



**HAL**  
open science

## **L'apprentissage en autonomie. Exemple de formation en ligne sur les fondamentaux de la cristallisation**

Alain Gaunand, Fabien Baillon, Ana Cameirão, Fabienne Espitalier, René David, Frédéric Gruy, Michel Cournil, Jacques Schwartzentruber, Michel Bauer

### ► **To cite this version:**

Alain Gaunand, Fabien Baillon, Ana Cameirão, Fabienne Espitalier, René David, et al.. L'apprentissage en autonomie. Exemple de formation en ligne sur les fondamentaux de la cristallisation. XIII<sup>e</sup> Congrès de la SFGP 2011 Société Française de Génie des Procédés : Des procédés au service du produit au coeur de l'Europe, Nov 2011, Lille, France. pp.N°783. hal-00658053

**HAL Id: hal-00658053**

**<https://hal.science/hal-00658053>**

Submitted on 9 Jan 2012

**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.

## **L'apprentissage en autonomie. Exemple de formation en ligne sur les fondamentaux de la cristallisation**

GAUNAND Alain<sup>c</sup>, BAILLON Fabien<sup>a</sup>, CAMEIRAO Ana<sup>b</sup>, ESPITALIER Fabienne<sup>a</sup>, DAVID René<sup>a</sup>,  
GRUY Frédéric<sup>b</sup>, COURNIL Michel<sup>b</sup>, SCHWARTZENTRUBER Jacques<sup>a</sup>, BAUER Michel

<sup>a</sup>École des Mines d'Albi-Carmaux, Campus Jarlard Route de Teillet F-81013 ALBI cedex 09 –  
[Fabienne.Epitalier@mines-albi.fr](mailto:Fabienne.Epitalier@mines-albi.fr), [Fabien.Baillon@mines-albi.fr](mailto:Fabien.Baillon@mines-albi.fr)

<sup>b</sup>École des Mines de Saint-Étienne, 158, cours Fauriel F-42023 SAINT-ÉTIENNE cedex 2 –  
[Frederic.Gruy@emse.fr](mailto:Frederic.Gruy@emse.fr)

<sup>c</sup>École des Mines de Paris, 60 Boulevard St Michel F-75006 PARIS – [Alain.Gaunand@ensmp.fr](mailto:Alain.Gaunand@ensmp.fr)

### **Résumé**

Un cours en ligne sur les fondamentaux de la cristallisation et la précipitation a été conçu par une communauté de chercheurs et d'enseignants-chercheurs en cristallisation/précipitation. Ce cours vise plusieurs publics : élèves ingénieurs, étudiants de master, doctorants, enseignants, industriels. Aussi correspond-il en pratique à plusieurs types de prestations et d'outils pédagogiques, qui vont au-delà d'un simple document consultable à distance.

Le cours propose déjà des outils pédagogiques originaux :

- auto-apprentissage avec multiples animations illustratives et entrées possibles,
- auto-évaluation à distance, sur la base d'exercices applicatifs interactifs.

Pour aller plus loin dans la compréhension de ce qui se passe lors d'une cristallisation, l'intégration de programmes de simulation interactifs dans le support pédagogique a été réalisée. Ces simulateurs pédagogiques permettent de mettre en évidence la sensibilité d'une opération de cristallisation aux valeurs de ses paramètres opératoires.

Mots-clés : cristallisation, cours en ligne, simulateur pédagogique

### **1. Introduction**

La cristallisation et la précipitation sont des opérations de transformation fluide-solide de la matière présentant beaucoup d'avantages et de souplesse, pourvu qu'on en sache, pour un système déterminé, la sensibilité à l'état du fluide (solution) mère, et aux conditions opératoires, par le biais de connaissances sur l'équilibre de solubilité, et de cinétique sur ses processus-clés : on pourra viser une pureté de particules mono-cristallines, et une taille adaptée à une séparation par filtration, ou au contraire la production de nano-particules coeur-coquille, ou faites de cristaux du type solution solide pour la micro-électronique, elles-mêmes individualisées ou agglomérées, encore par filtration.

