

Faire des exercices à données aléatoires et évaluation du raisonnement en Chimie

- Résumé** L'usage pédagogique des exercices en ligne est souvent contraint par le format limité des exercices et des réponses analysées, l'absence de base de données qui limite la quantité d'exercice à disposition et la rigidité du feedback aux erreurs commises par l'élève-étudiant. L'extension Stack de Moodle répond à ces limitations. Il permet de développer des exercices élaborés, comparables à des problèmes, dans tous les domaines de la chimie enseignées en licence, allant de la chimie générale à la chimie organique, en passant par la préparation aux TP et l'évaluation finale par examen en ligne.
- Mots-clés** Moodle, extension, Stack, exerciceur, aléatoire, correction automatique, retours spécifiques, arbre de réponse.
- Abstract** Stack, a Moodle extension to design Chemistry exercises with random data, personalized feedback and reasoning evaluation
- Stack is an open-source plugin for the Moodle learning environment, allowing the creation of automatically evaluated exercises. It offers a wide variety of formats for the exercise statement but also for the student answers (multiple-choice questions, numerical responses, literal expressions, graphical interactions, 3D animations...). It allows the use of random data (numerical, or selected from a database such as organic groups or thermodynamical informations) to generate the same exercise in a large number of versions. Furthermore, analyzing student responses through a response tree allows for detailed and personalized evaluation tailored to the errors made: it is even possible to assess the coherence of reasoning even if the provided numerical results are incorrect.
- Keywords** Moodle, plugin, Stack, exercise generator, random data, automatic grading, specific feedback, response tree.

L'enseignement hybride connaît ces dernières années une démocratisation importante dans le secondaire et le supérieur, en particulier avec les confinements liés à la pandémie de Covid-19. Cette période a permis de (re)découvrir les intérêts des outils numériques dans la pédagogie.

Le boom des exercices en ligne

Point de vue étudiant

Les plateformes d'exercices en ligne existent déjà depuis de nombreuses années, et leur nombre ne cessent de croître, tant leur utilisation se démocratise à tous les niveaux d'enseignement.

Proposés pour un travail personnel en asynchrone, les exercices peuvent offrir une véritable plus-value aux étudiants, dont ils favorisent l'autonomie. Si en plus l'exercice offre la possibilité de données aléatoires, cela ouvre un panel d'applications pédagogiques encore plus vaste : par exemple, en mode « formatif », les exercices peuvent être refaits plusieurs fois pour s'assurer de la bonne maîtrise de la notion, ou encore pour atteindre un objectif (note minimale par exemple), sans risque de réponse donnée « par cœur ». En mode « évaluatif », cela permet également de proposer des exercices différents à chaque étudiant, afin d'éviter le « travail collaboratif ».

Malheureusement leur usage pédagogique reste limité par de nombreuses contraintes :

- ♦ le format des exercices et des réponses attendues est souvent limité (QCM, champ de réponse unique, parfois des interactions sur une image). Il est en particulier difficile d'évaluer des expressions littérales.
- ♦ le manque d'adaptabilité du feedback aux erreurs commises par l'élève-étudiant (le feedback se contente généralement de

donner la bonne solution, sans analyse plus fine de l'erreur commise).

Point de vue enseignant

♦ Du point de vue logistique pour l'enseignant, la correction automatique allège considérablement la correction de copies... Dans le cas des grandes cohortes d'étudiants, cela évite en outre le recours à plusieurs correcteurs, toujours source de biais dans l'équité de correction, et donc de frustration des étudiants.

♦ Mais là encore, un certain nombre de contraintes limitent l'usage optimal de ces outils :

♦ la correction automatique, aussi agréable et équitable soit elle, présente souvent des limites : le retour (parfois appelé feedback) automatique est souvent peu spécifique, se contentant parfois de donner la bonne réponse attendue, sans analyse plus poussée des erreurs commises. Or toutes les erreurs ne se valent pas, et la note qui en découle mérite souvent d'être pondérée à sa « gravité ».

