et les fondements didactiques retenus pour les aborder. Enfin, nous discutons certaines limites et présentons les prolongements, engagés ou à venir, de ce travail.

2 Modèle de rétroactions

Dans cette section nous présentons les principes qui ont orienté notre travail, les fondements didactiques utilisés et enfin le modèle de rétroaction.

2.1 Principes du modèle et fondements didactiques

Pour construire le modèle et le contenu des rétroactions, nous avons fixé cinq principes qui nous permettent de prendre en considération différentes observations de Shute (2008) qui insiste sur la qualité du contenu et sur l'intérêt de l'adaptation des rétroactions au niveau de compétence de l'apprenant (« *For instance, instead of feedback complexity, a more salient facet of feedback may be the nature and quality of the content, such as providing information about learning goals and how to attain them* » (ibid. p. 161) « *For instance, a struggling student may require greater support and structure from a formative feedback message compared to a proficient student* » (ibid. p. 154)) :

1. Les rétroactions s'appuient sur le savoir en jeu et les moyens de sa mise en œuvre.
2. Les rétroactions sont mathématiquement correctes².
3. Certaines rétroactions prennent en compte des erreurs fréquentes.
4. Il existe des rétroactions adaptées à différents profils d'apprenants.

² Les notations sont rigoureuses et il n'y a pas dans les feedbacks, même si on les rencontre parfois dans les classes, des formulations approximatives (« segments égaux » à la place de « segments de même longueur », « angle » à la place de « mesure de l'angle », etc.) ou relevant de « recettes » (énoncé du type « si on change de côté alors on change de signe »). Ce principe est pris en charge essentiellement lors de la production effective des feedbacks.

5. Le modèle présente un niveau de généralité qui lui permet de décrire des rétroactions pour les différents domaines mathématiques présents dans la plateforme.

Pour mettre en œuvre ces principes nous exploitons les apports de la didactique au travers d'une modélisation des savoirs visés, des erreurs associées et de leur cause, et d'une définition du niveau de compétence de l'apprenant. La modélisation du savoir est construite à partir de l'approche praxéologique de la théorie anthropologique du didactique (Chevallard, 1992), de ces développements avec le cadre T4TEL (Chachoua, 2018) et des apports réalisés dans le cadre du projet MindMath (Jolivet et al., à paraître). Le savoir est structuré en domaines (algèbre, géométrie, etc.) dans lesquels sont travaillés des thèmes (les équations du 1^{er} degré, les triangles, etc.) au sein desquels sont définies des types de tâches à réaliser (résoudre une équation du 1^{er} degré, modéliser un problème à l'aide d'une équation du 1^{er} degré, etc.). Cette structuration est le fruit d'un travail épistémologique et didactique. Ce travail porte aussi sur l'identification des erreurs habituelles en lien avec le savoir modélisé (voir par exemple Grugeon-Allys et al. (2012) pour le cas de l'algèbre). Ces éléments permettent de prendre en compte les principes 1 et 3. De plus, comme cette modélisation du savoir ne dépend pas du domaine mathématique, cette approche nous permet de prendre en compte le cinquième principe ci-dessus. Nous présentons les éléments de cette modélisation utilisés pour les rétroactions.

