

Formation à la microfluidique et aux microréacteurs selon un scénario pédagogique mixte

N. REGNIER^a, A. PERRO-MARRE^b

a. Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Pessac, France – nicolas.regnier@enscbp.fr

b. Institut des Sciences Moléculaires (ISM), Talence, France – adeline.perro-marre@enscbp.fr.

Résumé :

Un projet de formation à la microfluidique et aux microréacteurs est en cours de réalisation pour les élèves-ingénieurs de Bordeaux INP. Du point de vue pédagogique, sa particularité est de proposer différentes modalités d'enseignement : certaines activités sont réalisées à distance et en autonomie, d'autres sont présentielles et collectives.

Une autre particularité est sa réalisation à l'aide d'outils simples à mettre en œuvre, mais donnant un résultat attractif et en accord avec les intentions pédagogiques.

Abstract :

A learning project concerning microfluidics and microreactors is currently developed by Bordeaux INP for engineering students. From a pedagogical point of view, its particularity is to propose different teaching modalities: some activities are performed on-line and independently by each student, others are performed face-to-face during group sessions.

Another feature is its realization with simple tools, resulting however in an attractive online course, in line with the pedagogical goals.

Mots clefs : microfluidique ; procédés intensifiés ; formation en ligne

1 Introduction

Ce projet pédagogique concerne une formation ayant pour thème la microfluidique et les microréacteurs, à l'attention d'élèves-ingénieurs en chimie-physique. L'objectif est d'initier les futurs ingénieurs à l'utilisation de l'outil microfluidique, via l'acquisition de connaissances et de compétences innovantes qui prennent depuis plusieurs années une grande importance pour le génie des procédés (Jensen [1], Stone & Kim [2]).

Il est réalisé et mis en œuvre dans une école d'ingénieur de Bordeaux INP, où il est soutenu en tant que lauréat de l'appel à projet « innovation pédagogique ».

Plusieurs activités sont définies et mises en œuvre selon des modalités mixtes, en partie à distance en autonomie, en partie sous forme présentielle et collective. Le scénario pédagogique retenu peut être

assimilé à celui d'une classe inversée (Bishop & Verleger [2]), dont l'originalité est une activité présente sous forme de travaux pratiques.

Les raisons de ces choix pédagogiques sont en partie liées à des contraintes matérielles et organisationnelles (par exemple la difficulté à augmenter le nombre d'heures de présence par étudiant), et surtout à l'envie de dispenser cette nouvelle formation sous une forme attrayante et innovante.

Les ressources nécessaires à cette formation (cours et quiz en ligne, matériel et protocole expérimental) sont actuellement en cours de réalisation. En particulier, un prototype fonctionnel du cours en ligne (diaporama sonorisé) peut être présenté. La médiatisation est réalisée par les enseignants-chercheurs porteurs du projet eux-mêmes, à l'aide d'outils à la portée de tous.

2 Thématique et contexte

Les procédés intensifiés, tels que les microréacteurs, présentent des avantages considérables et ont désormais une grande importance pour le génie des procédés. La réduction de la taille des composants conduit à une amélioration considérable des transferts de chaleur et de masse, en raison de rapports de surfaces d'échange sur volumes très largement augmentés par rapport à ceux des procédés classiques.

Ces différences impliquent que les phénomènes dominants ne sont pas les mêmes aux échelles classiques et aux échelles microfluidiques. Dans ce dernier cas, les flux de chaleur et de masse sont prépondérants par rapport aux phénomènes d'accumulation ou de production. Ceci permet une très grande efficacité énergétique, et offre la possibilité de contrôler des systèmes quasiment impossibles à maîtriser de façon classique, comme des réactions chimiques explosives.

Les systèmes microfluidiques sont donc caractérisés par leurs petites dimensions et par leur faibles consommations d'énergie ou de matière, qui résulte à la fois de leur taille et de leur efficacité. Il semble important de faire découvrir ces outils et leurs caractéristiques à des élèves-ingénieurs qui, par ailleurs, suivent des enseignements de génie des procédés concernant en particulier les outils « classiques » du génie chimique : opérations unitaires à l'échelle macroscopique telles que réactions, distillations, extractions, échanges de chaleur, etc.

3 Pédagogie de la formation

3.1 Objectifs d'apprentissage

La principale intention pédagogique à l'origine de cette formation est donc d'initier les futurs ingénieurs à l'utilisation de l'outil microfluidique, et de mettre en évidence ses particularités et ses potentialités.

