

Modélisation didactique des rétroactions dans un EIAH

Selon Hattie et Timperley, « *feedback is one of the most powerful influences on learning and achievement, but this impact can be either positive or negative* »¹ (Hattie & Timperley, 2007, p. 81). C'est pourquoi nous commençons ici par étudier la question des types de rétroactions et de leur impact sur les apprentissages des élèves à travers plusieurs études. Dans un deuxième temps, nous explicitons comment nous élaborons les rétroactions proposés aux élèves dans la résolution des types de tâches de construction des parcours d'apprentissage.

Au-delà des recherches en didactique des mathématiques, nous nous intéresserons ici à des travaux en psychologie et dans le domaine des EIAH afin de nous donner une perspective plus large sur la recherche concernant les rétroactions (ou *feedbacks*, voire *feed-back*) automatiques.

Comme dans le chapitre précédent, nous utilisons ici les mots « technique » et « technologie » dans le contexte de la TAD (cf. section 2.1.3) et non en lien avec la dimension informatique de notre travail.

8.1 Définition et intérêts des rétroactions

8.1.1 Définitions didactiques et dans le domaine des EIAH

Hattie et Timperley définissent une rétroaction par :

[an] information provided by an agent (e.g., teacher, peer, book, parent,

1. Traduction personnelle : « la rétroaction est l'une des influences les plus importantes sur l'apprentissage et les performances, mais cet impact peut être aussi bien positif que négatif ».

*self, experience) regarding aspects of one's performance or understanding. A teacher or parent can provide corrective information, a peer can provide an alternative strategy, a book can provide information to clarify ideas, a parent can provide encouragement, and a learner can look up the answer to evaluate the correctness of a response. Feedback thus is a "consequence" of performance*² (Hattie & Timperley, 2007, p. 81).

Shute ajoute à cette définition une dimension d'apprentissage : la rétroaction est une « *information communicated to the learner that is intended to modify his or her thinking or behavior for the purpose of improving learning* »³ (Shute, 2008, p. 154).

Dans le même sens, selon Bosc-Miné, la rétroaction est « un processus par lequel l'apprenant obtient des informations sur son travail afin d'apprécier les similitudes et les différences entre les normes correspondant à cette tâche et les qualités de son propre travail afin de générer des travaux de meilleure qualité » (Bosc-Miné, 2014, p. 318). Ici, la rétroaction n'est plus simplement une information mais un processus, l'apprenant qui la reçoit ne peut pas rester passif s'il veut prendre en compte cette rétroaction. De plus, comme Shute le laissait déjà entendre, le but d'une rétroaction n'est pas forcément de donner uniquement une information sur une performance. Elle peut aussi être utile « pour s'améliorer dans des tâches ultérieures semblables ou plus complexes » (Bosc-Miné, 2014, p. 318).

Même si elles pointent certaines caractéristiques sur lesquelles nous nous appuyons par la suite, ces définitions issues du domaine des EIAH ne prennent pas en compte le contenu (mathématique en ce qui nous concerne) en jeu. C'est pourquoi nous nous référons également au travail de Brousseau (2010) qui, dans le cadre de la TSD, introduit la notion de situation adidactique qui comprend celle de rétroaction (ou « réaction » ici) :

Remplacer certains problèmes par des situations permet de déléguer une part [de] cette responsabilité à un milieu chargé de laisser libre cours à la pensée de l'élève, et de lui en montrer les conséquences, indépendamment du professeur... qui devient alors disponible pour une attitude positive.

Toute la difficulté de l'ingénierie didactique consiste alors à faire que les

2. Traduction personnelle : « une information fournie par un agent (par exemple, un enseignant, un pair, un livre, un parent, soi-même, son expérience) concernant des aspects de sa performance ou de sa compréhension. Un enseignant ou un parent peut fournir des informations correctives, un pair peut proposer une stratégie alternative, un livre peut fournir des informations pour clarifier des idées, un parent peut encourager et un apprenant peut chercher la solution pour évaluer la justesse d'une réponse. La rétroaction est donc une "conséquence" de la performance. »

3. Traduction personnelle : « information communiquée à l'apprenant qui est destinée à modifier sa pensée ou son comportement dans le but de favoriser l'apprentissage. »

réactions du milieu soient instructives, c'est-à-dire conduisent assez rapidement à résoudre le problème (souvent caché) en comprenant sa résolution. Autrement dit qu'il produise **des réactions non seulement correctes mais suggestives et pertinentes, c'est-à-dire spécifiques de la connaissance à produire et adaptées à la démarche de l'élève.**

Un milieu faiblement significatif, qui se borne par exemple à indiquer « réussite/échec » sans que chaque expérience apporte d'autre information que l'élimination d'une issue possible est un milieu très dispendieux et inefficace (Brousseau, 2010, p. 19, c'est nous qui soulignons).

Dans la suite de ce chapitre, nous étudierons plus précisément comment les rétroactions conçues pour l'EIAH MINDMATH sont effectivement correctes, suggestives, spécifiques de la connaissance à produire et adaptées à la démarche de l'élève.

8.1.2 Rétroactions internes, rétroactions externes

Nous l'avons dit, les rétroactions peuvent venir de l'apprenant lui-même qui observe ses propres actions (Hattie & Timperley, 2007) ou qui se questionne dans un dialogue intérieur (Wong, 1985). C'est, à terme, ce genre de rétroactions qui est attendu des apprenants :

Selon Hattie et Timperley (2007), quand ils sont engagés dans une tâche, les apprenants les moins efficaces dépendent beaucoup de facteurs externes alors que les apprenants les plus efficaces créent des *feed-back* internes : ils sont plus capables d'examiner, d'évaluer leurs capacités, l'état de leurs connaissances et les stratégies cognitives utilisées, d'évaluer leurs performances par rapport aux objectifs et aussi de rechercher les *feed-back* externes dont ils ont besoin (Bosc-Miné, 2014, p. 319).

Cependant, nous nous concentrons ici sur la question des rétroactions « externes » ou « intentionnelles ». Celles-ci peuvent évidemment venir du professeur ou des pairs comme nous l'avons vu mais nous nous intéressons en particulier aux rétroactions délivrées par un logiciel. Ces rétroactions offrent un avantage sur les autres :

Selon Mason et Bruning (2001), le *feed-back* provenant d'un ordinateur semblerait avoir des avantages importants par rapport à des *feed-back* reçus par une tierce personne parce que face à un travail en cours, l'ordinateur est toujours disponible pour fournir les *feed-back* au contraire d'un enseignant qui ne peut pas être disponible à chaque instant et pour chacun de ses élèves (Bosc-Miné, 2014, p. 325).

De plus, « *when feedback is delivered in a more neutral manner (e.g., written or computer delivered), it is construed as less biased [than when it is given orally]* »⁴ (Shute, 2008, p. 178).

Chevalier, qui travaille dans le cadre de la TSD, distingue « les rétroactions qui dépendent de l'enseignant, de celles que l'élève peut attribuer assez directement aux résultats de ses actions » (Chevalier, 1992, p. 26). Dans le cadre d'un environnement de géométrie dynamique et en particulier du projet *MindMath*, le milieu est le logiciel. Les rétroactions du milieu sont donc de deux sortes :

- les rétroactions du logiciel lui-même : ce qu'il laisse faire ou non à l'élève en termes de construction et de déplacement par exemple, ce que nous avons étudié tout au long du chapitre 6. Ces rétroactions sont perçues comme directement liées aux actions de l'élève. Par exemple, une rétroaction du logiciel est la déformation des figures lorsqu'on déplace un de leurs points si les propriétés voulues n'ont pas été intégrées dans le processus de construction par l'utilisation des outils de construction appropriés. Cette rétroaction est perçue par l'élève comme le résultat d'une erreur dans son programme de construction (même s'il ne l'interprète pas immédiatement ainsi) ;
- les rétroactions intentionnelles que nous implémentons derrière les boutons « aide », « valider » et lorsqu'une rétroaction est envoyée à l'élève s'il est inactif pendant un moment. Ces rétroactions correspondent à celles du professeur, comme l'évoquait Chevalier, tout en apparaissant moins biaisées car délivrées par l'EIAH (Shute, 2008).

8.2 Rétroactions dans le domaine des EIAH

Nous commençons par faire un rapide état de l'art du travail sur les rétroactions dans le domaine des EIAH. Cela nous permet d'introduire les types de rétroactions que nous considérerons pour la conception du modèle des rétroactions. Les travaux en EIAH ne prenant souvent pas en compte le contenu en jeu, nous reviendrons à des travaux en didactique des mathématiques par la suite.

