



HAL
open science

Des grains, des gouttes et des bulles : quand génie des procédés se conjugue avec hydrodynamique et pédagogie

Marie Debacq

► To cite this version:

Marie Debacq. Des grains, des gouttes et des bulles : quand génie des procédés se conjugue avec hydrodynamique et pédagogie. Génie des procédés. Université de Lorraine, 2017. tel-01665475v2

HAL Id: tel-01665475

<https://hal.science/tel-01665475v2>

Submitted on 9 Jan 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.



Des grains, des gouttes et des bulles : quand génie des procédés se conjugue avec hydrodynamique et pédagogie

MÉMOIRE

présenté et soutenu publiquement à Nancy le 12 décembre 2017

pour l'obtention d'une

Habilitation à diriger les recherches de l'Université de Lorraine
(spécialité Génie des Procédés et des Produits)

par

Marie DEBACQ

Composition du jury

Rapporteurs : Catherine BONAZZI, directrice de recherche - UMR Genial, Inra (Massy)
Christophe GOURDON, professeur - LGC, Ensiacet (Toulouse)
Hani HENEIN, professeur - University of Alberta (Edmonton, Canada)

Examineurs : Véronique FALK, professeur - LRGP, ENSGSI (Nancy)
Jean-Louis HAVET, professeur - CMGPCE-EA7341, le Cnam (Paris)
Fabrice PATISSON, professeur - Institut Jean Lamour, École des Mines de Nancy
Sylvain SALVADOR, professeur - Centre Rapsodee, École des Mines d'Albi

Invités : Jean-Léon HOUZELOT, professeur émérite - LRGP, Ensic (Nancy)
Jean-Pierre HULIN, directeur de recherche émérite - Fast, Université Paris Sud

Mis en page avec la classe thesul.

« Et tant de trucs encore
Qui dorment dans les crânes
Des géniaux ingénieurs
(...)
Et des pensifs penseurs »

Boris VIAN in Je voudrais pas crever

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier les sept docteurs que j'ai eu le plaisir d'accompagner, pour certains dès leur DEA (dans l'ordre de soutenance : Florent, Olivier, Alexis, Bouchra, Baptiste, Phahath et Alex) et les dix autres étudiants que j'ai encadrés ou co-encadrés (dans l'ordre alphabétique : Charles, Damien, Didier, Maryanna, Mauro, Thao, Vincent, Wael, Ying et Ziyana).

Je remercie également les auditeurs de la spécialité génie des procédés et ingénierie pharmaceutique du Cnam : cobayes de mes expérimentations pédagogiques, ils sont surtout ma force motrice.

L'équipe GPIIP du Cnam est bien plus qu'une équipe, une famille. Nous avons traversé ensemble beaucoup de moments difficiles ; il est probable que nous en traverserons encore. Mais nous savons pourquoi et pour qui nous résistons ! Clément, Jean-Louis, Manuela, Phahath, Serge, Stéphane, Vincent et toutes les ATER qui se sont succédées auprès de nous.

Je remercie très chaleureusement ma marraine scientifique, Véronique FALK, pour sa relecture et ses conseils précieux à la finalisation de ce mémoire.

Je remercie chacun des membres du jury, je suis vraiment heureuse d'avoir pu tous les réunir, chacun pour un certain regard sur mes travaux.

Je voudrais aussi remercier mes deux directeurs de thèse et tous les encadrants et industriels que j'ai eu la chance de croiser au long de mes premières années de chercheuse : tous m'ont aidée à me construire.

J'aimerais remercier les autres personnalités scientifiques que j'ai croisées, avec lesquelles nous avons débattu de science, de pédagogie et de stratégie de recherche.

J'ai une pensée pour tous les collègues du Cnam avec lesquels nous avons fait du bon travail : au département ; au conseil scientifique ; avec les centres Cnam en région et la DirAR ; au service AUPeN et à la D2N ; à l'EICnam et à la DNF ; avec le collectif et les syndicats.

Je remercie enfin mes parents, Annick et Jean-Louis, et mon fils, Cyril, pour leur affection et leur soutien indéfectibles, leur patience quand je passais mes journées « avec mon ordinateur ».

Sommaire

Introduction générale	1
1 Rétrospective générale	4
2 Environnements de recherche	7
3 Thématiques de recherche successives	7
3.1 Préparation de n-alcanes lourds	9
3.2 Hydrodynamique physique : mélange par gravité de fluides miscibles	9
3.3 Préparation de couches minces de verres organiques	10
3.4 Cristallisation discontinue par refroidissement sous agitation	12
3.5 Traitement d'effluents aqueux industriels par procédés d'ozonation : éjecteur et colonne à bulles	13
3.6 Traitement d'effluents liquides par Oxydation par Voie Humide Cata- lytique (OVHC)	15
3.7 Fours tournants	16
Chapitre 1 Procédés polyphasiques étudiés	23
1.1 Tube vertical de mélange	24
1.2 Cristalliseurs agités	26
1.3 Réacteurs à absorption gaz/liquide	30
1.3.1 Éjecteur	30
1.3.2 Colonne à bulles	34
1.3.3 Pilote de traitement biologique complémentaire	34
1.4 Réacteur à lit fixe arrosé	37
1.4.1 Conception du pilote et de sa supervision	37
1.4.2 Préparation du catalyseur	41
1.5 Fours tournants	44
1.5.1 Pilote de four tournant du Cnam	44
1.5.2 Pilote de four tournant du centre Rapsodee	48

Chapitre 2 Études hydrodynamiques	51
2.1 Analyse d'images	53
2.1.1 Mélange gravitaire en tube vertical	53
2.1.2 Hydrodynamique transverse dans les fours tournants	56
2.2 Distribution des Temps de Séjour (DTS)	61
2.2.1 Cas des fours tournants	62
2.2.2 Cas de la colonne à bulles	69
2.2.3 Cas du pilote de traitement biologique	69
2.3 Mécanique des fluides numériques	70
2.4 Mesure de $k_L \cdot a$: cas des réacteurs d'ozonation	74
2.5 Agitation : cas des cristalliseurs	76
2.6 Une « jauge » à niveaux de sable pour le four tournant	77
Chapitre 3 Modélisations	81
3.1 Analyse dimensionnelle	82
3.1.1 Cas du mélange gravitaire	83
3.1.2 Cas du four tournant	84
3.2 Modélisation phénoménologique basée sur l'hydrodynamique : cas du four tournant	90
Chapitre 4 Pédagogie numérique	97
4.1 L'offre de formation du Cnam	101
4.1.1 Organisation générale de l'offre de formation en génie des procédés	102
4.1.2 Contenus des formations en génie des procédés	103
4.2 Petite histoire de l'enseignement à distance en génie des procédés au Cnam	104
Conclusion générale	123
Projet scientifique	127
1 Fours tournants munis de releveurs	127
1.1 Hydrodynamique	127
1.2 Transferts thermiques	128
1.3 Transferts de matière	129
1.4 Modèle dynamique global	129
1.5 Applications	129
2 Transposition à d'autres types de contacteurs et extensions vers d'autres domaines scientifiques	130

3	Proposition d'ouverture vers une recherche sur l'enseignement du génie des procédés en France	131
	Glossaire	133
	Références bibliographiques	135

CURRICULUM VITÆ

	Annexe A Encadrement scientifique	143
A.1	Thèses codirigées (7)	143
A.2	DEA et masters encadrés (13)	144
A.3	Mémoires d'ingénieur Cnam tuteurés et soutenus (9)	145
	Annexe B Production scientifique	147
B.1	Articles (11)	147
B.2	Congrès (30)	148
B.2.1	Congrès internationaux avec actes (4)	148
B.2.2	Congrès nationaux avec actes (13)	148
B.2.3	Congrès internationaux (11)	150
B.2.4	Congrès nationaux (2)	151
B.3	Rapports de contrats industriels (8)	151
	Annexe C Enseignement	153
C.1	Volume horaire assuré et répartition	155
C.2	Animation des formations	156
C.3	Animation de la vie de la spécialité	157
C.4	Animation de la communauté	157
C.5	Communications sur la pédagogie (11+3)	158
C.5.1	Congrès internationaux avec actes (1)	158
C.5.2	Congrès nationaux avec actes (5)	158
C.5.3	Congrès internationaux (4)	159
C.5.4	Congrès nationaux (1)	159
C.5.5	Séminaires invités (3)	159

Annexe D Administration, rayonnement, valorisation et transfert	161
D.1 Diffusion et rayonnement	161
D.1.1 Activités éditoriales	161
D.1.2 Diffusion du savoir	162
D.1.3 Activités au sein de sociétés savantes	163
D.2 Responsabilités scientifiques et financement de la recherche	164
D.3 Responsabilités administratives et mandats	165
D.3.1 Direction d'un département d'enseignement	165
D.3.2 Mandats électifs	165
D.3.3 Participation à des travaux d'intérêt collectif	166
D.3.4 Participation au recrutement des enseignants-chercheurs	166

Introduction générale

JACQUES BREYSSE rappelait lors des assises NORD du génie des procédés qui se sont tenues à Paris le 4 novembre 2016, qu'alors que l'on présente souvent le génie des procédés (*chemical engineering*) comme né aux États-Unis au début du XX^e siècle (avec notamment Arthur D. LITTLE au MIT en 1915), puis importé en France au milieu du même siècle par Joseph CATHALA à Toulouse et Maurice LETORT à Nancy, on peut citer de grands pionniers en France dès le XIX^e :

- Antoine LAVOISIER (dont on peut voir la reconstitution du cabinet au Musée des Arts et Métiers), qui n'est pas seulement celui qui énonça l'un des fondamentaux du génie des procédés qu'est la conservation de la matière, mais décrit aussi dès 1793 certaines de ce que nous appellerons plus tard les opérations unitaires ; il fut par ailleurs un des premiers à associer expérimentations et mathématiques pour l'étude de la chimie ;
- Jean-Antoine CHAPTAL, connu notamment pour ses travaux d'amélioration de la production industrielle de l'acide chlorhydrique, mais également auteur en 1807 d'un ouvrage consacré à ce que l'on appelait alors la "Chimie appliquée aux arts", dans lequel on retrouve beaucoup des intitulés de chapitres classiques d'un ouvrage moderne de génie des procédés ;
- Eugène PECCLET, que l'on présente comme un physicien -au contraire des précédents, qualifiés de chimistes- et qui dans son "Traité de la chaleur" en 1843, décrit lui-aussi plusieurs de nos opérations unitaires usuelles ;
- Ernest SOREL, pionnier de l'étude des réacteurs dès 1887 (bien avant la première édition de l'ouvrage d'Octave LEVENSPIEL) et surtout connu pour ses travaux sur la distillation à la fin du XIX^e siècle ;
- mais aussi Anselme PAYEN, industriel, ami de CHAPTAL et premier titulaire de la chaire de "Chimie industrielle" du Cnam à partir de 1839.

Outre l'antériorité, il faut surtout retenir de ce rappel historique la transversalité de notre science et son lien étroit avec l'industrie. Le génie des procédés est : d'une part une science appliquée, raison pour laquelle on cherchera toujours l'efficacité, la simplicité, l'opérabilité et l'agilité, en vue de la transposition industrielle ; d'autre part une science intégrative, à la croisée de la chimie, la physique, les mathématiques, l'informatique et de plus en plus la biologie ; autant de sciences de base sur lesquelles le génie des procédés s'appuie et qu'il contribue à alimenter. On peut dire avec un brin de provocation que « les gens de génie des procédés »¹ sont de mauvais chimistes, de piètres hydrodynamiciens, de pitoyables thermiciens, des mathématiciens très approximatifs, mais que nous sommes (les seuls ?) capables de faire fonctionner une usine de transformation de la matière et de l'énergie dans toute sa complexité, mettant en œuvre le couplage de toutes ces disciplines. Et le Cnam, avec le très large champ de métiers qu'il couvre et avec la mission que lui a confié l'Abbé Grégoire en 1794 pour « perfectionner l'industrie

1. Nous n'avons pas encore de nom simple pour nous désigner.

nationale », est un bon endroit pour développer la transversalité de cette science appliquée qu'est le génie des procédés.

Il est souvent difficile de faire comprendre à ceux qui nous gouvernent, la diversité des domaines et des métiers concernés par le génie des procédés. La méconnaissance du génie des procédés par le grand public, nous pénalise jusqu'au niveau institutionnel. De cette diversité découle notre incapacité à fournir des chiffres-clés sur le marché de l'emploi, le chiffre d'affaire annuel ou la balance extérieure par exemple. C'est pourtant bien une réalité, que, né dans la pétrochimie et la chimie minérale industrielle, le génie des procédés s'est étendu à l'environnement, l'énergie, la santé et l'alimentation : autant dire tous les grands défis sociétaux du XXI^e siècle ! C'est d'ailleurs pour accompagner cette extension que le génie chimique s'est appelé génie des procédés à partir de la fin des années 1980. Aujourd'hui on souhaite même utiliser les méthodes du génie des procédés pour étudier des systèmes non-industriels : le corps humain ou les écosystèmes urbains par exemple (*cf.* conférences plénières au dernier congrès mondial *WCCE10* à Barcelone en octobre 2017).

En face de cette diversité de domaines, se tiennent les mêmes grandes classes de phénomènes (réactions, transferts de matière et d'énergie, hydrodynamique), les mêmes méthodes et les mêmes paradigmes (bilans, opérations unitaires, transferts couplés, approche systémique, modélisation, etc.). C'est ce qui fait la capacité des personnes formées en génie des procédés, à passer au long de leur carrière d'une industrie à l'autre. Toujours de manière transversale, se développent aujourd'hui l'éco-conception (en lien avec l'économie circulaire) et le génie des produits (pour concevoir un procédé de production à partir de la définition des propriétés d'usage du produit souhaité). Et c'est bien l'approche transverse et appliquée du génie des procédés qui permet ces développements.

Enfin le génie des procédés est fondamentalement la science des changements d'échelle : de part sa vocation à la transposition industrielle, donc depuis longtemps à l'extrapolation et depuis plus récemment à la réduction d'échelle ; mais aussi parce que pour étudier des phénomènes aussi complexes, on a besoin de s'intéresser à ce qui se passe au niveau moléculaire, à celui des interfaces, à l'échelle des appareils, des ateliers de fabrication et même des sites industriels complets.

Prausnitz, dans sa *Danckwerts Memorial Lecture* de 2001, intitulée "*Chemical engineering and the postmodern world*" [Prausnitz, 2001] refait le lien entre génie des procédés et société en ces termes : « *Chemical Engineering also needs to be reinvented if it is to survive. (...) Because our unavoidable task is to serve society, our attitudes and our activities need to adjust to what a changing society expects and increasingly demands, even if these expectations and demands are not always consistent with our traditional beliefs.* » Les slogans des derniers congrès de notre discipline prouvent que la communauté s'est emparée de l'injonction de Prausnitz de servir la société, au-delà du seul monde industriel.

Si je suis loin d'avoir touché à tous les domaines concernés par le génie des procédés, ma vingtaine d'années de recherche m'a amenée à travailler pour le traitement des eaux, la pharmacie, le domaine nucléaire, les explosifs ou encore l'extraction pétrolière.

J'ai observé que l'**hydrodynamique** est parfois oubliée ou outrageusement simplifiée lorsque l'on étudie un procédé : on s'intéresse aux réactions s'il y en a, aux transferts de matière et de chaleur puisqu'il y en a toujours ; mais on occulte bien souvent la question des écoulements, se contentant de dire si l'on travaille à co- ou contre-courant, en écoulement plutôt piston ou bien agité. Après des études menées sur des applications variées, pour lesquelles nous n'avons d'ailleurs pas toujours étudié l'hydrodynamique, j'ai acquis la conviction que l'on devrait toujours commencer par là. Certes la question de l'hydrodynamique est intimement liée à la « gamelle » dans

laquelle le procédé est mis en œuvre (les anglo-saxons diraient « *tank* »), mais fondamentalement les transferts de matière et de chaleur aussi. Il n'y a donc guère que lorsque l'on s'intéresse uniquement aux réactions -et l'on s'appelle alors des chimistes- que l'on peut faire l'économie d'étudier l'hydrodynamique (et encore, certaines difficultés de répétabilité de manipulations à l'échelle de la paillasse, sont parfois dues aux problèmes de micromélange).

Et c'est parce que le génie des procédés consiste à s'intéresser à l'appareillage, souvent évoqué dans les définitions du génie des procédés², que mon premier chapitre sera consacré à la **conception des pilotes**. Mes travaux se fondent en effet avant tout sur l'expérimentation.

Cependant la complexité des phénomènes -presque toujours couplés- mis en jeu en génie des procédés d'une part et le besoin de transposition industrielle, donc de changement d'échelle, d'autre part, font qu'il est indispensable de pousser nos études jusqu'à la **modélisation**. Parce que ce n'était pas toujours la culture du laboratoire ou parce que nous n'avons pas forcément eu les ressources pour aller assez loin dans certaines de nos études, la modélisation n'a pas été développée sur tous les procédés que j'ai eu l'occasion d'étudier. Le type de modélisation que je pratique se veut : autant que faire se peut phénoménologique (tout en restant assez simple, avec des temps de calcul courts, pour être aisément utilisé par des industriels) ; essentiellement macroscopique et basé le plus possible sur des grandeurs physiques (soit bien répertoriées dans la littérature, soit que l'on est capables de déterminer par l'expérience).

C'est donc autour de ces trois axes que j'ai choisi de présenter mon mémoire :

- le chapitre 1 détaille cinq des pilotes expérimentaux sur lesquels j'ai travaillé ; la place importante qu'il occupe ne reflète pas seulement la nécessité de présenter ces procédés pour comprendre la suite, mais aussi l'importance de la conception de ces installations dans une démarche de recherche en génie des procédés ;
- le chapitre 2 relate les différentes manières dont j'ai pu aborder l'étude hydrodynamique de ces procédés : analyses d'images, DTS et quelques autres outils ;
- le chapitre 3 présente les deux types de modélisations sur lesquels je me suis exercée jusqu'à présent : analyse dimensionnelle et modèle phénoménologique fondé sur l'hydrodynamique.

La question transversale de la **mesure** apparaîtra régulièrement au fil de ces trois chapitres ; j'y reviendrai dans la conclusion générale.

Le dernier chapitre est consacré à la pédagogie numérique, thématique que je considère aujourd'hui comme un sujet de recherche à part entière, parce qu'il en a tous les attributs : innovations, expérimentations, parfois modélisation et enfin publication/communication. La mission très particulière du Cnam pour la formation professionnelle supérieure (*Omnes Docet Ubique*³) a fait de nous -pour paraphraser Étienne GUYON- de petits artisans de la **pédagogie**, devant enseigner à un public fortement hétérogène et souvent à distance. Depuis quelques années que je communique sur nos expériences pédagogiques, j'observe que nous sommes plutôt en avance sur beaucoup d'aspects, y compris au niveau international, et que nos développements intéressent jusqu'à certaines entreprises à l'étranger. Non seulement les Ressources Éducatives Libres (REL) que nous mettons à disposition se révèlent utilisées bien au-delà de ce que nous avons imaginé quand nous les avons mises en ligne, mais nos méthodes et nos outils trouvent échos ailleurs que pour la formation hors temps de travail.

