



HAL
open science

Cours en ligne sur les fondamentaux de la cristallisation et de la précipitation : un lien recherche / enseignement

Fabienne Espitalier, Fabien Baillon, René David, Frédéric Gruy, Alain Gaunand, Jacques Schwartzentruber, Michel Cournil, Ana Cameirao, Axel Momm, Katia Oliver, et al.

► **To cite this version:**

Fabienne Espitalier, Fabien Baillon, René David, Frédéric Gruy, Alain Gaunand, et al.. Cours en ligne sur les fondamentaux de la cristallisation et de la précipitation : un lien recherche / enseignement. CRISTAL 5: cristallisation et précipitations industrielles, May 2008, Lyon, France. p.323-328. hal-01768707

HAL Id: hal-01768707

<https://hal.science/hal-01768707>

Submitted on 6 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COURS EN LIGNE SUR LES FONDAMENTAUX DE LA CRISTALLISATION ET DE LA PRÉCIPITATION : un lien recherche / enseignement

ESPITALIER Fabienne^a, BAILLON Fabien^a, DAVID René^a, GRUY Frédéric^b, GAUNAND Alain^c,
SCHWARTZENTRUBER Jacques^a, COURNIL Michel^b, CAMEIRAO Ana^b, MOMM Axel^b, OLIVER
Katia^c, LOUBIGNAC Eric^a, LOURS Nathalie^a

^aÉcole des Mines d'Albi-Carmaux, Campus Jarlard Route de Teillet F-81013 ALBI cedex 09 –
Fabienne.Epitalier@enstimac.fr, Fabien.Baillon@enstimac.fr

^bÉcole des Mines de Saint Étienne, 158, cours Fauriel F-42023 SAINT-ÉTIENNE cedex 2-
fgruy@emse.fr

^cÉcole des Mines de Paris, 60 Boulevard St Michel F-75006 PARIS - Alain.Gaunand@ensmp.fr

Résumé

Un enseignement en ligne sur les bases fondamentales en cristallisation est en cours de réalisation. Ce projet a vu le jour grâce à la mise en commun des compétences pédagogiques de plusieurs partenaires et de leurs expériences en recherche. Les compétences en enseignement de neuf enseignants-chercheurs et chercheurs ont été mises à profit en mutualisant le contenu pédagogique des cours qu'ils assurent dans leurs écoles respectives à des niveaux variés des cursus. D'autre part, l'expérience en recherche de cette communauté scientifique permet d'illustrer le cours par des exemples simples, mais pertinents car issus de problèmes industriels. Le produit, disponible en version de démonstration, présente une dimension supplémentaire au niveau du dialogue enseignant-enseigné par rapport aux enseignements classiques.

Mots clés : cristallisation, modèle pédagogique, chaîne éditoriale, SCENARichain, e-learning

1. Introduction

Depuis sept ans, le groupe GPCristal composé de chercheurs en cristallisation/précipitation de trois Écoles des Mines (Albi-Carmaux, Paris et Saint Étienne) se réunit deux fois par an pour discuter des différentes études en cours dans leurs laboratoires respectifs. Cette communauté a mis à profit ces compétences en enseignement, en mutualisant le contenu pédagogique de différents cours concernant la cristallisation-précipitation enseignés dans chaque Ecole à différents niveaux du cursus.

Ainsi, un cours en ligne sur les bases fondamentales en cristallisation est actuellement en phase de réalisation.

Ce cours s'inscrit dans un objectif plus général de diffusion de supports de cours mené par les établissements partenaires. Ces supports diffusés en ligne sont destinés à l'enseignement supérieur, à la fois à la formation initiale (en cycle licence), à la mise à niveau rapide d'étudiants entrants en cycle master - l'internationalisation des formations et la diversification des recrutements renforçant la nécessité d'homogénéiser les connaissances des étudiants - et aux étudiants de formation continue diplômante (cycle à distance).