- Les tâches à réaliser : elles sont regroupées dans des familles de tâches qui sont définies à partir d'un verbe d'action (par exemple résoudre), d'un objet mathématique sur lequel s'exerce l'action (par exemple une équation du premier degré) qui permettent de définir un grand ensemble de tâches (dans notre exemple : résoudre une équation du premier degré). On définit alors un ensemble de variables, et de valeurs associées, qui permettent de caractériser didactiquement des sous-ensembles de tâches (par exemple, la forme de l'équation, le nombre de solutions, la nature des coefficients, la nature de la solution, etc.). Les variables et leurs valeurs sont choisies pour pouvoir : 1) définir le niveau scolaire auquel la tâche est adaptée ; 2) caractériser les procédures qui permettent de réaliser, ou non, les tâches ; 3) déterminer la complexité des tâches. L'instanciation de ces différentes variables définit une famille de tâches, c'est-à-dire un ensemble de tâches qui peuvent toutes être résolues par au moins une procédure commune et qui sont de complexité identique (au regard des valeurs choisies pour les variables de complexité).
- Les procédures : il s'agit des moyens existants pour réaliser les tâches d'une, ou plusieurs, famille(s) de tâches. Par exemple : regrouper les termes contenant l'inconnue dans le même membre ; regrouper les termes constants dans l'autre membre ; calculer la valeur de l'inconnue.
- Les justifications : il s'agit des propriétés, définitions, etc., qui permettent de justifier la validité mathématique des procédures de résolution. Par exemple : « une égalité est préservée quand on réalise la même opération dans les deux membres » ; « le produit d'un nombre et de son inverse est égal à un ».
- Les erreurs classiques : il s'agit des erreurs susceptibles de se manifester lors de la réalisation des tâches. Elles sont identifiées à partir des travaux de la didactique.

En ce qui concerne la modélisation de l'apprenant on définit le niveau de compétence à l'aide du mode d'activité (Grugeon-Allys, 2016). Il permet de caractériser le rapport de l'apprenant, construit au fil de ses apprentissages, à différents domaines des mathématiques sur plusieurs aspects de l'activité mathématique (calculer, modéliser, représenter, construire, raisonner). Dans le cadre du projet MindMath, ce mode est initialisé lors de la réalisation d'un ensemble de tâches au début du travail sur une notion, il est régulièrement actualisé en fonction de l'activité de l'apprenant. Il est exploité lors de la décision des rétroactions permettant ainsi de prendre en compte le quatrième principe présenté au début de la section. Nous disposons maintenant des principes et des fondements didactiques qui nous permettent de présenter notre modèle de rétroactions.

2.2 Patron de rétroactions

Nous distinguons deux types de rétroactions selon leur finalité :

- Amener l'apprenant à interroger la validité de sa réponse de manière à lui permettre d'établir qu'elle est erronée et de s'engager dans une reprise de sa production.
- Fournir des éléments qui lui permette de retravailler la tâche. Ceux-ci peuvent davantage porter sur des éléments de justification ou sur des éléments de procédure. Ils peuvent être illustrés sur une tâche proche où sur la tâche à traiter elle-même.

Le premier type est à rapprocher de la question de la *vérification* proposée par Shute (2008), qui signale par ailleurs que cela peut être fait de manière explicite ou implicite. L'aspect explicite de la vérification est pris en charge dans la plateforme par des coches rouges et vertes qui indiquent la validité ou non de la réponse. Notre proposition est plus implicite car il s'agit d'indiquer à l'apprenant une propriété, une définition, etc. et l'inviter à vérifier sa bonne mise en œuvre, charge à lui d'en déduire l'aspect erroné de sa réponse et la nécessité d'un retravail sans qu'une orientation particulière soit proposée. Pour le deuxième type, l'élève est informé que sa réponse est erronée et il s'agit de lui fournir des éléments permettant de retravailler la tâche. Il contient à la fois des rétroactions plutôt directives (*directive feedback*) et d'autres plutôt facilitatrices (*facilitative feedback*), au sens proposé par Shute (2008), selon que l'accent est mis sur la procédure ou les justifications. Ces contenus peuvent être illustrés sur un exemple proche de la tâche à réaliser ou sur la tâche à réaliser elle-même (par exemple, illustrer avec une équation qui présente une complexité identique sans avoir les mêmes coefficients ou utiliser la même équation que celle à résoudre par l'apprenant). Pour des raisons liées à la plateforme nous avons concentré notre travail sur le 2^e type de rétroactions. Afin de les définir nous avons identifié les paramètres et valeurs possibles nous permettant de définir le patron d'une rétroaction à l'aide du vecteur suivant :

$$FB = \langle J \mid P ; G \mid IFt \mid It ; C \mid NC ; \{Er_i\}_i \mid null \rangle.$$

- Première composante : la rétroaction porte sur justification (J) ou une procédure (P).
- Deuxième composante : la rétroaction est rédigée de manière générique (G), instanciée à la famille de tâche (IFt) ou instanciée à la tâche (It).