La présente introduction générale situe le contexte dans lequel j'ai mené mes travaux de re-

2. Le génie des procédés est l'ensemble des connaissances nécessaires à la conception, la mise en œuvre et l'optimisation de l'appareillage dans lequel on réalise la transformation physico-chimique et biologique des matières premières en produits fonctionnels à l'échelle industrielle.

3. Il enseigne à tous et partout.

cherche depuis une vingtaine d'années : tout d'abord d'un point de vue général, quantitatif et chronologique ; puis en listant les différents laboratoires dans lesquels j'ai travaillé ; enfin en présentant successivement mes sept thématiques de recherche. Cette dernière section est relativement détaillée, car compte tenu du choix que j'ai fait de centrer mon mémoire sur l'hydrodynamique et la modélisation, certaines de ces thématiques ne seront plus abordées par la suite.

1 Rétrospective générale

Après ma microthèse et mon DEA (réalisés en 1997), j'ai démarré fin 1997 ma thèse "Étude et modélisation des fours tournants de défluoration et réduction du difluorure d'uranyle" <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00974273/document>>, que j'ai soutenue dans la spécialité Génie des procédés à l'Institut National Polytechnique de Lorraine en janvier 2001. J'ai été recrutée au Cnam en septembre 2002 sur un poste de maître de conférences en génie des procédés (section 62), après deux années en tant qu'ATER à l'Université Paris Sud (sections 60-62), puis à l'ENS Cachan (section 62).

De 2002 à 2008, j'ai eu une importante charge d'enseignement et d'encadrement scientifique au Cnam, avec :

- de nombreux cours à monter pour la formation professionnelle supérieure hors temps de travail (niveaux L3 à M2), y compris en formation à distance ;
- des pilotes de travaux pratiques à reconstruire voire entièrement concevoir, avec le protocole associé ;
- le suivi quotidien de 2, puis 4, puis 5 doctorants travaillant sur 3 thématiques différentes + de nombreux stagiaires de niveau master ;
- la contribution au financement de la recherche (projets Anvar, projet interne Cnam et BQR ; pour un total d'environ 30 000 €) ;
- la participation aux tâches d'intérêt collectif (administration des ordinateurs de l'équipe ; conception, administration et mises à jour très régulières du site Internet pédagogique ; gestion des comptes ; etc.).

Je me suis également rapidement impliquée dans la vie de l'établissement et dans ses instances, ainsi que dans celles d'autres établissements (élue au conseil de perfectionnement de 2005 à 2009 ; membre de trois commissions de spécialistes au Cnam, à l'ENS Cachan et à l'Université Paris VI).

Une nouvelle période a commencé pour moi en 2008, où à la suite d'un CRCT d'un an, j'ai obtenu un contrat de recherche financé à hauteur de 285 500 € par un industriel. Ceci a permis d'équiper le laboratoire d'un four tournant pilote unique en France (très instrumenté et polyvalent) et de mener à bien 2 thèses à ce jour, qui ont donné lieu à 5 publications et 9 communications. Parallèlement j'ai continué de développer fortement la pédagogie numérique et jouis aujourd'hui d'une certaine reconnaissance en la matière au Cnam et dans la communauté génie des procédés ; ces enseignements sont plébiscités par les auditeurs. Je communique régulièrement sur ce sujet dans des congrès, y compris internationaux. Je suis ou ai été porteur de deux projets pédagogiques financés par Unit⁴ pour un total de 45 000 €. Je suis plus que jamais engagée auprès des auditeurs de la spécialité génie des procédés du Cnam (suivi individuel, développement des réseaux sociaux, création de vidéos, conseils de perfectionnement, enquêtes,

4. La Fondation **Unit** (Université Numérique Ingénierie et Technologie), créée à l'initiative du Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, est une Fondation qui associe les acteurs publics et privés de la formation supérieure en Sciences de l'Ingénieur et Technologie désireux de partager des ressources numériques existantes, des outils, des expériences, et de co-piloter des projets. <<http://www.unit.eu/>>

journee anciens/nouveaux, etc.). Je suis depuis longtemps très investie dans la vie scientifique nationale et internationale de la communauté génie des procédés (forte implication à la Société Française de Génie des et Procédés (SFGP), organisation de nombreux événements scientifiques ou de diffusion de la culture scientifique et technique, participation à des comités de sélection, implication dans des comités scientifiques de colloques, expertise d'articles pour des revues internationales). On m'a confié en 2016 la coordination des assises du génie des procédés pour les régions Ile-de-France, Normandie et Hauts-de-France. Pendant deux ans et demi (2013-2016), j'ai été directrice d'un département d'enseignement interdisciplinaire d'environ 80 personnels : département "Chimie, Alimentation, Santé, Environnement, Risque" du Cnam (Caser). Enfin je continue de participer activement aux instances de l'établissement (Conseil Scientifique, Conseil d'Administration, Conseil de Laboratoire, Conseil de Département et Conseil d'École) et à de nombreux groupes de travail et comités de pilotage (Saghe, Schéma Directeur du Numérique, Sisco, Synergie, prospective métiers, Formation à distance, Règlement Intérieur, Base de l'offre de formation, etc.). J'ai bénéficié au second semestre 2016-2017 d'une nouvelle période de CRCT de six mois.

Ma carrière en chiffres de 2001 à 2017

Recherche

11 publications dans des revues internationales à comité de lecture
30 communications nationales et internationales
8 rapports industriels
≈ 320 000 € obtenus et gérés pour le montage d'installations et leur fonctionnement
7 thèses codirigées
13 stages de niveau master encadrés
20 articles expertisés pour des revues internationales
5 comités scientifiques de colloques et congrès
>15 journées scientifiques organisées

Formation

≈ 200 HED/an en moyenne
20 ECTS de formation entièrement à distance créés
≈ 500 pages de photocopies originaux
5 modules d'autoformation créés
4 installations de travaux pratiques remises en état ou construites
responsable national de 4 formations (2 licences et 2 certificats) et 7 unités d'enseignement
9 mémoires d'ingénieurs Cnam tuteurés et soutenus
45 000 € obtenus et gérés pour 2 projets Unit
11 communications nationales et internationales (dont 1 *keynote*) + 3 séminaires invités

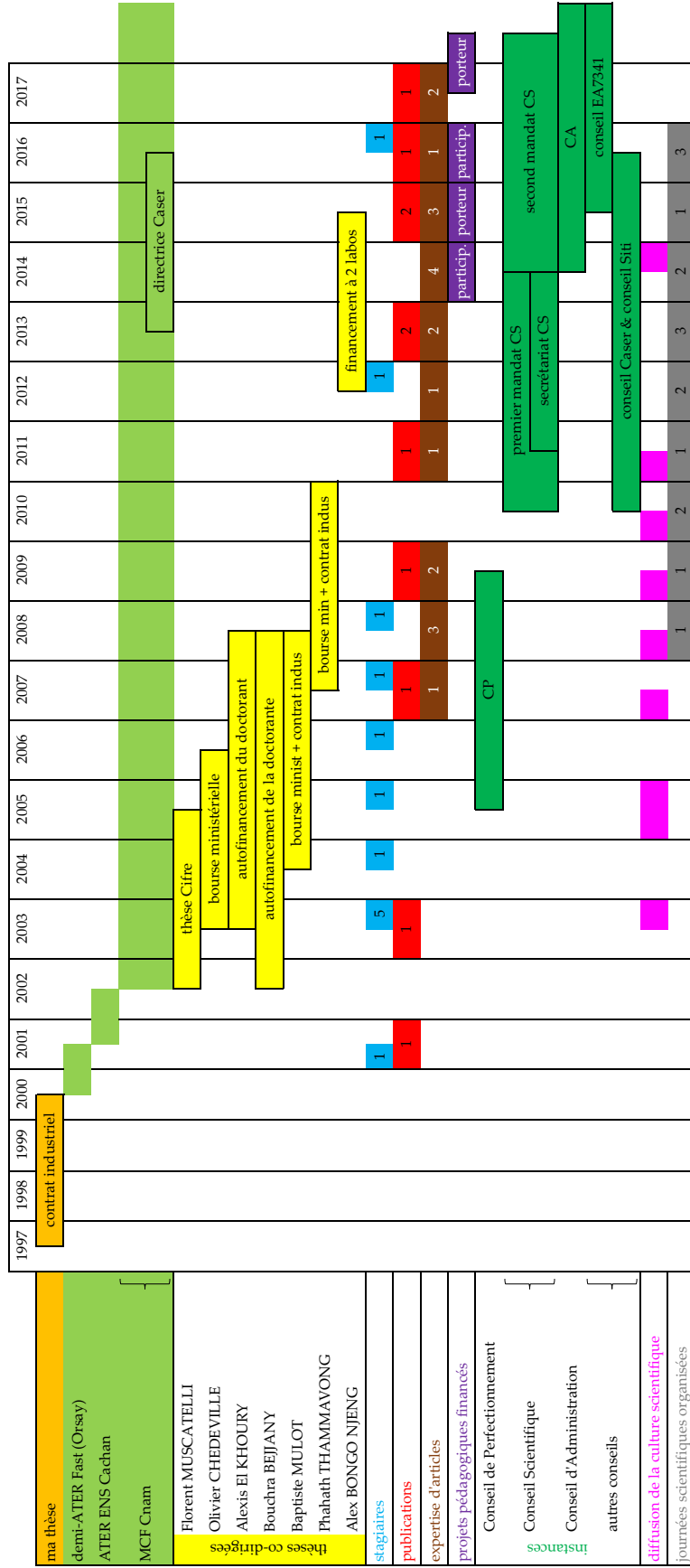
Diffusion de la culture scientifique

14 conférences organisées dans le cadre du cycle « Vous avez dit génie des procédés? »
3 fêtes de la science
6 années avec l'accueil de groupes d'enfants ou de lycéens au laboratoire (>400 élèves)

Mandats et responsabilités

2,5 ans de direction d'un département d'enseignement interdisciplinaire de 80 personnels
7 mandats électifs dans les conseils de l'établissement
11 comités de sélection et 3 commissions de spécialistes (≈ 20 EC recrutés)
présidente du groupe Formation & secrétaire du groupe IAP de la SFGP
secrétaire de la *Working Party Education* de la fédération européenne (*EFCE*)

Vue chronologique synthétique



2 Environnements de recherche

Au cours de ma vingtaine d'années de recherche, j'ai eu l'occasion de travailler dans des environnements très différents :

- plusieurs équipes de recherche académique pendant mon DEA à l'Ensic ;
- deux gros laboratoires académiques (LSG2M, devenu Institut Jean Lamour depuis et LSGC, aujourd'hui LRGP) et deux grandes entreprises industrielles (Codema et FBFC, aujourd'hui fusionnées avec Areva) pendant ma thèse ;
- un laboratoire de physiciens, le Laboratoire Fast à Orsay, pendant ma première année d'ATER ;
- un laboratoire de chimistes, le Laboratoire PPSM de l'ENS Cachan, pendant ma seconde année d'ATER ;
- une petite équipe de recherche au Cnam (aujourd'hui 3 enseignants-chercheurs et 2 ingénieurs de recherche, dont 1 contractuel), insérée dans un plus gros laboratoire (EA21), dont le périmètre a changé pratiquement à chaque renouvellement, nous associant tantôt à des chercheurs en génie des procédés d'un autre établissement, tantôt à des énergéticiens, tantôt à des spécialistes de turbomachines, et plus récemment à des chimistes (ce qui a occasionné le changement de numéro du laboratoire, devenu EA7341).

3 Thématiques de recherche successives

Depuis longtemps attirée par la recherche, j'ai eu ma première expérience lors de ma microthèse dans le cadre de mon cursus à l'Ensic, puis de mon DEA. Ce travail essentiellement expérimental a eu la particularité de se dérouler avec trois équipes de recherche différentes : synthèse organique, procédés supercritiques et thermodynamique. **Cette première expérience a confirmé mon souhait de faire de la recherche.**

L'objectif de mon travail de thèse à Nancy était d'étudier puis de modéliser le fonctionnement de **deux types de fours tournants utilisés pour le traitement de l'hexafluorure d'uranium issu de l'enrichissement**. J'ai beaucoup travaillé sur l'hydrodynamique (après avoir étudié expérimentalement les mouvements transversal et axial de la charge solide, je les ai modélisés d'une manière inédite) et sur les transferts de matière (le modèle de transfert de matière et de conversion original que j'ai développé s'appuyait sur le modèle hydrodynamique et sur des études expérimentales de conversion chimique). La représentation des transferts thermiques s'appuyait sur des bilans utilisant les surfaces d'échanges calculées à partir du modèle hydrodynamique ; la difficulté majeure était l'accès aux valeurs des coefficients d'échange, en particulier celui entre la paroi et la charge solide. La dernière partie de ma thèse concertait la mise en place d'un modèle unique pour les deux types de fours tournants ; ce modèle 1D en régime permanent avait le grand avantage de fournir des résultats de simulation en quelques secondes et de pouvoir donc être **utilisé directement par les exploitants industriels**. Les résultats de mon travail ont permis d'augmenter sensiblement le débit d' UF_6 traité par le premier type de four et de beaucoup mieux maîtriser la conduite du second type de four. Ce travail de thèse m'a donné le goût du fort couplage entre expérimentation et modélisation, ainsi que la recherche de modèles assez simples pour pouvoir être aisément transposés et exploités par les industriels.

J'ai retrouvé cet état d'esprit auprès des spécialistes de l'hydrodynamique physique avec lesquels j'ai eu la chance de travailler pendant un an au Fast. Mon travail consistait à étudier la **dy-**
namique du mélange entre deux fluides miscibles de densités différentes, superposés en configuration instable. J'ai réalisé de nombreuses expériences, puis nous avons cartographié

trois régimes de mélange et établi des lois de comportement basées sur l'analyse adimensionnelle. Cette thématique s'est poursuivie après mon départ grâce à plusieurs stages et thèses.

Ma modeste activité de recherche pendant mon année à [Cachan] a concerné la mise au point d'une **méthode de dépôt par évaporation sous vide de molécules synthétisée dans le laboratoire** pour réaliser des guides d'onde.

À mon arrivée au [Cnam] j'ai à nouveau opéré un changement thématique, mais aussi organisationnel total par rapport à mes travaux précédents, avec la responsabilité quotidienne de **deux, puis quatre, puis cinq doctorants en parallèle** (dont deux non financés), ainsi que de nombreux stagiaires de DEA puis master, **sur trois thématiques de recherches distinctes : procédés d'ozonation ; oxydation par voie humide catalytique ; cristallisation**. Compte tenu du nombre de sujets et du nombre d'étudiants dont j'avais la charge, parallèlement à une intense activité d'enseignement, pendant mes premières années au Cnam, mon activité de recherche consistait avant tout à conseiller et guider les jeunes chercheurs que l'on me confiait : leur faire acquérir certains réflexes de chercheur en génie des procédés (la plupart d'entre eux n'en avaient qu'une connaissance récente, acquise en DEA/master), leur donner le goût des manipulations soignées, les aider à construire un travail de recherche cohérent, pragmatique mais rigoureux. Ce fut toujours une expérience humainement très enrichissante, quoique scientifiquement assez frustrante et parfois difficile, notamment pour les thèses sans financement des doctorants. Je n'ai pas développé de nouvelles modélisations pendant cette période, j'ai en revanche eu l'occasion de travailler sur l'hydrodynamique de certains procédés.

J'ai obtenu en 2007 un an de CRCT que je prévoyais de mettre à profit pour me plonger véritablement dans les aspects scientifiques des trois thématiques que je n'avais pu qu'aborder jusque-là. Cependant j'ai eu à cette époque l'opportunité de travailler à nouveau sur les fours tournants, avec un financement industriel conséquent. Comme évoqué plus haut, la quantification des échanges thermiques entre la charge solide et la paroi des fours tournants demeurait très difficile. La perspective de travailler sur un sujet pour lequel j'avais déjà une certaine expertise, dans des conditions de travail correspondant davantage à mes aspirations, m'ont rapidement conduit à prendre la décision de me lancer dans l'aventure.

Ainsi depuis fin 2008, je travaille exclusivement sur la thématique four tournant. Mon travail de recherche est beaucoup plus fondamental qu'à l'époque de ma thèse, mais j'ai conservé la même manière de travailler : partir de l'expérience pour comprendre les phénomènes et les modéliser de la manière la plus simple possible. La première thèse réalisée au Cnam sur les fours tournants a permis de **concevoir un outil pour réaliser des mesures permettant d'accéder au fameux coefficient de transfert thermique paroi/poudre**. Depuis les années 1950, très peu d'études expérimentales se sont attelées à ce problème, non par manque d'intérêt scientifique et industriel, mais à cause de la difficulté de ces expériences et de leur interprétation. On trouve en revanche dans la littérature de nombreux travaux de modélisation ; mais sans fond expérimental, on demeure circonspects quant à leur fiabilité, d'autant qu'ils conduisent à des valeurs très disparates de coefficients pour une même application. Nous nous heurtons nous aussi aux difficultés de cette problématique expérimentale et au bout de la seconde thèse n'en sommes pas encore à une solution pleinement satisfaisante. Cependant les progrès réalisés sont assez prometteurs pour nous inciter à persévérer dans cette voie. Parallèlement aux études thermiques, notre pilote s'est avéré bien adapté pour étudier la **distribution des temps de séjour dans de nombreuses configurations et pour différents types de poudres**. Là aussi la littérature est pauvre en résultats expérimentaux ; cette fois non à cause de la difficulté intrinsèque de l'étude, mais probablement de par son caractère rébarbatif. J'ignore si la persévérance légendaire des « Cnamiens » nous a ici inspirés, mais nous avons accumulé, et accumulons encore, **un nombre considérable de résultats expérimentaux, modélisés par analyse dimensionnelle** et bien valorisés en

termes de publications et de notoriété internationale.

3.1 Préparation de n-alcane lourds

J'ai effectué mon travail de recherche de DEA en 1997 au Laboratoire de Thermodynamique des Séparations (LTS) et Laboratoire de Chimie-Physique Macromoléculaire (LCPM) à Nancy - dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut Français du Pétrole, sous la direction de Danielle BARTH, Alain BREMBILLA et Dominique PETITJEAN.

