

Une approche pédagogique plus active pour améliorer la mémorisation des fonctions de la chimie organique en licence 1

Frédéric Hapiot

Faculté des Sciences Jean Perrin, Unité de Catalyse et de Chimie du Solide (UCCS), UArtois,
Lens, frederic.hapiot@univ-artois.fr

Catherine Couturier

Laboratoire Grammatica, UArtois, catherine.couturier@univ-artois.fr

Ophélie Carrereas

Laboratoire Cognition, Langues, Langage, Ergonomie, UToulouse Jean Jaurès

ophelie.carreras@univ-tlse2.fr

Viviane Boutin

UArtois

viviane.boutin@univ-artois.fr

Résumé

Cette analyse de dispositif concerne un apprentissage de connaissances de base, essentiel en 1^{re} année de licence, que constituent treize fonctions de base de chimie organique. Constatant que la mémorisation des étudiants de première année du premier cycle (licence 1) est souvent défaillante, il a été décidé de leur proposer une activité plus active, plus ludique et moins abstraite, à savoir la manipulation en binômes de supports en bois, chaque support représentant un symbole chimique. Pour ce faire, chacun des 13 groupes de travaux dirigés (TD) a suivi une séquence d'une heure complémentaire au cours. Il a été observé une participation active des étudiants, des échanges soutenus et une implication plus forte. En comparaison avec les résultats de l'année précédente, une amélioration globale des évaluations de fin de semestre a été remarquée. La mémorisation à court terme est améliorée, en particulier pour les étudiants dont le niveau de connaissances initiales est le plus faible. La mémorisation à long terme n'est

pas significativement impactée. Plusieurs prolongements sont envisagés : faire mobiliser des activités cognitives de plus haut niveau (création...), se concerter en équipe pour faire réactiver régulièrement les connaissances, et questionner la temporalité des enseignements dans le cadre du passage à l'approche par compétences.

Abstract

This analysis is concerned with very important basic knowledge in bachelor 1: thirteen functions of organic chemistry. Memorizing these concepts is difficult for those students, and first author decided to propose a more active, more attractive, and less abstract activity. Students play with wooden devices, each of them representing a chemical symbol. Each of the 13 groups had an extra one-hour session. Active student participation, sustained exchanges and greater involvement were observed. In comparison with the results of the previous year, an overall improvement in the end-of-semester evaluations is notice. Short-term memorization is improved, especially for students with the lowest initial level of knowledge. Long-term memory is not significantly affected. Several perspectives are considered: mobilizing higher level cognitive activities (creation...), working together as a team to regularly reactivate knowledge, and questioning the temporality of the courses as part of the transition to the competency-based approach.

Mots-clés

Chimie, premier cycle universitaire, mémorisation, motivation, jeu

Keywords

Chemistry, Bachelor, Memorization, Motivation, Game

1. Introduction

Parmi les fondamentaux de la chimie organique, l'apprentissage des fonctions (arrangements spécifiques des atomes ayant une réactivité bien déterminée) en première année du premier cycle universitaire (L1) constitue une des pierres angulaires de la majorité des apprentissages de niveau supérieur (L2, L3, master). Toutefois, il n'est pas rare de constater que certains étudiants de master de chimie ne maîtrisent ni le nom ni la structure des fonctions de base. Or, la connaissance de ces fonctions est un prérequis essentiel pour la poursuite d'études, en particulier pour les étudiants qui se destinent à passer le concours de médecine (mineure Accès

Santé de la mention chimie) et ceux qui souhaitent intégrer le master « Conception du médicament ». Partant de ce constat, nous avons cherché à améliorer la mémorisation de treize de ces fonctions de la chimie organique en licence en favorisant un ancrage plus profond. Il s'agit de rendre plus attractif cet apprentissage de connaissances pures, généralement rébarbatif, à travers une pédagogie plus active, plus ludique et moins abstraite pour les étudiants. Nous nous sommes inspirés pour cela de travaux publiés récemment dans *Journal of Chemical Education* (O'Halloran, 2019). Ce collègue fait assembler à ses étudiants des lettres – sur des morceaux de papiers autocollants – correspondant aux atomes couramment rencontrés en chimie organique pour leur permettre de former les fonctions. Il nous est apparu intéressant de concevoir un modèle de lettres sur supports en bois, en collaboration avec Léo Marius en charge du Muséolab (Louvre Lens Vallée), de manière à mieux motiver nos étudiants en leur permettant de jouer et de réfléchir avec un support physique commun.