4. Traduction personnelle : « lorsque la rétroaction est donnée de manière plus neutre (par exemple, par écrit ou par ordinateur), elle est considérée comme moins biaisée [que lorsqu'elle est donnée à l'oral] ».

8.2.1 Types de rétroactions

Il existe de nombreuses typologies des rétroactions. Dans cette section, nous en développons quelques unes que nous jugeons pertinentes pour notre travail en nous appuyant en particulier sur les travaux de Mason et Bruning (2001), Hattie et Timperley (2007), Shute (2008) et Bosc-Miné (2014) qui proposent un état de l'art du domaine à différentes périodes.

a. Rétroactions de vérification, rétroactions élaborées

Les rétroactions de vérification indiquent à l'apprenant si sa réponse est juste ou non. Bosc-Miné en distingue trois types (Bosc-Miné, 2014, p. 320) :

- les rétroactions de performance : nombre de réponses correctes, nombre de points, note, etc. ;
- les rétroactions « appréciation de la réponse fournie » : « très bien », un sourire, une grimace, mais aussi « essaie encore » (sans plus de précisions) ;
- les rétroactions « réponse correcte attendue » : fournissent simplement la réponse correcte ou la meilleure solution à une tâche.

Or, « *several researchers have reported that feedback is significantly more effective when it provides details of how to improve the answer rather than just indicating whether the student's work is correct or not* »⁵ (Shute, 2008, p. 157).

Ces rétroactions sont généralement appelées des rétroactions élaborées. Selon Hattie et Timperley, « *effective feedback must answer three major questions asked by a teacher and/or by a student : Where am I going ? (What are the goals ?), How am I going ? (What progress is being made toward the goal ?), and Where to next ? (What activities need to be undertaken to make better progress ?)* »⁶ (Hattie & Timperley, 2007, p. 86).

Bosc-Miné parle en termes de fonctions cognitives des rétroactions élaborées et ajoute une dimension d'apprentissage qui dépasse la tâche en cours : évaluer l'état courant, évaluer l'écart au but, aider à la réalisation d'une tâche et aider à développer des connaissances (Bosc-Miné, 2014, pp. 339-341).

5. Traduction personnelle : « plusieurs chercheurs ont montré que la rétroaction est nettement plus efficace lorsqu'elle fournit des détails sur la manière d'améliorer la réponse plutôt que lorsqu'elle se contente d'indiquer si le travail de l'étudiant est correct ou non ».

6. Traduction personnelle : « Une rétroaction efficace doit répondre à trois grandes questions posées par un enseignant et/ou un étudiant : où vais-je ? (Quels sont les objectifs ?), où en est ma résolution ? (Quels sont les étapes réalisées en vue d'atteindre l'objectif ?), et quelle est la prochaine étape ? (Quelles sont les activités à entreprendre pour mieux progresser ?) »

Aujourd'hui, « *most researchers now share the view that successful feedback (feedback that facilitates the greatest gains in learning) must include both verification and elaboration* »⁷ (Mason & Bruning, 2001, p. 4). Ces rétroactions indiquent à l'apprenant la justesse de sa réponse et lui fournissent d'autres informations sur sa réponse et/ou la réponse attendue (Bosc-Miné, 2014, p. 322).

b. Types de rétroactions élaborées

Les rétroactions élaborées varient en fonction de leur spécificité : elles peuvent fournir des informations générales mais aussi prendre en compte les spécificités de la tâche, du contexte, voire de l'apprenant. Shute propose une typologie des rétroactions classées selon leur complexité de mise en œuvre. Nous ne présentons ici que celle concernant les types de rétroactions élaborées :

- informations sur des caractéristiques du savoir en jeu (« *attribute isolation* ») et informations sur le savoir en jeu (« *topic contingent* ») : ces rétroactions amènent l'apprenant vers la réponse attendue mais sans s'intéresser à ses erreurs ;
- information sur la réponse (« *response contingent* ») : ces rétroactions s'appuient sur une bibliothèque d'erreurs courantes pour présenter des erreurs et des façons de les corriger à l'apprenant (elles n'analysent pas spécifiquement la réponse de l'apprenant) ;
- indices (« *hints/cues/prompts* ») : ces rétroactions guident l'apprenant dans la bonne direction en lui donnant des indices, elles peuvent se présenter sous la forme de corrigés-types, elles ne donnent pas directement la réponse attendue ;
- « *misconceptions* » : ces rétroactions nécessitent une analyse et un diagnostic des erreurs de l'apprenant dans sa résolution, elles expliquent où sont les erreurs et pourquoi ce sont des erreurs ;
- aide tutorée (« *informative tutoring* ») : cette rétroaction est la plus élaborée, elle donne à la fois une information sur la justesse de la réponse, sur les erreurs commises et elle donne des indices concernant la ou les stratégie(s) de résolution.

De manière générale, les rétroactions liées à la réponse de l'apprenant semblent plus efficaces pour la réussite des apprenants que les rétroactions plus générales uniquement liées au savoir en jeu (Mason & Bruning, 2001, p. 5). De même, les

7. Traduction personnelle : « la plupart des chercheurs partagent désormais le point de vue selon lequel une rétroaction réussie (une rétroaction qui apporter les plus grands bénéfices en matière d'apprentissage) doit comprendre à la fois une vérification et une élaboration ».

rétroactions liées au processus de résolution sont plus efficaces pour l'apprentissage que les rétroactions focalisées sur la tâche en cours (Bosc-Miné, 2014, p. 329) car les rétroactions au niveau de la tâche se généralisent généralement assez mal aux autres tâches (Hattie & Timperley, 2007, p. 91). Bosc-Miné résume la situation :

Recevoir un feed-back est plus efficace que de ne pas recevoir de feed-back du tout mais le développement de la démarche d'auto-feed-back est préférable à la réception de multiples feed-back qui peuvent ne pas être traités. Parmi les feed-back intentionnels, les feed-back élaborés sont plus efficaces pour l'apprentissage que les feed-back de vérification (Bosc-Miné, 2014, p. 325).

Cependant, plusieurs études ont montré que « *the amount of information (i.e., feedback complexity) was not significantly related to feedback effects* »⁸ (Shute, 2008, p. 159). En particulier, Shute rapporte même que « *more complex versions of feedback had a small effect on students' ability to correct their own errors, and the least complex feedback (i.e., correct answer) demonstrated greater learner benefits in terms of efficiency and outcome than complex feedback* »⁹ (Shute, 2008, p. 161). Ainsi, les rétroactions les plus complexes à la fois à mettre en œuvre et à la fois en termes d'informations données à l'apprenant ne sont pas forcément les plus efficaces en termes d'apprentissage. Plusieurs raisons peuvent expliquer cela : une trop grande quantité d'informations que l'apprenant ne parvient pas à appréhender, des rétroactions en dehors de la ZPD de l'apprenant, des rétroactions apportant des aides trop particulières et peu adaptables à d'autres tâches, etc.

Nous considérons ces travaux en psychologie ou dans le domaine des EIAH avec précautions. En effet, les termes employés pour décrire les types de rétroactions (« *information relating to the target topic* », « *why the incorrect answer is wrong* », « *the learner's specific errors or misconceptions* ») et « l'efficacité » de telle ou telle rétroaction sont assez peu précis. En particulier, ils ne permettent pas de dire si les rétroactions se placent au niveau technique ou technologique (cf. section 2.1.3), par exemple. Ils n'évoquent pas non plus la ZPD de l'apprenant même si, comme nous allons le voir, la question des capacités de l'apprenant est prise en compte.

8. Traduction personnelle : « la quantité d'informations (c'est-à-dire la complexité de la rétroaction) n'était pas liée de manière significative aux effets de la rétroaction ».