L'objet de ce stage était la mise au point d'une méthode de préparation des n-alcane lourds de grande pureté. Le LTS, en collaboration avec l'Institut Français du Pétrole, avait en effet entrepris plusieurs études thermodynamiques et structurales des n-alcane purs et de leurs mélanges, car leur cristallisation dans les *pipelines* posait des problèmes d'exploitation. Or les produits commerciaux ont pour principales impuretés des alcane –linéaires ou branchés– à nombres de carbones voisins, dont les propriétés physico-chimiques sont très proches de celles du produit d'intérêt, qu'il est par conséquent extrêmement difficile d'éliminer, alors qu'ils sont susceptibles de former des solutions solides avec le produit désiré. Ce travail a été réalisé en trois étapes et dans trois composantes des laboratoires partenaires.

- La première étape consistait à synthétiser le produit désiré. Nous avons choisi le schéma de synthèse de sorte à éviter les produits secondaires ayant des propriétés physico-chimiques proches de celles du produit recherché.
- Dans la deuxième étape, l'extraction du n-alcane par fluide supercritique a été mise en œuvre, le produit extrait étant récupéré sous forme pulvérulente. Ce type d'extraction (où le produit extrait est un solide) avait été jusqu'alors rarement réalisé et posait quelques difficultés techniques : dans l'installation utilisée, qui avait été conçue pour extraire des liquides, l'extrait avait tendance à cristalliser dans la vanne de détente au lieu du vase de récupération. Après une mise au point sur des mélanges artificiels, l'extraction a pu être réalisée avec les produits synthétisés en réchauffant la vanne de détente.
- Enfin la troisième étape consistait à caractériser les produits obtenus aux différentes étapes de la purification par des analyses qualitatives et quantitatives (chromatographie en phase gazeuse ; analyse calorimétrique : température de transition solide/solide et température de fusion ; diffraction des rayons X).

Ces analyses ont montré que la synthèse organique suivie d'une extraction par fluide supercritique donnait des résultats prometteurs, puisque le produit obtenu présentait une pureté d'au moins 98%, des propriétés physico-chimiques tout à fait conformes à celles indiquées dans la littérature, et ne contenait aucun alcane voisin détectable, ce qui était la condition la plus importante.

Financement : Institut Français du Pétrole.

Publications et communications : Un poster présenté au *Meeting on Supercritical Fluids* en 1998.

3.2 Hydrodynamique physique : mélange par gravité de fluides miscibles

J'avais souhaité compléter ma formation en génie des procédés par une expérience dans le domaine de l'hydrodynamique, grâce aux travaux réalisés dans le cadre de mon demi-poste d'ATER au laboratoire Fast (UMR 7608) à Orsay auprès de Jean-Pierre HULIN, en collaboration avec Bernard PERRIN de l'ENS (octobre 2000 / août 2001).

La dynamique du mélange entre deux fluides miscibles de densités différentes superposés en configuration instable, dépend de façon cruciale de leur contraste de densité. Le but de notre expérience était d'analyser ce phénomène dans une géométrie particulière encore peu étudiée : un long tube vertical de faible diamètre par rapport à la hauteur. Une telle configuration est rencontrée lors de la complétion des puits pétroliers (ciment injecté au-dessus de la boue de forage). On peut aussi la rencontrer en cas de fonctionnement dégradé d'une colonne d'extraction liquide-liquide. Pour le cas des puits pétroliers, il est important de pouvoir prédire la hauteur de la zone de mélange ciment/boue de forage, afin de l'évacuer correctement. Cette étude se situant très en amont de l'application, nous avons travaillé sur un fluide modèle : une solution aqueuse. Après avoir mis au point le protocole expérimental basé sur la visualisation (l'un des liquide étant coloré), nous avons réalisé de nombreuses expériences en faisant varier le contraste de densité, la viscosité commune des fluides et le diamètre du tube (avec l'aide de Vincent FANGUET, que j'ai eu l'occasion de co-encadrer pour son stage). L'objectif étant d'avoir une vue complète des comportements de mélange, nous n'avons pas cherché à limiter le nombre d'expériences en mettant en œuvre un plan d'expériences par exemple. Au contraire, grâce au grand nombre d'expériences réalisées, nous avons mis en évidence l'existence d'un régime de mélange diffusif à l'échelle macroscopique, induit par des mouvements convectifs à petite échelle ; le coefficient de diffusion correspondant étant cinq ordres de grandeur plus élevé que le coefficient de diffusion moléculaire. Nous avons ensuite quantifié le mélange en déterminant pour chaque expérience le coefficient de diffusion macroscopique et la vitesse caractéristique des éléments fluides. Nous avons ainsi cartographié trois régimes de mélange : régime de contre-écoulement stable, régime diffusif/convectif et régime diffusif turbulent. Enfin nous avons bâti un modèle basé sur des lois de comportement en fonction des nombres adimensionnels caractéristiques du problème. En vue d'une transposition future au cas industriel, ce type de modèle permettra de prédire la hauteur de mélange à évacuer pour garantir la solidité du puit pétrolier.

J'ai eu l'occasion de participer au démarrage d'un dispositif expérimental beaucoup plus grand (environ 20 m de haut, contre 4 m à l'échelle laboratoire) chez Schlumberger à Cambridge : dans ce pilote, l'ensemble des liquides était en mouvement descendant forcé, afin de s'approcher de la configuration d'un puits pétrolier.

Collaborations et financements : Bernard PERRIN du Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, ENS Paris ; Edward John HINCH du Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics (DAMTP) à Cambridge ; Schlumberger à Cambridge.

Publications et communications : Deux publications internationales et deux nationales + trois communications internationales.

Perspectives : Cette thématique s'est poursuivie après mon départ grâce à plusieurs stages et thèses avec notamment l'étude de l'influence de l'inclinaison du tube et de la rhéologie des fluides, mais surtout une étude approfondie des mécanismes de mélange s'appuyant sur des mesures locales de vitesse et de concentration.

3.3 Préparation de couches minces de verres organiques

Lors de ma seconde année d'ATER à l'ENS Cachan, j'ai effectué quelques travaux de recherche en collaboration avec Éléna ISHOW dans l'équipe du Professeur Keitaro NAKATANI, au sein du Laboratoire de Photophysique et Photochimie Supramoléculaires et Macromoléculaires (PPSM).

Un des projets entrepris au sein de l'équipe concernait l'étude d'un nouveau type de matériaux, les verres organiques, qui semblaient prometteurs pour la réalisation de guides d'onde ; ces derniers étant jusque là réalisés en métal ou en polymère. Ce projet comportait trois phases : la synthèse, la mise en forme et la caractérisation optique de ces verres organiques. Ma modeste contribution a concerné essentiellement la partie mise en forme. La molécule retenue était le DBABNO₂ (4-[N-di(4-biphényl)amino]-4'-nitroazobenzène), qui présente à la fois un groupe photo-isomérisable et une structure dipolaire. L'introduction d'un groupe photo-isomérisable autorisait le recours à la technique d'orientation photo-assistée pour préparer, à température ambiante, un matériau non isotrope, nécessaire à l'obtention des propriétés recherchées en optique non linéaire du second ordre. La synthèse du DBABNO₂ était réalisée par Éléna ISHOW ; il était obtenu sous forme cristallisée. J'ai testé trois techniques de dépôt sur des substrats de verre (recouverts ou non d'une couche de semi-conducteur, nécessaire à l'étape ultérieure d'orientation photo-assistée). L'objectif était de déposer des couches de quelques μm d'épaisseur pour une surface de l'ordre du cm^2 .

- Le dépôt à la tournette d'une solution concentrée en DBABNO₂ dans le chloroforme, technique classique pour ce type d'étude, ne permettait d'obtenir que des couches de faible épaisseur (0,2 à 0,4 μm).
- Le dépôt par évaporation sous vide (vers 200°C, 5 10^{-5} mbar) du DBABNO₂ pulvérulent a été testé pour la première fois, à l'aide d'un dispositif en verre que nous avons conçu et réalisé. Il comportait en particulier un doigt pouvant accueillir de l'azote liquide, permettant de refroidir brutalement le composé et ainsi d'obtenir des dépôts amorphes, sachant que les dépôts cristallisés sont inaptes à l'orientation. L'épaisseur des couches obtenues par cette méthode pouvait atteindre 1,5 μm sans difficulté. Toutefois l'équipe n'avait pas jugé prioritaire l'étude de l'influence des conditions d'évaporation (pression, température de chauffage du produit cristallisé et température de trempe au niveau du dépôt, distance entre l'échantillon sublimé et la plaque de dépôt, etc.) sur la qualité et l'épaisseur du dépôt obtenu.
- La préparation d'électrodes « sandwich » par ascension capillaire du DBABNO₂ fondu (180°C) entre deux plaques préchauffées espacées par une entretoise de 3,5 μm n'a permis d'obtenir que des couches peu homogènes. L'idée était d'obtenir directement l'électrode nécessaire à l'orientation ultérieure. Cependant la forte viscosité du DBABNO₂ fondu et son refroidissement rapide et hétérogène au contact des plaques (nous n'étions pas équipés pour les maintenir chaudes), n'autorisait l'ascension capillaire que sur quelques millimètres.

Nous avons ensuite exploré l'activité en optique non linéaire du second ordre de ces couches minces. De manière conventionnelle, celles obtenues par la technique de dépôt à la tournette ne présentaient un signal de génération de second harmonique qu'après que les molécules aient été orientées en présence d'un champ électrique. Celles obtenues par ascension capillaire étaient inexploitable. En revanche et de manière inattendue, celles obtenues par évaporation sous vide étaient actives avant même l'étape d'orientation, ce qui semblait indiquer que cette technique induisait une orientation des molécules lors du dépôt. Ces travaux se sont poursuivis après mon départ et ont fait l'objet de quelques publications.

3.4 Cristallisation discontinue par refroidissement sous agitation

L'EA21 travaillait depuis de nombreuses années dans le domaine de la cristallisation par refroidissement : au départ uniquement sur l'automatisation, puis au fil du temps d'autres aspects ont été étudiés, en particulier le profil de refroidissement et le problème de la nucléation secondaire.

Les stages de DEA de Thao-Nguyen LE-VU et Wael KHALIL en 2002-2003 m'ont permis de me familiariser avec la thématique cristallisation, en particulier les problématiques liées au profil de refroidissement et au polymorphisme. Les travaux menés par le laboratoire dans ce domaine étaient essentiellement expérimentaux. L'enjeu général était l'amélioration du produit final, obtenu par différents types de cristallisation (cependant surtout la cristallisation discontinue par refroidissement en cuve agitée). De façon générale, pour la cristallisation à l'échelle industrielle, le contrôle de la distribution granulométrique est une préoccupation constante, car les opérations de traitement qui suivent (filtration, essorage...) ainsi que la manutention du produit, sont grandement facilitées lorsque sa distribution granulométrique est resserrée autour d'une taille cible. Notre stratégie consistait à optimiser le profil de refroidissement d'une part (travail déjà largement avancé lorsque je suis arrivée au laboratoire) et l'agitation de la cuve d'autre part. Des moyens de mesure en ligne, des cristaux et de la phase liquide, ont été mis en œuvre pour permettre un suivi des deux phases tout au long de la cristallisation.

La microthèse et le stage de DEA de Damien DESPINOY en 2003 avaient pour objet la recherche de nouvelles pistes permettant de contrôler la distribution granulométrique de la glycine ; l'objectif étant toujours d'obtenir une distribution de taille des cristaux resserrée et centrée sur les plus grandes tailles possibles. Une réflexion sur les mécanismes de cristallisation de la glycine, déjà longuement étudiée par le laboratoire, nous a conduit à nous intéresser à la vitesse d'agitation dans le cristalliseur, et plus particulièrement à l'établissement d'un **profil de vitesse d'agitation**, c'est-à-dire une variation de la vitesse d'agitation en fonction du temps, permettant de limiter l'influence de l'attrition et de l'agglomération, phénomènes nuisibles à l'obtention d'une distribution granulométrique homogène. Un premier profil de vitesse d'agitation a été déterminé à partir de simulations par Mécanique des Fluides Numérique de la mise en suspension des cristaux dans l'ensemble de la cuve, en fonction de leur taille au fur et à mesure du refroidissement. Puis ce profil de vitesse d'agitation a été amélioré expérimentalement. Une distribution granulométrique resserrée sur les gros cristaux est obtenue lorsque la vitesse d'agitation, élevée en début de cristallisation, diminue progressivement, puis est à nouveau augmentée en fin d'opération.

La thèse de Florent MUSCATELLI (contrat Cifre avec la SNPE Matériaux Énergétiques de 2002 à 2005) a débuté la même année que mon arrivée au Cnam et je me suis progressivement investie dans le suivi de cette thèse réalisée au Centre de Recherche du Bouchet (à Vert-le-Petit, dans le sud de l'Essonne). Il s'agissait d'un travail purement expérimental. La première partie de ce travail portait sur l'amélioration de la **cristallisation par refroidissement** d'une charge énergétique minérale : en jouant sur le profil de refroidissement et la vitesse d'agitation (constante pour cette étude), il a été possible d'obtenir des cristaux exempts d'inclusions et ayant la morphologie et la distribution granulométrique voulues ; ces améliorations ont pu être testées avec succès sur un pilote à l'échelle 1/10^e de l'installation industrielle, puis sur l'atelier de fabrication lui-même. La deuxième partie de ce travail concernait la **cristallisation par évaporation** d'un explosif organique : le travail sur le ratio solvant/anti-solvant et l'agitation ont permis d'obtenir la granulométrie souhaitée et les essais d'extrapolation sur une installation de 60 L ont donné satisfaction. La troisième et dernière partie de la thèse concernait la cristallisation en voie fondue dans un polymère (**prilling en suspension**) d'un explosif minéral : le procédé

a été mis au point sur une cuve de 3 L et transféré avec succès sur une installation de 16 L.

La thèse de **Baptiste MULOT** (réalisée en grande partie sur le site de Sanofi-Aventis à Vitry de 2004 à 2008), concernait l'**utilisation des outils d'analyse en ligne pour le suivi de la cristallisation du pilote jusqu'à l'échelle industrielle**. La maîtrise des phénomènes qui régissent la cristallisation nécessite en effet le suivi simultané de la phase liquide (pour mesurer la sursaturation) et de la phase solide (pour suivre l'évolution des cristaux en taille et en concentration). La réfractométrie et la turbidimétrie ont été utilisées à cette fin dans le cadre de ces travaux. Le choix s'est porté sur ces outils, plus rudimentaires que les mesures spectrométriques par exemple, car il existe des appareillages adaptés à la production à l'échelle industrielle. Après une mise au point et la calibration d'un réfractomètre industriel à l'échelle laboratoire (cuve d'1 L), il a été implanté sur un atelier de fabrication d'un principe actif pharmaceutique (5000 m³). Une fois validé, l'outil a été adopté et permet désormais de limiter les prélèvements effectués, de diminuer le temps de cycle de production et de gagner en rendement, en évitant les dépassements de seuil. La même démarche a été entreprise pour la turbidimétrie jusqu'à l'échelle pilote (cuve de 20 L). La faisabilité et l'intérêt du couplage des deux instruments ont été démontrés à l'échelle laboratoire dans le cadre du stage de master 2 de **Phahath THAMMAVONG** en 2007.

Collaborations et financements : Thèse Cifre avec la SNPE Matériaux Énergétiques pour Florent MUSCATELLI; convention avec Sanofi-Aventis (Vitry) pour la thèse de Baptiste MULOT; BQR pour le financement de la machine frigorifique pour les essais sur pilote au Cnam dans le cadre de la thèse de Baptiste MULOT.

Publications et communications : L'étude de Damien DESPINOY a fait l'objet d'une publication nationale. Les résultats de Florent MUSCATELLI, sur un sujet très sensible à la SNPE, n'ont pu donner lieu à publication. Selon l'accord avec Sanofi-Aventis, les travaux de Baptiste MULOT ne pouvaient pas non plus être publiés.

Perspectives : J'ai fait le choix de cesser mes travaux sur cette thématique après la soutenance de la thèse de Baptiste MULOT, afin de me consacrer au développement de la nouvelle activité sur les fours tournants au sein du Cnam, sachant que la thématique "cristallisation" se poursuit sous l'égide de mon collègue Jean-Louis HAVET.

3.5 Traitement d'effluents aqueux industriels par procédés d'ozonation : éjecteur et colonne à bulles

L'EA21 travaillait depuis quelques années dans le domaine du traitement d'effluents aqueux industriels et avait notamment mis en place un pilote d'éjecteur (thèse de Smain MERROUCHE, soutenue en 1998).

L'année de mon arrivée au Cnam, **Olivier CHEDEVILLE** a effectué son stage de DEA, qu'il a poursuivi en thèse de 2003 à 2006, sur les procédés d'oxydation avancée, techniques efficaces pour le traitement de nombreux polluants organiques dissous. L'objectif de l'étude était de mettre au point, à l'échelle pilote, un outil de dépollution du phénol en phase aqueuse, basé sur les procédés d'oxydation avancée à pression et température ambiantes : les radicaux HO• sont générés par décomposition de l'ozone dans l'eau, ou par couplage ozone/UV, ozone/H₂O₂ ou ozone/UV/H₂O₂. Ce type de réaction étant rapide, l'enjeu était de vérifier que l'**éjecteur tubulaire** prolongé par un tube droit, type de contacteur habituellement recommandé pour ce

cas de figure mais jusqu'alors peu utilisé dans le monde industriel, était effectivement performant, non seulement pour éliminer le polluant initial, mais aussi des sous-produits éventuels, en garantissant un abattement maximal de la matière organique. L'éjecteur tubulaire offre une importante efficacité de transfert de l'ozone vers l'effluent à traiter, il permet donc de répondre à la forte demande en ozone des procédés d'oxydation avancée utilisés. Nous avons tout d'abord étudié le transfert d'ozone en phase liquide, fortement lié à l'hydrodynamique du réacteur. Puis nous avons mis en œuvre le procédé sur un polluant modèle, le phénol.

Lors de cette étude, plusieurs réponses du système étaient mesurées : les évolutions en fonction du temps de la quantité de polluant cible et de ses sous-produits (HPLC), de la demande chimique en oxygène (DCO), du carbone organique total (COT), du pH et du ratio de transfert d'ozone. Dans le cas des expériences sur le phénol, quelle que soit la technique utilisée (ozone seul ou couplé avec les UV et/ou l'eau oxygénée), l'élimination du composé initial est complète, et les abattements de DCO et de COT sont supérieurs à 90% ; il reste en solution des composés de faible masse moléculaire (acides carboxyliques légers), facilement éliminables par traitement biologique par exemple, comme nous avons tenté de l'étudier lors du stage de DEA de Didier GRACIEN en 2003-2004. Le ratio de **transfert d'ozone** dans l'éjecteur est quant à lui très élevé (> 90%) tant qu'il reste en solution des polluants en quantité non négligeable.

Nous avons testé en parallèle le cas d'une **colonne à bulles**, mise en place avec l'aide de Mauro FERRANTE pendant son stage de master 1 en 2005. L'enjeu était de disposer d'éléments de comparaison puisque ce réacteur, au contraire de l'éjecteur, est réputé adapté aux réactions lentes ; ce qui peut être le cas de certains sous-produits ou bien d'autres polluants phénoliques. Nous avons étudié les effets de différents paramètres (température, pH, débits) sur l'efficacité des deux procédés et ce de manière exclusivement expérimentale.