Les cours de chimie de licence assurés par une équipe d'enseignants prévoient l'enseignement de ces fonctions de base (l'enseignant écrit au tableau, les étudiants notent et ont à mémoriser). Le premier auteur de cette communication a obtenu un fonds d'innovation pédagogique¹ pour animer, pendant un an, une séquence supplémentaire d'une heure par groupe de travaux dirigés (TD) pour expérimenter ce dispositif et tenter d'en évaluer les effets sur l'engagement des étudiants dans leurs apprentissages et sur leur capacité de mémorisation. C'est cette expérimentation que nous présentons maintenant à travers cette étude. Nous commençons par présenter les éléments de théorie mobilisés, qui concernent la manipulation d'objets et le lien avec la mémorisation, la ludicisation des activités d'enseignement et la motivation des étudiants. Nous détaillons ensuite le dispositif mis en œuvre, la manière dont nous l'avons évalué du point de vue de la mémorisation des fonctions, et enfin les résultats obtenus du point de vue de la mémorisation à court, moyen et long terme, pour conclure tout en identifiant de nouvelles perspectives à notre étude.

2. Éléments de théorie

Dans son étude, O'Halloran (2019) a évalué la manipulation de symboles chimiques inscrits sur des papiers autocollants pour l'apprentissage de fonctions de chimie organique. Au lieu d'apprendre « bêtement » une liste de fonctions, l'étudiant est ici amené à mémoriser le nom et la structure des fonctions par le jeu. O'Halloran constate qu'une part importante de cet

¹ Bonus Qualité Enseignement.

apprentissage est basée sur la technique essai/erreur. Il relève que ce type de dispositif permet de donner du sens à cet apprentissage dans la mesure où l'étudiant est confronté à certaines situations où il viole les règles de base de la liaison chimique (valence, liaisons simple, double ou triple), ce qui l'amène à réfléchir sur le concept même de liaison chimique. Nous nous sommes ainsi questionnés sur les effets possibles de la manipulation d'objets sur la motivation et sur la mémorisation. En effet, la manipulation d'objets peut améliorer l'apprentissage dans la mesure où cela facilite l'utilisation de connaissances antérieures pour lier des concepts abstraits à des objets et actions concrètes. Cela contribue donc à mettre en œuvre un « apprentissage génératif » tel que défini par Fiorella et Mayer (2016) : organiser les éléments sélectionnés et les intégrer aux connaissances stockées en mémoire à long terme. La stratégie d'apprentissage par la « mise en acte » (*enacting*) est listée par ces auteurs parmi les huit stratégies d'apprentissage génératives étayées par de nombreuses études. Ce type de stratégie a par ailleurs montré son utilité en chimie, où des enseignants font manipuler des structures moléculaires en 3 dimensions (Stull, Gainer & Hegarty, 2018). Cet effet positif de la manipulation sur l'apprentissage peut également être interprété dans le cadre des travaux sur la cognition incarnée qui considèrent que la cognition et l'action sont interdépendants, et que la pensée prend sa source dans l'action (Barsalou, 2008). Ainsi, la manipulation peut contribuer à une amélioration de l'apprentissage.

L'utilisation de supports en bois est également susceptible de créer chez les étudiants une expérience ludique. En ce sens, elle peut relever de la ludicisation, processus permettant aux apprenants de vivre une expérience de jeu (Romero & Sanchez, 2020). Les travaux sur la ludicisation ont étudié ses effets sur les performances d'apprentissage et sur la motivation. Même si les relations restent complexes et dépendantes des contextes, et qu'il est nécessaire de développer davantage les recherches dans ce champ, il apparaît que quand la situation est perçue comme ludique par les apprenants, cela peut augmenter leur motivation et leur engagement dans la tâche (Seaborn & Fels, 2015). La motivation est un processus indispensable à l'apprentissage (Viau, 2001, 2009). Pour l'auteur, trois éléments sont déterminants pour la motivation d'un apprenant : la perception de la valeur de l'activité (utilité, intérêt), la perception de compétence (se sentir capable de réussir) et la perception de contrôlabilité (degré de contrôle sur l'apprentissage). Il semble que le dispositif proposé ici soit susceptible d'augmenter la perception de la valeur de l'activité ainsi que la contrôlabilité chez les apprenants (du fait de pouvoir manipuler et créer soi-même des structures).

Enfin, l'introduction du dispositif de manipulation s'accompagne également d'une modification globale des rôles et postures des étudiants et de l'enseignant : les étudiants ne sont pas passifs mais agissent, manipulent, testent, comparent... Ils ne sont pas seuls mais débattent en groupes. Ils peuvent identifier ainsi plus facilement les points de blocage qui les amènent à confondre les différentes fonctions de la chimie organique. L'enseignant guide, accompagne, répond aux interrogations, donne des feedbacks fréquents... Ces différents éléments contribuant à une mise en activité, y compris cognitive, sont susceptibles d'améliorer les apprentissages (Chi et Wylie, 2014).

Dans le cadre de cette étude, nous avons voulu vérifier que ce dispositif permettait un ancrage plus profond de la notion de fonctions organiques ainsi qu'une motivation améliorée chez nos étudiants de L1.

