

Le Tournoi français des chimistes

Une compétition pour se former par la recherche et se confronter à la pluridisciplinarité

Résumé Depuis 2021, le Tournoi français des chimistes (TFChim) est organisé par plusieurs grandes écoles et universités à destination de leurs étudiant-es de niveau L3 et M1. L'objectif pédagogique est de développer des compétences transverses telles que la communication, le sens critique et le travail d'équipe et que les étudiant-es puissent pratiquer la démarche scientifique. Cette activité pédagogique amène également les étudiant-es à échanger avec leurs pairs sur les différentes façons d'aborder et de traiter un problème scientifique commun, dans le cadre d'une approche souvent pluridisciplinaire. Cet article montre d'une part en quoi la compétition intègre tous les éléments de la formation par la recherche, et d'autre part comment la pluridisciplinarité des approches s'exprime au cœur des réponses expérimentales aux questionnements proposés. La 3^e édition de ce tournoi, qui a vu concourir neuf établissements d'enseignement supérieur, a pu servir d'objet d'étude pour un premier retour d'expérience, avant la 4^e édition prévue à l'ENS de Lyon en mars 2024. Cet article complète celui paru le mois précédent qui traitait de la genèse, du déroulement et des enjeux relatifs à ce tournoi.

Mots-clés Enseignement, travaux pratiques, formation par la recherche, lien recherche-formation, pluridisciplinarité.

Abstract The French chemists' tournament: a multidisciplinary research-based learning competition

Since 2021, the Tournoi français des chimistes (TFChim) has been organized by several "grandes écoles" and universities for their L3 and M1 students to develop multidisciplinary skills such as communication, critical thinking and teamwork, and to practice the scientific method. This pedagogical activity also encourages students to exchange views with their peers on different ways of approaching and dealing with a common scientific problem, often within the framework of a multidisciplinary approach. This article shows how the competition integrates all the elements of research-based learning and how multidisciplinary approaches are expressed in the experimental answers to the proposed problems. The 3rd edition of this tournament, in which nine higher education establishments competed, was used as an object of study for initial feedback, prior to the 4th edition scheduled to take place at the ENS Lyon in March 2024. This article complements the one published the previous month which dealt with the creation, progression and challenges related to this tournament.

Keywords Teaching, laboratory work, research-based learning, research and teaching nexus, multidisciplinary.

Le Tournoi français des chimistes (TFChim) est, depuis 2021, un évènement scientifique conçu pour s'adresser à des étudiant-es de l'enseignement supérieur dans le domaine de la chimie en leur proposant de réfléchir et de travailler sur des problèmes ouverts de chimie (ensuite désignés comme « sujets »). La séquence d'activités pédagogiques qui en découle a lieu en deux temps : un premier dédié à la préparation d'une réponse théorique et expérimentale à ces sujets – l'amont du tournoi –, puis un deuxième de communication de leur réponse et d'une critique de cette dernière par leurs pairs – des étudiant-es d'autres établissements – et/ou par des personnes extérieures : le tournoi à proprement parler.

Le premier temps permet aux étudiant-es de travailler sur des thématiques et des techniques/méthodes expérimentales adaptées à leur cursus, en y ajoutant une expérience authentique de recherche et, par ce biais, à la fois une pratique de la démarche scientifique et le développement de compétences transverses de communication, de planification théorie-expérimentation et de recherche bibliographique. Cette première phase leur permet également d'enrichir leur culture scientifique dans des domaines très variés de la chimie comme de la physique ou de la biologie et, dans le cas de certains sujets, d'acquérir ou de compléter des connaissances en histoire des sciences et chimie environnementale.

Dans un second temps, le tournoi est le point d'orgue de ce travail de recherche préparatoire, au travers d'une véritable compétition – se déroulant sur deux journées fin mars – où

se défient des équipes d'étudiant-es de plusieurs établissements sous forme de joutes oratoires scientifiques (appelées « rencontres ») autour des sujets préparés en amont. Une équipe est constituée d'au maximum six étudiant-es volontaires inscrit-es en premier ou second cycle universitaire (troisième année de licence ou première année de master ou équivalent) et d'un-e ou plusieurs encadrant-es. L'article d'octobre 2023 fournit les détails sur la genèse, le déroulement et les enjeux relatifs à ce tournoi [1].

Le TFChim est ainsi l'occasion de sensibiliser les étudiant-es à la démarche scientifique et de les faire travailler sur des thématiques de chimie variées (pour se confronter à la pluridisciplinarité) et correspondant à des enjeux de recherche actuelle (pour avoir une idée de l'état de la recherche).

Contexte pédagogique

De nos jours, de nombreuses universités, écoles et instituts mettent l'accent sur la connexion entre la recherche et l'enseignement [2] et proposent une formation basée sur un fort lien recherche-enseignement (« research-teaching nexus » en anglais). Dans ces établissements, les étudiant-es peuvent par exemple être intégré-es aux démarches de recherche, soit sur des sujets d'études dont les connaissances sont déjà bien établies (permettant ainsi le travail sur la méthodologie en elle-même), soit sur des sujets nouveaux pour la discipline, et donc être à l'origine de découvertes [3]. Une part

de motivation voire d'intérêt supplémentaire se voit ainsi introduite, permettant de découvrir un aspect important des métiers de la recherche, de même qu'un apprentissage à la gestion, le cas échéant, de la déception en cas d'échec ou lorsque les conclusions diffèrent des attentes (en apprenant à savoir valoriser les résultats quels qu'ils soient, par exemple). De nombreuses études montrent ainsi que ce positionnement améliore la compréhension de la science et de la démarche scientifique par les étudiant-es [4-7]. En lien avec cette démarche scientifique, une méthode d'enseignement appelée « démarche d'investigation » a été introduite dans les programmes des sciences de l'école primaire et du collège en France depuis respectivement 2002 et 2005 [8]. Reposant sur des activités expérimentales (« hands-on » en anglais), cette méthode datant de 1993 a été instituée en France pour tenter de remédier à la désaffection des jeunes publics pour les études scientifiques et techniques, et de prévenir tout impact négatif sur le développement scientifique, technologique et économique du pays à long terme [8-10].

Si la recherche d'une démocratisation de la science existe dès la fin du XIX^e siècle, au travers des premiers ouvrages de « science amusante » (ex : [11]) – bien différents des kits de chimie modernes, de par le danger des produits utilisés –, un tournant majeur a été l'édification du Palais de la découverte au sein du Grand Palais, à l'occasion de l'Exposition universelle de 1937 [12], de ses expériences spectaculaires « mises en marche par le spectateur » et de l'apparition d'une nouvelle « figure de science » : celle du médiateur scientifique.