♦ En outre, la correction automatique peut pratiquer la « double peine » évaluative : une erreur commise dans une question préalable peut avoir des répercussions sur la validité des réponses ultérieures. Là où un correcteur humain évalue la cohérence du raisonnement, la correction automatique classique ne juge que sur les valeurs brutes : elle pénalisera l'erreur de départ mais aussi les réponses suivantes, logiquement différentes des valeurs attendues même si l'étudiant a fait preuve de cohérence entre ses réponses.

♦ Pour finir, l'aspect « chronophage » de la création de ces exercices en limite le nombre : la bibliothèque d'exercices mis à disposition des élèves et étudiants est donc souvent restreinte, ce qui limite la possibilité pour l'élève-étudiant de

Tester l'utilisation d'une formule - Ex :

$$\lambda_{\text{rayonnement}} = \frac{hc}{\epsilon_{\text{photon}}}$$

à calculer donnée

Valeur particulière => Paramètre aléatoire

Nettoyer la question | Tests de question et versions déployées

1. Un photon d'énergie 46.9 eV est associé à un rayonnement de longueur d'onde :
(écrire les résultats avec 3 chiffres significatifs)

o $\lambda =$ m

o $\lambda =$ nm

Figure 1 - Exercice simple à donnée numérique aléatoire.

retravailler une notion sur un nouvel exercice dont il ne connaîtrait pas déjà la réponse.

STACK, c'est quoi ?

STACK est une extension libre d'utilisation de Moodle créé par Chris Sangwin (The University of Edinburgh), Tim Hunt et Tim Lowe (The Open University)⁽¹⁾ qui répond à ces limitations. Il a été récompensé en 2017 aux « Collaborative Award for Teaching Excellence ».

Intégré à Moodle (système d'apprentissage en ligne le plus répandu en France et à l'International dans l'enseignement supérieur et la formation tout au long de la vie), il est très pratique à utiliser dans un parcours de formation hybride : le lien vers l'exercice est immédiat à partir de la page de cours, il est paramétrable au même titre que les autres activités Moodle et les notes obtenues sont directement intégrées au carnet de notes.

Il permet de rajouter un « type de question » (selon le vocabulaire consacré) sur la plateforme Moodle. STACK utilise un système de calcul formel (CAS) pour implémenter ces fonctions mathématiques. Un CAS fournit une bibliothèque de fonctions permettant de manipuler les réponses des étudiants et de générer des résultats tels que la fourniture de commentaires. L'utilisation du CAS peut également aider à générer des problèmes aléatoires mais structurés et des solutions fonctionnelles correspondantes. L'interprétation des formules mathématiques se fait via le CAS Maxima.

Initialement développé pour l'enseignement des mathématiques, nous l'avons adapté pour développer des exercices élaborés, comparables à des problèmes d'examen, dans tous les domaines de la chimie de licence : exercices de thermochimie, électrochimie, cinétique, chimie organique, également des préparations de TP dans lesquels les étudiants peuvent choisir eux-mêmes les quantités introduites, etc. Il se limite néanmoins aux exercices de type algorithmique.

Afin de fonctionner, l'extension requiert le moteur de calcul algébrique « Maxima » et le moteur de tracé graphique « Gnuplot ». Ces services peuvent être installés sur le serveur qui héberge Moodle ou alors sur un serveur dédié⁽²⁾.

Des exercices à données aléatoires au format très varié !

STACK permet de construire des exercices sur la base de données tirées au sort. Avec un seul fichier source, il est ainsi possible de créer un grand nombre de versions d'un même

exercice. Les formats de ces données aléatoires sont extrêmement très variés.

Données numériques aléatoires

Comme de nombreux exercices (dont Wims est le précurseur), STACK permet de construire des exercices autour d'une (ou plusieurs) donnée(s) numérique(s) que l'étudiant doit utiliser pour donner la réponse attendue : par exemple, dans l'exercice de la figure 1, l'étudiant doit calculer la longueur d'onde associée un photon d'énergie donnée – tirée au sort.