- Troisième composante : quand la rétroaction porte sur une procédure, indique si elle est commentée (C) ou non commentée (NC).
- Quatrième composante : prise en compte d'une erreur usuelle (Er_i) ou non (null).

Nous illustrons ce modèle sur deux exemples présentés dans la **Fig. 1**

AS-TU PENSÉ À VÉRIFIER CECI ?

Avant d'appliquer la propriété de factorisation par facteur commun, vérifie que :

- 1- l'expression est bien une somme :
- 2- Chaque terme de la somme contient bien un même facteur k .

$$\begin{array}{c} \text{même facteur} \\ \downarrow \\ ka + kb = k(a + b) \\ \uparrow \\ \text{somme} \end{array}$$

Remarques :

$ka + kb = k \times a + k \times b$

L'absence de signe entre k et une parenthèse signifie une multiplication.

$k \times a + k \times b = a \times k + b \times k$

Le facteur commun k de chaque terme peut être le premier ou le deuxième facteur.

UNE ERREUR FRÉQUENTE...

Énoncé : Factoriser l'expression suivante : $4 + 4y$

Dans la résolution ci-dessous, une erreur fréquente aurait pu être commise...

Résolution :

$4 + 4y = 4 \times 1 + 4 \times y$

Attention à ne pas oublier le 1 ici, sinon tu es écrit : $4 + 4y = 4y$, ce qui est faux!

$4 + 4y = 4(1 + y)$

En effet, si tu prends $y = 0$, alors d'un côté : $4 + 4 \times 0 = 4$ et de l'autre : $4 \times 0 = 0$ mais $4 \neq 0$, l'égalité n'est pas vérifiée.

Fig. 1. Exemples de rétroactions. Type $\langle J ; G ; C ; \text{null} \rangle$ et $\langle P ; I ; C ; Er_oublCofacteur1 \rangle$

La rétroaction de gauche est du type $\langle J ; G ; C ; \text{null} \rangle$: elle présente la formule à utiliser de manière générique (les coefficients sont des lettres). Des commentaires sont proposés pour guider l'utilisation de la formule (cadres grisés) et pour rappeler différents éléments de vocabulaire. Il ne se réfère pas à une erreur particulière. Celle de droite est du type $\langle P ; I ; C ; Er_oublCofacteur1 \rangle$: elle présente une procédure de résolution instanciée, de manière commentée et évoque une erreur usuelle qui est l'oubli du cofacteur 1. Un commentaire signale une manière de détecter une telle erreur.

Les différentes combinaisons possibles des valeurs des composantes du vecteur permettent de définir de nombreuses rétroactions permettant d'explorer le champ des possibles. D'une part on a des rétroactions avec une information essentiellement centrée sur les éléments de justifications (*facilitative feedback*), ce qui est un objectif d'apprentissage fondamental pour avoir une activité mathématique réfléchie et contrôlée. D'autre part, on a des rétroactions avec une information spécifique et procédurale qui permettent, elles, d'améliorer la réussite immédiate de la tâche (*directive feedback*). Il nous semble difficile d'associer une rétroaction avec un unique effet visé, cependant, nous avons formulé, à partir de l'expertise didactique, certaines hypothèses sur :

- l'effet le plus probable, apprentissage ou réussite, des différentes rétroactions,
- une relation de pertinence entre les différents rétroactions et le profil d'apprenant.