Pour terminer la thèse d'Olivier CHEDEVILLE, des essais ont été menés sur d'autres polluants organiques : acides phénoliques et effluents composites, ainsi que sur des margines (résidu aqueux de l'industrie oléicole, fortement chargé en polluants organiques, notamment des composés phénoliques) ; les résultats ont été très satisfaisants et la faisabilité du procédé de dépollution des eaux phénolées par ozonation en éjecteur tubulaire a donc été démontrée.

Collaborations et financements : "Aide à l'innovation – jeunes" financé par Anvar-Oséo (6 000 € en 2005) ; projet "Innovation 2007" financé par la direction de la recherche du Cnam (9 350 € pour l'ensemble de l'activité "traitement des eaux" sur 2006 et 2007) ; don de matériel (ozonneur, détecteur et destructeur d'ozone) par Trailigaz et Anjou Recherche.

Publications et communications : Deux publications internationales et quatre nationales + une communication internationale.

Perspectives : Olivier CHEDEVILLE a été recruté sur un poste de maître de conférences à Orléans dans un laboratoire avec lequel le Cnam collaborait depuis longtemps ; il a donc quelques temps chapeauté l'activité "ozonation" depuis Orléans ; il a notamment amorcé une étude de l'intérêt du couplage ozone/charbon actif. De mon côté, j'avais restreint mes activités dans le domaine du traitement des eaux à l'OVHC.

3.6 Traitement d'effluents liquides par Oxydation par Voie Humide Catalytique (OVHC)

À de mon arrivée, l'EA21 travaillait depuis peu sur l'oxydation par voie humide catalytique (OVHC) en réacteur tubulaire triphasique à lit fixe, avec la thèse de Gilberto TORRES-TORRES (soutenue en 2003). Après son départ, j'ai piloté cette activité avec les deux doctorants.

L'OVH permet la destruction par oxydation en phase aqueuse de polluants organiques, en utilisant de l'oxygène moléculaire ou de l'air comme source d'oxydant. Généralement, le polluant n'est pas complètement éliminé mais partiellement converti, selon un mécanisme radicalaire, en plusieurs intermédiaires de toxicité significativement réduite. Dans notre cas, l'OVH était effectuée en présence d'un catalyseur hétérogène (complexes de ruthénium et de cérium déposés sur des billes d'alumine) dans un réacteur tubulaire triphasique à lit fixe et cocourant gaz/liquide descendant. Les travaux de Gilberto TORRES-TORRES avaient permis de définir le catalyseur (choix des métaux), mais avaient révélé les défauts de l'installation (qui avait été détournée de son application originelle pour cette étude de faisabilité de l'OVHC) : nous avons **entièrement reconstruit le pilote** afin de travailler en sécurité dans des conditions de pression et de température adéquates pour l'OVH (soit vers 200°C et jusqu'à 25 bar), de disposer de moyens de mesures et de contrôle supplémentaires et de limiter les effets de paroi et les écoulements préférentiels dans le réacteur triphasique (le diamètre du réacteur dans l'ancienne installation ne pouvait accueillir que quelques grains de catalyseur, ce qui compromettait toute tentative d'extrapolation ultérieure). La pollution globale des échantillons était caractérisée par la mesure du carbone organique total (COT) et de la demande chimique en oxygène (DCO) ; le suivi du polluant cible et de ses sous-produits de dégradation majoritaires était réalisé par chromatographie en phase gazeuse.

L'**automatisation de l'installation** puis son utilisation pour la **destruction du Méthyl-tertiobutyléther** (MTBE, polluant des eaux souterraines en cas d'infiltrations provenant des réservoirs de stockage ou des canalisations de transports de carburant) a fait l'objet du DEA et de la thèse d'Alexis El KHOURY de 2003 à 2008.

La **mise au point du protocole de préparation du catalyseur** a été réalisée dans le cadre de la thèse de Bouchra BEJJANY de 2002 à 2008 et du stage de master 2 de Ziyana ROSSANALY en 2006. Une première étude du vieillissement du catalyseur a été réalisée lors du stage de master 2 de Yue Ying XU en 2008. La dépollution de solutions aqueuses contenant des herbicides a également été tentée à la fin de la thèse de Bouchra BEJJANY.

Dans les conditions opératoires usuelles de l'OVHC, c'est-à-dire en se plaçant juste au-dessus de la pression de vapeur saturante de l'eau vers 200°C, un abattement total du MTBE peut être obtenu, ainsi qu'une conversion de l'ordre de 90% de la pollution globale, avec un vieillissement lent du catalyseur. Les premiers tests réalisés sur un herbicide montrent que le produit initial peut être correctement éliminé, en revanche des sous-produits persistent, y compris des espèces potentiellement toxiques de masse molaire élevée.

Les conditions difficiles dans lesquelles ces travaux ont été menés, n'ont pas permis d'explorer des moyens d'améliorer la conversion de l'herbicide, ni d'entamer une démarche de modélisation pour le cas du MTBE.

Collaborations et financements : "Aide à l'innovation – jeunes" financé par Anvar-Oséo (6 000 € en 2007-2008) ; projet "Innovation 2007" financé par la direction de la recherche du

Cnam (9 350 € pour l'ensemble de l'activité "traitement des eaux" sur 2006 et 2007) ; réalisations de caractérisations à titre gratuit par des laboratoires du Cnam et de l'UPMC.

Publications et communications : Une publication nationale et deux communications internationales. Cette modeste production – ainsi que la durée particulièrement longue de ces deux thèses – s'explique notamment par le fait que les deux doctorants n'avaient pas de financement ; ils ont dû travailler en parallèle de leurs travaux de recherche.

Perspectives : Souhaitant me consacrer au développement de la nouvelle activité sur les fours tournants, j'avais décidé de laisser en suspend l'activité OVHC après les soutenances de Bouchra BEJJANY et Alexis El KHOURY. L'intérêt et l'efficacité du procédé ayant été démontrés, une suite aurait pu consister à effectuer une étude du comportement hydrodynamique du réacteur. Cette étude aurait pu se faire à la fois à l'échelle macroscopique (à l'aide de mesures de Distribution des Temps de Séjour au moins sur le liquide) et à l'échelle des grains de catalyseurs. Pour ce second aspect, j'avais renoué contact avec des mécaniciens des fluides spécialistes des milieux granulaires du Fast à Orsay. Plusieurs études sur les écoulements dans les réacteurs à lit fixe arrosés ont été effectuées par des chercheurs en génie chimique : l'intérêt premier de la partie mesures de DTS de ce projet aurait donc été de comparer les résultats publiés avec le cas du réacteur mis en place dans notre laboratoire. Les billes d'alumine supports de notre catalyseur ayant une topologie particulière, on pouvait s'attendre à des propriétés de mouillage éventuellement peu communes. Des expériences auraient tout d'abord pu consister en de simples observations dans une cellule de Hele-Shaw, puis dans un tronçon de tube transparent. Ce travail aurait pu faire l'objet d'une thèse, dont il fallait trouver le financement. Côté matériel, l'investissement pouvait être modeste, et par conséquent partiellement voire totalement auto-finançable. L'étude hydrodynamique du réacteur d'OVHC aurait naturellement mis sur le chemin de la modélisation de ce procédé. Il fallait pour cela s'intéresser à la cinétique réactionnelle et aux échanges thermiques : si l'étude bibliographique s'était révélée insuffisante pour apporter les éléments nécessaires à la modélisation, il aurait fallu développer des dispositifs expérimentaux adaptés. Le besoin financier en matériel devait préalablement être identifié et les moyens adaptés étaient à trouver.

3.7 Fours tournants

J'ai préparé ma thèse au Laboratoire de Science et Génie des Matériaux Métalliques (devenu aujourd'hui l'Institut Jean Lamour) et au Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (devenu aujourd'hui le LRGP), à Nancy, dans le cadre d'une étroite collaboration avec Cogema Pierrelatte et FBFC Romans, sous la direction des professeurs Denis ABLITZER et Jean-Léon HOUZELOT, avec le soutien de Fabrice PATISSON. J'ai soutenu mon doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, spécialité Génie des Procédés, le 4 janvier 2001, devant le jury suivant : professeur Jean-Bernard GUILLOT, École Centrale Paris (rapporteur) ; professeur Hani HENEIN, University of Alberta, Canada (rapporteur) ; professeur Michel SOUSTELLE, École des Mines de Saint-Étienne (rapporteur) ; André FEUGIER, FBFC Romans (examinateur) ; Didier HARTMANN, Cogema Pierrelatte (examinateur) ; professeur Denis ABLITZER, École des Mines de Nancy (directeur de thèse) ; professeur Jean-Léon HOUZELOT, Ensic Nancy (directeur de thèse).

L'objectif de mon travail était d'étudier puis de modéliser le fonctionnement de deux types de fours tournants utilisés pour le traitement de l'hexafluorure d'uranium issu de l'usine d'enrichissement : l' UF_6 appauvri est défluoré et converti en U_3O_8 , tandis que l' UF_6 enrichi est défluoré

puis réduit en UO_2 , qui sera ensuite placé dans les « crayons » qui forment le combustible des centrales nucléaires. Ces fours tournants sont constitués d'un long tube (rapport d'aspect supérieur à dix) incliné de quelques degrés par rapport à l'horizontale et tournant à quelques tours par minute ; ils permettent la mise en contact et donc la réaction d'un matériau granulaire et d'un gaz circulant à contre-courant.

Si les problématiques étaient différentes pour les deux types de four (problèmes de conduite et de garantie de la qualité de la poudre finale pour les fours traitant l' UF_6 appauvri ; besoin d'augmentation de capacité de production pour ceux convertissant l' UF_6 enrichi), la stratégie était la même : mettre au point un modèle macroscopique global représentant le fonctionnement des deux fours et utilisable par les exploitants pour tester diverses stratégies d'amélioration.

Il s'agissait en particulier de prendre en compte l'effet des équipements internes (releveurs notamment) présents dans ces fours tournants, car si la littérature était riche en ce qui concerne l'étude de l'hydrodynamique et les transferts thermiques, ainsi que la modélisation des fours tournants classiques, très peu de publications concernaient les fours tournants munis de releveurs, et aucune ne proposait de modélisation globale dans ce cas. Pourtant ces releveurs favorisent le brassage et les contacts gaz/solide et par conséquent la conversion. Leur effet sur les transferts thermique est en revanche moins intuitif et ils pourraient même se révéler néfastes dans certains cas.

L'hydrodynamique dans les fours tournants est un sujet complexe, *a fortiori* quand ils sont munis de releveurs. Or l'écoulement, notamment de la poudre, à travers le four, conditionne les transferts de matière et de chaleur et par conséquent la conversion. J'ai donc effectué une étude approfondie du mouvement de la charge solide dans les fours à l'aide d'essais en maquette froide et de mesures de Distribution des Temps de Séjour sur les fours industriels ; j'ai alors pu développer un **modèle hydrodynamique original** permettant de calculer la répartition de la poudre dans chaque section droite de four. Les lois cinétiques ont été approximativement établies expérimentalement dans les conditions de fonctionnement des fours industriels et j'ai mis en place un **modèle de transferts de matière**, basé sur la loi des temps caractéristiques additifs, permettant de calculer l'avancement des réactions en s'appuyant sur le modèle hydrodynamique. L'écriture des bilans thermiques sur la charge solide (dont la répartition était décrite grâce au modèle hydrodynamique), la phase gazeuse et les équipements internes, ainsi que la mesure expérimentale de certaines grandeurs, m'ont permis de caractériser les échanges de chaleur dans les fours. Enfin j'ai rassemblé l'ensemble des modèles dans un code de calcul pseudo-bidimensionnel (en langage Fortran) représentant de façon simple, mais très satisfaisante selon les objectifs fixés au départ, le fonctionnement des deux types de fours industriels en régime stationnaire. Ce modèle a permis de suggérer des pistes pour l'amélioration du procédé, à la fois pour le contrôle du procédé et pour la validation de la faisabilité d'une augmentation importante de la capacité de production. Ces améliorations ont été mises en œuvre par la suite sur les installations de production et ont permis des gains substantiels (en productivité et en coût de maintenance).

Collaborations et financements : Cogema et FBFC ; Comurhex à Pierrelatte et le Laboratoire des Agrégats Moléculaires et Matériaux Inorganiques (LAMMI) à Montpellier pour les mesures cinétiques.

Publications et communications : Ma thèse était confidentielle pour dix ans ; j'avais cependant obtenu l'autorisation pour cinq publications nationales. J'ai également produit quatre rapports industriels pendant mon doctorat. Récemment j'ai pu valoriser mon travail par deux publications internationales ; une voire deux autres seraient envisageables.

J'ai apporté cette nouvelle activité dans l'EA21 (qui deviendra plus tard EA7341) en 2007, suite à une demande d'Areva. Cet apport fut –parmi d'autres– l'occasion d'une réorganisation dans les thématiques du Laboratoire et la création d'un axe "Réacteurs polyphasiques" dans l'équipe "Génie des procédés chimiques". Ce sujet offre des perspectives intéressantes compte tenu d'une part de l'intérêt industriel (même si en 2012 –dans un contexte géopolitique complexe– Areva n'a pas souhaité renouveler notre contrat ; le domaine nucléaire n'est pas le seul domaine d'application de ce type de contacteur) et d'autre part de la relativement modeste activité de recherche académique dans ce domaine en France, et même au niveau international. On trouve de nombreuses publications sur les fours tournants sans relevage, mais peu avec relevelers et les modèles proposés sont rarement globaux ou alors très simples.

La thèse de **Phahath THAMMAVONG**, avait pour objectif de concevoir un outil et une méthode pour **étudier les transferts thermiques dans un four tournant**, et en particulier quantifier le coefficient de transfert solide/paroi, qui est le plus délicat à déterminer. Le modèle global mis en place lors de mon travail de thèse présentait en effet une grande sensibilité aux coefficients de transfert de chaleur, notamment le coefficient d'échange solide/paroi ; or les essais effectués pendant ma thèse sur un dispositif simplifié et de petite dimension n'avaient pas fourni de mesure fiable de ce coefficient (problèmes métrologiques ; écoulement du solide peu représentatif de l'écoulement réel dans les fours tournants) et les corrélations disponibles dans la littérature conduisent à des valeurs extrêmement dispersées (plusieurs ordres de grandeur). Nous avons donc conçu et fait fabriquer un **pilote polyvalent et finement instrumenté**. Nous nous sommes pour cela appuyé sur les rares et très anciens travaux expérimentaux menés sur le sujet notamment au Canada. Nous avons tenté de nous rapprocher d'études de thermique sur les transferts en milieu granulaire, mais la complexité de l'écoulement de poudre dans un four tournant muni de relevelers rendait la transposition de ces méthodes impossible pour notre configuration. Nous avons eu beaucoup de mal à trouver un fournisseur capable de fabriquer à façon une installation adéquate. Nous nous sommes heurtés à plusieurs reprises à des impossibilités techniques de réalisation de certains éléments du pilote, remettant en cause sa conception entière. Pourtant au bout de pratiquement deux ans de thèse, le pilote a été livré et les premiers résultats obtenus, en utilisant du sable comme poudre modèle, furent très encourageants, même s'ils continuèrent de démontrer la grande difficulté d'obtenir des mesures fiables lors de l'étude thermique des fours tournants, ce qui est cohérent avec le particulièrement faible nombre de travaux expérimentaux rapportés dans la littérature à ce sujet. Nous avons dû apporter quelques modifications à l'installation. Et nous avons finalement pu montrer l'importante influence du débit de solide sur le coefficient d'échange thermique solide/paroi, alors que l'effet de la vitesse de rotation –dans la gamme de variation considérée– était nettement plus modeste. Par la suite, Phahath THAMMAVONG étant ATER au laboratoire, nous avons continué l'étude de l'influence des paramètres (inclinaison, température de chauffe) sur le coefficient d'échange thermique solide/paroi. Nous avons également exploré une configuration d'intérêt industriel, mais à propos de laquelle aucune étude expérimentale n'est rapportée dans la littérature : le refroidissement. Après quelques tests de faisabilité, nous avons fait fabriquer une canne support de thermocouples spécifique. De premiers résultats ont été obtenus, mais nous avons été confrontés à des difficultés métrologiques, que nous avons résolu par un ré-étalonnage de l'ensemble des 68 thermocouples de la nouvelle et de l'ancienne cannes de mesure de températures.

Lors de la mise en place du pilote pour l'étude thermique, des mesures de distribution des temps de séjour avaient été effectuées pour vérifier le bon fonctionnement du four. Ceci avait révélé un champ d'étude riche et prometteur : l'étude hydrodynamique macroscopique en présence de relevelers, également peu investiguée expérimentalement dans la littérature. Au départ le traceur

utilisé était du sable coloré ; il fallait donc trier les grains de sable dans les échantillons prélevés en sortie de four. Par la suite nous avons pu démontrer qu'une méthode moins fastidieuse (utilisant du sel comme traceur) permettait d'obtenir de tout aussi bonnes mesures de distribution des temps de séjour du sable ; une campagne d'essais exhaustive a fait par la suite l'objet d'une seconde thèse.

Dans le cadre de l'Institut Carnot ARTS auquel le Laboratoire avait été rattaché peu avant, nous avons lancé une étude (stage de master 2 de Charles DOIREAU en 2012) avec le Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Ensam afin de confirmer –ou infirmer– certaines des hypothèses émises pour la formulation du bilan thermique qui permet d'accéder à la valeur du coefficient d'échange thermique solide/paroi à partir de nos mesures de températures : l'objet du stage était de mettre au point une simulation de notre pilote à l'aide d'un logiciel commercial (Fluent) afin de tester nos hypothèses simplificatrices. Les résultats quantitatifs ne furent hélas guère probants.