Il est également possible d'utiliser des valeurs numériques tirées aléatoirement pour construire des graphiques : en utilisant ensuite l'expression analytique de la courbe, on peut tracer « à la volée » la courbe correspondante. Cela évite notamment d'avoir à préparer une collection de courbes intégrées à l'exercice sous forme d'images construites au préalable, ce qui est souvent très fastidieux.

La figure 2 en montre un exemple sous forme d'un exercice basé sur une courbe de titrage acidobasique, construite avec les valeurs de concentrations ou de pK_A tirés au sort.

Peuvent également être ainsi envisagés des exercices sur des diagrammes E-pH avec concentrations de tracé choisies aléatoirement, ou encore des courbes intensité-potentiel avec des potentiels d'équilibre et des courants limites de diffusion choisis dans un intervalle défini.

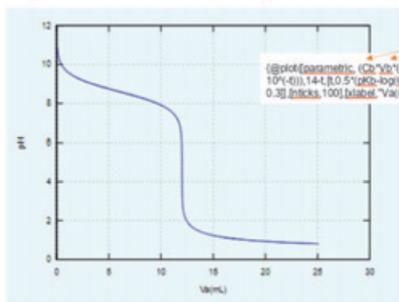
Données tirées au sort dans une base de données

L'exemple typique d'exercices basés sur la base de données est celui où l'étudiant doit fournir des informations sur un élément chimique tiré au sort dans la classification périodique (composition du noyau, configuration électronique, nombre d'électrons de valence, ions communs, bloc d'appartenance...), en ayant éventuellement pris soin, selon le niveau des étudiants et l'objectif de l'enseignant, de limiter les cas possibles aux éléments sans exceptions et/ou limités à certaines périodes (figure 3).

Il est également possible de créer des listes de substituants chimiques en code « smiles », que l'on tire au sort et que l'on greffe au code smiles d'une molécule « squelette » : on peut ainsi créer pour chaque version de l'exercice des molécules différentes, qu'il est également possible de représenter en 2D ou en 3D – au format Jsmol permettant de « manipuler » les molécules obtenues dans l'espace, par mouvement de la souris (figure 4).

Il peut également être intéressant de décliner un QCM (du type « sélectionner les affirmations exactes ») sur un thème en affichant différentes propositions tirées au sort parmi une base

Ex : Evaluer la capacité d'un étudiant à exploiter une courbe de titrage



Tirées au sort

```
[[plot([parametric, (Cb*Vb*(10^-pHb))/(10^-pHb)+10^(-4))^(10^(-14)/10^(-4)-10^(-4))], 144, 8, 0.5^2*(Cb*(log(10)-14+log(Ca)/log(10)-0.3) [ticks, 100] [label, "Vb(mL)"] [label, "pH"] [tjcs, 2] [size, 500, 500]@]]
```

Possibilité de tracer une courbe « à la volée » à partir de données tirées au sort

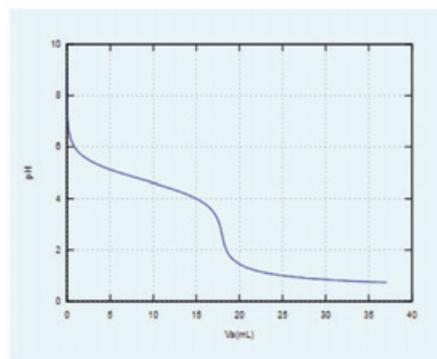


Figure 2 - Deux versions de la courbe donnée dans un exercice d'exploitation de résultat de titrage acide-base (tracé réalisé avec les données aléatoires de concentrations, de volume et de pK_A).

Déduire un certain nombre de propriétés atomiques à partir de la position de l'élément chimique dans le tableau périodique

Tableau périodique

Élément chimique tiré au sort

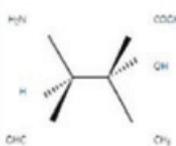
On s'intéresse à l'élément **S**.