Pour poursuivre cette démarche de démocratisation et, cette fois-ci, ne plus uniquement chercher à ouvrir les portes des laboratoires en proposant au public (notamment jeune) de rentrer dans le laboratoire, mais directement que le laboratoire vienne au public, une approche a été proposée depuis 1996 en France par La main à la pâte [13] sous l'impulsion notamment du prix Nobel Georges Charpak, puis par le Plan Rénovation de l'Enseignement des Sciences et de la Technologie à l'École (PRESTE) en 2000. Ce dernier est maintenant intégré dans les programmes allant de l'école primaire au lycée, avec l'objectif de développer la curiosité, la créativité, l'esprit critique et l'intérêt pour les avancées scientifiques et techniques. Cette approche implique que les élèves s'interrogent sur un problème, proposent des hypothèses, argumentent, échangent et communiquent. De plus, elle prône une pédagogie active dans laquelle les élèves deviennent acteurs de la construction des connaissances et des compétences [14]. Dans le premier et le deuxième cycle universitaire, la formation par la recherche (« research-based learning » en anglais), qui se définit comme « une approche pédagogique dans laquelle les étudiant-es apprennent en s'impliquant dans les processus de réflexion et les activités des scientifiques », s'inscrit naturellement dans la continuité de la « démarche d'investigation ». Elle y ajoute notamment les aspects méthodologiques (travail bibliographique, analyse, interprétation, communication) permettant de développer des compétences de recherche ainsi que des éléments techniques et des méthodes de construction des connaissances [15].

Dans ce contexte, cinq établissements (Chimie ParisTech-PSL, l'ESPCI-PSL, l'École Polytechnique, l'ENS-PSL et l'ENS de Lyon) ont décidé d'initier en 2021 le Tournoi français des chimistes afin de proposer une nouvelle activité pédagogique de formation par la recherche à leurs étudiant-es.

Le Tournoi français des chimistes, c'est quoi ?

Les sujets

Les sujets, au nombre de huit, sont rédigés avec l'objectif principal d'aborder des problématiques quotidiennes, esthétiques ou culturelles, d'une façon qui y implique des questionnements ayant trait à la chimie, tout en suscitant un attrait fort pour la thématique propre à chaque problématique – voir à titre d'exemple les sujets de l'édition 2023 mentionnés dans le *tableau I*.

Ils se proposent souvent de répondre à une problématique, en les encourageant à suivre des méthodologies qui pourraient également être celles de l'ingénierie ou du design : à partir des questions posées (qui pourraient être celles de personnes non scientifiques), un cahier des charges est établi et des recherches bibliographiques menées afin d'acquérir une meilleure expertise des domaines corrélés et de leurs états de l'art associés. Puis, les étudiant-es aidé.es de leurs encadrant-es cherchent des solutions techniques ou appliquent des solutions théoriques ou optimisent ces dernières pour s'approcher d'un système le plus efficace possible. Un travail sur les modèles théoriques chimiques associés à ces enjeux quotidiens ou culturels (aussi bien en termes d'identification, que d'élaboration et d'amélioration) permet en parallèle, par le biais d'une boucle de rétroaction théorie-expérience, une compréhension plus fine des transformations et opérations impliquées et complète pleinement la méthodologie propre à la recherche scientifique. *A fortiori*, la pluridisciplinarité s'investit ici aussi bien entre branches de la chimie qu'entre les différentes sciences formelles et naturelles, ainsi qu'avec les sciences humaines.

La contextualisation et la rédaction des sujets sont travaillées à cet effet : ils se présentent sous les atours aussi bien d'une anecdote historique amusante, de la mise en situation plus romancée d'une question ou d'un besoin que tout le monde pourrait formuler sans en avoir la réponse à disposition. Par ce biais, leur écriture cherche à susciter ou attiser un intérêt pour la chimie, au travers de sa capacité à se cacher partout dans nos vies et de répondre parfois simplement à des problèmes complexes, à la manière d'une « magie moderne » éclairée par la démarche scientifique.

Une attention particulière est portée sur le bagage scientifique qu'il est possible d'acquérir pour les étudiants en traitant les sujets : ceux-ci sont formulés de sorte à se montrer très ouverts, mais en lien avec un domaine préférentiel couramment présent dans les cursus de L3/M1 qu'ils pourront explorer et, ainsi, développer des compétences théoriques et expérimentales d'une manière différente d'une séance thématique plus conventionnelle de travaux pratiques. Ce point garanti, pour les institutions participantes, une bonne viabilité de l'intégration de la préparation au TFChim dans le cadre de modules d'enseignement, permettant ainsi aux étudiant-es de gagner une source de motivation supplémentaire – le TFChim s'intégrant alors pleinement à leur formation. Autant que possible, les sujets sont suffisamment ouverts pour ne pas focaliser les pistes expérimentales vers des solutions uniques ou nécessitant le recours à des équipements spécifiques peu disponibles ou onéreux, ou des réactifs ou conditions opératoires présentant des risques pour la santé ou la sécurité (utilisation de produits spécifiques notoirement toxiques sans alternative viable par exemple). Ce dernier point permet également de garantir une certaine équité entre les institutions participantes, en anticipant les ressources qui

N°	Titre	Défis	Domaines ciblés
1	Le puzzle des bouteilles	Élaborer un système chimique qui reproduise dans le monde réel le jeu pour smartphone « Water sort puzzle ». Sera-t-il nécessaire de modifier les règles pour s'adapter aux réalités de la chimie (et de la physique) ?	Miscibilité des solutions
2	La disparition	Est-il possible de concevoir un système chimique « disparaissant » une fois mis en fonctionnement, bio-inspiré des mécanismes permettant à ces espèces telles que les pieuvres (ou d'autres encore !) de devenir invisibles ou presque ?	Les propriétés optiques – Chimie bio-inspirée
3	« Parfum-gag » by TFChim	Quelle pourrait être la « recette » d'un parfum-gag, qui au contact de la peau perd son odeur plaisante et dégage alors une odeur franchement fétide ?	Chimie organique – Formulation
4	Persistance de la chimie	Serait-il possible de mettre au point un système chimique permettant une mesure temporelle, et reposant sur le déroulement d'une réaction ? Ce système, pour être compétitif, devrait pouvoir être simple d'utilisation, réutilisable, et se montrer déclinable pour remplir diverses fonctions : minuteur, alarme, chronomètre, ou simple horloge, par exemple.	Cinétique chimique
5	Quand les poules auront des dents	Une assemblée de poules chimistes serait-elle capable de réparer une injustice de la nature, en transformant par synthèse chimique leurs coquilles d'œufs en de magnifiques dentiers plus vrais que nature (c'est-à-dire chimiquement identiques à des dents véritables) ? Comment est-il possible d'améliorer les performances de ces nouvelles dents pour les rendre aussi solides que possible ?	Chimie des matériaux
6	Des lessives aux grands airs	Quelles molécules sont responsables de l'odeur du linge qui a séché au grand air ? Comment sont-elles générées dans les conditions de séchage du linge ? Peut-on, par une méthode chimique réalisable au laboratoire et reproduisant ces conditions, générer des quantités plus importantes de ces molécules ?	Chimie atmosphérique
7	Un remède à l'indécision	Élaborer un système chimique (et son mode de lecture associé) qui permette de créer un « décideur chimique » : une réaction facile à mettre en œuvre qui peut aléatoirement aboutir de façon binaire à un résultat ou un autre – la lecture de ce résultat permet alors de prendre sa décision ! Est-il possible de mettre au point un décideur à trois choix, voire plus ?	Physico-chimie
8	Bois à modeler	Est-il possible de mettre au point un procédé permettant de « démanteler » chimiquement le bois en sous-unités (moléculaires par exemple) faciles à conditionner et acheminer, qu'on pourrait ensuite une fois arrivées à destination recomposer en un matériau aussi proche que possible chimiquement et physiquement de la structure du bois originel, sans avoir recours à des résines ou liants synthétiques, et qu'il serait possible de mouler, façonner et modeler à son gré aussi bien en formes qu'en dimensions ? Peut-on adapter ce procédé à différentes essences ? Peut-on le rendre aussi vertueux et éco-compatible que possible ?	Biochimie – Chimie durable