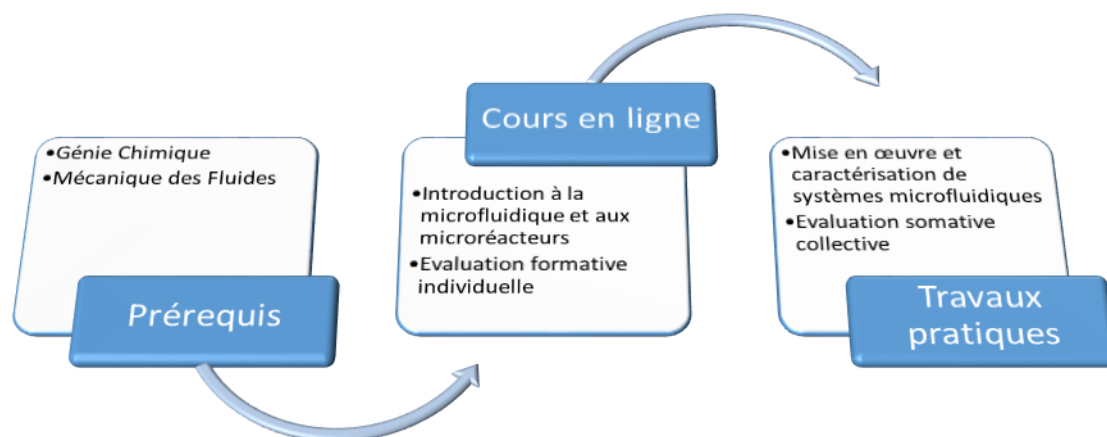
Plus précisément, à l'issue de la formation les élèves seront capables :

- D'énoncer les différences (avantages et inconvénients) entre systèmes macrofluidiques et microfluidiques, en particulier entre réacteurs classiques et microréacteurs.
- D'expliquer et de caractériser les phénomènes à l'origine de ces différences.
- De décrire les types de géométries et d'écoulement qui peuvent être mis en œuvre dans un microréacteur.
- D'identifier les productions susceptibles d'être réalisées dans des microréacteurs.
- D'énoncer les grands principes de construction de systèmes microfluidiques.

- De développer une approche expérimentale via l'utilisation d'un microréacteur afin de résoudre un problème concret (suivi d'une cinétique de réaction, mesure de la viscosité d'un fluide...).

3.2 Scénario pédagogique et activités

Le schéma suivant résume le scénario pédagogique :



a) Prérequis en génie chimique et en mécanique des fluides

Il est important que les élèves débutent cette formation avec des notions de génie chimique classique, en particulier à propos des réacteurs chimiques, ainsi qu'avec des notions de mécanique des fluides, en particulier à propos des régimes d'écoulement. De cette façon, les différences et similitudes, avantages et inconvénients par rapport aux microréacteurs et à la microfluidique, apparaîtront clairement.

Il s'agit pour les élèves de suivre les formations correspondantes, afin d'acquérir des connaissances et compétences en génie chimique et en mécanique des fluides.

L'intention de l'équipe pédagogique est de fournir les notions nécessaires pour commencer la formation, et d'inciter à comparer les systèmes classiques et microfluidiques.

b) Cours d'introduction à la microfluidique et aux microréacteurs

La méthode pédagogique choisie consiste à dispenser les connaissances, non pas grâce à un cours magistral nouveau ou complémentaire, mais plutôt grâce à un cours en ligne. Le principal avantage de cette méthode est l'autonomie et la liberté (de temps et de lieu) laissés à chaque élève pour son apprentissage, seule une échéance (liée à la poursuite des activités) étant imposée. Il est aussi plus facile de proposer des contenus attractifs, des approfondissements optionnels, et la réalisation d'un cours en ligne implique presque nécessairement une exigence sur le fond et sur la forme, dont bénéficie la pédagogie.

L'intention pédagogique est bien sûr de permettre aux élèves d'acquérir des connaissances de base en microfluidique. De nombreuses études montrent que la durée de concentration effective d'un élève suivant un cours est de l'ordre de 15 à 20 minutes (Bunce et al. [4]). Ce point est d'autant plus important pour un apprentissage réalisé en autonomie, et le cours en ligne a donc été calibré pour respecter cette durée maximum.

c) Evaluation formative à l'issue du cours

Pour un cours en ligne, la question du suivi est cruciale. Comment s'assurer que les élèves ont suivi le cours, l'ont suivi jusqu'au bout, et que des connaissances ont bien été acquises ? Bien sûr ces questions se posent aussi pour les enseignements présentiels, mais elles sont d'une importance particulière pour des activités distantes qui bien souvent doivent faire leurs preuves.