Dans cette optique et au plan national, les Écoles du GEM (Groupe des Écoles des Mines) participent au projet Grande École Virtuelle (GEV) et aux projets de création de contenus et d'outils au sein des trois Universités Numériques Thématiques : le consortium UNIT (Université Numérique en Ingénierie et Technologie), l'UVED (Université Virtuelle Environnement et Développement durable) et l'UNISCIEL (UNiversité des SCIences En Ligne).

2. Scénarisation du cours

2.1 Méthodologie de conception

Les modules du cours ont été réalisés à l'aide de la chaîne éditoriale SCENARichain, selon le modèle pédagogique OPALÉ (Open Academic Learning : <http://scenari-platform.org/projects/opale/fr/pres/co/index.html>), développé par la communauté libre scenari-platform.org). Une chaîne éditoriale est un outil de gestion documentaire permettant la conception de documents homogènes et structurés selon un modèle donné, puis la publication de ces contenus sur différents supports de diffusion (version papier, version en ligne, ou CD-ROM par exemple).

Le modèle OPALÉ est issu de l'expérience de production de supports de cours d'une vingtaine d'Universités et de Grandes Ecoles, pilotés par l'Unité d'Innovation Ingénierie des Contenus et Savoirs de l'UTC (UI-ICS : <http://scenari.utc.fr/ics/>), dans le cadre de la communauté ScenariSup (<http://scenari.utc.fr/scenarisup/co/Accueil.html>). La communauté initiée en 2003 a permis de mettre au point et de diffuser OpaleSup, la chaîne éditoriale de création et de publication de contenus pédagogiques académiques pour l'enseignement supérieur.

Pour atteindre les objectifs pédagogiques souhaités par les auteurs du projet, ce modèle et l'ergonomie de la publication web ont été adaptés.

Ce modèle offre une trame intéressante pour guider les enseignants dans leur démarche de conception. Par ailleurs, l'ouverture de ce modèle libre nous permet de le faire évoluer selon les besoins pédagogiques exprimés par les enseignants, en cours de rédaction du contenu.

Nous avons par exemple amélioré l'accès aux exercices et aux animations ou simulations dans une "vue outils", pour faciliter l'accès à ces ressources lors des phases de révision des apprenants.

De même, nous avons ajouté à ce modèle la notion de nomenclature, afin que l'apprenant puisse avoir accès à une vue globale des notations.

Ce modèle a été étendu afin de permettre les parcours par compétences ou par questions que souhaitent ses auteurs. Par la suite, une approche savoir/savoir-faire sera aussi adoptée afin d'enrichir le cours. Les supports sont sous licence Creative Commons, libres d'utilisation dans un contexte d'enseignement.

2.2 Méthodologie de conception

Les acteurs de ce projet sont neuf enseignants-chercheurs et chercheurs des procédés ayant une expérience en Enseignement (Génie des Procédés, Thermodynamique, Chimie) mais aussi en Recherche dans le domaine de la cristallisation et de la précipitation. Ils ont confronté leurs points de vue en travaillant en binôme ou trinôme afin de définir au mieux le contenu pédagogique, et ont été assistés d'ingénieurs en multimédia, en pédagogie et en conception numériques des cellules "Nouvelles Technologies Éducatives" des Écoles des Mines.

Module par module, les auteurs ont conçu leurs chapitres en respectant quelques normes de structuration et de mise en valeur pédagogiques. La confrontation du travail de chacun aux membres du projet a permis d'assurer une cohérence rédactionnelle. Le modèle pédagogique est une trame conceptuelle qui assure quant à lui une harmonisation structurelle du contenu pédagogique et un bon niveau de qualité lors de la publication finale.

En travaillant autour d'un modèle évolutif, nous pouvons gagner du temps lors de la conception des supports, et les auteurs peuvent s'attacher au contenu, et avoir une réflexion pédagogique de fond, en se concentrant sur leur cœur de métier.

3. Scénarisation du cours

Ce cours sur les fondamentaux de la cristallisation, d'un volume représentant une vingtaine d'heures en « présentiel » pour des élèves de niveau Master 1, traite des équilibres liquide-solide, de la nucléation, de la croissance, de l'agglomération et de l'hydrodynamique des suspensions. Le public visé est dans un premier temps des élèves ingénieurs, des élèves en Master Professionnel ou Spécialisé. Lors de la conception, un soin particulier est apporté pour que les supports d'enseignement soient enrichis par des illustrations, des animations et des exercices simples, afin d'en faciliter la compréhension.