Tableau I - Liste simplifiée des titres des huit sujets et des défis proposés aux équipes pour l'édition 2023. Nota : Les domaines ciblés ne sont pas précisés aux étudiant-es.

semblent nécessaires à l'aboutissement des projets – notamment au travers de problématiques d'équipement –, un des objectifs étant que la résolution des problèmes puisse s'effectuer dans l'immense majorité des cas dans des laboratoires d'enseignement équipés de façon standard, ponctuellement dans les laboratoires de recherche associés aux institutions, quitte à suggérer dans un second temps aux étudiant-es de contacter des chercheur-es travaillant avec des techniques et analyses plus spécialisées pour affiner leurs résultats si les systèmes développés sont au point.

En lien avec cette volonté d'éviter de monopoliser les réflexions vers des transformations impliquant des espèces chimiques dangereuses et pour accompagner la transition vers des pratiques de la chimie plus durables, un accent particulier est posé sur l'incorporation d'éléments de chimie verte directement dans les sujets (dans les thématiques ou directement dans l'énoncé). Les personnes impliquées sur les différents projets sont ainsi explicitement encouragées à s'orienter vers des réponses aux sujets plus vertueuses pour l'environnement et les personnes, et à partager leurs réflexions sur l'optimisation de leurs systèmes dans cette direction.

Déroulement du tournoi

L'article d'octobre 2023 fournit tous les détails sur le déroulement du tournoi [1]. Le *tableau II* rappelle les différentes étapes d'une rencontre.

Enjeux et rayonnement extérieur

L'interaction entre équipes d'étudiant-es, défendant leurs solutions à ces problèmes ouverts, les encourage à développer des raisonnements pluridisciplinaires, tant dans leurs modes de communication que dans leurs approches, afin de rendre leur démarche intelligible à des non-initiés, tout en pouvant également nourrir l'intérêt de chercheurs ou chercheuses spécialistes des domaines concernés. Concernant ce dernier type d'échange, le TFChim donne l'occasion aux étudiant-es d'interagir avec ceux-ci sur les aspects scientifiques, ce qui peut s'avérer particulièrement formateur au sein des cursus, de même qu'à initier certaines émulations et intérêts communs, pouvant contribuer à l'établissement d'un réseau plus solide dans la communauté des chimistes. Ce réseau peut se voir lui-même encore renforcé au cours des nombreux moments de convivialité ayant lieu, lors de l'évènement, entre groupes d'étudiant-es, participant-es.

N°	Durée /min	Étape
1	1	L'équipe « contradicteur » défie l'équipe « orateur » sur un sujet
2	1	L'équipe « orateur » accepte ou rejette le défi via l'utilisation d'un véto*
3	3	Préparation (installation de la présentation, vérifications techniques) de l'« orateur »
4	12	Présentation de l'« orateur »
5	2	Questions techniques du « contradicteur » et réponses de l'« orateur »
6	5	Préparation de la contradiction (discours, contenu, support...) du « contradicteur »
7	5	Présentation du « contradicteur »
8	5	Discussion entre « orateur » et « contradicteur »
9	5	Discussion générale entre l'ensemble des participant-es des deux équipes
10	1	Conclusion de l'« orateur »
11	6	Questions du jury (un par membre, temps pour une réponse par question : 40 s)
12	1	Délibération du jury (sans concertation) avec notation sur 10
13	5	Remarques du jury
	50	Temps total

Tableau II - Déroulement d'une rencontre.

Étapes et chronométrage d'un défi. *Si l'équipe « orateur » rejette le défi, l'équipe « contradicteur » défie l'équipe « orateur » sur un autre sujet et l'on revient à l'étape 1. L'équipe « orateur » est alors dans l'obligation d'accepter le défi dans l'étape 2.

comme accompagnant.es, enseignant.es et encadrant.es, membres des jurys et public. La participation au tournoi 2023 de l'Université de Sherbrooke en partenariat avec l'ESPCI Paris et la composition d'une équipe mixte québécoise et française a permis également d'ouvrir le tournoi à un univers franco-phonie plutôt que purement français, et aux étudiant-es d'explorer une nouvelle facette dans leurs travaux, au regard des différences culturelles entre établissements des deux pays en échangeant entre eux.

Former à la recherche par la recherche grâce au tournoi

Un des premiers cadres explorant les diverses expressions du lien recherche-enseignement dans les établissements d'enseignement supérieur est celui proposé par Healey et Jenkins en 2009 [15]. Celui-ci mentionne quatre façons d'impliquer les étudiant-es dans la recherche et l'investigation :

- fournir des informations sur l'état de la recherche ;
- engager les étudiant-es dans des discussions scientifiques ;
- développer des compétences (théoriques) de recherche et des techniques de construction des connaissances ;
- entreprendre des recherches et des investigations (expérimentales).

Ces deux dernières implications intègrent notamment les aspects théoriques de la démarche scientifique et les compétences à acquérir en lien avec celle-ci [16] : définir une question de recherche, rassembler des informations et des ressources (observer), formuler une hypothèse explicative, tester l'hypothèse en effectuant une expérience et en collectant des données de manière reproductible, analyser les données, interpréter les données, tirer des conclusions qui servent de point de départ pour une nouvelle hypothèse et communiquer sur les résultats par voie orale ou écrite. La première implication « fournir des informations sur l'état de la recherche » consiste notamment, au moyen de conférences ou d'analyse d'articles, à accroître le volume de connaissances des étudiant-es sur le sujet d'étude. Il est à noter que le fait d'engager les étudiant-es dans des discussions scientifiques

entre eux (deuxième implication) s'apparente aux échanges entre scientifiques et permet notamment d'initier de nouvelles hypothèses et/ou d'apporter un autre regard sur les données (analyse et interprétation), voire d'infirmer ou confirmer des conclusions. Les aspects méthodologiques de la recherche bibliographique sont intégrés dans la troisième implication citée. Dans la dernière implication, les étudiant-es peuvent choisir le contenu, sont activement impliqué-es dans l'activité, effectuent leurs propres recherches, construisent et produisent de nouvelles connaissances. Le critère de nouveauté n'est valable que s'il est original dans le domaine ou la discipline et pas seulement pour les étudiant-es [3]. Le cadre proposé par Healey et Jenkins permet de réfléchir à la manière d'intégrer la recherche dans l'enseignement et/ou de positionner une formation (ou une activité) parmi les quatre façons d'impliquer les étudiant-es de premier ou deuxième cycle universitaire dans la recherche et l'investigation.