9. Traduction personnelle : « les versions plus complexes des rétroactions ont eu un petit effet sur la capacité des étudiants à corriger leurs propres erreurs, et la rétroaction la moins complexe (c'est-à-dire donner la bonne réponse) a démontré de plus grands avantages pour l'apprenant en termes d'efficacité et de résultats que la rétroaction complexe ».

c. Des rétroactions en fonction des capacités de l'apprenant

La prise en compte des capacités des apprenants¹⁰ est une partie importante de la construction des rétroactions. Les études montrent par exemple que « *high achievers need less specific feedback, as they possess the necessary skills to identify errors and are also more likely to actively seek the correct information themselves* »¹¹ (Salamonson, Everett, Koch, & Frost, 2008, p. 13). Ainsi, plus l'apprenant est compétent dans un domaine et plus le niveau de difficulté des tâches augmente, moins des rétroactions spécifiques sont nécessaires (Mason & Bruning, 2001, p. 16). Pour ces apprenants, une rétroaction de vérification (Shute, 2008, p. 166) ou une rétroaction élaborée liée au savoir en jeu leur permettant de déterminer eux-mêmes où se trouvent les erreurs (Mason & Bruning, 2001, p. 15) sont les plus adaptées.

En revanche, les rétroactions élaborées sont plus adaptées aux apprenants en difficulté ou ayant peu de connaissances du domaine étudié (Shute, 2008, p. 166). En effet, ceux-ci ne sont pas forcément en mesure d'interpréter les rétroactions les plus générales concernant le savoir en jeu alors que les rétroactions liées à leurs réponses leur permettent de se concentrer sur les erreurs identifiées (Mason & Bruning, 2001, p. 15).

Enfin, les études ont montré que « *there were no significant differences between verification and elaborated feedback for middle-ability students, but both of these types of feedback were superior to no feedback* »¹² (Shute, 2008, p. 166).

d. Moment pour délivrer une rétroaction

De manière générale, les études distinguent deux types de rétroactions : les rétroactions immédiates et les rétroactions différées. Pour les apprenants en difficulté, Mason et Bruning (2001) conseillent de n'employer que des rétroactions immédiates. Pour les apprenants les plus à l'aise, le type de rétroaction dépend alors de la difficulté¹³ de la tâche en jeu. Pour les tâches les plus faciles, ils recommandent

10. Ici, « capacités de l'apprenant » est à prendre dans un sens assez général. Les études mentionnées dans cette section se contentent de distinguer les très bons élèves, les élèves en difficulté et les élèves de niveau intermédiaire.

11. Traduction personnelle : « les meilleurs étudiants ont besoin de rétroactions moins spécifiques, car ils possèdent les compétences nécessaires pour identifier les erreurs et sont également plus susceptibles de rechercher eux-mêmes activement les informations correctes ».

12. Traduction personnelle : « il n'y avait pas de différences significatives entre la rétroaction de vérification et la rétroaction élaborée pour les étudiants de niveau intermédiaire, mais ces deux types de rétroactions étaient supérieurs à l'absence de rétroaction ».

13. Nous parlons intentionnellement de difficulté de la tâche, de tâches faciles et difficiles ici pour ne pas employer le vocabulaire lié à la théorie de l'activité en didactique des mathématiques que nous avons introduit dans la section 2.2.

d'utiliser des rétroactions immédiates, tandis qu'ils conseillent d'implémenter des rétroactions différées pour les tâches plus difficiles.

Dans le cadre du projet *MindMath*, nous employons trois types de rétroactions :

- au cours de la résolution, l'élève peut appuyer sur le bouton « aide », le logiciel envoie alors une rétroaction qui donne des indices pour résoudre la tâche. Plus l'élève appuie sur ce bouton, plus l'aide apportée prend à sa charge l'activité mathématique en jeu. Nous précisons cet aspect dans la section 8.4 ;
- après la résolution, l'élève appuie sur le bouton « valider », le logiciel envoie alors une rétroaction qui valide ou invalide la réponse de l'élève. Si la réponse est erronée, la rétroaction doit donner les moyens à l'élève de la modifier. Si la réponse est correcte, la rétroaction peut simplement la valider ou donner des informations supplémentaires à l'élève comme nous allons le voir par la suite ;
- si l'élève ne fait rien pendant un temps prédéterminé, le logiciel envoie alors une rétroaction pour l'inciter à résoudre la tâche et/ou le guider dans la résolution.

La présence d'un bouton « aide » est un sujet de discussions dans les études sur les rétroactions. Selon Chevalier, « dans le cas où la rétroaction est annoncée, l'élève sait qu'il peut faire des tentatives, il peut prendre des risques, il sait aussi qu'il recevra de l'information sur son action. [...] On peut aussi trouver des élèves qui attendent l'évolution de la situation en pensant qu'elle deviendra plus accessible et refusent d'engager des connaissances » (Chevalier, 1992, p. 29). Dans le cadre de notre travail, nous considérons que l'utilisation du bouton « aide » revient à appeler le professeur dans une situation de blocage. Cette utilisation fait partie des informations que le logiciel garde en mémoire pour élaborer les parcours d'apprentissage des élèves.

8.2.2 Quelques recommandations générales pour la création de rétroactions

En accord avec les études qu'elle a recensées, Shute donne quelques recommandations pour construire des rétroactions pertinentes (Shute, 2008, pp. 177-181) :

- la rétroaction doit se concentrer sur la tâche et sa résolution, non sur l'apprenant lui-même (une rétroaction ne devrait pas être « tu es un bon/mauvais élève » par exemple) et encore moins sur les autres apprenants (pas de comparaisons entre apprenants). Les rétroactions ne doivent donc pas chercher à décourager l'apprenant ou à faire baisser son estime de lui-même, elles ne doivent pas non plus le louer ;

- les rétroactions élaborées favorisent l'apprentissage, de plus, il vaut mieux chercher l'apprentissage que la performance sur une tâche précise ;
- le nombre et la taille des rétroactions doivent être gérables par l'apprenant ;
- les rétroactions doivent être précises et claires, elles doivent également être les plus simples possibles (une seule vérification, un seul indice, etc.) mais pas simplistes ;
- les rétroactions doivent clarifier le(s) but(s) à atteindre, dire clairement à quel point la tâche est réussie ou non et ce qu'il faut faire pour atteindre le(s) but(s) ;
- les rétroactions doivent être non-biaisées, objectives et soit écrites, soit données par un ordinateur (qui est plus facilement perçu comme non biaisé). Cependant, il peut être intéressant de ne pas se limiter à du texte (dessins, schémas mais aussi vidéos) ;
- une rétroaction doit arriver après que l'apprenant a essayé de résoudre la tâche ;
- une rétroaction ne doit pas interrompre l'apprenant alors qu'il travaille à la résolution de la tâche ;
- il vaut mieux éviter les indices de plus en plus précis qui finissent par donner la réponse attendue au risque que les apprenants en abusent ;
- de manière générale, il vaut mieux minimiser les analyses et diagnostics d'erreurs car ceux-ci sont rarement assez complets et précis pour justifier leur coût par rapport aux bénéfices sur les apprentissages.

Concernant spécifiquement l'adaptation des rétroactions à l'apprenant, Shute recommande :

- pour les « bons élèves », préférer des rétroactions différées et des rétroactions de vérification peuvent suffire ;
- pour les apprenants en difficulté, préférer des rétroactions immédiates et des rétroactions assez directives (des indices ne suffisent généralement pas), voire des rétroactions proposant une structure accompagnant la résolution (« *scaffolding* »).

Par la suite, nous verrons comment nous mettons en œuvre ces différents conseils et pourquoi nous en écartons certains.

8.3 Rétroactions en didactique des mathématiques

Dans cette section, nous reprenons la typologie des preuves présentée dans la section 8.2.1, en particulier les notions de rétroactions de vérification ou élaborées. Nous revenons maintenant à une étude dans le champ de la didactique des mathématiques. Nous nous intéressons d'abord à la notion d'étayage dans un contexte d'interactions entre un professeur et un élève, puis à la mise en œuvre de rétroactions dans différents logiciels fondés didactiquement (APLUSIX, GEOGEBRATUTOR) ou qui ont fait l'objet d'analyses didactiques (bases d'exercices en ligne).

8.3.1 Étayages

Dans cette section, nous nous intéressons à la notion d'étayage, d'abord à partir de travaux en psychologie puis en didactique des mathématiques avec le travail de Soury-Lavergne (1998, 2003).

À l'origine de la notion d'étayage, nous trouvons celle de ZPD au sens de Vygotski (1985 [1934]) que nous avons introduite dans la section 2.2.2. Ainsi, selon Vygotski, l'enfant peut réaliser des tâches mettant en jeu des conceptions scientifiques qui dépassent son niveau effectif de développement avec l'aide d'un adulte, en particulier de l'enseignant pour les situations de classe (Soury-Lavergne, 1998, pp. 32-33).