D'après sa position dans la classification périodique, son ion le plus commun est l'ion **S**.

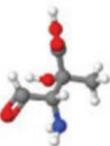
Figure 3 - Exercice simple avec donnée aléatoire choisie parmi une base de données (ici les éléments de la classification périodique).

* Légende de l'animation 3D :
 • Atome d'oxygène en rouge
 • Atome d'azote en bleu
 • Atome de chlore en vert
 • Atome de brome en marron
 • Atome d'iode en violet

Représentation de Cram de la molécule 1



Représentation en 3D de la molécule 1*



*Vous pouvez faire bouger la molécule de l'animation 3D avec votre souris pour la voir sous différents angles.

Représentation de Cram de la molécule 2



Tableau de données avec des infos sur une multitude de substituants

```
donnees : cons([ 1, "H", "H", "H", donnees_sansH]);
donnees : cons([ 19, "OCH<sub>3</sub>>", "CH<sub>3</sub>></sub>O", "OC"], donnees);
donnees : cons([ 12, "CHO", "OHC", "C=O"], donnees);
donnees : cons([ 14, "COOH", "HOOC", "C(=O)O"], donnees);
```

Tirage au sort de substituants par permutation aléatoire des lignes du tableau

```
subst_list : random_permutation (donnees);
```

Génération de la molécule à partir des substituants

```
molécule_smiles :
concat(subst_donne[4][4], "[C&commat;](", subst_donne[6][4], ")(", subst_donne[5][4], ")([C&commat;](", subst_donne[1][4], ")(", subst_donne[3][4], ")", subst_donne[2][4]);
```

Figure 4 - Exercice de stéréochimie avec tirage aléatoire des substituants de la molécule et de leur position sur le squelette de « Cram » (la vue 3D permet de faire bouger la molécule pour aider à visualiser dans l'espace).

- Sélectionner la ou les bonne(s) réponse(s) :
- 1 - Une pile en fonctionnement est un système à l'équilibre.
 - 2 - Le potentiel du pôle + d'une pile est supérieur au potentiel du pôle -.
 - 3 - On peut calculer le K° d'une réaction rédox grâce à la ddp de la pile en fonctionnement.
 - 4 - La réaction de fonctionnement d'une pile doit avoir une constante thermodynamique K° très inférieure à 1.
 - 5 - Une pile cesse de débiter lorsque sa ddp s'annule.
 - 6 - Il n'y a aucune bonne réponse.
- Sélectionner la ou les bonne(s) réponse(s) :
- 1 - Une pile cesse de débiter quand elle atteint l'équilibre thermodynamique de sa réaction rédox.
 - 2 - Une pile cesse de débiter lorsque sa ddp s'annule.
 - 3 - Si la cathode est constituée du métal réducteur du couple, sa masse diminue au cours du fonctionnement de la pile.
 - 4 - Les électrons circulent dans le circuit extérieur de la cathode vers l'anode.
 - 5 - La réaction de fonctionnement d'une pile est une réaction thermodynamiquement spontanée.
 - 6 - Il n'y a aucune bonne réponse.

Figure 5 - Différentes versions d'un même exercice de QCM.

Expressions littérales

2. Quotient de réaction de la RP :

- o Quelle est l'expression du quotient de réaction à l'équilibre $Q_{r,eq}$ en fonction de C et du taux de dissociation à l'équilibre a_{eq} que l'on notera **a_eq**. (on notera les multiplications avec le symbole "*" et la concentration standard C° en écrivant "C_0" - cette notation n'est pas la plus heureuse car il ne faut en principe pas confondre C° et C_0 , mais les limites de saisie par clavier nous l'imposent ici) :

$Q_{r,eq} =$

Contraintes de syntaxe

- opérations math.
- nom des paramètres

Interprétation préalable de la chaîne de caractères

=> permet à l'étudiant de corriger ses erreurs de syntaxe AVANT envoi de la réponse