Aussi, un cours en ligne sur les fondamentaux de la cristallisation et la précipitation a été conçu par une communauté de chercheurs et d'enseignants-chercheurs en cristallisation/précipitation de trois Écoles des Mines (Albi-Carmaux, Paris et Saint-Étienne). Cette communauté a mis à profit ses compétences en enseignement, en mutualisant le contenu pédagogique de différents cours concernant la cristallisation-précipitation enseignés dans chaque école à différents niveaux du cursus. Sept modules ont été

réalisés [1]. L'ensemble des ressources pédagogiques développées est librement accessible à l'adresse suivante : <http://nte.mines-albi.fr/CristalGemme> .

Ce cours vise plusieurs publics : élèves ingénieurs, étudiants de master, doctorants, enseignants, industriels. Il offre donc en pratique plusieurs types de prestations et outils pédagogiques, qui vont au-delà d'un simple document consultable à distance.

Cependant, ces différents publics peuvent avoir une motivation assez semblable : comprendre une transformation, naturelle ou effectuée en laboratoire, produisant des matières solides dispersées, ou la mettre en œuvre cette transformation dans un atelier de dimensions industrielles. Finalement, tous recherchent des réponses aux deux ensembles de questions :

- quels processus ont lieu, quelles grandeurs caractéristiques doit-on identifier à partir d'essais de laboratoire, ou rechercher dans la littérature ? comment ces processus interagissent-ils entre eux ?
- comment les conditions opératoires sont-elles liées aux propriétés physiques et chimiques des particules obtenues : composition, taille et distribution de taille, structure, nature du système cristallin s'il s'agit de cristaux, et taille des domaines cristallins ?

Le Génie des Procédés aborde ces questions en proposant des modèles dont la robustesse et la validité des paramètres sont préalablement éprouvées : soit par des travaux de recherche sur le système chimique étudié, soit comme résultat d'études d'extrapolation des caractéristiques physiques des appareils.

Les notions de base en thermodynamique et cinétique physique et chimique sont les seuls préalables à l'approfondissement que proposent ces enseignements.

Le cours propose déjà des outils pédagogiques originaux :

- auto-apprentissage avec multiples animations illustratives et entrées possibles,
- auto-évaluation à distance, sur la base d'exercices applicatifs interactifs.

Pour mieux faire comprendre l'imbrication des différents processus d'une cristallisation, l'équipe a entrepris, avec l'aide de ses spécialistes TICE<sup>1</sup>, d'intégrer à cet enseignement des programmes de simulation interactifs : ils illustreront visuellement les conséquences sur les produits d'une cristallisation d'actions effectuées par un apprenant sur ses paramètres opératoires.

Ce type de simulateur pédagogique, basé sur un code de calcul mais sans l'aspect conception d'expériences, a déjà été mis en place avec succès dans le cadre d'une autre formation en ligne « De la Thermodynamique aux Procédés : concepts et simulations » développée par l'École des Mines d'Albi-Carmaux, et librement accessible à l'adresse : <http://nte.mines-albi.fr/Thermo/co/ThermoPro.html> .

## 2. Objectifs

Ces simulateurs pédagogiques ont deux objectifs principaux et indépendants : simple étude de tendance (le solide cristallise, le solide ne cristallise pas) et examen phénoménologique (influence sur les particules obtenues du type et de l'intensité de la nucléation et de la croissance).

Le premier objectif laisse à l'apprenant la possibilité de construire son propre « dispositif expérimental » de cristallisation, à partir d'éléments se trouvant dans son « Laboratoire ». Il conçoit son expérience en choisissant des éléments prédéfinis. Il découvre ainsi essentiellement les notions de sursaturation (saturation, sous-saturation), de rendement de cristallisation (en solide), de temps d'induction, de régime permanent. Il découvre comment aborder une cristallisation à l'échelle du laboratoire en proposant des expériences simples et en identifiant les données nécessaires à leur réalisation.