La thèse d'Alex BONGO NJENG, a eu pour objectif de **quantifier et modéliser l'influence des releveurs sur l'hydrodynamique et les transferts thermiques en four tournant**, en collaboration avec une équipe du Centre Rapsodee de l'École des Mines d'Albi, qui dispose d'un pilote très complémentaire du notre : leur installation –de plus grande capacité– peut notamment travailler dans des conditions quasiment de production, en réaction et avec contrôle de la composition de la phase gazeuse. Cette collaboration était une opportunité inédite d'avancer de façon significative sur la compréhension fine et la maîtrise de ce procédé industriel qui, bien qu'utilisé en production depuis longtemps, nécessite encore des travaux de recherche fondamentale. Le projet comportait une partie expérimentale menée en synergie sur les deux installations dont disposent les deux laboratoires, et une partie modélisation réalisée elle aussi en collaboration étroite entre les deux laboratoires. Alex BONGO NJENG a passé 18 mois à Paris, puis 18 mois à Albi ; pendant la période où il était à Albi, les essais sur le pilote du Cnam continuaient grâce au technicien du laboratoire, formé à l'utilisation du pilote et qu'Alex BONGO NJENG chapeautait à distance. Les volets expérimentaux du projet ont permis de quantifier les effets des équipements internes placés dans le four, sur l'hydrodynamique de la charge ainsi que sur les transferts thermiques. À partir de campagnes d'essais exhaustives et complémentaires sur les deux installations, la modélisation des résultats -basée sur l'**analyse dimensionnelle**- a permis de corréler les coefficients d'échange thermique et les caractéristiques d'écoulement de la charge (temps de séjour moyen, coefficient de dispersion axiale et chargement total) en fonction des paramètres opératoires des fours et des caractéristiques des releveurs et des poudres employés. Les résultats sont particulièrement probants sur la partie hydrodynamique, ainsi la corrélation établie à partir des données recueillies sur le four du Cnam, a montré un excellent caractère prédictif sur le four d'Albi, deux fois plus gros, équipé d'internes sensiblement différents et opérant avec un solide aux propriétés très différentes des poudres testées au Cnam. Le travail sur la partie thermique nécessite encore des développements, mais constitue un début remarquable compte tenu de la difficulté de ce genre de mesures, comme évoqué plus haut. Un modèle global a également été mis en place en fin de thèse, dans le but de capitaliser l'ensemble des connaissances acquises grâce aux travaux expérimentaux. Une future extension du modèle pourrait être capable de modéliser des phénomènes réactifs, afin de faire le lien entre les coefficients de transfert thermique à une échelle locale, les écoulements granulaires et les performances globales du four. Ce modèle serait un outil d'aide au dimensionnement, mais aussi au pilotage car il s'agit d'un modèle dynamique.

Pendant son stage de master 1 en 2016, Maryanna DE MELO SOLEDADE a transposé avec succès le mode opératoire de détermination des distributions des temps de séjour au cas d'une poudre fine (sable de 0,1 mm de diamètre). Ceci nous permet aujourd'hui, avec le concours du

technicien du laboratoire, de **compléter notre banque de résultats expérimentaux** (près de 200 résultats expérimentaux à ce jour) afin de renforcer la qualité des modèles pour la prédiction du temps de séjour moyen, de la charge et de la dispersion axiale.

Collaborations et financements : Areva NC (275 500 € sur trois ans pour la construction du pilote dans le cadre de la thèse de Phahath THAMMAVONG, puis 10 000 € en 2011); Greth (André BONTEMPS) pour l'expertise sur les transferts thermique et l'étalonnage des thermocouples; Ensam (Fawaz MASSOUH) pour la tentative de modélisation CFD; Centre Rapsodee de l'École des Mines d'Albi (Jean-Louis DIRION) pour la thèse d'Alex BONGO NJENG.

Publications et communications : Cinq publications internationales et une nationale + six communications internationales et deux nationales. Quatre rapports industriels ont été produits pendant la thèse de Phahath THAMMAVONG.

Perspectives : Pendant ma thèse, l'approche avait été globale : il s'agissait de mettre en place un modèle complet ; l'hydrodynamique transverse et les transferts de matière était bien décrits ; en revanche il demeurait des incertitudes sur les valeurs des coefficients d'échange thermique (notamment solide/paroi) et sur les cinétiques réactionnelles. De même l'écoulement macroscopique de la poudre (temps de séjour moyen et dispersion axiale) avait été caractérisé approximativement et les éléments obtenus sur les fours industriels n'avaient aucun pouvoir prédictif pour toute autre installation. Pour les thèses de Phahath THAMMAVONG et Alex BONGO NJENG, la stratégie était en quelque sorte inverse : nous nous sommes focalisés sur des aspects très spécifiques de l'étude des fours tournants et avons cherché à accumuler de nombreux résultats expérimentaux afin de bâtir des modèles prédictifs. Mon ambition après tout ce travail est de reboucler avec l'approche globale pour aboutir à un modèle dynamique unifié ; j'y reviendrai dans mon projet scientifique, à la fin de ce mémoire page 127.

*
* *

Le tableau suivant propose une vue synthétique des cinq thématiques sur lesquelles je reviendrai dans les chapitres 1 à 3.

Au début de ma carrière, j'ai travaillé sur les thématiques de recherche du laboratoire dans lequel j'avais été recrutée. Dans des conditions peu ordinaires, comme je l'ai évoqué auparavant. Et je n'ai pas toujours pu travailler ou faire travailler selon une démarche à laquelle j'adhérais pleinement. J'ai néanmoins beaucoup appris pendant cette période, notamment sur la manière de diriger des étudiants ; peut-être davantage d'ailleurs que si j'avais eu la maîtrise totale des orientations scientifiques.

La thématique de recherche sur les fours tournants a été un vrai choix de stratégie de recherche : Les fours tournants sont présents dans de nombreuses industries, utilisés avec des dimensions et des capacités de production très différentes et sur des types de poudres également très variés. Pourtant il y a peu d'équipes de part le monde qui travaillent sur ce type de contacteurs gaz/solide, comparativement avec un autre contacteur fluide/solide qu'est le lit fluidisé par exemple. Conséquence ou cause du constat précédent, les industriels que j'ai eu l'occasion de rencontrer, ont souvent de grandes difficultés de conduite de leurs installations et une méconnaissance parfois désarçonnante de leurs procédés et équipements. Nous sommes une toute petite équipe (deux enseignants-chercheurs plus l'aide occasionnelle du technicien du laboratoire), dans un laboratoire mal connu. C'est pourquoi j'ai choisi de focaliser mon travail sur un sujet « niche »

comme celui des fours tournants : je pense que c'est la seule opportunité d'acquérir reconnaissance et visibilité pour notre activité dans ce contexte. Nous avons fait une bonne partie du chemin pour ce qui est du monde académique. Nous avons encore un gros travail à faire pour y parvenir côté industriel. L'idée du modèle unifié que je développerai dans mon projet vient d'ailleurs de là, présumant que disposer d'un tel outil pourrait intéresser les industriels et équipementiers.

étude concernée	phases *	conception de pilote(s)	échelle indus. o	démo. faisabilité	étude hydrodyn.	modélisation	thèses et stages master	publis et comm.
mélange	LL	existait déjà		sans objet ★	méso	analyse dimension.	V. FANGUET	2 et 5
crystal-lisations	LS	1 L 5 L 20 L	×	×	macro		F. MUSCATELLI B. MULOT D. DESPINOY W. KHALIL T.-N. LE-VU P. THAMMAVONG	0 et 1
ozonation	GL	éjecteur colonne bulles pilote bio.		×	méso et macro		O. CHEDEVILLE O. CHEDEVILLE M. FERRANTE D. GRACIEN	2 et 5
OVHC	GLS	lit fixe arrosé		×			A. EL KHOURY B. BEJJANY A. EL KHOURY Z. ROSSANALY Y. Y. XU	0 et 3
four tournant	GS	« <i>baby kiln</i> »	×	sans objet ★	méso et macro	analyse dimension. et modèle phénoméno- logique 1D	ma thèse P. THAMMAVONG A. BONGO NJENG M. SOLEDADE C. DOIREAU	7 et 14

* : G pour gaz ; L pour liquide ; S pour solide

o : Une croix dans cette colonne signifie que nous avons travaillé sur des installations industrielles.

★ : Les procédés existaient déjà à l'échelle industrielle, il n'y avait pas lieu de démontrer leur faisabilité.

Chapitre 1

Procédés polyphasiques étudiés

COMME rappelé dans l'introduction générale, le génie des procédés s'intéresse aux phénomènes de transferts (hydrodynamique et transferts de matière et de chaleur) et aux réactions lors de la transformation de la matière et de l'énergie à l'échelle industrielle. La coexistence de ces phénomènes et leurs couplages rend complexe leur compréhension. Le niveau de complexité est rapidement tel, qu'il nous oblige à modéliser les phénomènes pour être en mesure de concevoir ou de faire fonctionner une unité de production ; parce qu'il est à peu près impossible de concevoir d'emblée l'équipement ou l'atelier permettant cette production. Il est généralement tout aussi impossible, d'ailleurs pour les mêmes raisons de complexité, de modéliser *a priori* un procédé, c'est-à-dire sans aucune expérience.

Modélisation et expérimentation se mènent donc en parallèle, l'une venant parfois en amont de l'autre. La stratégie sera sensiblement différente selon qu'il s'agit :

- de démontrer la faisabilité d'un procédé et de concevoir l'équipement ou l'ensemble d'équipements pour le réaliser à l'échelle industrielle ;
- d'avancer dans la compréhension des phénomènes mis en jeu dans un procédé existant, parfois déjà à l'échelle industrielle, ou au moins à l'échelle pilote.

Dans le premier cas, on aura tendance à concevoir un dispositif expérimental mettant en œuvre au moins les principaux phénomènes que l'on anticipe à l'échelle industrielle. Par exemple dans le cas d'un réacteur, on construira un pilote où au minimum la ou les réactions auront lieu. Il faudra sélectionner le type de contacteur adéquat ; parfois plusieurs technologies peuvent convenir : dans certains cas, des calculs préliminaires peuvent permettre de déterminer *a priori* laquelle sera la mieux adaptée (par exemple en calculant le nombre de Hatta pour un réacteur gaz/liquide) ; dans d'autres cas, il peut être envisagé de construire plusieurs pilotes. L'échelle de taille du pilote à concevoir est une question délicate : trop petit risque de nous priver de détecter des phénomènes qui pourront devenir importants à grande échelle ; trop grand peut conduire à un niveau de complexité et de non-maîtrise tels que les essais préliminaires seront voués à l'échec. La question du coût est bien sûr également centrale dans le choix de la bonne échelle de taille. La politique de recherche et les moyens du laboratoire ont également un impact important pour orienter ces choix initiaux : on aura tendance à s'orienter vers la technologie maîtrisée par le laboratoire ou bien celle déjà à disposition ou facilement montable avec les moyens disponibles. Ce type de pilote est probablement le plus difficile à concevoir puisqu'il faut tenter d'anticiper l'ensemble des phénomènes qui risquent de se produire à l'échelle industrielle ; sélectionner ceux dont on veut tenir compte dès l'échelle pilote et ceux dont on regardera l'influence par la suite ; tout en restant assez simple puisqu'il s'agit parfois seulement de démontrer la faisabilité.

Dans le second cas, on pourra décider de concevoir des maquettes, dans lesquelles on se

focalisera délibérément sur un ou plusieurs aspects particuliers du procédé, par exemple l'hydrodynamique avec une maquette froide. Se posera alors la question de l'impact de la température sur l'écoulement et il n'y a pas que pour les fluides que la température influence l'écoulement *via* la viscosité ou la tension de surface : certaines poudres s'écoulent différemment à température ambiante et à chaud.

Après la phase d'étude sur pilotes et/ou sur maquettes, se posera la question du changement d'échelle. Dans les cas qui m'ont concernée jusqu'à présent, le changement d'échelle a toujours consisté en une augmentation de taille ; je limiterai donc ma discussion à ce cas de figure. Se pose donc le problème de sélectionner la « bonne similitude ». Pour le cas de l'agitation par exemple, il est usuel d'extrapoler en maintenant la similitude géométrique et en conservant soit la puissance dissipée par unité de volume, soit la vitesse en bout de pale. Or ces deux stratégies d'extrapolation conduisent généralement à des vitesses d'agitation sensiblement différentes. Le changement d'échelle, surtout si le gap est important, pose également régulièrement le problème du contrôle de la température.

En résumé, imaginer se passer de pilotes et de maquettes est pour l'heure une utopie ; précisément à cause du niveau de complexité des phénomènes étudiés en génie des procédés et surtout de leurs couplages. J'irai jusqu'à dire que ce serait une dystopie, puisque cela ferait le infortune de tous ceux qui ont le goût de l'expérimentation ; je crois personnellement que l'étude des procédés serait alors d'un profond ennui.

Dans le présent chapitre, cinq pilotes sont successivement présentés, après un bref rappel des objectifs et des applications pour chaque thématique. J'ai délibérément concentré mon propos dans ce chapitre sur les installations ; je reviendrai sur la métrologie en fonction des besoins spécifiques des travaux présentés dans les chapitres 2 et 3.

Sommaire

1.1	Tube vertical de mélange	24
1.2	Cristalliseurs agités	26
1.3	Réacteurs à absorption gaz/liquide	30
1.3.1	Éjecteur	30
1.3.2	Colonne à bulles	34
1.3.3	Pilote de traitement biologique complémentaire	34
1.4	Réacteur à lit fixe arrosé	37
1.4.1	Conception du pilote et de sa supervision	37
1.4.2	Préparation du catalyseur	41
1.5	Fours tournants	44
1.5.1	Pilote de four tournant du Cnam	44
1.5.2	Pilote de four tournant du centre Rapsodee	48

1.1 Tube vertical de mélange

Objectifs : étudier la dynamique du mélange entre deux fluides miscibles de densités différentes superposés en configuration instable dans un très long tube (rapport d'aspect supérieur à 100).

Applications : complétion des puits pétroliers ; fonctionnement dégradé de colonnes d'extraction liquide-liquide.

Pour deux fluides miscibles de densités différentes superposés en configuration instable, le système est stabilisé par l'influence combinée des diffusions moléculaire et visqueuse



FIGURE 1.1 – Dispositif expérimental pour l'étude du mélange gravitaire : au milieu le tube vertical (dont on voit sur cette photographie environ 2,5 m) ; au centre la vanne à guillotine et sa manœuvre sur la gauche ; au fond l'éclairage ; sur la gauche le support vertical du tube ; en bas à droite les deux caméras

[Rayleigh, 1882, Taylor, 1950] et de la valeur finie du gradient de concentration [Taylor, 1954, Batchelor and Nitsche, 1991, Batchelor and Nitsche, 1993]. Lorsqu'un tel système est placé dans une cellule de Hele-Shaw, la largeur de la zone de mélange croît initialement comme le carré du temps puis proportionnellement au temps [Dalziel et al., 1999]. Le but de nos travaux était d'étudier ce mélange dans le très long tube vertical (4 m de hauteur et 3, 8 ou 20 mm de diamètre) représenté sur la FIGURE 1.1 : un fluide léger (eau colorée par de la nigrosine à 40 mg L^{-1} , de densité ρ_1) est placé au-dessous d'un fluide lourd parfaitement miscible (solution plus ou moins concentrée de CaCl_2 , de densité ρ_2). Les deux fluides sont initialement séparés à l'aide d'une vanne à guillotine. Ce procédé n'est pas à proprement parler polyphasique puisque les fluides sont parfaitement miscibles, mais peut s'y apparenter dans la mesure où il s'agit d'étudier la manière dont ces deux fluides se mélangent.

Des expériences ont été réalisées avec des solutions denses contenant 0,05 à 300 g L^{-1} de CaCl_2 , ce qui correspond à des nombres d'Atwood $At = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$ variant de $2 \cdot 10^{-5}$ à $9 \cdot 10^{-2}$. Pour une expérience donnée, les deux fluides miscibles ont la même viscosité. Nous avons pu faire varier cette viscosité dynamique commune entre 1 et $16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, en ajoutant du glycérol dans des proportions de 0 à 60% en masse aux solutions aqueuses.

Quelques expériences ont été réalisées pour des contrastes de densité nuls ou faiblement stabilisants : aucun mélange significatif n'est observé après plusieurs heures. Les gradients thermiques locaux pouvant exister sur l'ensemble du montage expérimental ont donc un effet négligeable sur le mélange macroscopique étudié.

Si la visée à long terme de cette étude était la transposition vers un cas industriel, les travaux menés à ce stade demeureraient fondamentaux, visant à comprendre les phénomènes et à les modéliser de manière adaptée à leur future exploitation sur une application industrielle.

Les techniques de mesure de concentrations et de vitesses sont décrites au chapitre 2 à partir de la page 53.

1.2 Cristalliseurs agités

Objectifs : amélioration des procédés de production de solides par cristallisations (essentiellement distribution de tailles de cristaux ; parfois inclusions ou polymorphisme).

Applications : charges énergétiques pour la propulsion spatiale ; principes actifs pharmaceutiques ou cosmétiques.

La cristallisation est une opération unitaire primordiale pour la mise en forme des produits chimiques, pharmaceutiques et cosmétiques. Les cristallisations que nous avons réalisées, étaient le plus souvent par refroidissement avec ensemencement en régime discontinu, avec un profil de refroidissement convexe. Parmi tous les paramètres influençant la cristallisation, l'agitation est un facteur clé, qui assure la mise en suspension des cristaux, favorise le transfert de chaleur et de matière au sein de la solution et peut induire des phénomènes d'attrition et d'agglomération [Klein et al., 1997].

Au Cnam, nous disposons de dispositifs très classiques pour la cristallisation par refroidissement sous agitation : des cuves de 0,5 à 2 L (FIGURE 1.2 ; mais aussi d'un pilote pouvant être équipé d'une cuve de 5 ou 20 L (FIGURES 1.3 et 1.4). Le profil de refroidissement est piloté par le cryothermostat pour les petites cuves et par le système de supervision pour le pilote. Nous avons toujours travaillé avec un profil de température convexe, calculé selon le modèle de Nyvlt-Mullin [Mullin and Nyvlt, 1971] à partir de valeurs de vitesse de croissance et de fréquence de nucléation obtenues expérimentalement. Sauf pour quelques applications spécifiques, nous travaillions la plupart du temps avec des amorces, afin de mieux contrôler la taille des cristaux.