Ce positionnement peut ainsi être réalisé dans le cas du TFChim en s'appuyant sur les différentes étapes du déroulement d'une rencontre (tableau II) et la partie précédente (tableau III).

Une pluridisciplinarité des approches des sujets

En plus de former les étudiant-es par la recherche, cette activité pédagogique leur permet de se confronter à d'autres manières de penser et/ou d'aborder un sujet. Au travers des solutions (singulières) proposées par chaque équipe, s'expriment des différences de sensibilité, d'expertise disciplinaire ou encore d'interprétation des sujets. Les étudiant-es membres de l'équipe « contradicteur » découvrent souvent une nouvelle façon de répondre à un sujet et doivent s'adapter pour essayer d'améliorer la solution proposée. Rappelons qu'il ne s'agit en aucun cas pour l'équipe contradictrice de comparer les résultats ou discuter l'approche de l'équipe « orateur » en comparaison de sa propre approche. Avoir réalisé des recherches bibliographiques lors de la préparation peut s'avérer utile mais cela ne permet souvent pas de soutenir la discussion de manière approfondie pour plusieurs sujets. Les étapes n° 6 à 9

Implication	Exemples d'activités en amont (⇐), pendant (□) ou aval (⇒) du TFChim
1. Fournir des informations sur l'état de la recherche	L'énoncé des sujets invite à un travail bibliographique afin de mieux appréhender les phénomènes mis en jeu.
	(⇐) Lors de la préparation, chaque équipe <i>via</i> une étude bibliographique doit s'appropriier les connaissances et l'état des recherches sur une thématique ou un phénomène bien particulier.
	(□) Lors de la présentation par l'orateur (<i>tableau III</i> , étape 4), l'équipe contradicteur est susceptible d'acquérir de nouvelles informations sur l'état de la recherche. Cette phase s'apparente à une conférence scientifique.
2. Engager les étudiant-es dans des discussions scientifiques	(⇐) Lors de la préparation, les membres d'une même équipe sont amenés régulièrement à échanger entre elles et eux (ou l'équipe enseignante), que ce soit sur les résultats obtenus, les recherches bibliographiques menées, les analyses et interprétations réalisées ou la communication des résultats.
	(□) Les phases de discussion entre orateur et contradicteur (<i>tableau III</i> , étape 8) ou de discussion générale (<i>tableau III</i> , étape 9) sont par essence des moments durant lesquels les étudiant-es échangent et confrontent leurs points de vue. La phase de questions par le jury (<i>tableau III</i> , étape 11) constitue un moment d'échanges avec des personnes extérieures (professionnels) qui offre un nouveau point de vue.
	(⇒) Pour certaines équipes, un travail de valorisation <i>via</i> des publications est envisagé (ex [17]), ce qui prolonge les discussions entre les membres d'une équipe.
3. Développer des compétences (théoriques) de recherche et des techniques de construction des connaissances	(⇐) Certaines équipes profitent ou pourraient profiter du tournoi pour intégrer la méthodologie d'une recherche bibliographique ou d'analyse/interprétation des données à une unité d'enseignement dédiée par exemple à l'initiation à la démarche scientifique.
4. Entreprendre des recherches et des investigations (pratiques)	L'énoncé des sujets sous la forme d'une question de recherche permet d'engager les étudiant-es dans la première étape de la démarche scientifique.
	(⇐) Le principe même du tournoi est de pouvoir engager des équipes dans la réponse à un défi (i.e. une question de recherche) par un travail expérimental. Les étudiant-es sont acteurs et actrices de la construction des connaissances et des compétences, notamment celles relatives à la démarche scientifique : rassembler des informations et des ressources (observer), formuler une hypothèse explicative, tester l'hypothèse en effectuant une expérience et en collectant des données de manière reproductible, analyser les données, interpréter les données, tirer des conclusions qui servent de point de départ pour une nouvelle hypothèse et communiquer sur les résultats par voie orale ou écrite.
	(⇒) Pour certaines équipes, un travail de valorisation <i>via</i> des publications est envisagé (ex [17]), ce qui prolonge la phase de recherche et d'investigation.

Tableau III - Positionnement du TFChim dans le cadre d'Healey et Jenkins [15].

(*tableau II*) s'avèrent donc de véritables juges de paix pour évaluer la capacité des étudiant-es à assimiler rapidement une approche partiellement, voire totalement nouvelle pour eux et à produire une critique constructive.

Pour illustrer la pluridisciplinarité des approches d'une problématique, nous nous appuyons sur trois des huit sujets (*tableau I*) proposés lors de l'édition 2023 : le n° 3 (« parfum-gag by TFChim »), n° 5 (« Quand les poules auront des dents ») et n° 7 (« Un remède à l'indécision »). Les propositions simplifiées des solutions par chacune des équipes sont données dans le *tableau IV*. Les propositions détaillées pour ces mêmes trois sujets sont données en annexe*. Les trois sujets choisis se trouvent être plus ou moins ouverts dans leur énoncé et dans les domaines pouvant être investis.

Ainsi, le sujet n° 5 est celui le plus fermé en termes tant d'énoncé (synthèse et caractérisation) que de domaine d'étude (chimie des matériaux). Cela s'exprime dans les solutions proposées puisque la synthèse de l'hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) à partir de la calcite CaCO_3 des coquilles

d'œuf a été systématiquement proposée, réalisée selon un nombre limité de voies (hydrothermale et/ou calcination et/ou dissolution/précipitation) ; par ailleurs, les techniques de caractérisation mises en œuvre sont souvent les mêmes (diffraction des rayons X, spectroscopie infrarouge, tests de dureté ou de compression). On peut néanmoins noter que, malgré cet énoncé fermé, certaines équipes ont proposé des approches singulières pour améliorer les propriétés des dents (biomimétisme avec le collagène, impression 3D, incorporation de fluor, synthèse de matériaux hybrides avec des polymères). Ce type de sujet « fermé » (comme pouvaient l'être également les sujets n° 1 et 6 et, dans une moindre mesure, le sujet n° 8) permet aux étudiant-es de nourrir la discussion lors des phases d'échanges et de contradiction car celle-ci s'opère sur des bases bibliographiques et techniques communes. Il ne permet en revanche pas souvent des approches très variées du problème et ne confronte les étudiants à la pluridisciplinarité que de manière modérée.