---

<sup>1</sup> Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement

Le second objectif est de faire découvrir à l'apprenant quels sont les principaux leviers d'une opération de cristallisation, afin qu'il observe les grandes tendances qui la régissent. Dans ce cas, il a accès à la concentration et aux diamètres moyens des particules en fonction du temps de séjour ou de passage, il peut choisir le type de nucléation et de croissance, la façon de générer la sursaturation et le type de système (ouvert en régime permanent ou fermé). La simulation, conditionnée par ces choix, peut alors être lancée.

Selon le contexte, le scénario de déroulement de ces simulations pourra être adapté à l'approche pédagogique souhaitée par ou pour l'apprenant, et proposer indifféremment l'un ou l'autre de ces objectifs pédagogiques, voire les deux.

### **3. Contenu**

#### **3.1 Description de l'Atelier**

L'environnement graphique à réaliser doit favoriser la conception de simulations par l'apprenant lui-même, à partir d'éléments prédéfinis.

Une fois qu'il aura fait le choix des entrées et des sorties au sein d'un atelier de conception, l'apprenant pourra lancer la simulation qui les prendra en compte.

Cet atelier transmettra ces choix par un appel normalisé à un programme MATLAB [2] ou OCTAVE [3] installés sur un serveur dédié, et que l'on pourrait représenter sous la forme de l'équation :

$$[ \text{variables de sortie} ] = \text{simulation}( \text{paramètres d'entrée} )$$

Cette approche permet de faire évoluer le système à résoudre : toute la partie « calculatoire » de cette simulation est externalisée dans le code MATLAB ou OCTAVE. Cela permet une forte modularité et évolutivité du simulateur. Ce code de calcul, aussi complexe qu'il puisse être, sera caché pour l'apprenant.

L'Atelier de conception des simulations comportera différentes zones :

- une zone centrale correspondant à la paillasse de l'apprenant-expérimentateur : il viendra y déposer des éléments, pour construire sa propre expérience ;
- une zone « Laboratoire », qui mettra à sa disposition différents éléments pour construire son dispositif expérimental : des cuves, des mobiles d'agitation, des bains thermostatés (pour définir la température de travail), des sondes de température, de pH, de conductivité, etc ;
- une zone « Rapports », qui lui permettra de préciser les informations sur le déroulement de la cristallisation dont il souhaite l'acquisition (tableau de valeurs, des courbes à définir, etc) ;
- une zone « Ressources », donnant accès à des documents de références (fichiers pdf, ou liens vers des cours en ligne), pour des rappels sur les notions nécessaires à la compréhension du système étudié ou des observations recueillies.

Toutes ces zones pourront être contextualisées, en réduisant le nombre d'éléments disponibles dans le Laboratoire, en adaptant les Ressources accessibles, etc. Cela permettra d'adapter les simulations à l'usage pédagogique souhaité.

L'apprenant viendra choisir les éléments qu'il souhaite, et les disposera sur la zone centrale. Ils se positionneront automatiquement à des emplacements prédéfinis. Le cas échéant, l'apprenant pourra mettre à la corbeille un élément finalement jugé inutile. Dans d'autres cas, des éléments pourront aussi être repositionnés sur la paillasse, pour une simulation spécifique.

L'atelier de conception, volontairement très graphique, doit conférer un caractère ludique à cet exercice pédagogique. L'illustration sommaire qui suit donne un aperçu conceptuel de l'interface prévue pour cet atelier (voir Figure 1.).