3. Présentation du dispositif

3.1. Public

Le public étudiant visé est celui de la première année des licences de chimie (C), physique/chimie (PC) et sciences de la vie (SV) de la faculté Jean Perrin de Lens (université d'Artois). Les 300 étudiants de la promotion sont répartis en 13 groupes TD, dont 10 groupes de SV, 1 groupe de C, un groupe de PC et un groupe C/PC. Chaque groupe TD comporte de 20 à 30 étudiants de niveau très hétérogène.

3.2. Les apprentissages visés

L'enseignement de chimie organique dont il est question dans cette étude au semestre 1 de L1 dure 8h et il est suivi d'un TD de 4h. À l'issue de ce cours, les étudiants devraient être capables d'identifier treize fonctions de chimie organique. Pour cela, ils doivent relier des atomes entre eux, chaque atome étant représenté par un symbole (une ou plusieurs lettres). Chaque assemblage de lettres (de 3 à 7 lettres) conduit à une fonction particulière qui aura une réactivité chimique propre. L'expérimentation dont il est question consiste en une séquence supplémentaire d'une heure avec les supports en bois présentés ci-après.

3.3. Les supports utilisés et le déroulement de la séquence

Les supports en bois conçus pour notre projet sont des plaquettes de 4 x 4 x 0,5 cm proposant chacune un symbole chimique (Figure 1). Quinze boîtes de quarante supports ont été réalisées.

Ils permettent non seulement de comprendre comment les atomes s'agencent pour former des fonctions mais également d'identifier la différence entre la valence d'un atome (sa capacité à se lier à d'autres atomes) et sa classe (qui dépend de la nature des atomes directement liés). La manipulation des lettres permet rapidement et concrètement d'accéder à une variété de fonctions présentant des atomes mono-, bi-, tri- ou tétravalents, ainsi que des fonctions primaire, secondaire et tertiaire (cas des alcools, des amines, des amides et des dérivés halogénés). Les supports rendent également compte des liaisons simples et multiples (double ou triple liaisons). Les étudiants sont d'abord soumis à un test de trois minutes pendant lesquelles ils doivent identifier les fonctions de treize composés organiques (Test 1). Celui-ci permet aux étudiants d'identifier les apprentissages visés et de s'autoévaluer, tout en permettant à l'enseignant de situer le niveau de ses étudiants. Ceux-ci travaillent en binômes, chacun d'entre eux recevant une boîte de supports. Un nom de fonction (exemple : alcool primaire) est proposé au tableau, et les binômes doivent agencer les lettres pour construire la fonction correspondante. L'enseignant circule entre les tables, questionne, oriente sans donner la réponse pour encourager une démarche essais/erreurs. Cet exercice de construction dure environ 50 minutes et explore les 13 fonctions incluant au moins un hétéroatome (atome différent du carbone et de l'hydrogène) en garantissant la progression dans la difficulté. À l'issue de ces exercices pratiques, un deuxième test de 3 minutes est réalisé (Test 2). Les deux tests papier, de difficulté équivalente, sont distribués et retournés, et demandent d'identifier les fonctions incluses dans la structure de molécules organiques. Les résultats sont collectés et analysés sous Excel.



Figure 1. Manipulation des supports

4. Évaluation du dispositif - Méthodologie

Nous présentons maintenant ce que nous avons mis en place. Notons que pour une question d'équité, tous les étudiants ont profité du dispositif. Nous n'avons donc pas prévu de groupe témoin, mais nous avons comparé nos résultats avec ceux obtenus l'année précédente.

Bien que la séquence prévue pour la manipulation des supports ne dure qu'une heure, nous avons souhaité en évaluer les effets sur la mémorisation dans la mesure où la pédagogie utilisée nous semblait pouvoir réellement renforcer celle-ci. Nous avons ainsi tenté d'étudier les effets de cette séquence d'enseignement sur trois échelles de temps : court terme (à l'issue de la séquence), moyen terme (3 semaines) et long terme (6 mois).

Mémorisation à court terme : les deux tests concernent les 300 étudiants qui composent la promotion, c'est-à-dire l'ensemble des groupes TD. Les données collectées sont traduites sous forme d'un rapport entre les notes obtenues au Test 2 sur les notes obtenues au Test 1.

Mémorisation à moyen terme : la trace que nous analysons est une partie d'un contrôle continu réalisé en octobre 2020. Les notes obtenues à l'exercice concernant les fonctions ont été extraites et comparées à celles obtenues l'année précédente sur un exercice similaire de

difficulté équivalente. Les résultats sont exprimés en pourcentage d'amélioration d'une année sur l'autre.

Mémorisation à long terme : six mois après la séquence, les étudiants de C et PC² ont été soumis de nouveau au Test 1. Les résultats, exprimés ici aussi en pourcentage d'amélioration ont été comparés à ceux obtenus en octobre 2020.