Brüner s'appuie sur ces travaux pour étudier le rôle de l'adulte (nous nous concentrerons sur l'enseignant) dans l'organisation de la tâche que doit résoudre l'enfant (nous nous concentrerons sur l'élève). Il introduit ainsi la notion d'étayage : « ce système de support fourni par l'adulte à travers le discours, ou la communication plus généralement, est un peu comme un "étayage" à travers lequel l'adulte restreint la complexité de la tâche permettant à l'enfant de résoudre des problèmes qu'il ne peut accomplir tout seul » (Brüner, 1983, p. 288).

Il distingue ainsi six fonctions du tuteur (qui est ici une personne) : l'enrôlement de l'élève, la réduction des degrés de liberté, le maintien de l'orientation, la signalisation des caractéristiques déterminantes, le contrôle de la frustration et la démonstration ou « présentation de modèles de solutions pour une tâche » (Brüner, 1983, chapitre 10). Nous verrons par la suite que nous nous intéressons surtout à la réduction des degrés de liberté, à la signalisation des caractéristiques déterminantes et à la présentation de modèles qui sont en lien avec le contenu mathématique en jeu dans la tâche.

Cependant, selon Soury-Lavergne (1998), Brüner ne problématise pas « la question du rapport entre un comportement observé et les connaissances qui en sont à l'origine ».

Elle reprend donc le concept d'étayage en lien avec les situations d'apprentissage des mathématiques : « les interventions étayantes de l'enseignant, en référence aux interactions de tutelle décrites ci-dessus, peuvent prendre la forme d'une structuration de la tâche de l'élève en indiquant les caractéristiques pertinentes, en validant la réalisation d'une étape intermédiaire et en rappelant l'objectif à atteindre. Cela permet momentanément à l'élève de mieux lire et exploiter les feed-back de la situation » (Soury-Lavergne, 2003, p. 36).

Dans cette thèse, nous n'étudions pas la gestion de classe et les interactions entre enseignant et élèves (c'est un travail que nous avons commencé à mener et qui constitue une de nos perspectives). C'est l'EIAH qui apporte un étayage à l'élève lorsque celui-ci appuie sur le bouton « aide », le bouton « valider » ou s'il reste inactif pendant un moment. Cependant, nous reprenons l'idée de structurer la tâche de l'élève, de valider son résultat, de rappeler l'objectif à atteindre et de l'aider à exploiter les rétroactions directes de l'environnement de géométrie dynamique (cf. section 8.1.2).

8.3.2 Place et rôle des rétroactions dans des logiciels ou des bases d'exercices en ligne

Dans cette section, nous étudions deux logiciels dont les rétroactions ont fait l'objet d'une construction et d'une analyse didactiques : le logiciel APLUSIX en algèbre (Bouhineau & Nicaud, 2006) et le logiciel GEOGEBRATUTOR en géométrie (Tessier-Baillargeon, 2015). Nous nous attardons ensuite sur une analyse dans le cadre de la théorie de l'activité en didactique des mathématiques de plusieurs bases d'exercices en ligne proposée par Cazes et Vandebrouck (2008).

a. APLUSIX

Le logiciel APLUSIX permet notamment aux élèves de travailler le calcul littéral sur des expressions algébriques et de résoudre des équations. L'élève peut écrire chaque étape de sa résolution, le logiciel lui indiquant au fur et à mesure si sa solution est « inachevée » (pour les développements et factorisations d'expressions) ou « non comparable » (pour les résolutions d'équation) ou, en mode entraînement, qu'il peut appuyer sur le bouton « vérifier ». Ce bouton « vérifier » indique « non égal » (pour le calcul sur les expressions) ou « non équivalent » (pour les équations) lorsque la solution est incorrecte, et affiche une coche verte lorsque la solution est correcte (que ce soit un calcul intermédiaire ou la réponse finale). Un autre bouton, le bouton

« fin », permet la vérification finale de la résolution de l'élève. Cette fois, le résultat sous la forme d'une expression ou d'une équation est noté comme « non résolu » ou « presque résolu » selon le degré de simplification que doit encore appliquer l'élève.

Selon Bouhineau et Nicaud, « la plus évidente des rétroactions fournies par le système est d'offrir à l'écran une représentation visuelle, fidèle, immédiate et continue de l'objet algébrique (expression ou raisonnement) sur lequel l'utilisateur travaille » (Bouhineau & Nicaud, 2006, p. 345). En plus de cette rétroaction, le logiciel propose ce que Bouhineau et Nicaud appellent des « rétroactions épistémiques » :

- des rétroactions syntaxiques : répondent à la question est-ce que l'expression algébrique est syntaxiquement correcte et bien définie ?
- des rétroactions sémantiques : répondent à la question est-ce que le raisonnement poursuivi est sémantiquement correct (est-ce qu'il est juste) ?
- des rétroactions stratégiques : relatives à l'avancement de la résolution.

Ces rétroactions apparaissent sur l'image 8.1¹⁴.

Développer et réduire

$x(6x-4) - 3x(4-5x)$	
$6x^2 - 4x - 12x + 15x^2$	✓
$3 \times 7x^2 - 4x \times 4$	✓
$21x^2 - 16x$	✓
$5x$	✗ Non égal

Fin

Calculs auxiliaires

?

×	+	↶	↷	←	↑	↓	→	✖	✂			
x	y	z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
a	b	()	,	+	-	×	$\frac{a}{b}$	a^n	\sqrt{a}	📄	
Texte	=	≤	≥	ou	$\begin{cases} x=a \\ z=c \end{cases}$	↶	Δ	↷	↶	↷		

Image 8.1 – Exemple de développement d'une expression algébrique dans l'environnement APLUSIX

La coche verte indique à l'élève que l'expression est correctement développée. La croix rouge lui indique que la quatrième expression est erronée et le logiciel précise pourquoi d'une façon très générale (« non égal »). Ainsi, les coches vertes

14. Image tirée du site : <https://aplusix.org/siteTemplate.php?lang=fr&page=gallery.php&gallery=2>.

ne concernent que l'aspect algébrique, elles indiquent si les expressions ont bien la même dénotation que l'expression initiale, quel que soit leur sens. Le bouton « fin » concerne l'exercice en cours et permet de dire s'il est résolu ou non (ici, si l'expression est développée et réduite au maximum).

Dans le cadre des parcours d'apprentissage que nous concevons, nous gardons l'idée d'afficher des coches pour valider les éléments de la figure construits par l'élève, ainsi que celle d'une explication lorsque la figure ne correspond pas à ce qui est attendu.

b. **GEOGEBRATUTOR**

GEOGEBRATUTOR est un logiciel construit autour d'un système tutoriel qui soutient l'élève en situation de résolution de types de tâches de démonstration. Ce système tutoriel est décrit comme « un logiciel complexe qui se destine à soutenir l'élève en résolution de problèmes à l'aide d'un agent tuteur capable d'interaction intelligente et autonome avec l'élève » (Tessier-Baillargeon, 2015, p. 2).

Tessier-Baillargeon note que « peu de systèmes offrent des indices permettant à l'élève de déduire la prochaine étape de sa solution. L'intervention tutorielle offerte par les systèmes tutoriels qu'elle a analysés prend plutôt la forme d'une validation locale des inférences ou des énoncés soumis par l'élève et on recense peu de validation globale de démonstrations et encore moins d'annotation des solutions ou d'explication des erreurs » (Tessier-Baillargeon, 2015, p. 136).