Le cours est découpé en « grains pédagogiques » facilitant son réemploi dans différents contextes pédagogiques. Son contenu est organisé de façon à offrir à ses utilisateurs plusieurs modes de navigation : linéaire, par mots clés, par compétences ou par questionnement.

Un grain pédagogique est un petit élément de contenu porteur de sens et insécable.

La structuration sous forme de grains pédagogiques modulaires est un élément-clé pour la diffusion de ce type de supports de cours. En effet, s'il est vrai que les enseignants de ce projet ont choisi une organisation du module de formation produit à la suite d'une vraie réflexion pédagogique, cette structuration du cours répond à leurs besoins pédagogiques, selon leur contexte d'utilisation. Dans un autre contexte, soit pour une formation plus spécifique ou pour un complément de cours, un enseignant peut vouloir réutiliser tout ou en partie des chapitres, ou même que quelques activités de cours ou d'évaluation : la conception sous forme d'un fond documentaire composé de grains pédagogiques favorise grandement la recomposition d'un scénario pédagogique spécifique pour répondre au mieux au contexte d'utilisation de l'enseignant.

Lors de la conception de supports de cours en ligne, un travail de structuration du contenu est primordial. Cet effort rédactionnel est primordial pour des modules d'enseignement diffusés en ligne, car le média de consultation pour l'apprenant a des contraintes particulières : lorsqu'il consulte un contenu en ligne, l'apprenant le consulte page par page, et peut "naviguer" dans le cours de manière plus ou moins linéaire. Cela est vrai aussi pour un livre, mais les habitudes de navigation sur des sites généralistes favorisent cette navigation non linéaire. Par ailleurs, si dans un livre, il est courant de faire référence à un paragraphe en indiquant le numéro de page où le trouver, cela n'est pas concevable sur un site internet. De même, si pour un livre, il est admis qu'un auteur étende son explication sur plusieurs pages, des contraintes ergonomiques de navigation imposent que les pages de contenu d'un site ne soient pas trop longues.

Ces petites spécificités –parmi d'autres- obligent les enseignants à structurer précisément leur contenu de cours pour que le support produit soit bien un support de formation, et non un simple site de consultation.

Une fois la structure du cours posée et la scénarisation pédagogique définie, le support en ligne est consultable linéairement par de simples boutons de navigation, ou plus spécifiquement via un plan. Ces deux modes de navigation sont parfaits dans une démarche d'auto-apprentissage par l'apprenant. Un ensemble d'outils vient enrichir le dispositif en permettant à l'apprenant un accès direct à certains éléments : la nomenclature, la bibliographie, le glossaire précisant les notions et définitions fondamentales, la liste des exercices, sont autant d'outils transversaux qui permettent un accès direct à certains éléments du contenu.

Lors de la conception d'un dispositif de formation pour un apprentissage éventuellement sans tutorat, qu'il soit en ligne ou non, il est important de veiller à ce qu'il soit adapté à un large public d'apprenants. C'est aussi vrai en « présentiel », mais moins crucial, dans la mesure où à tout moment le développement peut être repris, à la demande des apprenants ou à l'initiative de l'enseignant. Pour pallier à l'absence de ce mode d'interactivité directe entre apprenants et enseignant, les intentionnalités pédagogiques sont explicitées et mises en forme dans les supports publiés. Ainsi, lorsqu'ils rédigent, les enseignants peuvent spécifier qu'il s'agit d'une définition, d'un point fondamental, d'une remarque, d'un exemple, d'un conseil, d'un complément, d'un rappel ou d'une méthode. Ces intentionnalités seront mises en forme afin d'alerter l'apprenant.