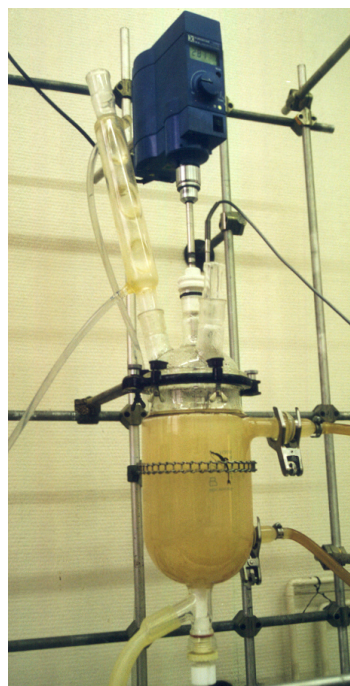


FIGURE 1.2 – Dispositif expérimental à l'échelle laboratoire : cuve à double-enveloppe, avec vanne de fond de cuve, surmontée d'un condenseur et de la sonde de température ; moteur d'agitation en bleu

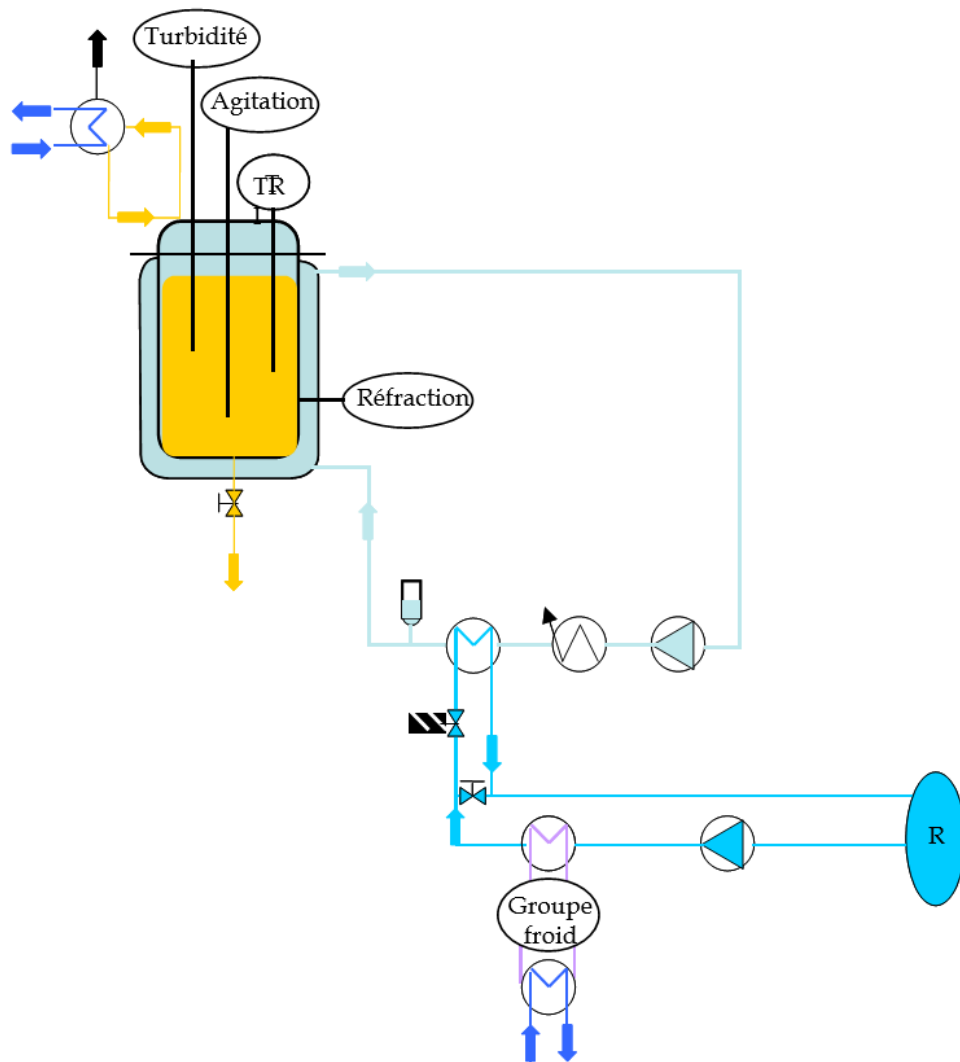


FIGURE 1.3 – Schéma de principe du pilote de laboratoire pour la cristallisation tel qu'utilisé pour la thèse de Baptiste MULOT :

R : réservoir (grande cuve noire sur la photographie de la FIGURE 1.4)

TR : mesure de température dans le cristalliseur



FIGURE 1.4 – Photographie du pilote de laboratoire pour la cristallisation : en bas au centre le réservoir (grande cuve noire) ; en bas à droite (en blanc) l’armoire de commande du groupe froid situé juste derrière ; au fond à gauche l’armoire de supervision ; au fond à droite la cuve à double-enveloppe, surmontée d’un condenseur et de son moteur d’agitation, avec le réfractomètre sur le côté ; au milieu en noir le circuit isolé thermiquement ; à l’arrière de ce circuit, l’épingle chauffante verticale



(a) cristallisation du perchlorate d'ammonium par évaporation dans une cuve de 5 L



(b) cristallisation en voie fondue (*prilling*) de l'ammonium dinitramide dans une cuve de 2,5 L

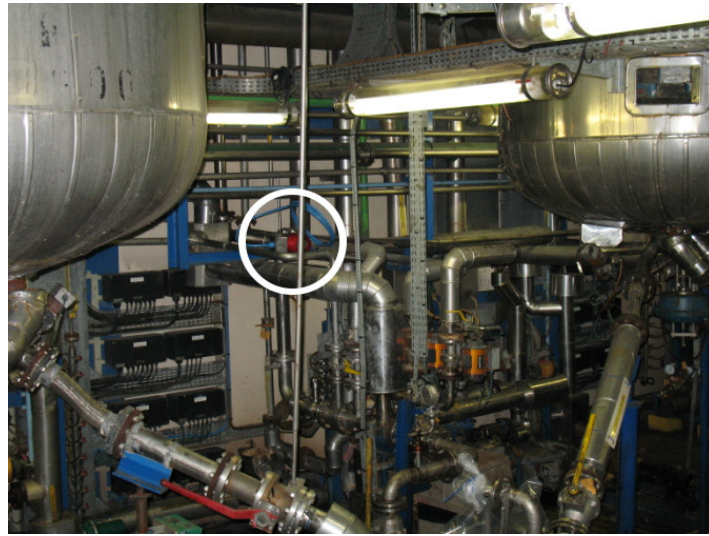
FIGURE 1.5 – Exemples de dispositifs utilisés pour la thèse de Florent MUSCATELLI

Pour la thèse de Florent MUSCATELLI, différentes cuves de taille laboratoire de un à une quinzaine de litres (FIGURE 1.5) ou pilote (60 L) ont été utilisées, jusqu'à la transposition dans l'atelier de fabrication industrielle (14 m³). Les cristaux fins étaient caractérisés par microscopie et la distribution de taille mesurée par tamisage. Il n'y avait pas de suivi en ligne de la cristallisation ; seule la température était mesurée dans la cuve. Les extrapolations étaient réalisées en similitude géométrique, avec le même profil de refroidissement et en conservant la puissance d'agitation dissipée par unité de volume.

Dans le cadre de la thèse de Baptiste MULOT, il s'agissait de mettre en place le suivi en ligne de la cristallisation par réfractométrie + turbidimétrie. Les études menées à l'échelle laboratoire chez Sanofi-Aventis (FIGURE 1.6-a) ont permis l'implantation du réfractomètre dans l'atelier de production (FIGURE 1.6-b). Le travail sur le couplage réfractométrie + turbidimétrie (fin de la thèse de Baptiste MULOT et master de Phahath THAMMAVONG) a été mené sur le pilote du Cnam (FIGURES 1.3 et 1.4).



(a) cuve de laboratoire d'1 L
(réfractomètre en fond de cuve)



(b) atelier de production avec réacteurs de 5000 m³
(réfractomètre en rouge au centre de la photographie, monté sur la conduite)

FIGURE 1.6 – Exemples d'implantation du réfractomètre industriel pour la thèse de Baptiste MULOT

1.3 Réacteurs à absorption gaz/liquide

Objectifs : mettre en place un pilote d'ozonation, afin de vérifier la faisabilité de la dépollution de solutions aqueuses; caractériser le transfert d'ozone et étudier l'efficacité du procédé pour l'abattement de polluants phénoliques dans des effluents aqueux modèles puis réels.

Application : traitement des eaux.

L'EA21 disposait d'un pilote avec éjecteur ([Merrouche, 1998, Caqueret, 2002, Tosun-Bayraktar et al., 2003]). Pour des raisons d'organisation du laboratoire, ce pilote a été démenagé; ce fut l'occasion de revoir entièrement les étanchéités, qui se devaient d'être parfaites puisque nous allons travailler sous ozone. De surcroît l'élimination des fuites permet évidemment de mieux boucler les bilans matière.

1.3.1 Éjecteur

Ce type de réacteur est bien adapté au cas des réactions gaz/liquide en régime diffusionnel. En effet, l'éjecteur Venturi favorise les transferts, ce qui est utile lorsque la réaction chimique est rapide. [Roustan, 2003]

Le principe de fonctionnement du pilote avec éjecteur est présenté sur la FIGURE 1.7 : Le pilote est constitué d'un circuit gaz (en rouge) et d'un circuit liquide (en bleu). Le liquide pollué est contenu dans un réservoir. Il est conduit par gravité jusqu'à une pompe centrifuge le dirigeant vers un échangeur thermique à plaques puis jusqu'à l'éjecteur. L'échangeur thermique permet de réguler la température du liquide à des valeurs comprises entre 20 et 35°C. Le débit liquide, contrôlé à l'aide d'une vanne, peut varier entre 0,5 et 1 m³ h⁻¹. Au sein de l'éjecteur (FIGURE

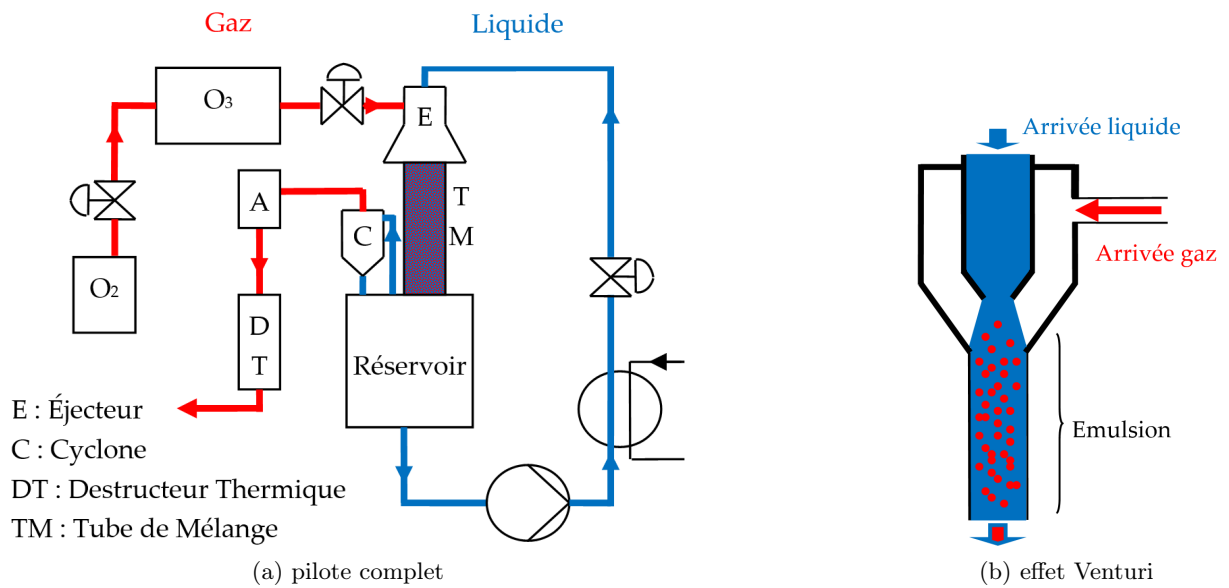


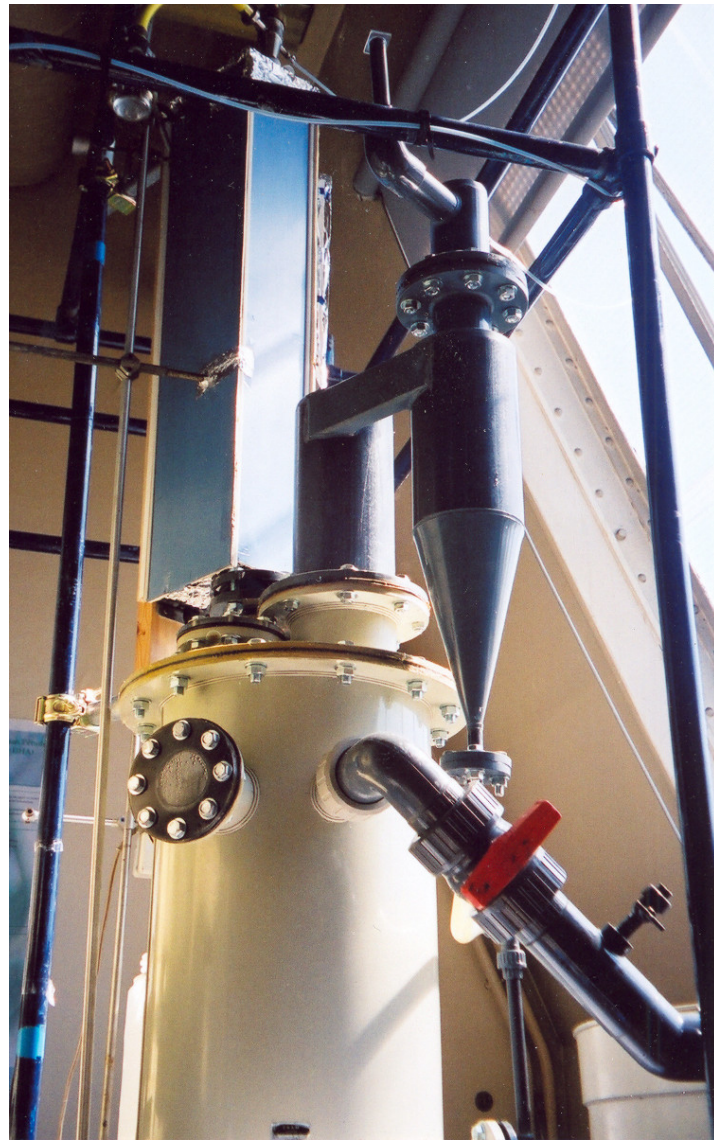
FIGURE 1.7 – Schéma de principe du pilote avec éjecteur

1.8-b) se produit l'aspiration de l'ozone par effet Venturi (FIGURE 1.7-b). Les deux phases, intimement mélangées, se propagent alors dans le tube de mélange (hauteur 1 m; diamètre 20 mm), permettant un retour du liquide dans le réservoir. Ce dernier est surmonté d'un cyclone pour séparer les gouttelettes du gaz. Ce gaz est ensuite conduit jusqu'à l'analyseur d'ozone puis au destructeur thermique afin d'éliminer l'ozone n'ayant pas été transféré, avant rejet à l'atmosphère. L'ozone est produit à partir d'oxygène pur dans un ozoneur type LABO LOX prêté par la société Trailgaz. Ce type d'appareil garantit une production moyenne d'ozone de 16 g h^{-1} pour une concentration de 5% en masse. Le débit gazeux est compris entre 100 et 800 NL h^{-1} .

Le plan détaillé du pilote est présenté sur la FIGURE 1.9. Le panneau de commande est montré sur la FIGURE 1.8-a.



(a) panneau de commande manuel : à gauche en jaune pour le liquide; à droite en bleu pour le gaz



(b) éjecteur (petite pièce métallique tout en haut au milieu de la photographie), tube capoté avec lampe UV (en bleu), réservoir (en jaune) surmonté d'un cyclone (gris foncé)

FIGURE 1.8 – Photographies de l'éjecteur

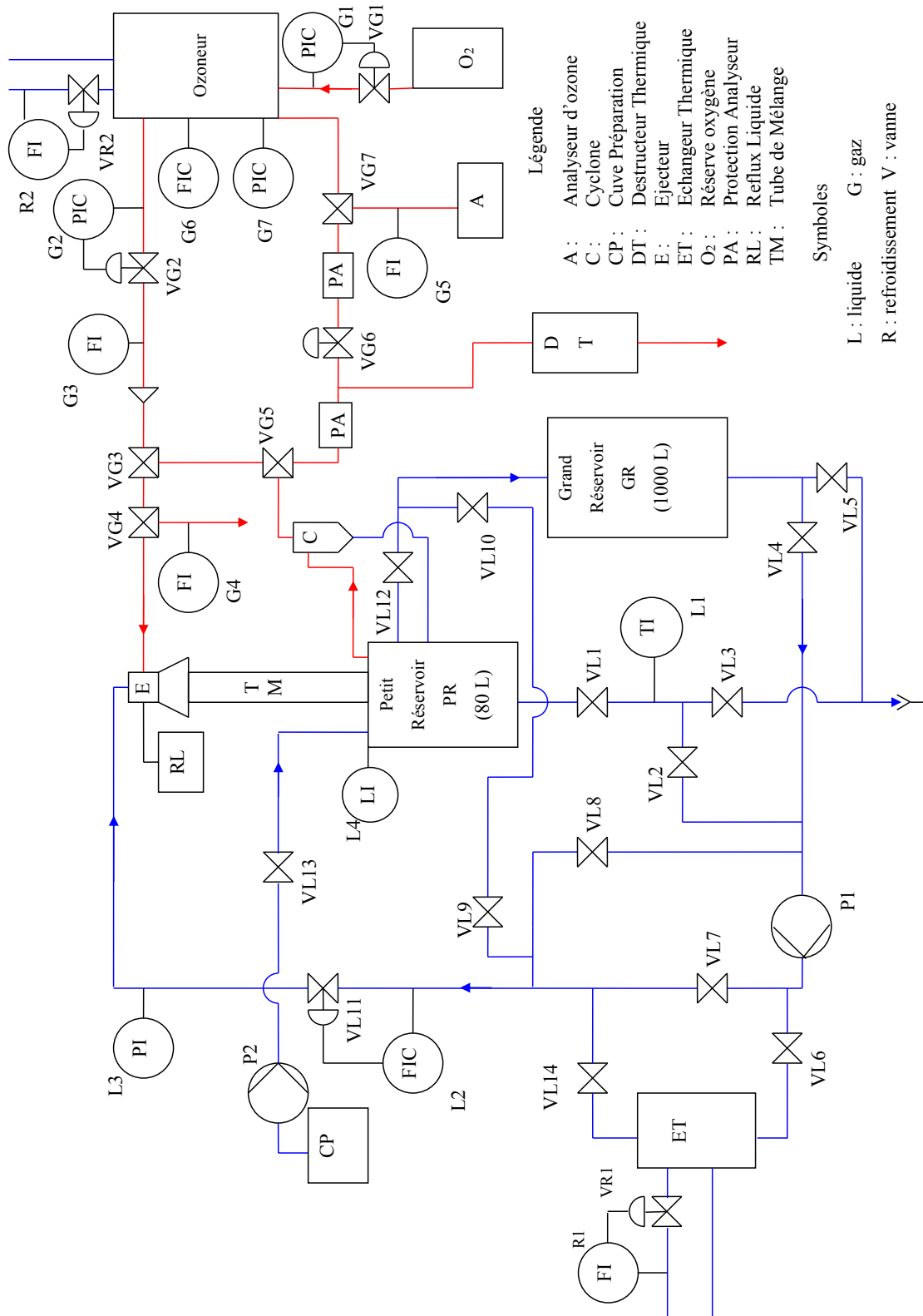


FIGURE 1.9 – Plan du pilote avec éjecteur (circuit liquide en bleu ; circuit gaz en rouge)

1.3.2 Colonne à bulles

Un second pilote a été monté pendant la thèse d'Olivier CHEDEVILLE et le stage de master de Mauro FERRANTE. Il est équipé d'une colonne à bulle, réacteur adapté au cas des réactions gaz/liquide en régime chimique (lorsque la réaction limitante); ce qui n'est pas le cas de l'éjecteur.[Roustan, 2003]

Notre colonne est en verre avec une tête sphérique (FIGURE 1.11-a). Le tube fait 1,40 m de hauteur et 49 mm de diamètre interne. La colonne est munie en pied d'un diffuseur poreux (verre fritté) qui permet de disperser la phase gazeuse dans le liquide sous forme de bulles.