Pour cela, nous distinguons deux critères de pertinence : permettre la réussite de l'apprenant sur la tâche en cours et permettre l'apprentissage par l'apprenant des connaissances mobilisées par la tâche. Ces hypothèses sont synthétisées dans la **Fig. 2**. Les lignes du tableau correspondent à des contenus portant sur les procédures ou les justifications, ses colonnes précisent si la rétroaction est générique ou instanciée et commentée ou non commentée tandis que les cases indiquent la prise en compte ou non d'une erreur usuelle dans la rétroaction (Er_i pour la prise en compte d'une erreur ; null

si non utilisation d'une erreur ; X indique que ce type de rétroactions n'existe pas³). L'hypothèse sur l'effet de la rétroaction est que, plus on se déplace vers la droite, plus il est probable de favoriser la réussite de la tâche. Plus on descend plus l'effet probable est de favoriser l'apprentissage. Enfin, le lien avec les profils d'apprenant est explicité par les couleurs selon la légende indiquée à droite du tableau.

Feedback plutôt orienté vers		Réussite de la tâche						Feedback plutôt destiné aux élèves :		
Apprentissage du savoir en jeu		G ; NC	G ; C	IFt ; NC	IFt ; C	It ; NC	It ; C			
	P	Er _i	Er _i	Er _i	Er _i	Er _i	Er _i		avec de bonnes compétences	
	P	Null	Null	Null	Null	Null	Null		avec des compétences en construction	
	J	Null	Null						avec des difficultés importantes par rapport à la tâche	

Fig. 2. Hypothèses sur la fonction et la cible des différents types de rétroactions

Par exemple nous faisons l'hypothèse qu'une rétroaction du type $\langle P ; It ; C ; \text{null} \rangle$, qui présente une procédure de résolution commentée (au moins partielle) de la tâche exacte à réaliser par l'apprenant, doit favoriser grandement sa réussite immédiate, mais sans pour autant favoriser la prise de recul nécessaire à l'apprentissage. Une telle rétroaction est donc plutôt destinée à un élève en difficulté. *A contrario*, une rétroaction du type $\langle J ; G ; NC ; \text{null} \rangle$ qui propose un rappel de cours sans commentaire, ne sera sans doute pas très efficace pour un apprenant avec de faibles compétences.

3 Décision des rétroactions

Maintenant que nous avons défini les rétroactions pouvant être proposés nous présentons les facteurs utilisés par le système pour décider les rétroactions, puis l'arbre de décision. Le peuplement de ses feuilles est appuyé sur les hypothèses synthétisées dans la Fig. 2. Pour éviter d'éventuelles ambiguïté nous précisons deux éléments : 1) dans la plateforme les exercices sont constitués d'une unique tâche, il n'y a donc pas à décider relativement à quelle tâche de l'exercice la rétroaction est la plus opportune ; 2) après une rétroaction un apprenant peut revenir sur la tâche et tenter une nouvelle résolution et bénéficier éventuellement d'une autre rétroaction en cas de nouvelle réponse erronée. Nous nous assurons qu'il n'a pas deux fois la même rétroaction lors de la résolution d'un exercice.

3.1 Critères pris en compte pour la décision

Pour décider les rétroactions, deux catégories de critères sont définies : 1) la première relative à la tâche et aux erreurs liées, 2) la seconde relative aux apprenants. Les critères sont synthétisés dans le Tableau 1. On distingue l'activité immédiate de l'apprenant qui réalise la tâche et l'historique des activités de l'ensemble des apprenants dans la

³ Il s'agit en effet des feedbacks portant sur une propriété, un théorème, une définition. Les instancier à une famille de tâches ou une tâche revient à mettre en œuvre la propriété, et donc à présenter la procédure. On n'est donc plus dans les feedbacks portant sur la justification.

plateforme. Cet historique permet l'actualisation du mode d'activité de l'apprenant et la détermination du rapport de l'ensemble des apprenants à la tâche en cours.