Équipe	Réponse expérimentale proposée pour le sujet n° 3 « parfum-gag » by TFChim	Réponse expérimentale proposée pour le sujet n° 5 « Quand les poules auront des dents »	Réponse expérimentale proposée pour le sujet n° 7 « Remède à l'indécision »
Chimie ParisTech	Formulation d'un parfum tri-composant contenant de l'indole encapsulé dans un polymère sensible au pH	Synthèse par voie hydrothermale de l'hydroxyapatite à partir du carbonate de calcium CaCO ₃ des œufs. Amélioration de l'élasticité de l'hydroxyapatite par ajout de collagène (approche biomimétique)	Observation de l'apparition des domaines ferroélastiques dans un monocristal de phosphate de plomb lorsque la température du cristal passe en dessous de la température de Curie
École Polytechnique	Aucune expérience réalisée	Synthèse par voie hydrothermale de l'hydroxyapatite à partir du carbonate de calcium CaCO ₃ des œufs. Caractérisation par diffraction des rayons X et test de dureté	Comparaison instantanée de la quantité d'ADN dans une cellule unique, suivie par phosphorescence
ENS Lyon	Étude de la dégradation des esters de butyrate et isovalérate au contact d'une formulation à base d'enzymes estérases, de peau et de sueur artificielle	Synthèse par calcination puis voie hydrothermale de l'hydroxyapatite à partir du carbonate de calcium CaCO ₃ des œufs. Mise en forme sous forme de pastilles et tests de dureté. Influence de paramètres (acidité, frittage, ultrasons, traitement au fluor) sur celle-ci	Étude de la cristallisation autocatalytique d'un sel d'anions chlorate, menant spontanément et aléatoirement vers des cristaux droits ou des cristaux gauches
ENS PSL	Formulation à base d'aldéhydes (hexanal notamment) s'oxydant à l'air en acides carboxyliques	Synthèse par dissolution/précipitation de l'hydroxyapatite à partir du carbonate de calcium CaCO ₃ des œufs. Caractérisation par IR et diffraction des rayons X. Impression 3D et modélisation de dents de poules. Ajout de collagène (approche biomimétique)	Aucune expérience réalisée
ESPCI-Université de Sherbrooke	Encapsulation d'huile essentielle d'ail dans une émulsion huile/eau, rompue par activation mécanique ou thermique	Synthèse par voie hydrothermale de l'hydroxyapatite à partir du carbonate de calcium CaCO ₃ des œufs. Caractérisation par diffraction des rayons X et test de compression	Proposition 1 : Suivi du mouvement d'un morceau de sodium métallique à la surface de l'eau. Lecture des choix selon la zone atteinte sur la surface Proposition 2 : Utilisation de la réaction de Belousov-Zhabotinsky dont la cinétique est perturbée par des sels de métaux lourds
Sorbonne Université	Fabrication d'un bracelet recouvert de sulfure d'argent permettant de générer du H ₂ S au contact d'une solution aqueuse électrolytique	Synthèse par dissolution/précipitation de l'hydroxyapatite à partir du carbonate de calcium CaCO ₃ des œufs puis ajout dans une matrice polymère (PMMA ou silicone). Caractérisation par diffraction des rayons X et test de compression	Proposition 1 : Dépôt de bleu de Prusse sur plaques d'ITO laissant apparaître les mots oui/non, passage entre les deux états par un courant oscillant arrêté aléatoirement Proposition 2 : Préparation de sept solutions à base de jus de chou rouge et réalisation d'une roulette russe utilisant les propriétés acido-basique de celui-ci
Université-ENS Paris-Saclay	Hydrolyse du butanoate d'éthyle (odeur d'ananas) en acide butanoïque (odeur de vomis) dans des conditions de pH similaires à celles de la peau	Synthèse par calcination puis voie hydrothermale de l'hydroxyapatite à partir du carbonate de calcium CaCO ₃ des œufs. Caractérisation par diffraction des rayons X	Synthèse de nanoprismes d'argent sans agitation, la diffusion particulière définissant trois familles de maxima d'absorption et donc trois valeurs possibles
Université de Montpellier	Conversion par hydrolyse ou oxydation d'un composé à l'odeur agréable (ester) en un autre à l'odeur déplaisante (acide)	Synthèse par calcination puis voie hydrothermale (micro-onde) de l'hydroxyapatite à partir du carbonate de calcium CaCO ₃ des œufs. Caractérisation par diffraction des rayons X, tests mécaniques et MEB	Proposition 1 : Mise en œuvre d'un phénomène de métastabilité/auto-amplification sur des cristaux instables (fulminate) exposés à une rampe de température Proposition 2 : Utilisation du mode chaotique de réaction oscillante type Belousov-Zhabotinsky Proposition 3 : Utilisation des anneaux de Liesegang pour la formation d'hélices (droites ou gauches) qui brisent spontanément la parité
Université Paris Cité	Photoclivage d'un ester associant une coumarine et l'acide valérique	Synthèse par dissolution/précipitation de l'hydroxyapatite à partir du carbonate de calcium CaCO ₃ des œufs puis ajout de fluor. Calcination puis caractérisation par diffraction des rayons X	Suivi électrochimique de l'oxydation d'un mélange de nanoparticules d'or et argent. Le premier type de nanoparticule oxydée à l'électrode est aléatoire

Tableau IV - Proposition simplifiée des solutions par chacune des équipes pour les sujets n° 3, 5 et 7 de l'édition 2023 (plus de détails sur ces réponses sont données en annexe*).

Le sujet n° 3 présente quant à lui un énoncé plus ouvert et la possibilité d'investir différents domaines de la chimie. Ainsi, même si l'on retrouve plusieurs réponses se rapportant à la synthèse organique, l'oxydoréduction ou la formulation, les systèmes étudiés s'avèrent (très) différents. À ces domaines s'ajoutent ceux de la photochimie, de la chimie des polymères, des émulsions, de la catalyse ou encore de la nano-précipitation. Ce sujet plus « ouvert » (comme pouvaient l'être également les sujets n° 2 et 4) permet donc aux étudiant-es d'approcher le problème par des voies et domaines très souvent différents de ceux qu'ils ont travaillés et, par conséquent, de se confronter à la pluridisciplinarité des approches de manière plus marquée que précédemment.

Le sujet n° 7, quant à lui, présente un énoncé très ouvert, voire « métaphysique », qui laisse la possibilité aux différentes équipes de répondre au moyen de systèmes aussi originaux que diversifiés. Il en est pour preuve la variété des domaines et systèmes investis par les différentes équipes, avec des approches à l'interface avec la physique (biréfringence, ferro-élasticité, microscopie optique en lumière polarisée, mouvement brownien) ou la biologie (biochimie), l'utilisation de la chiralité, de la cristallographie, de nanomatériaux, de techniques électrochimique ou spectroscopique (UV-visible) ainsi que de réactions acido-basiques, d'oxydo-réduction, oscillantes ou explosives. Les équipes ont proposé des solutions (très) différentes (tableau IV) même si les mêmes types de réactions (oxydo-réduction), de systèmes (nanoparticules d'argent), de techniques (électrochimie, microscopie optique en lumière polarisée) ou de phénomènes (autocatalyse, réaction oscillante) ont été parfois utilisés par deux équipes différentes. Ce sujet très ouvert est également l'un des seuls pour lequel plusieurs équipes ont proposé plusieurs solutions. Ce type de sujet permet donc aux étudiant-es de se confronter, avant même le jour du tournoi, à des approches pluridisciplinaires lors de la préparation.