5. Résultats

5.1. Mémorisation à court terme

5.1.1. Évolution du facteur multiplicatif en fonction des groupes

Sur les figures 2 et 3, le facteur multiplicatif apparaît sur l'axe des ordonnées alors que l'axe des abscisses est relatif aux interventions auprès des étudiants. Ces interventions sont classées dans l'ordre temporel, le groupe SV1 ayant assisté à cette expérimentation avant le groupe SV2, qui lui-même a assisté à l'expérimentation avant le groupe SV3 et ainsi de suite. Les résultats décrits sur les figures 2 et 3 mettent en évidence une évolution positive des résultats aux tests. Les résultats du Test 2 sont jusqu'à trois fois supérieurs à ceux obtenus lors du Test 1, ce qui est tout à fait appréciable. Il est à noter que, mis à part le premier groupe testé (Groupe A2), nous observons une croissance régulière des facteurs multiplicatifs dans le temps, c'est-à-dire au fur et à mesure de nos interventions avec les différents groupes SV, C et PC (Figures 2 et 3). Cela peut s'interpréter peut-être par une meilleure capacité de notre part à identifier les points de blocage des étudiants vis-à-vis de ces savoirs et à adapter nos explications en fonction des problèmes rencontrés. Le facteur multiplicatif de mémorisation à court terme s'améliore ainsi au fur et à mesure de nos interventions avec les différents groupes, jusqu'à atteindre un palier (facteur multiplicatif proche de 2,5 à partir de la septième intervention (groupe SV7)). On notera qu'il n'y a pas d'amélioration des résultats des Tests 1 pour les groupes testés une semaine avant l'échéance de l'examen par rapport à ceux testés trois semaines avant cet examen, ce qui semble mettre en évidence une absence d'anticipation des étudiants dans leur planning de révision. Il est difficile d'interpréter totalement ce phénomène, des facteurs plus généraux (capacité à organiser son travail, stratégies d'apprentissage, perception de la valeur des examens en général...) entrant probablement en ligne de compte.

² Les étudiants de SV ne suivent pas cet enseignement au second semestre.

Facteur multiplicatif de mémorisation

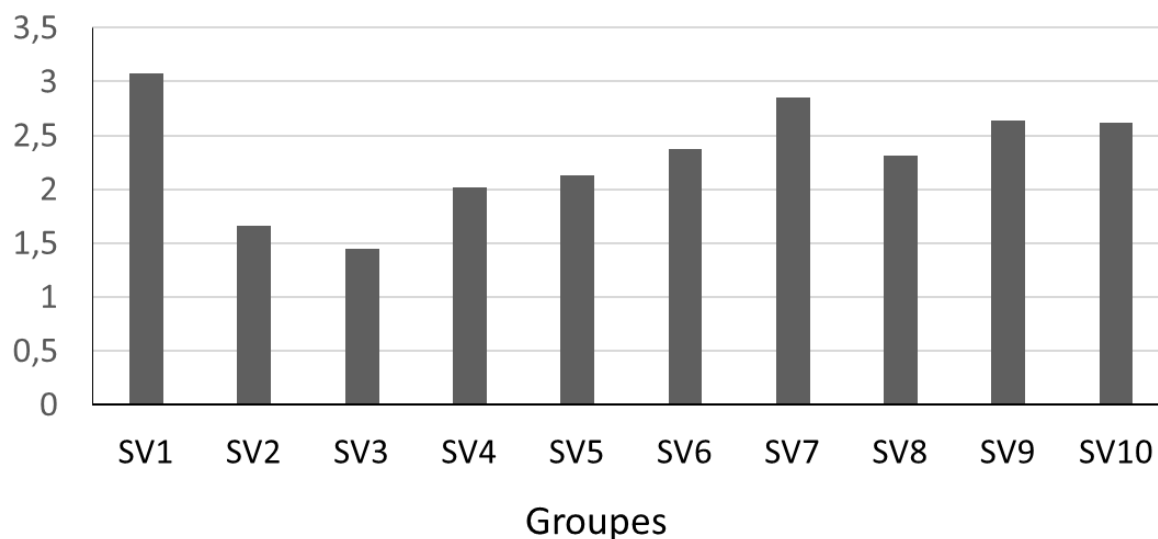


Figure 2. Évolution du facteur multiplicatif de mémorisation à court terme au fur et à mesure de nos interventions pour les groupes SV (les groupes étant présentés dans l'ordre dans lequel ils ont été testés)