La réponse est apportée ici sous la forme d'un test en ligne qui doit être réalisé par les élèves à l'issue du cours. Il s'agit d'une évaluation formative individuelle qui n'est pas notée, mais permet de vérifier la participation.

Cette activité permet à l'élève d'évaluer son positionnement par rapport aux attendus, de réguler son apprentissage en l'incitant à renforcer ses points faibles.

d) Travaux pratiques de microfluidique

Les travaux pratiques constituent l'activité suivante, la mise en situation étant toujours une étape importante des formations d'ingénieurs. Ils commencent par une séance de débriefing collective concernant le cours, et qui peut être considérée comme une évaluation formative complémentaire.

Réalisés sous forme collaborative et présentielle, ces travaux pratiques sont basés sur la manipulation d'éléments microfluidiques simples permettant de mettre en évidence les phénomènes importants : écoulements laminaires, coefficients de diffusion, génération de gouttes.

Leur objectif est d'apporter des compétences expérimentales en microfluidique, de renforcer, compléter, et concrétiser l'apprentissage commencé par le cours en ligne.

e) Evaluation à l'issue des travaux pratiques

Enfin, l'évaluation sommative finale est un travail collectif des élèves, sur la base des résultats obtenus et des observations réalisées, extrapolés à un cas concret. Elle prend la forme d'un exposé court et d'un document de synthèse.

f) Evaluation de l'enseignement

L'enseignement lui-même sera évalué comme tous ceux de l'école d'ingénieurs où il sera dispensé, mais avec un suivi particulier lié à sa qualité de lauréat de l'appel à projet « innovation pédagogique » de Bordeaux INP, dont le but est la diffusion et l'échange de pratiques innovantes.

Le tableau suivant résume les séquences pédagogiques et leurs objectifs.

| Séquence | Activités et moyens, durée élève | Apport pédagogique pour l'élève | Intentions pédagogiques de l'équipe pédagogique |
|---|---|--|---|
| 0 - Prérequis en génie chimique et en mécanique des fluides | <i>Suivre les formations correspondantes (CM, TD, TP) : 92h</i> | <i>Acquérir des connaissances et compétences en génie chimique et en mécanique des fluides</i> | <i>Fournir les notions nécessaires pour commencer la formation, inciter à comparer les systèmes classiques et microfluidiques</i> |
| 1 - Cours d'introduction à la microfluidique et aux microréacteurs | Suivre un cours en ligne (diaporama sonorisé Moodle) : 0h20 | Acquérir des connaissances de base en microfluidique | Transmettre des connaissances en autonomie, motiver et intéresser grâce à un contenu attractif |

| | | | |
|---|--|--|--|
| 2 - Evaluation formative à l'issue du cours | Répondre à un questionnaire autocorrigé en ligne (quiz Moodle) : 0h10 | Evaluer son positionnement par rapport aux attendus, réguler son apprentissage | Inciter à renforcer les points faibles, vérifier que le cours a été suivi |
| 3 - Travaux pratiques de microfluidique | Mettre en œuvre des systèmes microfluidiques réels, observer, caractériser : 3h30 | Concrétiser et ancrer les connaissances, acquérir quelques compétences expérimentales en microfluidique | Renforcer et compléter l'apprentissage, impliquer et intéresser par la mise en situation concrète |
| 4 - Evaluation à l'issue des travaux pratiques | Remplir une fiche de résultats, préparer et réaliser une présentation orale : 0h30 | S'entraîner à présenter des travaux et des résultats, s'approprier les concepts grâce à l'effort de clarification nécessaire | Vérifier l'atteinte des objectifs d'apprentissage, l'implication, valider / réajuster la formation |
| 5 - Evaluation de l'enseignement | Remplir une grille d'évaluation : 0h10 | (s'impliquer dans sa formation) | Valider / réajuster la formation |

4 Réalisation, ressources et outils utilisés

4.1 Cours en ligne

Un contexte particulier a conduit l'équipe pédagogique à médiatiser elle-même le cours, sans appui techno-pédagogique interne ou externe. Il était donc nécessaire d'utiliser des outils familiers et accessibles, le processus utilisés est le suivant :