Le Tournoi français des chimistes est aujourd'hui une activité originale de formation par la recherche proposée par dix grandes écoles et institutions d'enseignement supérieur francophones à destination de leurs étudiant-es de niveau L3 et M1. En sus d'une pratique de la démarche scientifique, ils et elles sont également confronté-es à des approches pluridisciplinaires d'un même sujet. Ce tournoi constitue une activité pédagogique très riche et formatrice dont d'autres établissements ou universités peuvent s'inspirer.

Les auteurs remercient l'ensemble des équipes pédagogiques et techniques impliquées dans la préparation des équipes : Sophie Griveau, Kawthar Bouchemal, Domitille Giaume, Odile Majerus, Zeinab Kadi, Pierre Dedieu, Virginie Lair, Philippe Barboux pour Chimie ParisTech ; Alexis Archambeau et Simon Delacroix pour l'École Polytechnique ; Belen

Albela et Vincent Wieczny pour l'ENS Lyon ; Manon Lecomte et Mathilde Lepoitevin pour l'ENS PSL ; Jean-Baptiste D'Espinose et Yvette Tran pour l'ESPCI ; Laure Fillaud, Clément Guibert et Natacha Krins pour Sorbonne Université ; Lou Barreau pour l'Université-ENS Paris-Saclay ; Sébastien Clément, David Egron, Jean-Sébastien Filhol, Claude Niebel, Saad Sene et Jean-Yves Winum pour l'Université de Montpellier ; Marion Giraud, Jean-François Lemineur et Samia Zrig pour l'Université Paris-Cité.

* Le fichier des annexes est téléchargeable librement sur www.lactualitechimique.org (page liée à cet article).

- [1] J. Piard, B. Sécordel, A. Wustrow, Le Tournoi français des chimistes : deux jours de débats scientifiques autour de la chimie entre étudiant-es de L3 et M1, *L'Act. Chim.*, **2023**, *488*, p. 44-48.
- [2] M. Simons, J. Elen, The 'research-teaching nexus' and 'education through research': an exploration of ambivalences, *Stud. High. Educ.*, **2007**, *32*(5), p. 617-631.
- [3] M. G.M.F. Elsen, G.J. Visser-Wijnveen, R.M. van der Rijst, J.H. van Driel, How to strengthen the connection between research and teaching in undergraduate university education, *High. Educ. Q.*, **2009**, *63*(1), p. 64-85.
- [4] A. Zubrick, I. Reid, P. Rossiter, T. & Y.A. (DETYA), E. and I. P. Australia, Dept of Education, *Strengthening the nexus between teaching and research*, Canberra: Evaluations and Investigations Programme, Higher Education Division, Department of Education, Training and Youth Affairs, **2001**.
- [5] J.W. Moore, The Boyer report, *J. Chem. Educ.*, **1998**, *75*(8), p. 935.
- [6] B.J. S. Barron et al., Doing with understanding: lessons from research on problem- and project-based learning, *J. Learn. Sci.*, **1998**, *7*(3-4), p. 271-311.
- [7] A. Jenkins, M. Healey, R. Zetter, *Linking teaching and research in departments*, **2007**.
- [8] K. Molvinger, La mise en œuvre d'une démarche d'investigation à l'école élémentaire : une étude de cas, *Spirale - Revue de recherches en éducation*, **2017**, N° varia, E1, p. 49-78.
- [9] *Science education now: a renewed pedagogy for the future of Europe*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, **2007**.
- [10] *L'enseignement des sciences dans les établissements scolaires en Europe : état des lieux des politiques et de la recherche*, Eurydice, Bruxelles, **2006**.
- [11] G. Bonnefont, *Tours de physique et de chimie amusantes*, Hachette Livre, BNF, **2018**.
- [12] Exposition internationale, Palais de la découverte, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k313536h>.
- [13] D. Jasmin, La formation en science des professeurs d'école primaire : l'expérience de *La Main à la Pâte*, *Raison présente*, **2019**, *210*(2), p. 17.
- [14] C.C. Bonwell, J.A. Eison, Active learning: creating excitement in the classroom, in *ASHE-ERIC higher education report*, no. 1, Washington, DC, School of Education and Human Development, George Washington University, **1991**.
- [15] M. Healey, A. Jenkins, *Developing undergraduate research and inquiry*, Heslington, York, England, Higher Education Academy, **2009**.
- [16] S. Crawford, L. Stucki, Peer review and the changing research record, *J. Am. Soc. Inf. Sci.*, **1990**, *41*(3), p. 223-228.
- [17] J. Piard, B. Boulenger, E. Brudy, C. Dubois, A. Eisenbeth, L. Barreau, Poivre peureux, poivre heureux, *Le BUP*, **2023**, *1051*, p. 149-165.

Jonathan PIARD^{1*}, professeur agrégé, **Bruno SÉCORDEL**², agrégé-préparateur, et **Allison WUSTROW**³, professeure adjointe.

¹Département de Chimie, ENS Paris-Saclay.

²Département de Chimie, ENS de Lyon.

³Département de Chimie, Université de Sherbrooke (Québec).

* jonathan.piard@ens-paris-saclay.fr



23-24 novembre 2023

Colloque « Patrimoine de la chimie : les bâtiments, les instruments et les chimistes »

École nationale supérieure de chimie de Rennes

• www.sfhc.fr ; www.rennesensciences.fr

Compléments à l'article « Le Tournoi français des chimistes : une compétition pour se former par la recherche et se confronter à la pluridisciplinarité », par J. Piard et coll. (L'Act. Chim., 2023, 489, p. 32)

Réponses détaillées des sujets n° 3, 5 et 7 de l'édition 2023 par les neuf équipes participantes