Le plan du pilote est représenté sur la FIGURE 1.10.

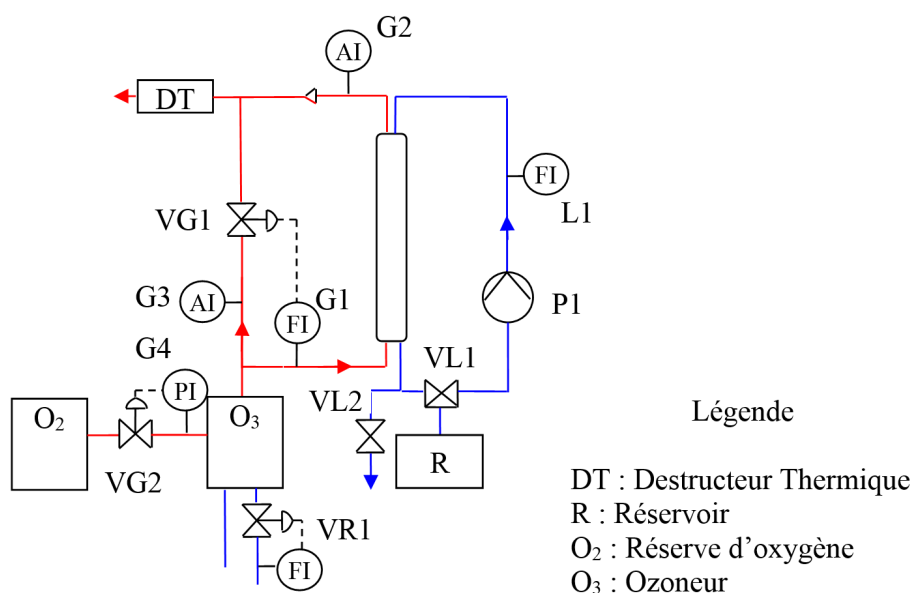


FIGURE 1.10 – Plan du pilote avec colonne à bulles (circuit liquide en bleu ; circuit gaz en rouge)

La solution à traiter est introduite en tête de colonne à l'aide d'une pompe péristaltique. Le débit liquide (0 à 200 L h⁻¹) est mesuré à l'aide d'un débitmètre à bille. Le liquide est récupéré en fond de colonne, où se situe une prise d'échantillon. Grâce à un système de vanne-trois-voies, la solution traitée est soit réintroduite en tête de colonne (pour un fonctionnement en boucle fermée), soit dirigée vers le système d'évacuation des eaux usées du laboratoire (fonctionnement en circuit ouvert). Compte tenu de la présence d'ozone et de polluants dissous, les tuyaux utilisés pour la phase liquide sont en exacanal (diamètre interne 6 mm).

Coté gaz, l'ozone est introduit à l'aide du diffuseur poreux (FIGURE 1.11-b) en fond de colonne pour un écoulement des phases à contre-courant. Le débit gazeux est contrôlé grâce à un débitmètre-régulateur à bille. Toujours à cause de la présence d'ozone, les tuyaux sur le circuit gaz sont en téflon (diamètre interne 4 mm) et les différents organes (clapet anti-retour et vannes) en PFA.

1.3.3 Pilote de traitement biologique complémentaire

Lors du traitement des dérivés phénoliques par ozonation, il reste en solution de la matière organique réputée éliminable par procédé biologique conventionnel [Contreras et al., 2003,

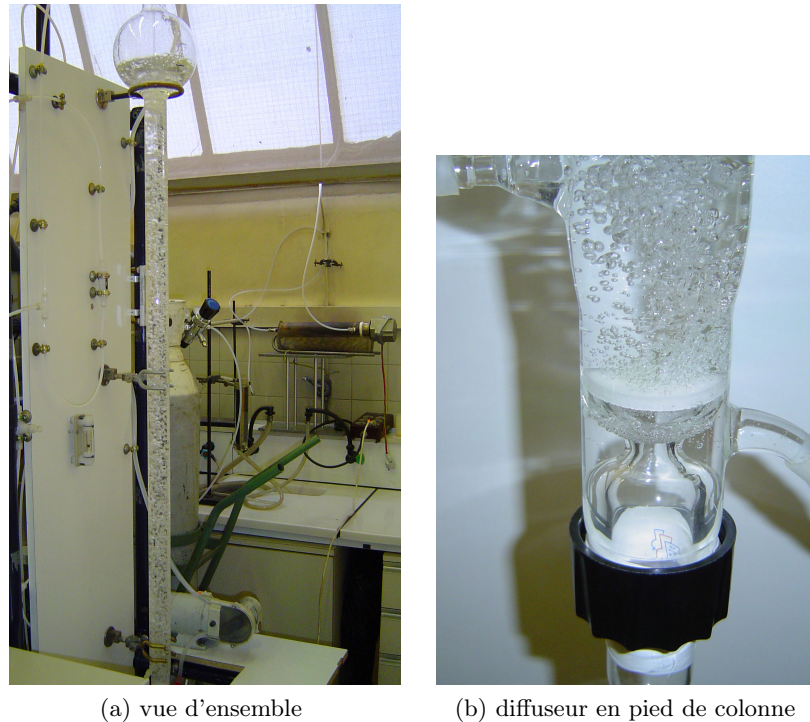


FIGURE 1.11 – Photographies de la colonne à bulles

[Hu and Yu, 1994](#)]. Dans le cadre du stage de DEA de Didier GRACIEN, nous avons souhaité vérifier ce principe, en vue d'un éventuel couplage avec l'ozonation ultérieurement.

Le pilote a été construit à l'aide de plaques en plexiglas et de tuyauteries PVC sur le principe des aquariums domestiques (FIGURE 1.12). Les bactéries utilisées provenaient de la station d'épuration d'Achères dans les Yvelines.

Le pilote complet est schématisé sur la FIGURE 1.13. La solution à dégrader est préparée dans le réservoir (5). Le réacteur et le décanteur (de 15 L chacun) sont chargés de liqueur mixte pour les tests de biodégradabilité ou d'eau de ville pour les tests hydrodynamiques. Au moyen des robinets d'air comprimé, on insuffle de l'air dans le circuit (4) afin d'une part de maintenir une aération des bactéries dans la solution à étudier ou à dégrader et d'autre part d'assurer un mélange homogène de la liqueur mixte avec la solution à dégrader. Le tuyau flexible perforé (4) est disposé au fond du réacteur en cercles concentriques au moyen de ventouses. Le débit d'air est évalué à l'aide du compteur à gaz. La pompe doseuse (3) permet de régler le débit de circulation liquide souhaité. Des échantillons peuvent être prélevés en sortie de réacteur biologique (1) ou en sortie de décanteur (2). Le second tuyau d'air comprimé (6) est inséré dans le circuit de recyclage. Cet air avait pour but de pousser l'eau à l'intérieur de ces tuyaux, permettant ainsi le recyclage du décanteur vers le réacteur biologique. Ce dispositif s'est avéré inefficace et nous avons perdu la biomasse. Faute de temps, nous n'avons pas pu renouveler l'expérience après installation d'une pompe de recyclage.

Le dimensionnement de l'installation avait été réalisé en fonction de la charge massique, de la concentration cible en matière volatile solide (MVS) pour deux cas types de fonctionnement (expérimentation ou entretien de la population bactérienne) et des caractéristiques de décantation de la biomasse épuratrice.



FIGURE 1.12 – Photographie du pilote de traitement biologique

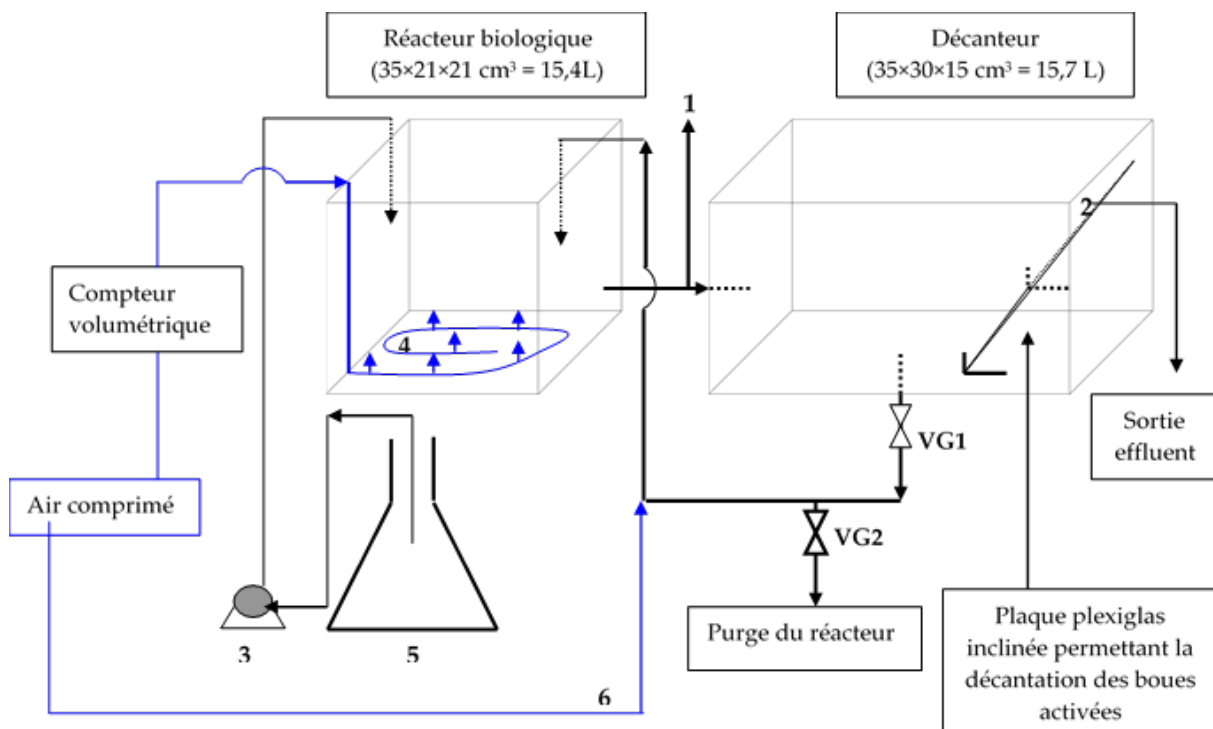


FIGURE 1.13 – Pilote de traitement biologique : 1= point de prélèvement entre le réacteur et le décanteur ; 2=sortie décanteur ; 3=pompe doseuse ; 4=tuyau flexible perforé ; 5=réservoir ; 6=air comprimé pour l'aide au recyclage

1.4 Réacteur à lit fixe arrosé

Objectifs : mettre en place un pilote d'oxydation par voie humide et concevoir le catalyseur associé ; étudier l'efficacité du procédé pour l'abatement d'effluents aqueux contenant du MTBE ou des pesticides.

Application : traitement des eaux.

Notre installation est basée sur le principe décrit précédemment [Pintar et al., 2001, Debellefontaine and Foussard, 2000] (FIGURE 1.14). L'effluent liquide et le gaz peuvent éventuellement être préchauffés dans un échangeur dans lequel circule aussi le flux de sortie du réacteur (ce n'était pas le cas sur notre installation pour simplifier l'étude thermique et parce que nous ne disposions pas d'un équipement adéquat). Ils passent ensuite dans le réacteur chauffé par une résistance : plusieurs modes de circulation sont possible ; dans notre cas l'effluent liquide et le gaz circulent à co-courant descendant et passent à travers le lit fixe de catalyseur. Le flux sortant du réacteur repasse le cas échéant par l'échangeur, avant d'être séparé et analysé.

Les premiers travaux exploratoires [Torres Torres, 2003] avaient été réalisés sur une ancienne installation, détournée de sa destination initiale. Or cette installation ne permettait pas de monter suffisamment en pression pour se mettre dans les conditions d'une véritable OVH ; le diamètre du réacteur était très faible au regard de la taille des grains de catalyseur utilisés ; la sortie liquide se faisait par intermittence et était souvent sujette à bouchage. Nous avons donc dû repenser complètement ce pilote afin : de garantir la séparation gaz/liquide en sortie de réacteur, de permettre une sortie liquide continue de l'installation, de disposer de moyens de mesures pour l'établissement des bilans de matière et si possible d'énergie et de s'affranchir autant que possible des effets de paroi et d'écoulements préférentiels dans le réacteur.

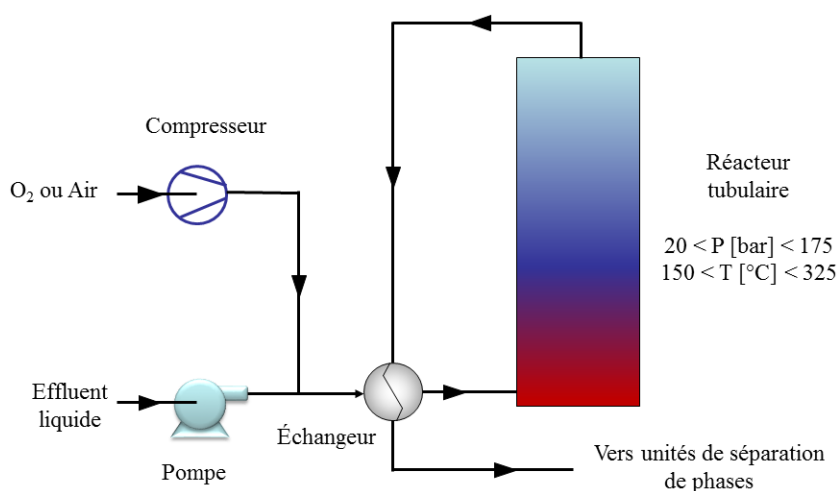


FIGURE 1.14 – Schéma de principe de l'oxydation par voie humide (OVH)

1.4.1 Conception du pilote et de sa supervision

La nouvelle installation (dont le plan détaillé est donné FIGURE 1.17) comporte un réacteur tubulaire en acier inoxydable Uranus B6 d'une hauteur de 700 mm et de 70 mm de diamètre interne (FIGURE 1.18) ; le diamètre retenu et la géométrie des injections devaient limiter les effets de paroi et d'écoulements préférentiels. Ce réacteur est fixé au centre d'un four à résistance



FIGURE 1.15 – Photographies de l’installation pour l’OVH : avant à gauche ; après à droite

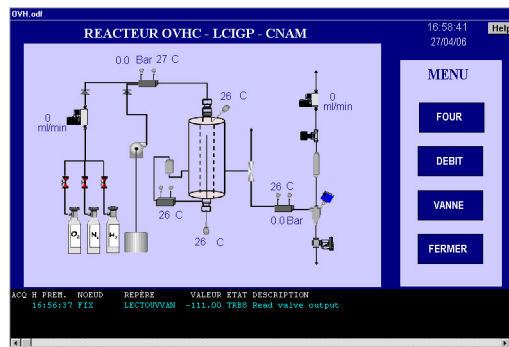


FIGURE 1.16 – Écran de supervision de l’installation d’OVH

électrique entourée d’une épaisse couche d’isolant ; nous disposons ainsi d’une zone de travail d’une longueur de 150 à 200 mm très homogène en température (FIGURE 1.19 page 41). Une pompe haute pression permet l’acheminement de la solution à traiter vers le réacteur, tandis que l’alimentation en oxygène se fait depuis une bouteille haute pression *via* un débitmètre massique régulateur. Deux condenseurs, un cyclone et une vanne de régulation sont placés en sortie de réacteur ; ils permettent d’assurer la séparation gaz/liquide après la réaction et le maintien en régime permanent. L’ensemble du procédé est équipé de sondes de température, de manomètres et de débitmètres. L’installation comporte également les éléments de sécurité indispensables pour un circuit multiphasique sous pression de quelques dizaines de bars d’oxygène. L’installation est enfin conçue pour permettre la calcination des catalyseurs dans le réacteur lui-même, sans endommager les outils de mesure et en garantissant l’absence de contact entre oxygène et hydrogène.

On peut voir sur les photographies de la FIGURE 1.15 l’installation telle qu’elle était avant les thèses d’Alexis El KHOURY et Bouchra BEJJANI et la nouvelle installation.

La FIGURE 1.16 donne un aperçu de la supervision développée par Alexis El KHOURY.