Tableau 1. Facteurs de décision de la rétroaction

Sujet	Attribut	Valeurs	Contexte
Apprenant	Modalité de déclenchement de la rétroaction	- Validation de la réponse - Demande d'aide - Inactivité longue	Activité immédiate de l'apprenant
Apprenant	Réponse à la tâche	- Correcte - Incorrecte	Activité immédiate de l'apprenant
Apprenant	Erreur identifiée	- Oui - Non	Activité immédiate de l'apprenant
Apprenant	Nombre de tentatives sur la tâche	- Première tentative - Plusieurs tentatives	Activité immédiate de l'apprenant
Apprenant	Fréquence de l'erreur identifiée chez l'apprenant	- Très fréquente - Fréquente - Peu fréquente - Non fréquente	Historique de l'activité dans la plateforme
Apprenant	Niveau de compétence de l'apprenant dans le domaine de la tâche	- 0 (faible) - 1 (moyen) - 2 (bon)	Historique de l'activité dans la plateforme
Ensemble des apprenants	Fréquence des erreurs possible sur la tâche pour l'ensemble des apprenants	- Erreur la plus fréquente - 2e erreur - ...	Historique de l'activité dans la plateforme

3.2 Algorithme de décision

Le processus de décision des rétroactions s'appuie sur un arbre de décision (**Fig. 3**) dont les nœuds sont les attributs décrits dans le **Tableau 1.** et considérés par les experts dans un ordre bien précis. Chaque branche de cet arbre de décision est la conjonction de valeurs d'un sous-ensemble de ces attributs. À une feuille (ou un nœud terminal) de l'arbre de décision sont associés une ou plusieurs rétroactions pondérées. La pondération d'une rétroaction dans une feuille représente, du point de vue de l'expert, la pertinence de la rétroaction pour l'apprenant et le contexte. Les rétroactions associées à une même feuille de l'arbre de décision peuvent être pondérées différemment. La **Fig. 3** présente un extrait de l'arbre de décision utilisé pour décider les rétroactions. Le peuplement des feuilles est réalisé avec les différents rétroactions produites et de manière à être cohérents avec les hypothèses présentées dans la **Fig. 2**. Ainsi à chaque branche de l'arbre sont associées un certain nombre de rétroactions, chacune de ces rétroactions étant pondérée pour rendre compte de l'avis expert sur sa pertinence dans la situation. L'algorithme de décision consiste donc à utiliser cet arbre de décision avec les pondérations définies par les experts et justifiées par nos hypothèses didactiques.

Dans le **Tableau 2** nous présentons le peuplement réalisé et les pondérations définies pour les feuilles 5 et 11 qui correspondent respectivement aux cas :

- réponse erronée, sans erreur type identifiée, apprenant avec de bonnes compétences

- réponse erronée, associée à une erreur très fréquente chez l'apprenant, niveau faible

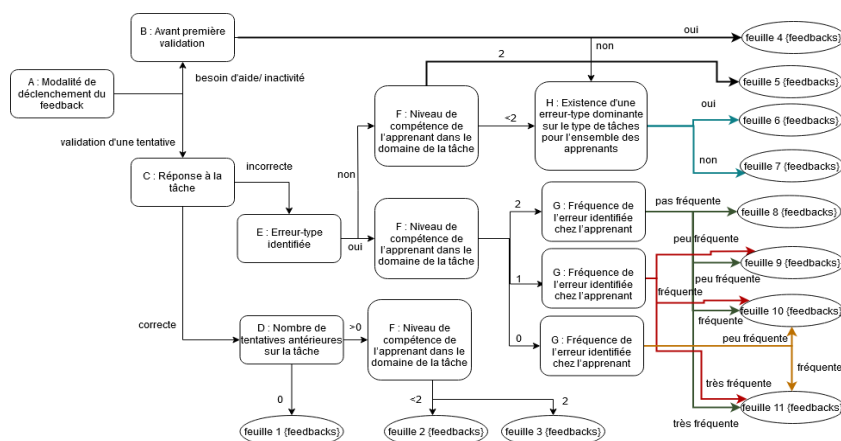


Fig. 3. Extrait de l'arbre de décision des rétroactions

Tableau 2. Peuplement, avec pondération, des feuilles 5 et 11 de l'arbre

Feuille	< Rétroaction > ; pondération			
5	<J ; G ; NC ; Null> ; 0,3	<J ; G ; C ; Null> ; 0,3	<P ; G ; NC ; Er ⁴ > ; 0,2	<P ; G ; NC ; null> ; 0,2
11	<P ; IFt ; C ; Er> ; 0,3	<P ; IFt ; C ; Null> ; 0,3	<P ; It ; C ; Er ⁵ > ; 0,2	<P ; It ; C ; null> ; 0,2