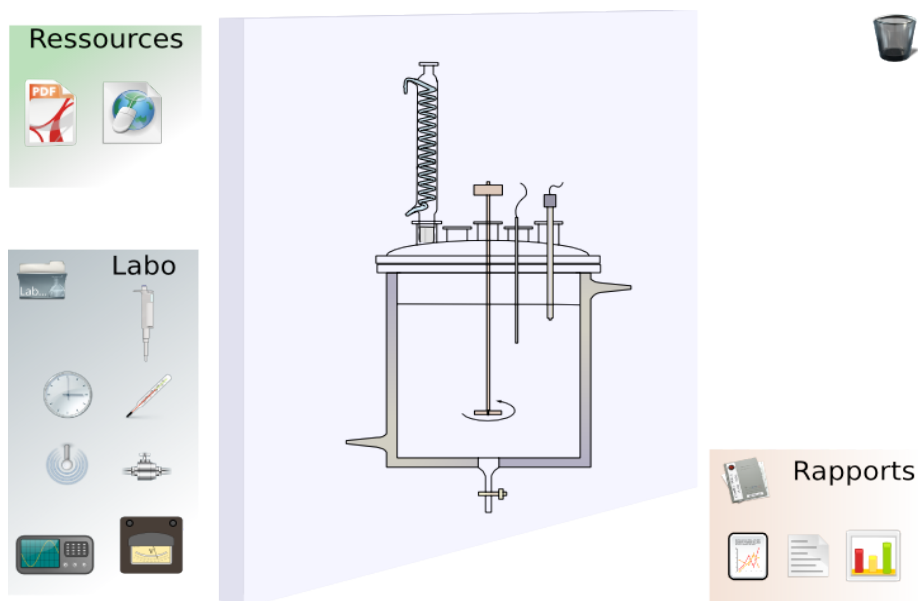


Figure 1: Schéma présentant les différentes zones de l'atelier de simulation.

### 3.2 Système et Équations

Le simulateur permet de résoudre un système d'équations différentielles ou algébriques ordinaires dans le cas d'un système fermé, semi-fermé ou ouvert en régime permanent. Le bilan de population y est transcrit sous forme de relations entre les moments de la distribution du nombre de particules selon des classes de taille (5 moments, 5 équations), un bilan de matière sur l'espèce qui cristallise, et un bilan global.

La résolution cachée du système donne accès aux évolutions :

- de la concentration en l'espèce qui cristallise,
- du diamètre moyen en nombre des particules,
- du leur diamètre moyen en volume,
- de l'écart type de la distribution,
- au rendement en solide et à la masse de solide cristallisé,

au cours d'une opération, de cristallisation par variation de la température, avec ou sans ensemencement.

La méthode de résolution choisie dans cette première version du simulateur implique que la vitesse de croissance des particules soit indépendante de leur taille, et que l'agglomération et la brisure soient négligées. Le cristalliseur est supposé parfaitement agité, et la solution initialement sursaturée à la température donnée.

Un seul système modèle est pour le moment disponible (solvant, solide, anti-solvant) pour lesquels les données d'équilibre, les cinétiques de nucléation (primaire et secondaire) et de croissance sont connues. Cependant, la conception de ces simulateurs se prête à l'ajout ultérieur d'autres systèmes.

## 4. Conclusion et perspectives

Dans les mois à venir, le simulateur sera enrichi avec d'autres systèmes modèles. L'apprenant pourra aussi rentrer des données de son propre système en vue de comprendre les phénomènes qu'il observe ou risque d'observer.

L'intégration de simulateurs au sein de ce contenu pédagogique antérieur constitue un enrichissement dynamique ; au-delà du dispositif mis en place pour les exercices applicatifs, il permet de développer la perception physique de l'apprenant, et ouvre de nouvelles perspectives pédagogiques, orientées vers la simulation de situations expérimentales réelles.

Au-delà d'une formation en ligne, ce cours réalise aussi le contact avec une équipe d'enseignants-chercheurs du Groupe des Écoles des Mines (GEM), spécialistes de cristallisation et de précipitation, qui ont profité de la mise en place de ce cours pour échanger leurs expériences.

### **Références**

- [1] Espitalier F., Baillon F., David R., Gruy F., Gaunand A., Schwartzenruber J., Courmil M., Cameirao A., Momm A., Oliver K., Loubignac E., Lours N., Cours en ligne sur les fondamentaux de la cristallisation et de la précipitation : un lien recherche / enseignement, SFGP - CRISTAL 5 : cristallisation et précipitations industrielles (n°97, p.323-328) - Lyon, FRANCE - 22-23 mai 2008
- [2] MATLAB, langage de calcul scientifique développé par MathWorks : <http://www.mathworks.fr/products/matlab/>
- [3] OCTAVE, langage libre similaire à MATLAB : <http://www.gnu.org/software/octave/index.html>

### **Remerciements**

Les auteurs remercient pour son soutien la Grande École Virtuelle du Groupe des Écoles des Mines (GEV@GEM).

---