Nous reprenons les notions de rétroactions de vérification et de rétroactions élaborées abordées précédemment pour décrire les rétroactions implémentées dans GEOGEBRATUTOR :

- des rétroactions de vérification « montrant l'évolution du cheminement au sein de chaque solution admissible sous forme de pourcentage de complétion » (Tessier-Baillargeon, 2015, p. 157) ;
- des rétroactions de vérification dites « sémaphoriques » sous forme d'émoticônes (potentiellement accompagnées d'un texte, par exemple « essaie encore ») : « les rétroactions non verbales négatives [...] indiquent que le système tutoriel ne reconnaît par l'énoncé soumis comme faisant partie des solutions admises au problème. Celle-ci sont illustrées par un émoticône qui dépeint un visage incertain (:\). Par ailleurs, les messages de répétition et de confusion entre réciproques sont aussi précédés d'un émoticône évocateur (:|). Les rétroactions non verbales positives [...], illustrées naturellement par un émoticône souriant

- (:)) confirment rapidement à l'élève l'importance de sa dernière action. En fait, l'ajout de rétroactions non verbales aux facettes du système tutoriel résulte de l'observation de l'importance de ces rétroactions en contexte d'échange entre un réel enseignant et son élève » (Tessier-Baillargeon, 2015, p. 190) ;
- des rétroactions élaborées donnant des indices en langage naturel (Tessier-Baillargeon, 2015, p. 168). Celles-ci peuvent être générales, par exemple « as-tu ciblé ce que tu cherches à démontrer ? » ou, pour un problème donné, « on te demande de démontrer qu'un quadrilatère avec trois angles droits est nécessairement un rectangle. Sais-tu comment le prouver ? ». Elles peuvent faire référence à des éléments précédemment fournis par l'élève, par exemple « quels antécédents sont nécessaires pour démontrer le résultat suivant : segment BN = segment DM ? ». Elles peuvent se présenter sous la forme de « messages de dernier recours », par exemple « essaie d'écrire : segment BN = segment DM » qui prend en charge une partie de l'activité de démonstration en demandant à l'élève de démontrer un résultat intermédiaire bien choisi. Enfin, pour une tâche donnée, elles peuvent être de plus en plus directives selon les besoins de l'élève, par exemple « recherche des justifications concernant les triangles d'aires égales » puis « quelle relation entre les aires des triangles ABC et ACD peut être déduite ? » puis « as-tu mentionné ce que représente le segment DM par rapport au triangle ACD ? ».

Dans le cadre des parcours d'apprentissage que nous construisons, nous reprenons l'idée des rétroactions élaborées sous forme de questions posées à l'élève. En effet, nous faisons l'hypothèse que celles-ci engagent l'élève à répondre à la question posée et relance donc son activité de résolution. De plus, nous proposons également des rétroactions de plus en plus précises et directives.

c. Bases d'exercices en ligne

Les bases d'exercices étudiées dans ce paragraphe n'ont pas été spécialement conçues par des chercheurs en didactique des mathématiques. De plus, Cazes et Vandebrouck (2008) ne cherchent pas à proposer une situation didactique particulière mais plutôt à analyser leur utilisation en « classes ordinaires ». Cette étude dans le cadre de la théorie de l'activité en didactique des mathématiques (cf. 2.2) nous apporte un autre point de vue sur l'intérêt et l'utilisation que peuvent faire des élèves des rétroactions implémentées dans un logiciel.

Cazes et Vandebrouck ont observé des élèves de seconde et du supérieur utilisant

les bases d'exercices en ligne (libres ou propriétaires) EULER¹⁵, MATHENPOCHE¹⁶, PARASCHOOL¹⁷, UNIVERSITÉ EN LIGNE¹⁸ et WIMS¹⁹.

Ces différentes bases d'exercices ont des approches différentes des rétroactions. Concernant les rétroactions arrivant après la résolution de l'exercice, certaines, par exemple, ne donnent jamais la bonne réponse. Elles renvoient une rétroaction de performance (« juste », « faux » ou une note), voire une rétroaction plus élaborée relative à la réponse de l'élève. Par exemple, si l'élève doit trouver les paramètres d'une fonction, le logiciel affiche le graphe de la fonction erronée qu'il a proposée (cf. image 8.2) mais l'élève doit refaire l'exercice plusieurs fois pour tenter de le comprendre.

Exercice. Soit $f(x)$ une fonction réelle définie sur l'intervalle $[-0.5, 0.5]$, par les formules suivantes.

$$f(x) = \begin{cases} a_1 + a_2 x & \text{si } x < 0 ; \\ 2\cos(x) + 3\sin(x) & \text{si } x \geq 0 . \end{cases}$$

Veuillez trouver les valeurs des paramètres a_1, a_2 telles que $f(x)$ soit continue et dérivable d'ordre 1.

Vous avez donné la réponse : $a_1 = 2, a_2 = 0$, donc

$$f(x) = \begin{cases} 2 + 0x & \text{si } x < 0 ; \\ 2\cos(x) + 3\sin(x) & \text{si } x \geq 0 . \end{cases}$$

Cette réponse n'est pas juste. $f(x)$ est continue mais elle n'est pas dérivable.

Votre note : 5/10.

Graphe de $f(x)$ selon votre réponse :

Image 8.2 – Rétroaction du logiciel WIMS pour la recherche des paramètres d'une fonction réelle continue et dérivable (Cazes & Vandebrouck, 2008, p. 155)

15. Lien vers EULER (porté sur WIMS depuis l'étude) : <https://euler-ressources.ac-versailles.fr/wims/> [consulté le 07/05/2021].

16. Lien vers MATHENPOCHE : <https://mathenpoche.sesamath.net/> [consulté le 07/05/2021].

17. Lien vers PARASCHOOL : <https://www.paraschool.com/> [consulté le 07/05/2020].

18. Lien vers UNIVERSITÉ EN LIGNE : <http://uel.unisciel.fr> [consulté le 07/05/2021].

19. Lien vers WIMS : <https://wims.univ-cotedazur.fr> [consulté le 07/05/2021].

Cazes et Vandebrouck notent que « cela peut constituer un obstacle à [sa] compréhension ou favoriser une activité mathématique biaisée par rapport à l'activité mathématique attendue » (Cazes & Vandebrouck, 2008, p. 154). D'autres bases d'exercices donnent la réponse correcte et l'accompagnent même d'un message explicatif, par exemple pour expliciter la technique supposément mise en œuvre par l'élève pour résoudre l'exercice. Certaines bases proposent également une aide à l'élève après une première réponse erronée. Aucune des bases étudiées ne semble proposer des rétroactions partant de la réponse de l'élève pour l'amener vers la solution correcte.

La plupart de ces bases d'exercices proposent également des aides accessibles au cours de la résolution des exercices. Ces aides sont soit instrumentales (elles concernent la manipulation du logiciel et de ses outils), soit mathématiques : « dans ce cas, ce sont généralement des rappels de cours ou des indications de méthode qui modifient l'activité des élèves en réduisant les adaptations à leur charge. Cela peut être également des explications sur des difficultés précises... Ces aides peuvent donc modifier l'activité des élèves sur les tâches prescrites ou même modifier les tâches elles mêmes » (Cazes & Vandebrouck, 2008, p. 158). Par exemple, la base d'exercices UNIVERSITÉ EN LIGNE propose un bouton « coup de pouce » pour la tâche « quelle est la nature de la suite de terme général $u_n = [2 \sin \frac{1}{n} + \frac{3}{4} \cos n]^n$ » qui affiche l'aide : « comparer, à partir d'un certain rang, à une suite géométrique » (Cazes & Vandebrouck, 2008, p. 160).

Au cours de leurs observations, Cazes et Vandebrouck notent à plusieurs reprises que les rétroactions proposées à l'élève (soit à la validation, soit pendant la résolution de l'exercice) ne relèvent pas de sa ZPD. Elles ne permettent pas à l'élève de comprendre son erreur et de proposer une autre solution à partir d'une technique plus attendue. En effet, soit la rétroaction ne reprend pas la technique (erronée ou ancienne) de l'élève pour lui expliquer pourquoi elle ne fonctionne pas et, au contraire, lui propose directement une autre technique en apparence beaucoup plus compliquée (parfois simplement parce qu'elle est difficile à expliquer à l'écrit). Soit la rétroaction est trop décontextualisée par rapport à l'exercice proposé. Par exemple, à une élève de lycée professionnel en difficulté avec la résolution des équations $5 + x = 12$, $8 - x = 3$, $x + 11 = 20$ et $x - 10 = 6$, le logiciel PARASCHOOL propose l'aide présentée sur l'image 8.3. Cette aide, très générale ne guide pas l'élève en difficulté qui résout les équations qui lui sont proposées en additionnant ou soustrayant les valeurs numériques des équations (sans logique apparente) et en affectant à son résultat un signe plus ou moins jusqu'à ce que le logiciel valide sa réponse (Cazes & Vandebrouck, 2008, p. 168).