4 Discussion et perspectives

4.1 Apports et limites

Dans cette contribution nous avons proposé un patron de rétroaction fondé épistémologiquement et didactiquement en termes de contenus. Pour permettre au système de les décider, dans une plateforme d'entraînement aux mathématiques, nous prenons en compte le savoir en jeu, l'activité et le profil de l'apprenant ainsi que l'histoire de l'activité, pour l'ensemble des apprenants, dans la plateforme. Le patron de rétroaction et l'arbre de décision ne sont pas spécifiques à un domaine des mathématiques et peuvent être utilisés dès lors qu'une modélisation du savoir, telle que présentée dans la section 2.1⁶, est disponible. A l'heure où nous écrivons cet article 142 rétroactions sont déjà produites pour cinq thèmes du projet (4 en algèbre et 1 en géométrie). La réalisation de

⁴ erreur la plus fréquemment réalisée sur la famille de tâche par l'ensemble des apprenants

⁵ erreur identifiée dans la réponse de l'apprenant

⁶ De telles modélisations sont déjà disponibles dans de nombreux domaines qui concernent l'école élémentaire et le collège (Jolivet, 2018; Pilet, 2015; Vu & Tchounikine, 2020).

ce projet avec des partenaires industriels a permis cette production importante mais a aussi nécessité la prise en compte de certaines contraintes éditoriales, techniques et économiques. En particulier sur la forme des rétroactions qui contiennent beaucoup d'informations, comme le montre les exemples proposés sur la **Fig. 1**, et sont, de plus, proposées d'un seul bloc.

La suite est la réalisation d'expérimentations et leur analyse pour évaluer les hypothèses qui ont fondé notre travail et, en particulier, l'effet des rétroactions sur l'apprenant, selon les deux dimensions réussites et apprentissage proposées dans cette contribution. La préparation des expérimentations est l'occasion de pointer certaines limites du travail réalisé pour anticiper leur prise en compte. L'approche choisie pour notre travail est une approche experte ; cependant, pour tester certaines hypothèses que nous avons faites sur des limites de notre travail, nous avons réalisé une enquête par questionnaire auprès de 17 enseignants de profils divers (expérience, niveaux d'enseignement, exercice en éducation prioritaire ou non). Elle a été réalisée en utilisant des maquettes de rétroactions et non pas lors d'une utilisation effective de la plateforme. Nous ne la détaillons pas⁷ par manque de place, mais nous retenons trois éléments importants.

Le premier enseignement de l'enquête confirme la remarque faite plus haut sur la forme des rétroactions. Un enseignant signale ainsi « Il y a beaucoup de texte, cela peut bloquer certains élèves en très grande difficulté », et un autre « Globalement j'ai trouvé que les propositions étaient assez inaccessibles pour des élèves en REP car elles sont trop formelles et ont trop de texte ». Ces commentaires vont dans le sens de Shute (2008) qui signale « (...) *if feedback is too long or too complicated, many learners will simply not pay attention to it, rendering it useless.* ». Lors de l'expérimentation nous devons donc, avant d'analyser l'effet des rétroactions, évaluer leur prise en considération. L'analyse des traces, en particulier le temps de consultation des rétroactions, sera un indicateur de cette considération ou non.