Sujet n° 3 – « Parfum-gag » by TFChim		
Quelle pouvait bien être est la « recette » d'un parfum-gag, qui au contact de votre peau a dégagé une odeur franchement fétide ?		
Équipe	Réponse expérimentale proposée	Mots-clés
Chimie ParisTech	Formulation d'un parfum à trois composés contenant l'indole en note de cœur (utilisation de diagrammes ternaires de parfumerie pour déterminer les quantités initiales afin de sentir rapidement l'indole) et incorporation de nanocapsules de poly-(D,L-lactide), polymère sensible au pH, contenant également de l'indole (encapsulation par nano-précipitation) relarguant l'indole au contact de la peau grâce au pH légèrement acide de celle-ci afin d'augmenter la concentration en indole dans le parfum et modifier l'odeur, l'indole ayant une odeur agréable à faible concentration et putride à forte concentration.	Nano-précipitation, relargage pH dépendant, diagramme ternaire de parfumerie
École Polytechnique	Aucune expérience réalisée	
ENS Lyon	Synthèses d'esters d'acides malodorants. Étude par contact avec des formulations de peau artificielle, sueur artificielle, élaboration de nanoparticules métalliques pour catalyser la dégradation des acides gras. Utilisation d'enzymes (estérases).	Synthèse organique, formulation cosmétique, catalyse enzymatique
ENS PSL	Réalisation d'un parfum à base d'hexanal. D'odeur initialement fruitée, celui-ci s'oxyde en acide hexanoïque au contact du dioxygène de l'air, produisant des effluves nauséabonds.	Oxydo-réduction
ESPCI-Sherbrooke	Encapsulation/relargage de molécules malodorantes par stimulus mécanique et/ou thermique. De l'huile essentielle d'ail est encapsulée dans une émulsion huile dans l'eau stabilisée par des polymères amphiphiles. La libération des composés malodorants peut être obtenue par activation mécanique (frottement) ou thermique (chaleur corporelle).	Émulsion directe huile/eau, encapsulation/relargage, polymères, stimuli thermique et mécanique
Sorbonne Université	Un bracelet en argent est recouvert d'une couche de Ag ₂ S à sa surface en le plaçant dans une cloche à vide en présence d'un pilulier contenant du P ₂ S ₅ dans de l'eau. Une feuille d'aluminium est ensuite cachée sous le bracelet, et une solution contenant de l'huile essentielle de lavande et du sel pour obtenir un milieu alcalin est pulvérisée sur le porteur du bracelet. Au départ, l'odeur de lavande est très forte, mais l'aluminium au contact de la solution électrolytique réduit la couche noire en formant du H ₂ S en toute petite quantité, ce qui dégage une forte odeur d'œuf.	Oxydo-réduction
Université-ENS Paris-Saclay	Utilisation de la dégradation du butanoate d'éthyle ayant l'odeur d'ananas en acide butanoïque (ou acide butyrique) d'une odeur intense de beurre rance (voire vomir) par hydrolyse dans les conditions de la peau (pH 4,8)	Synthèse organique, hydrolyse d'un ester
Université de Montpellier	Utilisation du principe de la rose sur le tas de fumier ; deux possibilités sont proposées : 1) hydrolyse/oxydation d'un composé chimique d'un composé agréable et conversion en un produit odorant désagréable (hydrolyse d'ester par exemple) ; 2) formulation d'un parfum en jouant sur les notes de tête (odeur de rose (acétate de géranyle, beta-damascone), les notes de fond (odeur fromage excrément (indole)), tout en respectant la réglementation en vigueur pour avoir un produit commercialisable et sans danger.	Hydrolyse d'un ester, oxydo-réduction ; formulation d'un parfum
Université Paris Cité	Utiliser une molécule pro-fragrante qui est constituée d'un fragment coumarine lié à l'acide valérique malodorant qui peut être relarguée via une liaison ester photoclivable.	Synthèse organique, photochimie, photoclivage d'une fonction ester

Sujet n° 5 – Quand les poules auront des dents

Une assemblée de poules chimistes serait-elle capable de réparer cette injustice de la nature, en transformant par synthèse chimique leurs coquilles d'œufs en de magnifiques dentiers plus vrais que nature (c'est-à-dire chimiquement identiques à des dents véritables) ? Comment est-il possible d'améliorer les performances de ces nouvelles dents pour les rendre aussi solides que possible ?

Équipe	Réponse expérimentale proposée	Mots-clés
Chimie ParisTech	La synthèse de l'émail par processus hydrothermal, pour reproduire une composition chimique identique à l'émail des dents. Conversion du carbonate de calcium CaCO_3 directement contenu dans les coquilles en hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$). Ce processus a été choisi pour les besoins de stérilisation que nécessite la commercialisation de tout dispositif biomédical. L'amélioration des propriétés de la dent peut être menée par une démarche de biomimétisme, par l'introduction de collagène dans le réseau d'hydroxyapatite afin d'imiter le rôle du réseau de glycoprotéines présentes dans les dents, qui permet d'amortir les chocs par élasticité (notamment lorsque l'on croque dans une pomme) et permettre d'avoir des dents plus solides.	Processus hydrothermal, biomimétisme, stérilisation, collagène
École Polytechnique	Transformation du CaCO_3 des coquilles d'œufs en hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) par voie hydrothermale. Analyse par diffraction des rayons X. Des tests de dureté conduisent une valeur de 246 sur l'échelle de Vickers, valeur cohérente avec la bibliographie.	Processus hydrothermal diffraction des rayons X, dureté de Vickers
ENS Lyon	Traitement thermique des coquilles à 600 °C pour éliminer les matières organiques. Synthèse d'hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) par voie humide dans l'acide phosphorique. Purification pour élimination du carbonate de calcium résiduel. Mise en forme en pastilles et études mécaniques de la dureté. Étude de l'influence de paramètres (acidité, frittage, ultrasons, traitement au fluor) sur cette valeur de dureté.	Processus hydrothermale, calcination, caractérisations physiques, chimiques et physico-chimiques de matériaux, dureté
ENS PSL	Transformation du CaCO_3 des coquilles d'œufs en hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) en dissolvant les coquilles et en apportant les ions nécessaires (hydroxyde et phosphate). Caractérisation de l'hydroxyapatite par spectroscopie infrarouge et diffraction à rayons X. L'originalité de notre démarche réside dans notre volonté de nous intéresser à la forme de ces dents de poule, en scannant un crâne de poulet au scanner à rayons X pour l'imprimer en 3D et en nous intéressant aux animaux à dents génétiquement proches des poules (alligators) pour modéliser la forme d'une dent de poule. Exploration de la possibilité d'utiliser une matrice de collagène ou de lysozymes (protéines présentes dans les blancs d'œuf).	Dissolution/précipitation, diffraction des rayons X, IR, biomimétisme, collagène
ESPCI-Université de Sheerbrooke	Formation de l'hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) qui compose 96 % de l'émail à partir uniquement de composés que l'on trouve dans les œufs. Purification de la calcite (CaCO_3) qui représente 95 % de la composition de l'œuf pour la transformer en hydroxyapatite. Caractérisation chimique par diffraction des rayons X. Caractérisation mécanique par des tests de compression.	Processus hydrothermal diffraction des rayons X, tests de compression
Sorbonne Université	Récupération du calcium de coquilles d'œufs et échanger leur contre-ion par dissolution dans de l'acide phosphorique, puis mettre en forme le phosphate de calcium obtenu par précipitation en ajustant le pH (et caractérisé par DRX) dans un matériau hybride associé à une matrice polymère (PMMA ou silicone), dont les propriétés mécaniques sont caractérisées ensuite par tests mécaniques sous contrainte de compression.	Dissolution/précipitation, matériau hybride, polymère, diffraction des rayons X, tests de compression
Université-ENS Paris-Saclay	Transformation du carbonate de calcium CaCO_3 des coquilles d'œufs en oxyde de calcium CaO par calcination à 900 °C puis former l'hydroxyde de calcium et ajouter l'acide phosphorique pour former l'hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) Caractérisation par IR et diffraction des rayons X.	Processus hydrothermal, calcination, IR, diffraction des rayons X

Université de Montpellier	Calcination des coquilles d'œufs à température intermédiaire pour essayer de farder un peu de nanostructuration, Formation hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) par ajout d'acide phosphorique (précipitation/micro-onde) et utilisation de liants polymères. Tests mécaniques et de morphologie par microscopie électronique à balayage (MEB).	Processus hydrothermal, calcination, micro-onde, polymère, MEB, diffraction des rayons X, tests mécaniques
Université Paris Cité	Transformer le carbonate de calcium CaCO_3 des coquilles d'œufs en hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) par réaction de cette poudre en milieu basique en présence d'acide phosphorique. Cela peut être transformé aussi en fluoroapatite par ajout de fluor Calcination <i>a posteriori</i> et caractérisation par diffraction des rayons X.	Dissolution/précipitation, calcination, diffraction des rayons X

Sujet n° 7 – Un remède à l'indécision

Élaborer un système chimique (et son mode de lecture associé) qui permette de créer un « décideur chimique » : une réaction facile à mettre en œuvre qui peut aléatoirement aboutir de façon binaire à un résultat ou un autre – la lecture de ce résultat permet alors de prendre sa décision ! Est-il possible de mettre au point un décideur à trois choix, voire plus ?