$x + a = b$	$x - a = b$	$a + x = b$	$a - x = b$
$x = b - a$	$x = b + a$	$x = b - a$	$x = a - b$

Image 8.3 – Rétroaction du logiciel PARASCHOOL pour l'exercice résoudre les équations $5 + x = 12$, $8 - x = 3$, $x + 11 = 20$ et $x - 10 = 6$ (Cazes & Vandebrouck, 2008, p. 168)

Mais même quand les rétroactions relèvent de la ZPD de l'élève, le travail d'interprétation des rétroactions est difficile (Cazes & Vandebrouck, 2008, p. 183). Par exemple, Cazes et Vandebrouck observent une élève de seconde qui résout une série d'exercices de recherche graphique d'antécédents et d'images par une fonction. Celle-ci oublie une solution dans sa réponse, le logiciel lui indique alors qu'elle a faux et lui montre la correction. Or, les valeurs affichées dans la correction comportent deux décimales alors que l'élève n'a proposé que des solutions à une décimale (comme l'indiquait l'énoncé) : « elle attribue de ce fait son erreur non pas au fait qu'il lui manque une solution mais au fait qu'elle n'a pas pu trouver toutes les décimales parce qu'elle n'a pas réussi à se servir de la loupe » (Cazes & Vandebrouck, 2008, p. 182).

Quand la rétroaction relève de la ZPD de l'élève, que l'élève l'interprète correctement et qu'il est dans une logique d'apprentissage (« lorsque l'élève semble chercher “un peu plus” que l'obtention du résultat » (Cazes & Vandebrouck, 2008, p. 184)), la rétroaction peut jouer le rôle d'une aide constructive (Cazes & Vandebrouck, 2008, p. 186). Elle permet alors à l'élève de trouver le résultat de l'exercice concerné mais aussi de transférer une certaine partie des connaissances mises en jeu dans l'exercice à d'autres contextes.

Nous partons de ces résultats pour implémenter les rétroactions du logiciel MINDMATH. En effet, nous cherchons à élaborer des rétroactions relevant de la ZPD de l'élève. Pour ce faire, comme nous le verrons par la suite, les rétroactions sont adaptées au mode de justification de l'élève et s'appuient également sur les techniques qu'il met en œuvre et les erreurs qu'il fait.

8.4 Modélisation didactique des rétroactions

8.4.1 Explicitation de certains choix concernant les rétroactions

Nous suivons la plupart des conseils proposés par Shute (2008) que nous avons développés dans la section 8.2.2. Ainsi, les rétroactions :

- se concentrent sur la tâche et sa résolution, non sur l'élève en tant qu'individu et sont fournies par le logiciel lui-même offrant une plus grande objectivité aux yeux des élèves ;
- sont des rétroactions élaborées qui cherchent à favoriser l'apprentissage plutôt que la performance sur une tâche précise en s'appuyant sur la réponse et les éventuelles erreurs de l'élève afin de lui donner des moyens de comprendre et mettre en œuvre la technique attendue ;
- sont présentées dans un format lisible et aéré, en nombre raisonnable et consultables à tout moment après leur première apparition pour permettre à l'élève de faire des allers-retours entre son travail et la ou les rétroaction(s) qu'il a reçue(s) ;
- n'interrompent pas l'élève dans sa résolution mais apparaissent à la demande de celui-ci (appui sur le bouton « aide ») ou après qu'il a validé sa réponse (appui sur le bouton « valider ») ;
- sont plus directives pour les élèves en difficulté.

Cependant, nous faisons le choix de proposer des rétroactions donnant des indices de plus en plus précis lorsque les élèves ne parviennent pas à résoudre la tâche à l'aide des premières rétroactions qui leur sont fournies. Nous définissons ainsi un nombre maximal de rétroactions et le nombre de rétroactions effectivement envoyées à l'élève est pris en compte dans le calcul du coefficient de réussite de la tâche.

Shute (2008) conseille de limiter les diagnostics d'erreurs qui sont souvent trop peu précis pour être vraiment bénéfiques. Cependant, dans le cadre du projet *MindMath* qui est un EIAH explicitement basée sur des recherches en didactique des mathématiques, nous décidons de nous appuyer sur un diagnostic d'erreurs fondé didactiquement que nous avons déjà abordé dans la section 7.3 et que nous présentons par la suite. Nous avons conscience que celui-ci ne peut pas être exhaustif et nous aborderons clairement ses limites. Les phases d'expérimentation prévues une fois l'EIAH MINDMATH développé seront l'occasion d'en tester la pertinence.

8.4.2 Modèle didactique des rétroactions

Pour élaborer les rétroactions qui sont renvoyées à l'élève utilisant l'EIAH MIND-MATH, nous nous appuyons sur différentes informations : des informations relatives à la famille de tâches en cours de résolution, des informations relatives au travail de l'élève sur la famille de tâches et de manière plus générale sur les familles de tâches du générateur de types de tâches.

Les informations du côté de la tâche sont :

- la ou les techniques attendue(s) ainsi que la ou les technologie(s) associée(s) définie(s) *a priori* compte tenu du niveau scolaire ;
- les catégories d'erreurs également définies *a priori*.

Les informations du côté de l'élève sont :

- la justesse (ou non) de sa réponse à la tâche en cours ;
- la stratégie mise en jeu et les catégories d'erreurs repérées dans sa résolution à partir de l'analyse *a priori* (cf. section 7.3.2) ;
- le mode de justification actuel de l'élève selon les praxéologies locales du domaine de la géométrie mises en oeuvre dans la technique de résolution (cf. section 7.3.1).

Ces informations nous permettent d'adapter les rétroactions envoyées à l'élève.

De plus, nous concevons une modélisation des rétroactions pouvant viser différents objectifs, selon la typologie que nous avons explicitée dans la section 8.2.1.b. :

- des rétroactions qui mettent en évidence les erreurs faites par l'élève, soit en pointant la différence entre ce que l'élève a construit et ce qui est demandé dans l'énoncé, soit en déplaçant (ou faisant déplacer) des points de la figure pour montrer qu'elle ne conserve pas les propriétés recherchées ;
- des rétroactions en lien avec la genèse instrumentale et les questions de transposition informatique, en particulier pour l'utilisation de l'outil « cercle » comme report de longueur ;
- des rétroactions pour donner des informations sur le savoir en jeu liées aux propriétés identifiées *a priori*, que ce soit des propriétés générales concernant les triangles ou les parallélogrammes quelconques, des propriétés propres aux différents types de triangles ou de parallélogrammes, ou la technologie liée à la structure du raisonnement déductif ;
- des rétroactions plutôt liées à l'heuristique et/ou à la technique à mettre en oeuvre, en lien avec la technique experte que nous avons explicitée dans le

MPR (cf. section 4.2.2). Ces rétroactions peuvent prendre la forme de questions posées à l'élève ou de corrigés-types accompagnés d'un discours expliquant les différentes étapes.

Dans la section suivante, nous nous attardons sur des choix que nous avons faits dans la mise en œuvre de ce modèle, que ce soit sur la forme ou le contenu des rétroactions. Nous donnons également des exemples de ces rétroactions.

Dans la section 8.4.4, nous verrons quelles rétroactions sont envoyées selon l'erreur et/ou la technique identifiées et selon le mode de justification de l'élève.

8.4.3 Forme et contenu des rétroactions

Dans cette section nous étudions deux aspects en particulier de certaines des rétroactions que nous concevons : les rétroactions sous forme de question et les rétroactions invoquant l'environnement papier-crayon.

a. Des rétroactions sous forme de questions

Selon Castela (2008), les chercheurs en mathématiques possèdent non seulement une grande connaissance théorique mais aussi un certain bagage pratique composé de façons de faire plus ou moins algorithmiques employées dans les tâches routinières de leur travail quotidien. Ainsi, « les ressources impliquées dans la résolution de problèmes débordent largement le strict cadre du savoir théorique » (Castela, 2008, p. 142). Comme nous l'avons déjà vu dans la section 2.2.2, il ne suffit pas de connaître les propriétés des figures concernées pour résoudre une tâche de construction. Il faut pouvoir organiser et hiérarchiser les démarches et le raisonnement au cours d'une argumentation heuristique pour appliquer les propriétés dans leur domaine de validité et mener à un résultat utilisable dans le cadre de l'exercice. Cela passe notamment par l'appréhension des figures (en particulier ici d'un schéma codé réalisé par l'élève) et le développement d'une argumentation heuristique (cf. section 3.3.3).