Le deuxième enseignement de l'enquête est que, sur la base des données recueillies, on ne peut pas mettre en évidence que les hypothèses issues de l'expertise didactique sont largement reprises dans les conceptions des enseignants qui ont répondu. Il nous semble donc important d'avoir à l'esprit, lors de l'analyse des résultats de l'expérimentation, que tous les élèves n'ont pas, antérieurement à l'utilisation de la plateforme, construit le même rapport aux rétroactions et que ceci peut impacter leur effet dans la plateforme. L'enquête suggère aussi que l'on ne peut pas associer le profil de l'enseignant à un rapport particulier aux rétroactions, ainsi le contrôle des lieux d'expérimentation (établissement plus ou moins favorisé, rural ou urbain, etc.), ne peut, *a priori*, suffire à contrôler « l'effet enseignant ». Nous prévoyons donc, en cas de disparités importantes d'une classe à l'autre d'un même établissement, d'interroger le rapport de l'enseignant aux rétroactions et ses pratiques usuelles à ce sujet. Pour cela nous envisageons de croiser ses réponses à un questionnaire, des productions (copies corrigées d'élèves, corrections produites en classe) et les résultats d'observation in-situ.

Enfin, certains retours d'enseignants, renvoient à des éléments que nous avons envisagés mais non mis en œuvre au regard des possibilités actuelles de la plateforme. Par

⁷ Le questionnaire utilisé est disponible à ce https://link.infini.fr/enquete_fb

exemple l'un d'eux demande « pourquoi ne pas proposer à l'élève de contrôler sa réponse comme premier feedback », ce qui renvoie au premier type de rétroaction que nous avons évoqué dans la section 2.2 mais qu'il n'a pas été possible d'implémenter pour le moment. D'autres suggèrent de mieux associer rétroaction et activité de l'élève lors de la résolution de la tâche. Ceci nécessite une finesse du diagnostic de l'activité de l'élève qui est pour le moment limitée dans la plateforme. Pour l'expérimentation cela va nous amener à apporter une attention particulière à la corrélation entre l'erreur remontée et la réalité de la production de l'élève. En effet, si l'erreur remontée n'est pas celle effectivement réalisée par l'élève on peut penser qu'une rétroaction qui prend en compte cette erreur ne sera pas nécessairement très efficace.

Ces différentes limites, en plus de leur prise en compte dans notre protocole expérimental, nous amènent à deux propositions d'améliorations à court terme. Premièrement, pour prendre en compte le décalage qu'il peut y avoir entre le contenu des rétroactions et certains usages dans les classes de mathématique (notamment en raison de l'application du principe de rigueur mathématique), nous avons déjà augmenté les rétroactions d'un glossaire qui permet une reformulation en des termes plus habituels, pour certains élèves, de certains mots utilisés dans les rétroactions. Deuxièmement, pour remédier aux limites liées à la forme des rétroactions, diverses pistes sont explorées, notamment des améliorations de la médiatisation avec, en particulier, un affichage dynamique et temporisé des différents éléments de la rétroaction et l'ajout de commentaires audio qui permettraient d'apporter des éléments de métadiscours difficiles à transcrire mais importants pour l'explicitation des contenus de certaines rétroactions.

Au-delà de ces améliorations, en court ou prochaines, nous avons aussi identifié de nouveaux défis que nous abordons dans la section suivante.

4.2 Vers un algorithme d'apprentissage par renforcement

Nous avons rappelé dans la section précédente que les décisions s'appuient d'une part sur un diagnostic et d'autre part sur une expertise didactique. Nous avons aussi pu constater que certaines hypothèses utilisées pour construire l'algorithme de décision ne reflètent pas nécessairement les pratiques des enseignants et que cela peut donc influencer sur la manière dont les rétroactions sont reçues par les apprenants, et, *in fine*, sur leur efficacité. Enfin, si l'expertise didactique est importante pour la description du savoir, pour l'identification des erreurs et pour l'évaluation des compétences de l'apprenant ; il n'en est pas de même concernant les effets des rétroactions sur l'apprenant. Il apparaît donc pertinent, pour pallier ces limites, d'augmenter le dispositif par les apports de l'IA. Pour cela nous développons actuellement un algorithme d'apprentissage par renforcement (Kaelbling et al., 1996) pour la décision des rétroactions. L'approche experte déjà réalisée va permettre de répondre au problème de démarrage à froid des algorithmes d'IA. Un premier enjeu, à la confluence entre didactique et IA, est de définir les récompenses permettant l'apprentissage de l'algorithme et donc une évaluation des effets des rétroactions sur l'apprenant. Dans un deuxième temps, une fois l'algorithme d'apprentissage par renforcement déployé et expérimenté avec les élèves, le défi suivant va être de créer les synergies entre didactique et informatique pour :