$Q_{r,eq} = [(C^*a_{eq}^2)/(C_0*(1-a_{eq}))]$

Votre dernière réponse a été interprétée comme suit :

$$\frac{C \cdot a_{eq}^2}{C_0 \cdot (1 - a_{eq})}$$

Les variables trouvées dans votre réponses étaient : [C, C_0, a_eq]

Figure 6 - Exercice avec réponse attendue sous forme d'expression littérale : écran de l'étudiant lors de sa saisie de la réponse (interprétation de sa formule par le serveur avant envoi de la réponse).

de propositions en liant avec ce thème : les propositions différentes sont données dans un ordre variable, et avec un nombre de propositions exactes lui-aussi variable.

Il est à noter que la multiplication des cas par les données aléatoires aboutit parfois à des situations sans signification ou erronées. Il est possible d'éliminer ces cas lors de la conception de l'exercice grâce à un système de « déploiement » des versions qui seront ensuite proposées aux étudiants. Cela permet de dépister en amont les cas problématiques pour les éliminer ou d'adapter le code en conséquence.

Grande variété de réponses possibles

Les exercices STACK peuvent comporter un nombre important de questions, se rapprochant ainsi du format des problèmes classiques avec des questions interdépendantes.

Chacune peut avoir un format différent : il peut s'agir de **QCM** (avec propositions aléatoires, sous forme de listes radio, checkbox ou menu déroulant), **champ de réponse numérique**

(avec possibilité de choisir le degré de tolérance de la valeur numériques, avec ou sans unité), **champ de réponse avec chaînes de caractères**, tout comme de nombreux autres exercices.

Mais STACK offre également la possibilité de proposer des réponses sous forme d'expressions **littérales**, de lectures de courbes à paramètres ajustables avec curseurs, de points à placer sur un graphiques... Ces derniers points sont rendus possibles grâce au lien être STACK et les bibliothèques Maxima et JSXGraph. Par exemple, dans le cas des expression littérales, le serveur les interprète grâce au couplage avec le CAS Maxima. De plus, pour éviter les erreurs liées à la syntaxe de l'étudiant, son expression littérale « tapée en ligne » est interprétée par le serveur et affichée à l'écran sous sa forme « mathématique » avant l'envoi de la question, comme le montre la figure 6. L'élève-étudiant peut ainsi corriger une éventuelle faute de syntaxe (parenthèse oubliée, signe multiplié mal placé, etc.) qui l'aurait pénalisé indépendamment de la compétence ciblée

Retours avec arbre de réponse : des retours ciblés et une évaluation automatique optimisée

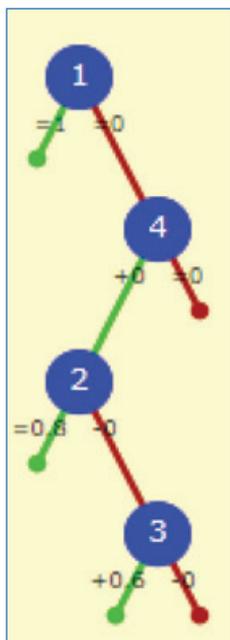


Figure 7 - Allure d'un arbre de réponse STACK (ici à 4 tests d'évaluation).

Les retours de STACK se créent sous forme d'arbres de réponse, constitués d'un ensemble de nœuds correspondant à un test booléen dont la réponse oriente vers une branche ou vers l'autre. Chaque branche est associée à un barème (positif ou négatif) et un feedback différents.

Classiquement, un exerciceur classique compare la valeur rentrée par l'étudiant à la valeur attendue (réponse alors comptée « juste » ou « fausse »). Aucune distinction n'est faite entre les réponses « fausses », quelle qu'en soit la raison : elles conduisent toutes au même retour (feedback), ce qui ne permet pas de souligner par exemple une erreur courante.

STACK, lui, permet de faire une distinction dans la nature des « mauvaises » réponses (figure 8) : certaines erreurs classiques (par exemple un oubli de conversion) peuvent ainsi bénéficier

d'un feedback spécifique, insistant sur l'erreur commise et aidant l'étudiant à mieux l'appréhender.