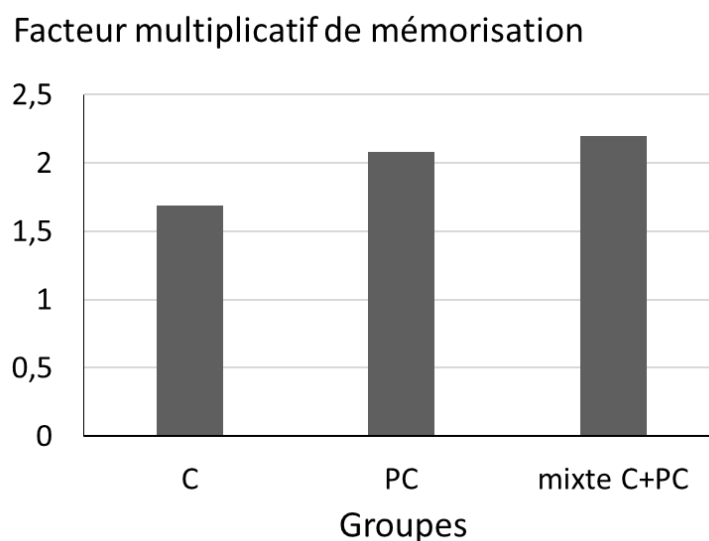


Figure 3. Évolution du facteur multiplicatif de mémorisation à court terme au fur et à mesure de nos interventions pour les groupes C et PC (les groupes étant présentés dans l'ordre dans lequel ils ont été testés)

Les groupes C et PC affichent globalement de meilleures notes au Test 1, ce qui peut paraître logique étant donné leur intérêt plus prononcé pour une discipline qui est au cœur de la formation qu'ils ont choisie. Toutefois, il est intéressant de noter que certains groupes de SV, globalement moins intéressés *a priori* par la chimie organique, présentent malgré tout de meilleurs résultats au Test 1 que ceux des groupes C et PC.

Au-delà des notes, il nous semble que cette séquence d'enseignement, perçue comme intense par l'enseignant, a mis en évidence un engagement certain des étudiants et une plus forte implication. Ils ont fait part de leurs questionnements ouvertement, de leur incompréhension sur certaines notions et ont montré un intérêt prononcé pour nos explications. Les classes étaient très vivantes par rapport à un enseignement de TD classique, le travail en binôme et la manipulation des supports les a visiblement rendus dynamiques. Des échanges informels à la fin de la séquence nous permettent d'affirmer que loin de trouver cet apprentissage rébarbatif, les étudiants sont sortis souvent satisfaits de cette heure d'enseignement avec l'impression d'avoir progressé.

5.1.2. Évolution du facteur multiplicatif en fonction des notes obtenues au Test 1

Nous avons comparé le facteur multiplicatif avec les moyennes des résultats du Test 1, groupe par groupe. Concernant la mémorisation à court terme (2 tests différents en moins d'une heure), il apparaît que l'utilisation des supports en bois a été très utile pour les étudiants ayant très peu de notions au démarrage de la séquence. En effet, le coefficient d'amélioration des groupes présentant une moyenne au Test 1 faible est plus important que celui des groupes présentant une moyenne au Test 1 élevée (Figures 4 et 5). Pour ceux connaissant déjà une bonne partie des fonctions, l'apport de la séquence a été plus limité.

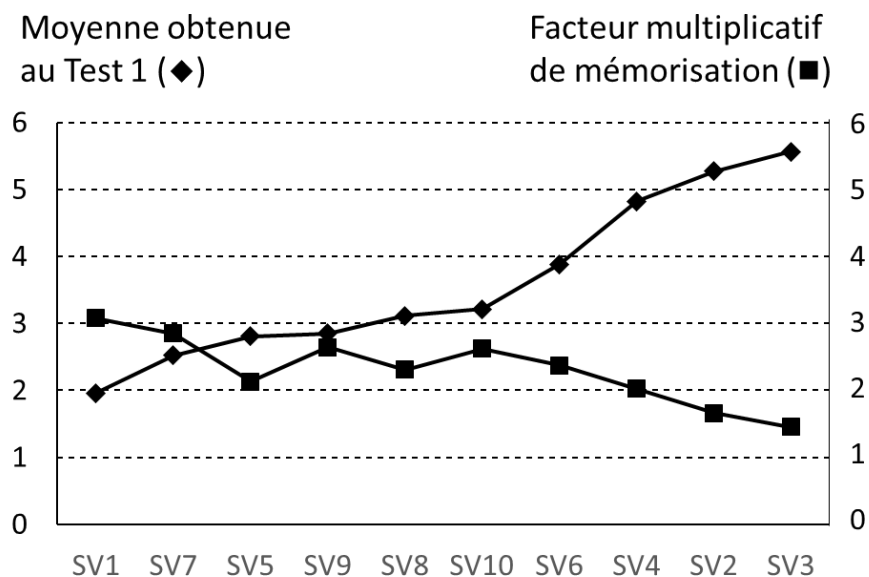


Figure 4. Moyennes (/13) obtenues au Test 1 (◆) et facteurs multiplicatifs associés (■) pour les Groupes SV