- Comparer les résultats entre l'utilisation uniquement basée sur l'expertise et l'utilisation en mode apprentissage. Une fois les éventuelles différences identifiées il faudra se donner les moyens théoriques, du point de vue didactique, pour comprendre les causes des différences et éventuellement explorer de nouvelles approches.
- Analyser avec un point de vue didactique les résultats issus de l'algorithme d'apprentissage et exploiter les résultats de ces analyses pour l'améliorer.

Références

1. Bimba, A. T., Idris, N., Al-Hunaiyyan, A., Mahmud, R. B., & Shuib, N. L. B. M. (2017). Adaptive feedback in computer-based learning environments : A review. *Adaptive Behavior*, 25(5), 217-234. <https://doi.org/10.1177/1059712317727590>
2. Chaachoua, H. (2018). T4TEL, un cadre de référence didactique pour la conception des EIAH. In J. Pilet & C. Vendeira (Éds.), *Actes du séminaire de didactique des mathématiques 2018* (p. 8-25). IREM de Paris - Université Paris Diderot; hal-02421410.
3. Chevallard, Y. (1992). Concepts fondamentaux de la didactique : Perspectives apportées par une approche anthropologique. *Recherche en didactique des mathématiques*, 12(1), 83-121.
4. Grugeon-Allys, B. (2016). Modéliser le profil diagnostique des élèves dans un domaine mathématique et l'exploiter pour gérer l'hétérogénéité des apprentissages en classe : Une approche didactique multidimensionnelle. *e-JIREF*, 2(2), 63-88.
5. Grugeon-Allys, B., Pilet, J., Chenevotot-Quentin, F., & Delozanne, E. (2012). Diagnostic et parcours différenciés d'enseignement en algèbre élémentaire. *Recherches en Didactique des Mathématiques, Numéro spécial hors-série, Enseignement de l'algèbre élémentaire: bilan et perspectives*, 137-162.
6. Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The Power of Feedback. *Review of Educational Research*, 77(1), 81-112. <https://doi.org/10.3102/003465430298487>
7. Jolivet, S. (2018). *Modèle de description didactique de ressources d'apprentissage en mathématiques, pour l'indexation et des services EIAH* [Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02079412/document>
8. Jolivet, S., Lesnes-Cuisiniez, E., & Grugeon-Allys, B. (à paraître). Conception d'une plateforme d'apprentissage en ligne en algèbre et en géométrie : Prise en comptes et apports de modèles didactiques. *Annales de didactique et de sciences cognitives*.
9. Kaelbling, L. P., Littman, M. L., & Moore, A. W. (1996). Reinforcement learning : A survey. *Journal of artificial intelligence research*, 4, 237-285.
10. Leibold, N., & Schwarz, L. M. (2015). The art of giving online feedback. *Journal of Effective Teaching*, 15(1), 34-46.
11. Luengo, V. (2009). *Les rétroactions épistémiques dans les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain* [HDR, Université Joseph Fourier - Grenoble 1]. https://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/69/98/02/PDF/Luengo_2009.pdf
12. Pilet, J. (2015). Réguler l'enseignement en algèbre élémentaire par des parcours d'enseignement différencié. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 35(3), 271-312.
13. Shute, V. J. (2008). Focus on formative feedback. *Review of educational research*, 78(1), 153-189.
14. Vu, T. M. H., & Tchounikine, P. (2020). Supporting teacher scripting with an ontological model of task-technique content knowledge. *Computers & Education*, 163, 104098.
15. Wisniewski, B., Zierer, K., & Hattie, J. (2020). The power of feedback revisited : A meta-analysis of educational feedback research. *Frontiers in Psychology*, 10, 3087. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.03087>