Cette distinction se paramètre au niveau de l'arbre de réponse, sous forme de nœud spécifique à l'erreur à commise, comme le montre la figure 9.

De même, lors d'un exercice dont les réponses dépendent d'autres réponses précédemment saisies par l'étudiant, il est possible de tenir en compte des erreurs précédentes pour ne pas pénaliser une seconde fois une erreur déjà pénalisée auparavant, parce qu'elle impacte les résultats suivants (figure 8).

La possibilité de concevoir des arbres de réponse tenant compte des valeurs saisies par l'étudiant permet de faire sur STACK des activités d'exploitations de TP : avec la

valeur expérimentale qu'il a obtenue en séance (par exemple un volume équivalent de titrage, *a priori* différent de celle d'un camarade), chaque étudiant peut calculer les grandeurs recherchées (dans l'exemple des titrages, il peut s'agir de la concentration de l'espèce titrée) et obtenir un retour immédiat sur la faibilité de ses calculs (voire de ses mesures).

Possibilité de recalculs des notes *a posteriori* en cas de modification du barème ou du corrigé

Il est possible de modifier *a posteriori* le barème ou le corrigé d'un exercice, après qu'il ait été soumis aux étudiants. Le recalcul des points permet d'ajuster en conséquence les notes obtenues pour chaque copie, et ce automatiquement.

Cela peut être intéressant :

- en cas de détection d'erreur dans le corrigé (erreur de formule, de texte dans les retours, etc.)
- si, en feuilletant les copies rendues, on constate une erreur répandue qui n'avait pas été prise en compte dans l'arbre de réponse lors de la conception de l'exercice et qui ne fait donc pas encore l'objet d'un feedback particulier (les étudiants ont souvent plus d'imagination que les enseignants !) : il est possible de rajouter un nœud dédié à cette erreur pour affiner la correction via un feedback spécifique.
- si l'on souhaite *a posteriori* modifier un barème (si on réalise par exemple qu'une question finalement difficile doit être moins pondérée, au contraire que telle question mérite d'avoir plus de points)
- s'il s'avère qu'un cas issu du tirage au sort des données pose problème (ou qu'il serait passé au travers des mailles du filet des tests préalables), on peut neutraliser la question pour les étudiants concernés.

Et en pratique, comment on fait ?

La première approche avec STACK peut être difficile et rebutante, tant il est paramétrable et adaptable. Un enseignant doit avoir quelques notions de code pour se lancer dans la conception d'un exercice. De ce fait, encore plus que pour d'autres outils en ligne, le temps à investir dans la conception des ressources est initialement très important.