La force motrice de la cristallisation ou sursaturation $\Delta \mu_i$ est définie comme la différence entre des potentiels chimiques des espèces (molécules, ions) constituant la substance à cristalliser, dans la solution saturée $\mu_i^{L,eq}$ et dans la solution μ_i^L :

$$\Delta \mu_i = \mu_i^L - \mu_i^{L,eq}$$

La cristallisation (apparition du solide) est spontanée quand : $\Delta \mu_i > 0$.

Le système tend à un état d'équilibre lorsque $\Delta \mu_i = 0$.

(a)

Un mélangeur statique en ligne n'est utile qu'aux valeurs des nombres de Froude modifié élevés et nombres d'Archimède faibles. Dans les autres cas, le mélangeur va piéger le solide divisé suspendu dans le tube.

(b)

Figure 1. Exemple de balises pédagogiques : définition et rappel

Par ailleurs, plusieurs niveaux de lecture sont proposés à l'apprenant au travers de renvois à des pages ou des parties complémentaires. Ainsi, l'apprenant peut, si besoin, approfondir ou non certains points.

Un effort de conception a été apporté sur les ressources d'illustration, notamment par le développement d'animations à forte plus-value pédagogique. Les enseignants ont été accompagnés dans la phase de conception de ces animations, afin que les phénomènes décrits puissent être visualisés au mieux par les apprenants, sans que le graphisme prenne le pas sur la volonté didactique.

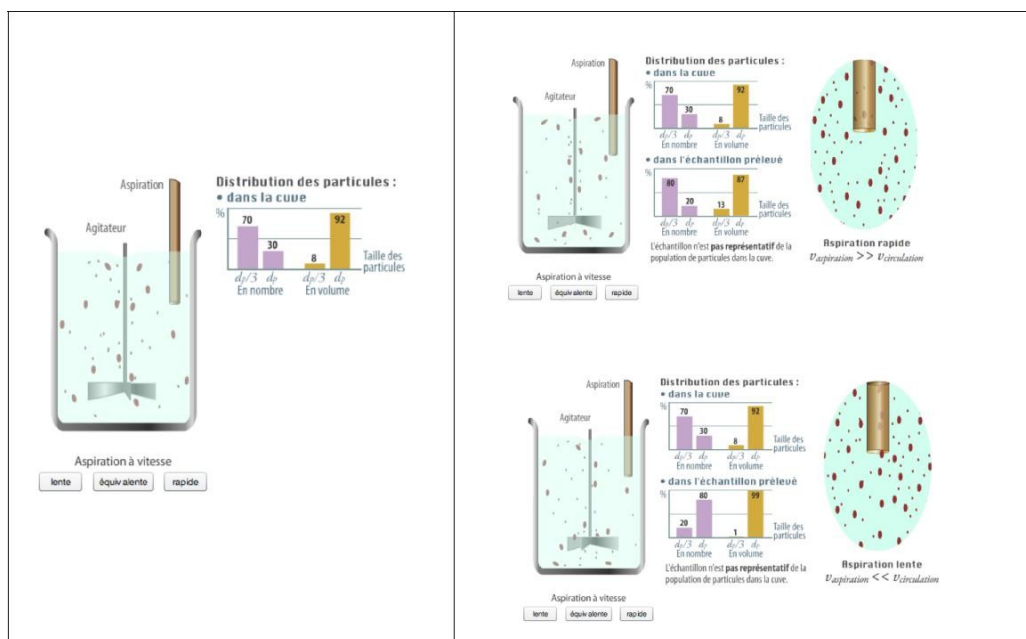


Figure 2. Captures d'une animation montrant l'influence de la vitesse de prélèvement d'une suspension sur la validité d'une distribution de tailles des cristaux

Des exercices sont aussi disponibles afin que l'étudiant applique simplement les notions abordées. La scénarisation de ces exercices correspond à ce qui est classiquement proposé en travaux dirigés : une mise en contexte introduit le problème proposé, puis une suite de questions, avec ou sans indices et solution. Actuellement, nous sommes en phase de réflexion sur la conception d'exercices où l'apprenant pourrait construire sa propre méthodologie de résolution. A la fin de l'exercice, son cheminement de résolution lui serait restitué et comparé à un cheminement conseillé.