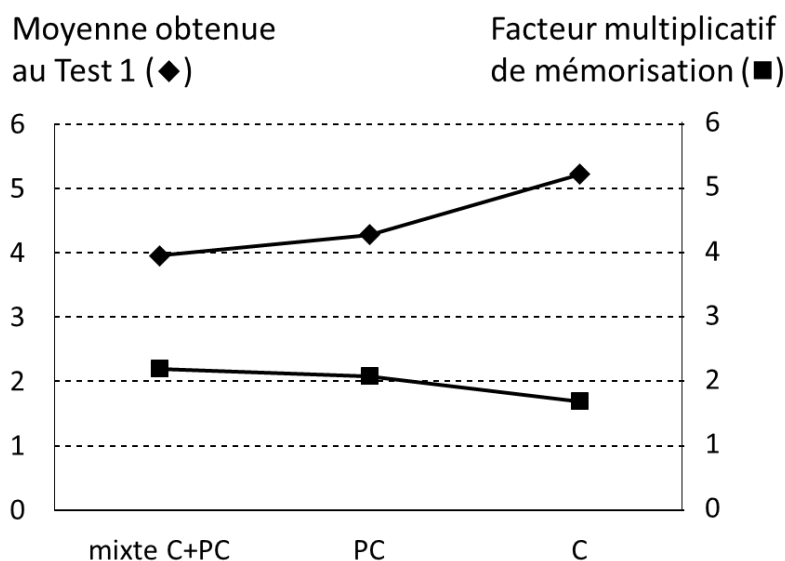


Figure 5. Moyennes (/13) obtenues au Test 1 (◆) et facteurs multiplicatifs associés (■) pour les Groupes C et PC

5.1.3. Évolution du facteur multiplicatif en fonction des notes obtenues au Test 2

Nous avons comparé le facteur multiplicatif avec les moyennes des résultats du Test 2, groupe par groupe. Nous ne retrouvons pas le phénomène précédent : le facteur multiplicatif oscille autour de 2, quel que soit le groupe testé en SV (Figure 6) et en C/PC (Figure 7), ce qui signifie probablement que tous les groupes sont maintenant relativement homogènes sur leur connaissance des fonctions de la chimie organique.

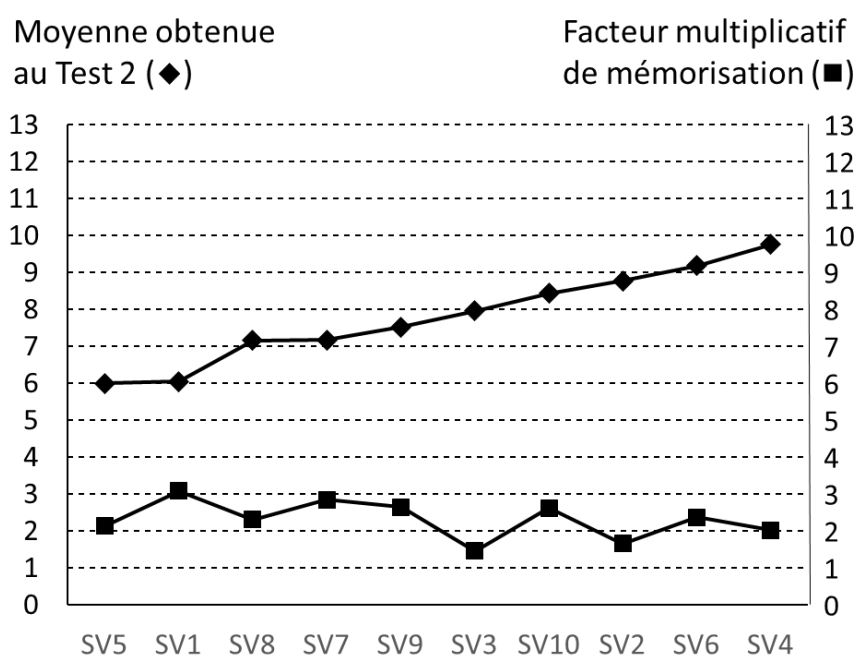


Figure 6. Moyennes (/13) obtenues au Test 2 (◆) et du facteur multiplicatif associé (■) pour les Groupes SV