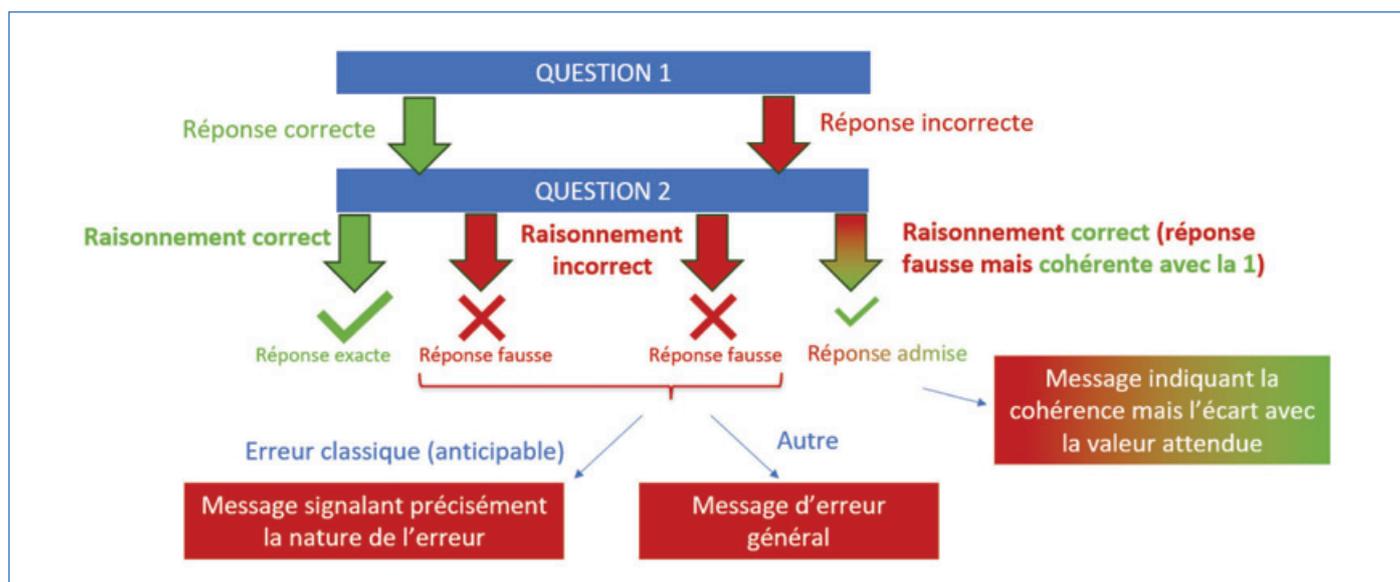


Figure 8 - Évaluation de questions « à tiroirs », avec différenciation dans la nature des erreurs commises.

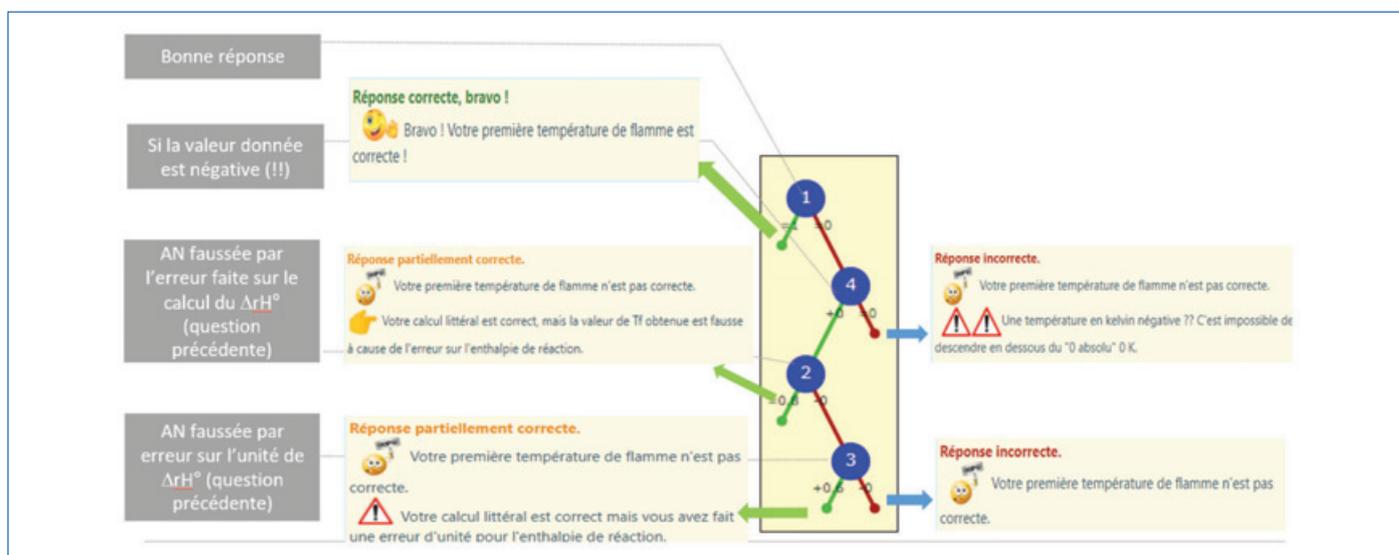


Figure 9 - Arbre de réponse pour un exercice de type « calcul d'une enthalpie libre standard de réaction $\Delta_r G^0$ en utilisant les valeurs d'enthalpie standard de réaction $\Delta_r H^0$ et d'entropie standard de réaction $\Delta_r S^0$ obtenues dans des questions précédentes ».