Il n'existe pas de discours pré-établi pouvant assurer la résolution de tous les types de tâches de construction, en particulier ceux exigeant la mobilisation d'une argumentation heuristique mettant en jeu plusieurs îlots déductifs pour construire une figure. Cependant, une série de questions peut potentiellement guider l'élève dans sa démarche heuristique puis l'élaboration de son raisonnement, comme le propose par exemple le mathématicien Pólya (1965 [1957]) : quelles données et quelles propriétés apparaissent dans l'énoncé ? Quelles propriétés faut-il faire apparaître pour pouvoir construire ? Quels outils de construction sont à disposition dans le milieu ? Quelles

propriétés ces outils de construction permettent-il de réifier ? Comment passer des propriétés initiales aux propriétés de la figure à construire en tenant compte des propriétés des outils de construction du milieu ? Ces questions correspondent à la fonction de « signalisation des caractéristiques déterminantes » des aides que nous avons vue dans la section 8.3.1. De plus, elles sont essentiellement des rétroactions plutôt liées à l'heuristique à mettre en œuvre que nous avons introduites dans la section 8.4.2. Ainsi, il y a des questions très générales qui appuient sur la nécessité d'élaborer un raisonnement, que ce soit en mettant l'accent sur les données de l'énoncé (« as-tu pris en compte toutes les données de l'énoncé ? », « as-tu fait un schéma codé de la figure à construire ? ») ou sur les propriétés à mobiliser (« quelle(s) propriété(s) du triangle/du parallélogramme à construire peux-tu utiliser dans ta construction avec les outils que tu as à disposition ? »). D'autres questions signalent des caractéristiques plus précises selon l'énoncé. Si la résolution de la tâche de construction s'appuie sur le calcul des angles du triangle, une rétroaction peut être « combien valent les angles du triangle ? ». De même avec les longueurs des côtés ou des diagonales pour les parallélogrammes.

Il est également possible de proposer des « rétroactions qui mettent en évidence les erreurs faites par l'élève » (cf. section 8.4.2) sous la forme de questions, en demandant par exemple : que se passe-t-il lorsque tu déplaces les points de ta figure sur l'écran ? La figure se déforme-t-elle ? Quelles propriétés ne sont plus conservées ?

Même si certaines de ces rétroactions ont un aspect procédural dans le sens où elles modifient l'activité *a minima* de l'élève, ces questions ont une visée constructive car elles ne permettent pas seulement la résolution de la tâche en cours. En effet, l'élève peut réutiliser ces questions générales de lui-même pour se guider dans la résolution d'autres tâches de construction.

b. Invoquer l'environnement papier-crayon

Un type de rétroaction courant lorsque l'élève travaille dans un environnement informatique consiste à invoquer l'environnement papier-crayon. Par exemple, Soury-Lavergne (2003) observe des enseignantes dans des situations de préceptorat distant médiatisé par un environnement de géométrie dynamique dans le cadre d'une expérimentation de *TéléCabri*²⁰. Ces enseignantes guident chacune un élève de 4^e ou

20. Il s'agit d'un projet mené par l'ancien laboratoire Leibniz de l'IMAG (Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble) entre 1994 et 2000 qui avait pour objet « le développement et l'analyse d'un dispositif d'enseignement à distance supporté par la téléprésence » (Soury-Lavergne, 2003, p. 11).

de 3^e pour la construction d'un carré à partir de ses côtés dans l'environnement CABRI. Elles disent alors : « imaginez que vous soyez avec votre règle et votre crayon sur votre cahier, qu'est-ce que vous feriez à partir de là ? » (Soury-Lavergne, 2003, p. 17) ou « si t'étais sur ton cahier [...] tu ferais quoi pour trouver le point C ? » (Soury-Lavergne, 2003, p. 22). Elles évoquent également clairement les outils de construction de l'environnement papier-crayon, en particulier la « règle » ou le « double-décimètre ».

Ce type de rétroaction paraît naturel puisque l'élève de collège est plus habitué à résoudre des tâches de construction dans l'environnement papier-crayon et nous avons déjà vu que le passage à l'environnement de géométrie dynamique et en particulier des instruments habituels pouvait le désemparer (cf. section 6.1.2). Cette rétroaction peut effectivement venir en aide à l'élève ou, au contraire, provoquer d'autres difficultés. Ainsi, l'évocation de l'environnement papier-crayon peut réussir « d'un point de vue heuristique car elle entraîne les mêmes décisions que ce soit dans l'environnement papier-crayon ou dans Cabri-géomètre » (Soury-Lavergne, 2003, p. 18). Cependant, comme nous l'avons vu dans le chapitre 6, les différences entre les deux environnements peuvent rendre inopérantes certaines techniques de l'environnement papier-crayon, en particulier lorsque l'élève a l'habitude de détourner les instruments à sa disposition (en utilisant son équerre comme règle graduée par exemple).

Dans la modélisation didactique des rétroactions que nous proposons, une rétroaction suggérant à l'élève de tracer un schéma codé de la situation renvoie indirectement à l'environnement papier-crayon (d'autant plus qu'à l'heure actuelle, l'élève ne peut pas tracer de schéma sur le logiciel MINDMATH).

8.4.4 Diagnostic des erreurs et envoi d'une rétroaction

Dans la section précédente, nous avons présenté le modèle des rétroactions. Dans le chapitre 7, nous avons également présenté le modèle de l'apprenant et en particulier la façon dont l'EIAH diagnostique son mode de justification à partir de l'analyse didactique *a priori* qui permet de relever des traces dans sa construction associées à des hypothèses sur les technologies erronées. L'envoi d'une rétroaction à l'élève se base sur le même processus.

Ainsi, selon la famille de tâches en cours, l'éventuelle erreur identifiée et selon l'hypothèse sur la technologie mise en œuvre par l'élève, nous déterminons *a priori* quelle rétroaction ou quel ensemble de rétroactions doit envoyer le logiciel. Les

éléments liés à l'éventuelle erreur et à l'hypothèse sur la praxéologie mise en œuvre par l'élève nous permettent de déterminer l'objectif de la rétroaction. Ainsi, si l'élève n'utilise pas l'outil « cercle » pour construire des points à égale distance d'un même troisième point, c'est la rétroaction liée à la transposition informatique et à la genèse instrumentale qui permettra de l'aider. Si l'élève n'utilise pas toutes les données de l'énoncé pour construire, le logiciel peut d'abord envoyer une rétroaction permettant de déstabiliser la réponse donnée en incitant l'élève à déplacer les points de sa figure qui se déformera. Dans un deuxième temps, il peut envoyer une rétroaction liée à la technique visée.

La prise en compte du mode de justification de l'élève sur les praxéologies locales en jeu permet de préciser le degré d'accompagnement des rétroactions envoyées à l'élève. Ainsi, pour un élève dont le mode de justification correspond au mode idoine, des questions sur la technique visée comme celles que nous avons présentées dans la section 8.4.3.a. peuvent suffire. En revanche, pour un élève dont le mode de justification correspond à un mode ancien, ces questions pourront être accompagnées d'un corrigé-type d'une famille de tâches proches de celle qu'il doit résoudre.

8.4.5 Implémentation et limites actuelles dans l'EIAH MIND-MATH

Pour développer les rétroactions de l'EIAH MINDMATH, nous travaillons en collaboration avec l'entreprise Tralalère qui emploie un professeur de mathématiques chargé de les rédiger en s'appuyant sur le modèle didactique que nous fournissons, et le LIP6 qui les implémente dans l'EIAH. Le LIP6 développe également un algorithme de recommandation des rétroactions.

Suivant les recommandations de Shute (2008) (cf. section 8.2.2), les rétroactions sont présentées dans un format lisible et aéré, en nombre raisonnable et sont consultables à tout moment après leur première apparition pour permettre à l'élève de faire des allers-retours entre son travail et la ou les rétroaction(s) qu'il a reçue(s). Sur l'image 8.4, on peut ainsi voir sur la droite la liste des rétroactions « courtes » qu'a reçues l'élève (cf. image 8.5) et qu'il peut consulter à tout moment. En cliquant dessus, il peut faire apparaître une fenêtre qui recouvre la tâche en cours et lui donne une rétroaction plus détaillée (cf. image 8.5).