- Réalisation du contenu « source » sous forme d'un diaporama (Microsoft Powerpoint), inclus diverses ressources telles que des vidéos. Une narration a été prévue dès le départ, et dans un premier temps rédigée sous forme de commentaires.
- Sonorisation par lecture et enregistrement audio des commentaires, puis inclusion dans le diaporama.
- Transformation du diaporama dans un format utilisable en ligne : il s'agit ici d'Adobe Flash. Le résultat n'est pas une vidéo se déroulant seule du début à la fin, mais plutôt une séquence de diapositives dans lesquelles l'élève peut naviguer à son rythme. Les animations, vidéos, et liens inclus sont bien sûr conservés.
- Mise à disposition du cours en ligne de façon à être facilement accessible pour les élèves : il s'agit ici de la plateforme pédagogique Moodle de l'établissement, déjà installée et utilisée essentiellement en complément des enseignements présentiels. L'avantage est que tous les problèmes d'accès sont déjà gérés, et que ce système permet le déploiement de nombreux types d'activités.

4.2 Evaluation formative en ligne

L'évaluation en ligne a tout naturellement été réalisée sur la même plateforme pédagogique Moodle, grâce à l'activité « test » que propose celle-ci.

Une de ses possibilités très intéressante est la réalisation de questions dont certains éléments sont « calculés » selon des formules et ensembles de données définis au préalable. En pratique, cela signifie

que les éléments numériques de ces questions sont différents pour chaque élève, ou pour chaque tentative d'un même élève.

Une vue d'ensemble est disponible pour les enseignants, elle permet de vérifier la participation et les scores obtenus par chaque élève.

4.3 Travaux pratiques

Dans cette première version les travaux pratiques sont constitués de deux types de puces microfluidiques : l'une pour mettre en évidence les écoulements laminaires et le mélange par diffusion de deux fluides, l'autre permettant la génération de gouttes et l'observation d'un autre type de mélange.

Les observations sont réalisées grâce à un microscope muni d'une caméra numérique, les données recueillies étant ensuite traitées à l'aide d'un logiciel de calcul scientifique (Matworks Matlab).

Les dispositifs expérimentaux sont très simples et peu onéreux, mais suffisants pour sensibiliser les élèves-ingénieurs à l'outil microfluidique et aux phénomènes se déroulant en milieux confinés.

5 Perspectives et conclusion

Ce projet vise à faire découvrir un outil innovant et pluridisciplinaire. Il est dans une première phase ciblé sur une formation particulière (le génie chimique), et a pu être mis en place avec peu de moyens, aussi bien matériels qu'humains.

Les notions apportées pourront s'inscrire à terme de manière plus globale dans la formation des élèves-ingénieurs. Notre objectif est d'introduire l'exploitation de microréacteurs à différentes étapes de la formation : l'acquisition de notions fondamentales pourra s'effectuer lors de la première et/ou deuxième année, puis ces acquis pourront être exploités lors des enseignements de spécialités de troisième année (polymères, matériaux, fluides complexes, formulation...).

Une demande de financement a été déposée (appel à projet « enseignement supérieur » du Conseil Régional d'Aquitaine) par une équipe d'une vingtaine de personnes constituée de professeurs, de maître de conférences et d'intervenants extérieurs. Elle permettra, entre autres, de consolider ce projet en ce qui concerne la mise en œuvre et la caractérisation de microréacteurs : observation par thermographie infrarouge de réactions exothermique en milieu confiné, et extension à plusieurs postes de travail.

La réalisation sous forme d'un module autonome est un avantage important permettant de proposer cet enseignement à d'autres formations (y compris continue), soit par intérêt pour son contenu, soit pour transposition de la méthode pédagogique à d'autres thématiques.

Références

- [1] Jensen, K. F., Microreaction engineering - is small better? *Chemical Engineering Science*, 56(2), 293-303, 2001.
- [2] Stone, H. A., Kim, S., Microfluidics: basic issues, applications, and challenges. *AICHE Journal*, 47(6), 1250-1254, 2001.
- [3] Bishop, J. L., Verleger, M. A. The flipped classroom: A survey of the research. In *ASEE National Conference Proceedings*, Atlanta, GA, 2013.
- [4] Bunce, D. M., Flens, E. A., & Neiles, K. Y., How Long Can Students Pay Attention in Class? A Study of Student Attention Decline using Clickers. *Journal of Chemical Education*, 87, 1438-1443, 2010.