Il est donc important de partir de modèles d'exercices existants, qui permettent de mieux comprendre le principe de fonctionnement et de paramétrage. La documentation STACK, disponible sur le site, est assez développée et permet de trouver bon nombre de réponses aux questions de développement.

Il serait très utile, à terme, de développer une banque de questions commune dans chaque discipline, pour ne pas « réinventer la roue » à chaque fois qu'un enseignant a besoin d'un exercice.

Une autre limitation réside dans le fait que l'extension Stack n'est pas présent nativement dans Moodle : il faut l'installer, ce qui n'est pas forcément très simple du fait de la nécessité de le coupler à Maxima⁽¹⁾. Sur les Moodle gérés par des institutions extérieures (rectorat ou région), il faut donc trouver le bon interlocuteur, ce qui n'est pas toujours chose aisée.

Mais une fois installé, cet outil devient vite un indispensable au suivi pédagogique régulier des étudiants qui le plébiscitent largement.

Remerciements

Nous remercions l'équipe des développeurs et ingénieurs pédagogiques de Capsule de la FSI de Sorbonne-Université,

qui ont mis en place l'extension Stack sur le Moodle de SU, et ainsi permettre le développement de ces exercices.

⁽¹⁾ <https://docs.STACK-assessment.org/en/>

⁽²⁾ <https://docs.stack-assessment.org/en/Installation/#2-install-gnuplot-and-maxima>

Claire COLONNA^{1*}, professeure agrégée de Chimie, **Marie JARDAT**², professeure des universités, **Vanessa LABET**³, maître de conférence, **Guillaume MERIGUET**⁴, professeur des universités.

¹CPGE – PCSI - Lycée Lakanal Sceaux (92).

²Laboratoire PHENIX (Physicochimie des Electrolytes et Nanosystèmes Interfaciaux) UFR de Chimie – Sorbonne Université, Paris.

³Laboratoire MONARIS (Laboratoire Dynamique, Interactions et Réactivité) UFR de Chimie – Sorbonne Université, Paris.

⁴Laboratoire PHENIX (Physicochimie des Electrolytes et Nanosystèmes Interfaciaux) Polytech Sorbonne.

*claire.colonna@ac-versailles.fr

ANNEXE

Installation de l'extension STACK sur Moodle

STACK : type de questions Moodle intégrables à un test, permettant de proposer des exercices à données aléatoires, d'évaluer des réponses données sous forme d'expressions littérales et de proposer des feedbacks adaptés, tenant compte notamment du raisonnement, mené par l'étudiant. Ce plugin, initialement destiné à l'enseignement des mathématiques, a été adapté à l'enseignement de la Chimie.

Information sur le site dédié :

<https://docs.stack-assessment.org/>

Présentation aux JIREC 2024 :

<https://new.societechimiquedefrance.fr/wp-content/uploads/2024/01/colonna.pdf>

Contact sur des exercices STACK en chimie :

claire.colonna@ac-versailles.fr

Modalités d'installation

Tout est indiqué sur le site : <https://docs.stack-assessment.org/>

Le plugin requiert le moteur de calcul algébrique « Maxima » et le moteur de tracé graphique « Gnuplot ». Ces services peuvent être installés sur le serveur qui héberge Moodle ou alors sur un serveur dédié :

<https://docs.stack-assessment.org/en/Installation/#2-install-gnuplot-and-maxima>

Il faut disposer d'un hébergement qui autorise ces installations. À l'académie de Paris, la DANE a fait le choix d'un serveur dédié qui expose les services à l'aide de la solution MaximaPool :

https://github.com/mathstack_util_maximapool