Sur les images de la plateforme présentées ici, l'élève (fictive) résout une tâche de construction d'un triangle équilatéral à partir d'un de ses côtés et avec un constructeur d'angle. L'élève demande deux fois de l'aide. Les rétroactions reçues sont présentées

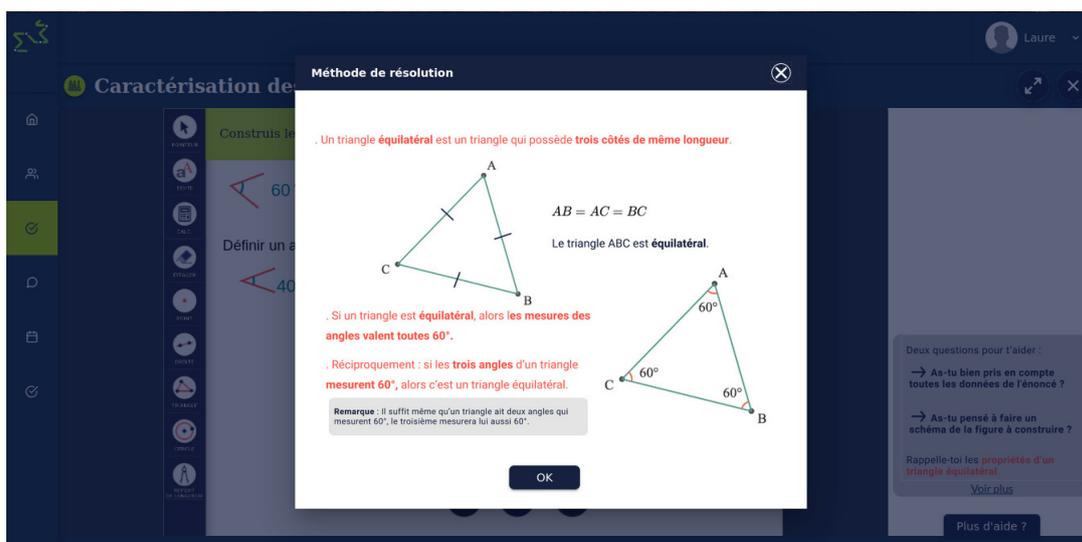


Image 8.4 – Fenêtre de l’élève résolvant un exercice sur l’EIAH MINDMATH

sur l’image 8.5.

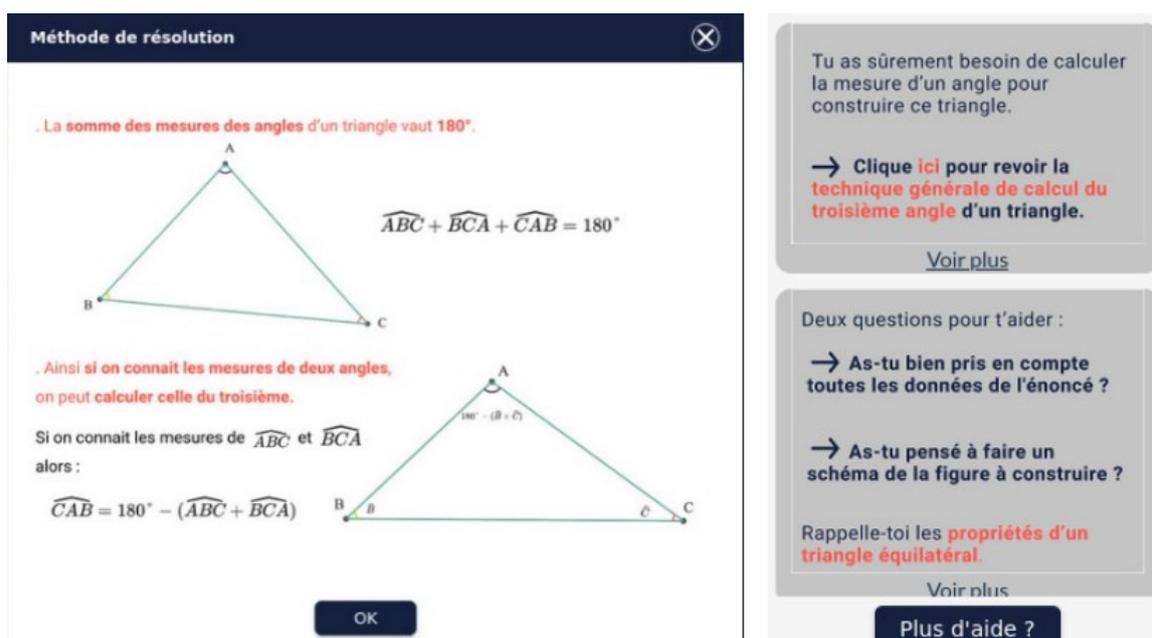


Image 8.5 – À droite, l’élève a reçu deux rétroactions (la première est en haut). Si elle clique sur la première, elle voit apparaître la rétroaction de gauche

Lorsque l’EIAH valide la construction de l’élève, il entoure le point construit et surligne les côtés du triangle en vert. De plus, une coche verte est affichée sur le triangle construit (cf. image 8.6). À cela, s’ajoute ensuite une mécanique de gamification, l’élève récoltant des médailles au fur et à mesure du parcours réalisé, mais nous ne développerons pas cet aspect.

Ainsi, une partie des rétroactions prévues dans le modèle didactique que nous

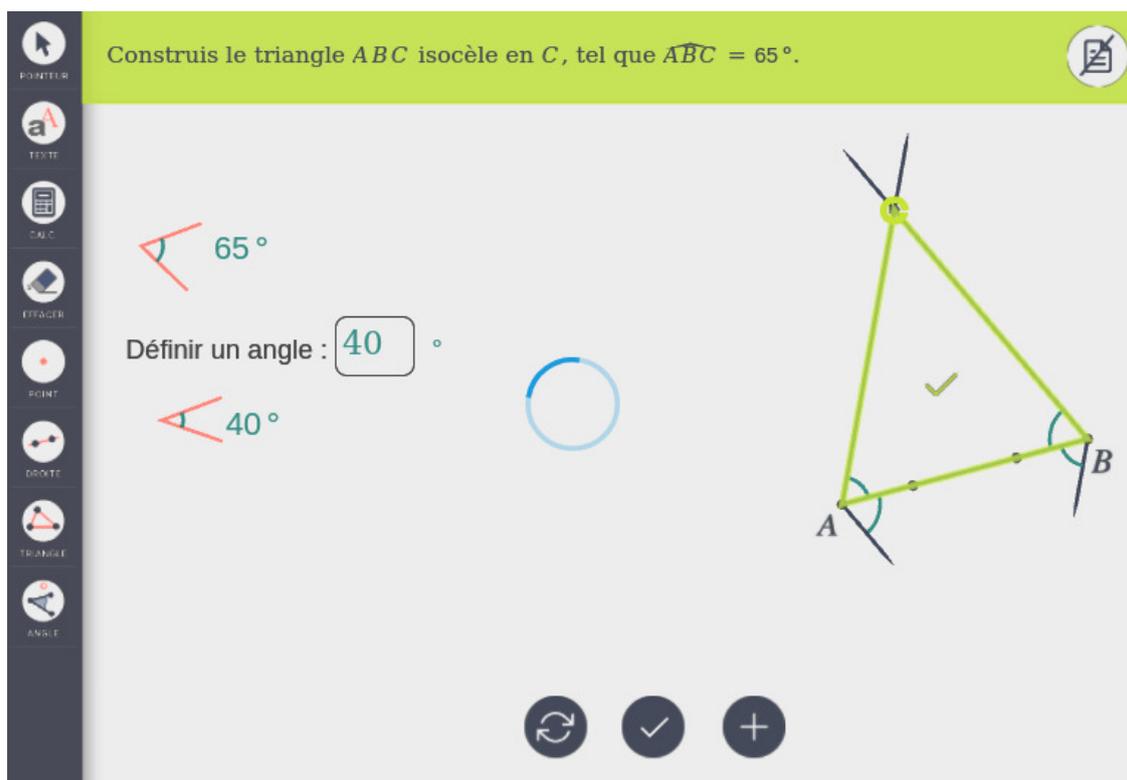


Image 8.6 – Validation du point C et du triangle construits par l'EIAH MINDMATH

avons présenté a été implémentée dans la plateforme. Cependant, les limitations logicielles que nous évoquons dans la section 7.3.3 impactent la mise en œuvre des rétroactions d'une façon similaire. Si le logiciel n'est pas en mesure de détecter les erreurs repérées *a priori* dans l'analyse didactique, il ne peut pas envoyer les rétroactions adaptées à l'élève.

De plus, l'algorithme de recommandation des rétroactions que les chercheurs du LIP6 implémentent en appui sur le travail didactique est encore en cours de test. Le modèle didactique n'a donc pas encore pu profiter des retours d'expérience pour être affiné et pour mieux correspondre à la réalité des élèves et des enseignants utilisant l'EIAH MINDMATH. Cette recherche déjà entamée en algèbre, notamment dans le rapport de stage Reiter (2020) co-encadré au LIP6 et au LDAR, est toujours en cours en géométrie et fait partie des perspectives de ce travail.