En complément, une activité d'évaluation en fin de chaque chapitre permettra à l'apprenant de s'évaluer.



Calcul d'échelles caractéristiques

Il est important de connaître les valeurs relatives des tailles de particules et des échelles de turbulence, afin de déterminer les régimes prépondérants pour le mouvement relatif des particules et les transferts autour de ces particules.

Dans une cuve agitée cylindrique de diamètre $T=H=0,2\text{ m}$ contenant de l'eau ($\rho_L=1000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\nu=10^{-6}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), agitée à la vitesse de 5 tours par seconde par un mobile d'agitation profilé ($N_p=0,8$) de diamètre $D=T/3$, on voudrait connaître les valeurs de l'énergie dissipée par unité de masse de fluide et des échelles de Kolmogoroff et de Batchelor.

Question

Quels vont être les régimes hydrodynamiques subis par des particules suspendues de 200 nm (diffusivité $D_m=10^{-11}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), $20\text{ }\mu\text{m}$ et $200\text{ }\mu\text{m}$?

+ Indice	
- Solution	
Pour le premier cas : petite cuve, agitée à 5 tours par seconde, on a :	
$T\text{ (m)}$	0,2
$V\text{ (m}^3\text{)}$	$6,28\cdot 10^{-3}$

Figure 3. Exemple d'exercice d'application

Ce cours présente des liens avec des cours complémentaires développées par la cellule NTE de l'École des Mines d'Albi-Carmaux dans le cadre de projets financés par l'Université Numérique Ingénierie et Technologie : "Sciences et Technologies des poudres" (sept modules disponibles sur la caractérisation des solides, Gatumel et coll., 2006), et "De la Thermodynamique aux Procédés : concepts et simulations" (autour de la thermodynamique entre phases et ses applications en génie des procédés).

4. Conclusions et perspectives

Ce cours sera disponible en ligne à partir de septembre 2008 pour des élèves de l'École des Mines d'Albi-Carmaux et de l'École des Mines de Saint-Étienne. Plus qu'une simple addition des compétences, il constitue une nouvelle voie pédagogique, plus complète et demandant davantage d'investissements de la part de l'enseignant et de l'élève que les méthodes classiques.

Un forum commun (inter-promotion) sera mis en place à partir de novembre afin d'aider les apprenants à s'approprier le contenu pédagogique, et les concepts sous-jacents. Ce forum sera un facteur d'émulation entre les apprenants qui pourront confronter leurs compréhensions. Il sera animé par des enseignants des différents établissements afin d'enrichir les discussions.

Cette première phase a permis le développement d'un cours basé sur les notions fondamentales de cristallisation. Une seconde phase comprendra : l'ouverture à l'international par la traduction en anglais du cours de base et des contacts avec des universités étrangères, la mise en place de trois niveaux d'exercices applicatifs (résolution faisable à la main, résolution au moyen d'un tableur, résolution grâce à l'utilisation de « simulateurs » mis à disposition des utilisateurs), l'arrivée de nouveaux partenaires français éventuels et la création de modules plus complexes en anglais et en français.

Remerciements

Ce projet intitulé « Cristal Gemme » est co-financé par le programme « Grande École Virtuelle » du Groupe des Écoles des Mines.

Références

Gatumel C., Baillon, Maurice J.J., Dodds J.A.D., Guigon P., Delebarre A., Schwartzentruber J., Chamayou A., Berthiaux H., Calvet R., Espitalier, Rodier E., De Ryck A., Saleh K., Loubignac E., Développement d'une formation

en sciences et technologies des poudres utilisant les TICE, Octobre 2007, Récents Progrès en Génie des Procédés, vol.96, CD-ROM édition.

Supports d'auto-apprentissage "*Sciences et Technologies des poudres*", <http://www.unit.eu> : Classification Unit > Génie des procédés > Solides Divisés

Supports d'auto-apprentissage "*De la Thermodynamique aux Procédés : concepts et simulations*", <http://www.unit.eu> : Classification Unit > Génie des procédés > Procédés de séparation physique