Équipe	Réponse expérimentale proposée	Mots-clés
Chimie ParisTech	Observation de l'apparition des domaines ferroélastiques dans un monocristal de phosphate de plomb lorsque la température du cristal passe en dessous de la température de Curie. On observe alors des lignes orientées selon trois directions distinctes et on associe une possibilité à chaque direction par microscopie en lumière polarisée. La possibilité retenue est celle correspondant à la direction majoritaire sur la zone observée.	Phosphate de plomb (monocristal), biréfringence, domaines ferroélastiques, microscopie optique en lumière polarisée., décideur à 3 choix
École Polytechnique	Pas d'expérience faites par les étudiants eux même sur ce projet. La source d'aléatoire peut provenir du cycle cellulaire, au cours duquel la quantité d'ADN présente dans la cellule varie du simple ou double de manière continue. Puisqu'on est capable de sélectionner une seule et unique cellule, on détermine sa quantité d'ADN (par phosphorescence après ajout d'un intercalant) et on la compare à une valeur moyenne : c'est un décideur à deux choix. Pour un système à plusieurs choix, faire n mesures pour aboutir à un nombre binaire allant jusqu'à $2^n - 1$	ADN, biochimie, phosphorescence, décideur à deux choix, décideur à N choix
ENS Lyon	Étude de la cristallisation d'un sel de chlorate avec enrichissement énantiomérique spontané droit ou gauche (aléatoirement) par autocatalyse. Étude par microscopie optique polarisante et recherche de réactions auto-catalytiques : la réaction de Mannich n'a pas été fructueuse.	Cristallochimie, microscopie optique en lumière polarisée, autocatalyse, chiralité, décideur à deux choix
ENS PSL	Aucune expérience réalisée	
ESPCI-Université de Sherbrooke	Utilisation la réaction du sodium dans l'eau. N zones spatiales sont définies. La position du métal après 5 secondes déterminait le résultat.	Oxydo-réduction, mouvement brownien, décideur à N choix
	Utilisation d'une réaction chimique périodique comme celle de Belousov-Zhabotinsky dont la cinétique est perturbée par des sels de métaux lourds. Développement d'un système de lecture du résultat aléatoire.	Belousov-Zhabotinsky, réaction oscillante, décideur à deux choix

Sorbonne Université	Utilisation de deux lames d'ITO recouverte de bleu de Prusse qui laissent apparaître les mots oui/non. À l'aide d'un bipotentiostat les lames sont polarisées de manière synchrone, l'une en réduction l'autre en oxydation avec des séquences aléatoires. Lorsque le mot non apparaît sur l'une des lames, le mot oui disparaît sur l'autre et inversement. La séquence est arrêtée aléatoirement et le choix est soit oui soit non.	Bleu de Prusse, électrochromisme, électrochimie, décideur à deux choix
	Préparation de sept solutions à l'image des boules magiques dans les films, ces solutions correspondent chacune à une couleur pouvant être prise par le jus de chou rouge en fonction du pH de la solution. Une sorte de roulette russe a été fabriquée : celle-ci est constituée de sept tubes à essai positionnés tout autour d'une flèche capable de tourner. Les tubes à essai contiennent des solutions plus ou moins acide. Un tube à essai central contient du chou rouge. Quand la flèche est lancée, le tube sur lequel elle s'arrête est versé dans le tube central contenant du chou rouge et la couleur indique l'un des sept choix possibles.	Chou rouge, indicateur coloré acido-basique naturel, roulette russe, décideur à sept choix
Université-ENS Paris-Saclay	Utilisation de la synthèse de nanoprismes d'argent sans agitation afin de tirer profit du caractère chaotique de la diffusion particulaire. Les nanoprismes d'argent étant colorés (résonance plasmon de surface), il est possible d'utiliser soit notre œil, soit les longueurs d'onde du maximum d'absorption. 48 synthèses ont été réalisées dans les mêmes conditions et ont permis de montrer qu'il est possible de générer un décideur à trois choix parfait (33 % par choix) en s'appuyant sur les longueurs d'onde au maximum d'absorption.	Nanomatériaux, spectroscopie UV-visible, résonance plasmon de surface, décideur à trois choix
Université de Montpellier	Utilisation de cristaux (sub millimétriques) d'un composé explosif instable (fulminate) et de sa température de décomposition T_m . Cette dernière est prise comme décideur (explosion au-dessus de T_m : oui en dessous non) : mise en œuvre rapide et simple par l'utilisation d'un banc Köfler mais la reproductibilité nécessite une maîtrise des conditions de synthèse. La manipulation de composés explosifs n'est pas optimale. Une variante popcorn a été envisagée mais non réalisée.	Décomposition, réaction explosive, décideur à deux choix
	Utilisation du mode chaotique de réaction oscillante (Crazy Clock). Détermination des conditions (température concentration agitation...) où l'oscillateur chimique (Belousov-Zhabotinsky) devient chaotique (les oscillations deviennent aléatoires), la décision oui/non est assurée par la comparaison du temps entre deux oscillations par rapport à la durée médiane.	Belousov-Zhabotinsky, réaction oscillante, décideur à deux choix
	Utilisation des anneaux de Liesegang pour la formation d'hélices (droites ou gauches) qui brise spontanément la parité. Une optimisation des conditions (concentration, rayon des tubes) pour passer du mode anneau en mode hélice est possible. La lecture est directe mais ne peut se faire qu'après 6-12 heures de réaction.	Métastabilité, autocatalyse, anneaux de Liesegang, décideur à deux choix
Université Paris Cité	Utilisation du caractère aléatoire du mouvement brownien de nanoparticules d'argent et d'or pour venir impacter la surface d'une électrode polarisée et s'oxyder en ions de charge différente. Une discrimination de l'impact électrochimique de ces nanoparticules de nature chimique différente (mais de tailles identiques) par la quantité d'électrons échangée au cours du processus est réalisée. À partir de la quantité de charge, il est possible de savoir si la particule qui a réagi était une particule d'or ou d'argent et donc le premier impact détectable permettait de décider.	Nanomatériaux, oxydo-réduction, électrochimie, mouvement brownien, décideur à deux choix