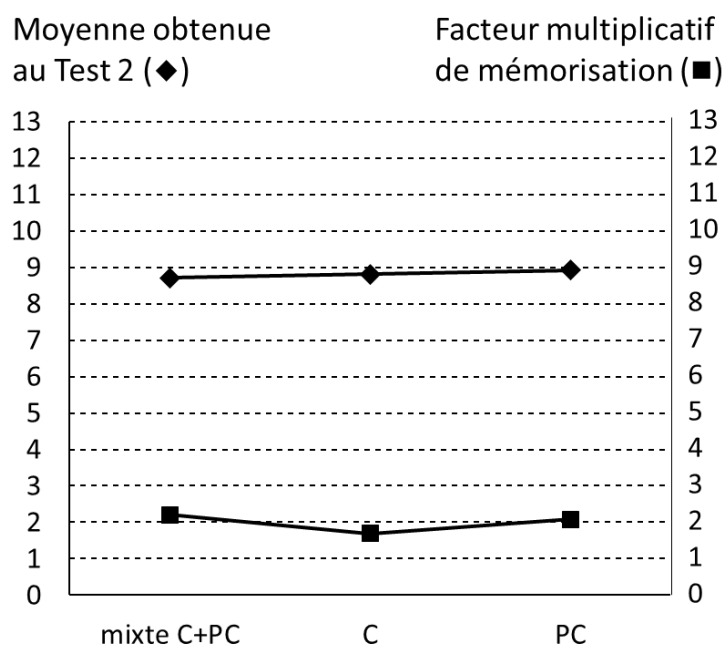


Figure 7. Moyennes (/13) obtenues au Test 2 (◆) et facteur multiplicatif associé (■) pour les Groupes C et PC

En résumé, bien que ce projet fût élaboré au départ pour tous les étudiants de L1 en Sciences Expérimentales, il s'avère particulièrement adapté pour soutenir la mémorisation à court terme des étudiants dont les connaissances initiales en chimie organique sont les plus faibles.

5.2. Mémorisation à moyen terme

Nous avons comparé les résultats de l'exercice (demandant d'identifier les 13 fonctions) de l'évaluation menée en octobre avec ceux de l'évaluation de l'année précédente, le niveau de difficulté étant similaire. Pour des raisons d'ordre pratique, cette analyse ne concerne que les groupes SV, c'est-à-dire 250 étudiants.

Une amélioration de 8 % est observée sur la moyenne générale des groupes SV testés, ce qui est relativement peu au regard des efforts déployés. Toutefois, le nombre de notes maximales obtenues sur l'exercice (13/13 dans le cas présent) est de 35 % supérieur à celui obtenu l'année précédente. Sans méconnaître les conditions possiblement très différentes entre les deux

promotions, cet élément nous conforte dans l'idée que cette expérimentation semble bénéfique aux apprentissages des étudiants.

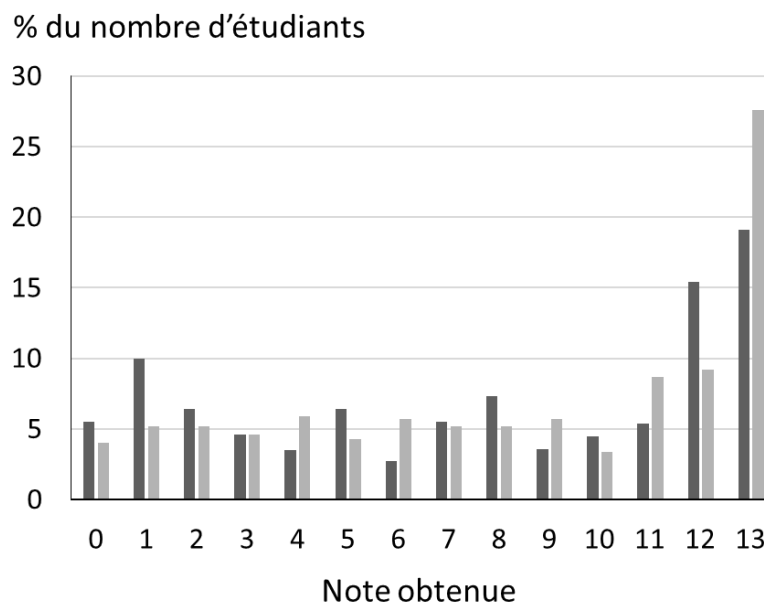


Figure 8. Évolution des pourcentages d'étudiants en fonction des notes obtenues (/13) en 2019-2020 (noir) et 2020-2021 (gris) pour les groupes SV

5.3. Mémorisation à long terme

Six mois après le test 1, les étudiants de C et PC ont été resoumis à ce même test, dans les mêmes conditions. La moyenne obtenue est de 5,7 sur 13. Pour mémoire, la moyenne du Test 1 était de 4,5 et celle du Test 2 était de 8,8 pour ces 2 groupes. Il apparait donc que le dispositif ne se suffit pas à lui-même, et il doit être complété par d'autres dispositifs connexes que nous évoquons ci-après.

6. Conclusion et perspectives

Nous avons pour objectifs d'améliorer chez nos étudiants la mémorisation des formules et d'expérimenter un mode d'enseignement différent en faisant manipuler des supports en bois représentant les symboles des atomes constitutifs des fonctions de la chimie organique à mémoriser. En comparaison avec les résultats de l'année précédente, nous observons de meilleurs résultats aux évaluations de fin de semestre pour les étudiants ayant bénéficié du dispositif. Au regard des efforts déployés, celle-ci est relativement modeste (+8 % sur la moyenne générale au Test 2), et il est évident que de nombreux autres facteurs diffèrent entre les deux promotions. La mémorisation à court terme est améliorée, en particulier pour les

étudiants dont le niveau de connaissances initiales est le plus faible. La mémorisation à long terme n'est pas significativement impactée, peut-être du fait d'une absence de réactivation régulière de ces connaissances. Nos observations pendant les séances nous ont permis de constater une participation active et intéressée des étudiants, des échanges soutenus et une implication plus forte que celle que nous pouvions constater en TD.

Dans le prolongement de cette expérience, plusieurs perspectives s'offrent à nous. Pour favoriser l'apprentissage à long terme, il nous semble important de permettre aux étudiants de réfléchir à leur manière d'apprendre dans le temps de la séquence. Il serait possible de leur proposer de créer leurs propres moyens mnémotechniques et de les matérialiser avec des supports de leur choix, la création se situant à un haut niveau d'apprentissage cognitif (Bloom & Krathwohl, 1956). Encourager la facilitation graphique et les associations d'idées (esters et parfums...) nous semble pertinent pour soutenir des apprentissages en profondeur, génératifs (Fiorella & Mayer, 2016) qui sont susceptibles de se maintenir à plus long terme. Il s'agit ici de passer d'une connaissance stockée de façon isolée et non intégrée (récupérable à court terme) à une connaissance intégrée et connectée aux connaissances antérieures, permettant l'inférence et le transfert (Chi & Wylie, 2014). Par ailleurs, proposer régulièrement des exercices permettant aux étudiants de réactiver les connaissances acquises peut également contribuer à un ancrage à long terme (cf. les bénéfices du testing : Agarwal, Nunes & Blunt, 2021).

Ce dispositif a vocation à être utilisé et généralisé par l'ensemble des collègues sur les trois années de la licence. Une concertation en équipe permettrait d'apprécier au mieux les avantages de ce dispositif et la manière de l'utiliser, et permettrait aux enseignants de faire réactiver régulièrement ces savoirs de base. Enfin, dans le cadre de l'approche par compétences et d'une refonte de la maquette de licence de chimie, il nous semble intéressant de questionner la temporalité des enseignements. Enfin, ce dispositif pourrait être proposé aux étudiants à besoins spécifiques, étudiants « Oui si »³... et bien qu'il concerne ici un point précis de la formation en chimie organique, son application pourrait concerner d'autres sciences expérimentales traitant de notions abstraites et qui mériteraient d'être traitées par une approche sensorielle.

³ Il s'agit d'un dispositif d'accompagnement de publics spécifiques à l'entrée en 1^{re} année à l'université.

Références bibliographiques

Agarwal, P. K., Nunes, L. D. & Blunt, J. R. (2021). Retrieval Practice Consistently Benefits Student Learning: A Systematic Review of Applied Research in Schools and Classrooms. *Educational Psychology Review*, 33(4), 1409-1453.

Barsalou, L. W. (2008). Grounded Cognition. *Annual Review of Psychology*, 58, 617-645.

Bloom, B. S. & Krathwohl, D. R. (1956). *Taxonomy of Educational Objectives. The Classification of Educational Goals*. New York : McKay.

Chi, M. T. & Wylie, R. (2014). The ICAP Framework : Linking Cognitive Engagement to Active Learning Outcomes. *Educational Psychologist*, 49(4), 219-243.

Fiorella, L. & Mayer, R. E. (2016). Eight Ways to Promote Generative Learning. *Educational Psychology Review*, 28(4), 717-741.

O'Halloran, K. P. (2019). Puzzle to Build Organic Molecules with Sticky Notes. *Journal of Chemical Education*, 96(4), 725-728.

Romero, M. & Sanchez, E. (2020). *Apprendre en jouant*. Paris : Retz.

Seaborn, K. & Fels, D. L. (2015). Gamification in Theory and Action : A Survey. *International Journal of Human-Computer Studies*, 74, 14-31.

Shapiro, L. & Stolz, S. A. (2018). Embodied Cognition and its Significance for Education. *Theory and Research in Education*, 17(1), 19-39.

Stull, A. T., Gainer, M. J. & Hegarty, M. (2018). Learning by Enacting : The Role of Embodiment in Chemistry Education. *Learning and Instruction*, 55, 80-92.

Viau, R. (2001). *La motivation des élèves : Pourquoi s'en préoccuper ? Et comment ?* Colloque du Conseil Provincial de l'Association des Enseignantes et des Enseignants Francophones du Nouveau-Brunswick (AEFNB), Nouveau-Brunswick.

Viau, R. (2009). *La motivation en contexte scolaire*. Bruxelles : De Boeck.

Remerciements

Léo Marius, MuséoLab

Kevin O'Halloran, University Center Lane, United States, pour sa diligence

Johanne Masclet, chercheure en psychologie au laboratoire RECIFES-CIREL, directrice du site INSPE de Douai, pour ses explications sur la mémoire