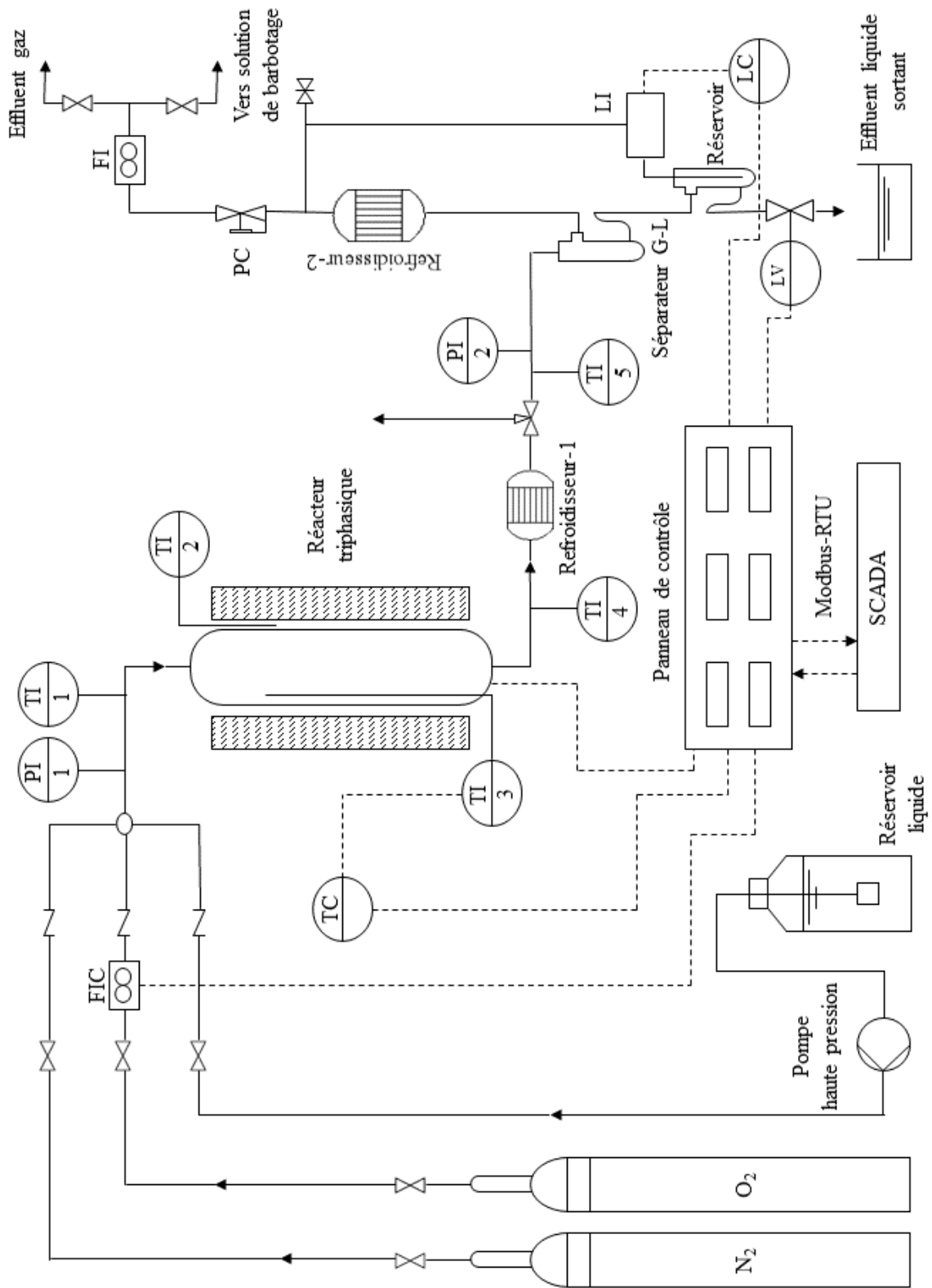
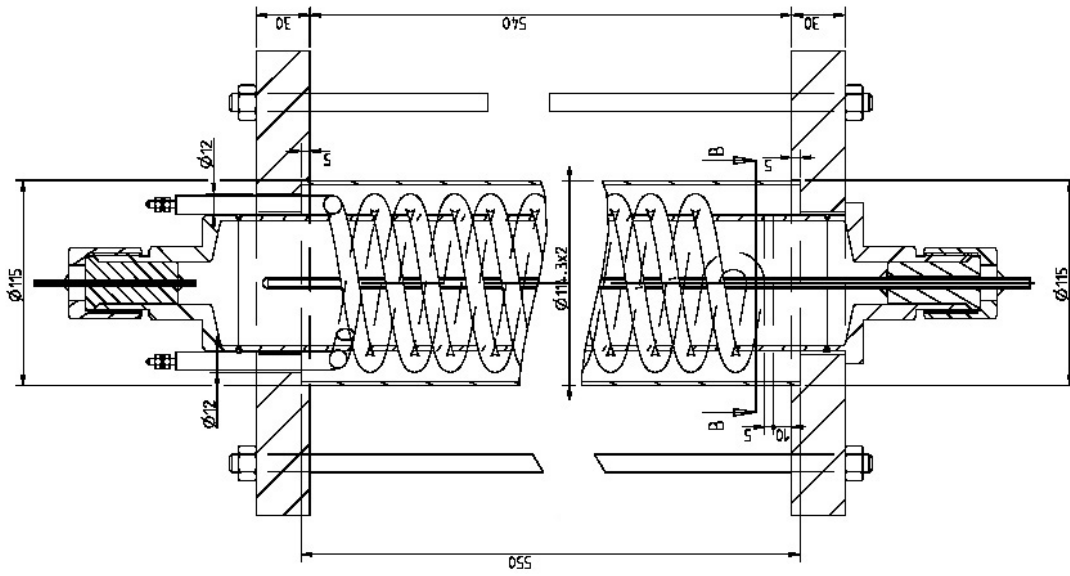
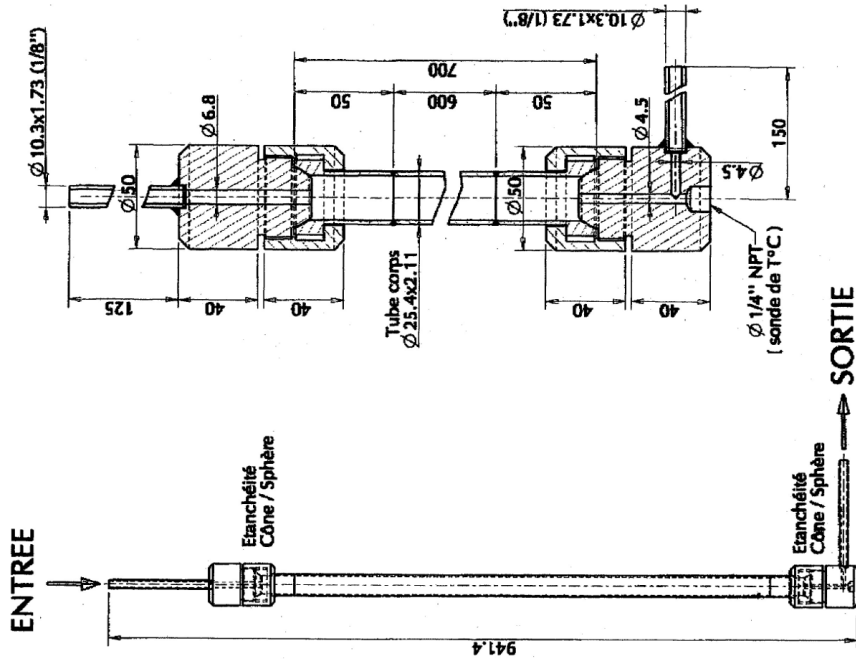


FIGURE 1.17 – Schéma général de l'installation d'OVH



(b) réacteur avec résistance de chauffe



Chaudronnerie - Tuyauterie 185, route de Lailaing - BP338 59148 Fines-les-Raches	
DP	04 / 12938
Croquis	
Date	09/07/04

**Matière : 316L
(T°C maxi : 500°C)**

(a) réacteur

FIGURE 1.18 – Plans du réacteur pour l'OVH

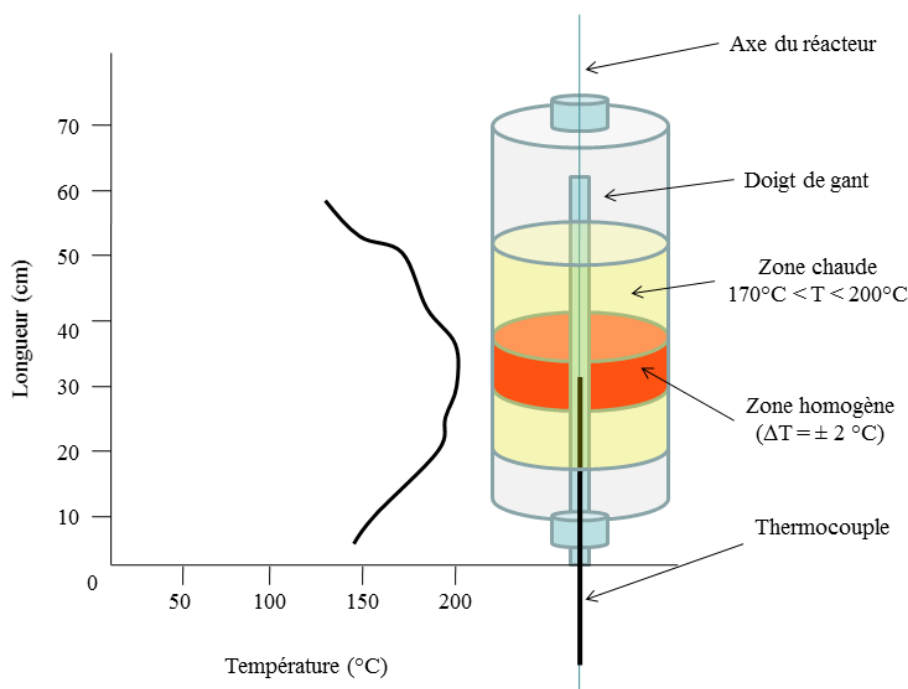


FIGURE 1.19 – Caractérisation thermique du réacteur d'OVH

Le profil thermique du réacteur a été obtenu en déplaçant le thermocouple situé dans le doigt de gant central (FIGURE 1.19). Pour les expériences ultérieures, la couche de grains de catalyseur était placée dans la zone homogène centrale en ajoutant un lit de billes de verre de même diamètre en partie basse et au-dessus.

La conception de la supervision de ce pilote est présentée dans : Alexis EL KHOURY, Bouchra BEJJANY, Marie DEBACQ, Catherine PORTE, 2007. Design of an automated fixed bed reactor used for a catalytic wet oxidation process. article de 4 pages en anglais paru dans les actes [poster *International Conference on Informatics in Control, Automation & Robotics - ICINCO 2007*, mai 2007, Angers – France] – [article en téléchargement <http://akconcept.hd.free.fr/website/data/uploads/personal/paper-icinco-174.pdf>](http://akconcept.hd.free.fr/website/data/uploads/personal/paper-icinco-174.pdf)

1.4.2 Préparation du catalyseur

Le catalyseur utilisé est à base de ruthénium et de cérium déposés sur alumine. Le choix de ce catalyseur, sa composition et son mode de préparation sont détaillés dans la thèse de Bouchra BEJJANY, sur la base de travaux antérieurs [Imamura et al., 1988, Barbierjr et al., 1998]. Le support d'alumine choisi se présente sous forme de billes de 2 à 5 mm de diamètre. Ce choix -relativement arbitraire au stade de la conception d'une expérience destinée à démontrer la faisabilité du procédé- permettait de développer une importante surface de contact entre le polluant et l'oxydant, tout en limitant les pertes de charge à travers le lit de catalyseur. Compte tenu des problèmes de bouchages intempestifs rencontrés sur l'ancienne installation et des risques que représentait l'équipement sous pression, nous souhaitons avancer prudemment avant d'envisager de tester des particules plus petites. Le ruthénium est le catalyseur des réactions de dégradation des polluants. Quant au cérium, il est un point d'ancrage du ruthénium et un réservoir d'oxygène :

il augmente donc l'efficacité du catalyseur. Dans cette configuration, les quantités de ruthénium (0,3% en masse) et de cérium (3% en masse) nécessaires sont minimales, et le coût du catalyseur demeure raisonnable en vue d'une utilisation industrielle future. Les analyses ont montré que le protocole de préparation mis au point (par imprégnations/calcinations successives de chlorures de cérium puis de ruthénium ; déchloration soignée et enfin hydrogénation, comme présenté sur le Grafset de la FIGURE 1.21) permet d'obtenir :

- un dépôt du cérium et du ruthénium en surface des billes d'alumine (en noir sur la FIGURE 1.20), ce qui permet de s'affranchir des limitations au transfert par diffusion à l'intérieur des pores des billes de catalyseur ;
- une bonne répartition des métaux sur les billes, tout le ruthénium déposé étant par conséquent effectivement disponible pour la dépollution ;
- une absence de chlore dans le catalyseur final, celui-ci étant un inhibiteur des réactions d'oxydation ;
- un dépôt d'oxyde de cérium associé au ruthénium, ce qui facilitera les réactions puisque les réactifs (polluant adsorbé sur Ru et oxydant adsorbé sur CeO_2) seront à proximité immédiate ;
- un dépôt du ruthénium sous forme réduite, réputée la plus active pour l'oxydation ;
- un dépôt du cérium sous forme oxydée, meilleur réservoir d'oxygène.

Les analyses du catalyseur après son utilisation au cours d'une expérience de dégradation du MTBE montrent que le ruthénium et le cérium demeurent respectivement sous formes réduite et oxydée. Seul un léger frittage des métaux est observé.



FIGURE 1.20 – Photographie d'une coupe de grain de catalyseur pour l'OVH : alumine en blanc ; dépôt de cérium et ruthénium en noir sur la surface

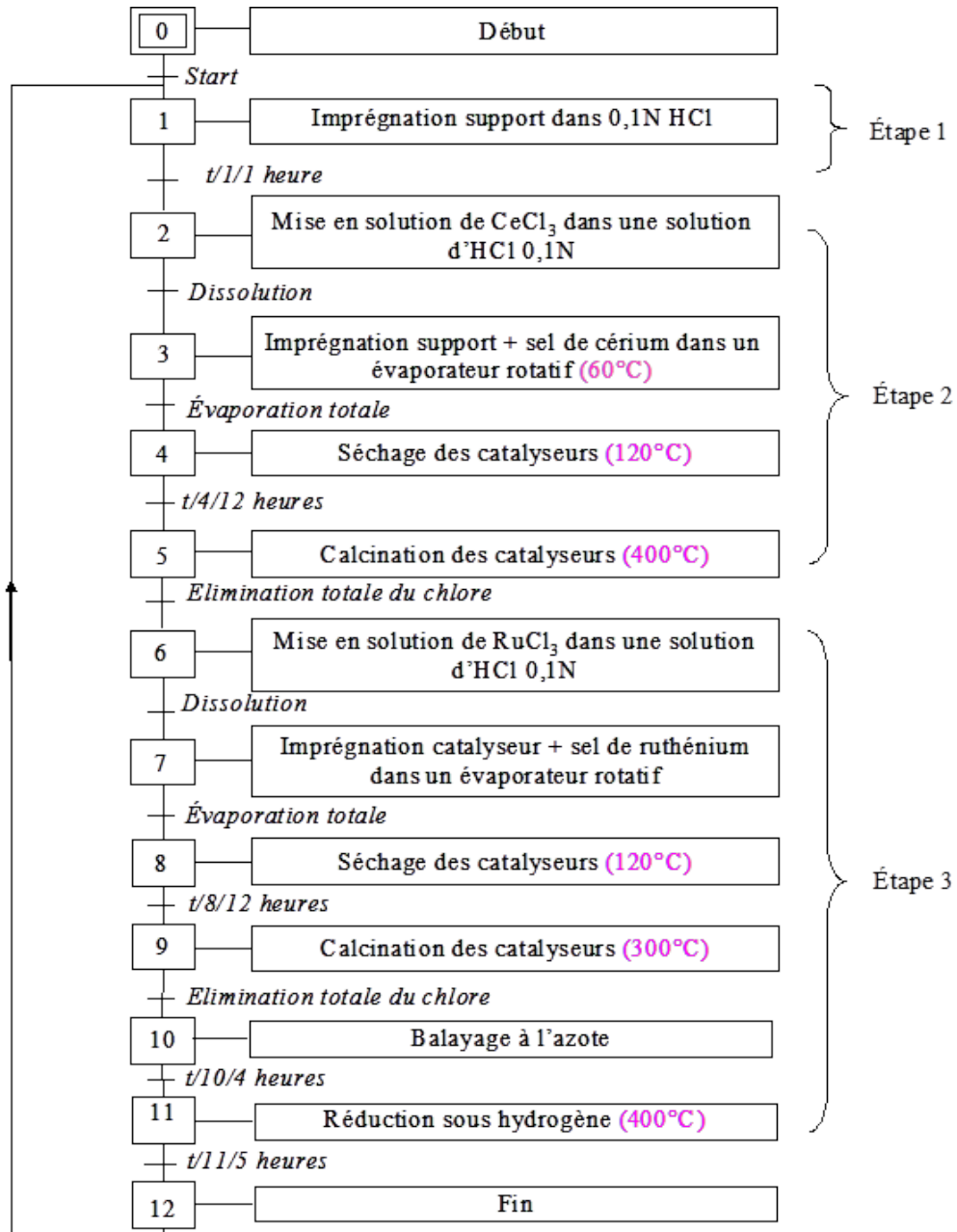


FIGURE 1.21 – Grafset de la préparation du catalyseur pour l'OVH

1.5 Fours tournants

Objectifs : mettre en place un pilote de four tournant permettant la détermination du coefficient de transfert paroi/poudre et plus généralement l'étude des transferts thermiques et de l'hydrodynamique de la charge solide.

Applications : nucléaire ; métallurgie ; agroalimentaire ; production du ciment ; traitement des déchets ; traitement de la biomasse.

Les fours tournants sont des contacteurs gaz/solide, utilisés essentiellement comme réacteurs ou sécheurs. Ils sont constitués d'un long tube, dont la longueur est habituellement supérieure à dix fois le diamètre. Ils sont généralement légèrement inclinés par rapport à l'horizontale (de l'ordre de 2 à 4°). Ils tournent à faible vitesse (quelques tr/min) ; d'autant plus faible que le diamètre du tube est grand. Ils peuvent être chauffés par l'extérieur (on parle alors de chauffage indirect) ou par l'intérieur (chauffage direct) au moyen de la circulation d'un gaz chaud, voire d'une flamme. Le solide et le gaz circulent le plus souvent à contre-courant ; mais des fonctionnements à cocourant sont également rencontrés, pour le séchage notamment. Afin de maintenir dans le four la quantité de poudre désirée (appelée charge), les fours tournants peuvent être équipés de diaphragmes en sortie. Pour favoriser l'homogénéisation de la charge et les transferts de matière, ils peuvent également être munis de releveurs (barres ou cornières installées longitudinalement contre la paroi interne du tube tournant). [Meade, 1914, Boateng, 2008]

De conception assez simple, ces contacteurs ont l'avantage de conduire à un écoulement de la charge solide de type piston dispersif, souvent recommandé pour les réactions à solide consommable (au contraire des lits fluidisés qui sont normalement bien mélangés). Les fours tournants permettent aussi de traiter une très large gamme de taille de particules : de quelques μm à plusieurs cm. À l'échelle industrielle, ils sont capable de traiter des débits de solide importants.

1.5.1 Pilote de four tournant du Cnam

Pour les besoins de la thèse de Phahath THAMMAVONG, nous avons conçu et fait fabriquer un pilote de four tournant afin d'étudier les transferts thermiques. Ce pilote est schématisé sur la FIGURE 1.23 ; une photographie est montrée en FIGURE 1.22 et les plans détaillés sont fournis sur la FIGURE 1.27.

Le tube tournant fait 1,95 m de long et 10 cm de diamètre interne, il est en Inconel de 6,5 mm d'épaisseur. Il est équipé de releveurs amovibles et un diaphragme peut être installé en sortie (FIGURE 1.24). Il est muni de nombreux thermocouples (FIGURE 1.25) : type K pour les 16 thermocouples externes et type N pour les 20 thermocouples internes. Deux spires de résistances électriques permettent de chauffer la partie centrale du tube de 100 à 1000°C, avec deux zones indépendantes de 40 cm de longueur chacune. Une zone du tube est laissée « nue » (sans isolant) en sortie de four pour pouvoir étudier le refroidissement. Tous les paramètres de contrôle peuvent varier indépendamment :

- le débit d'alimentation en solide Q_m peut varier de 0,5 à 3 kg h⁻¹ grâce au variateur sur la vis d'Archimède sous la trémie ;
- la pente S du tube peut être fixée entre 0 et 5° car le bâti est inclinable ;
- la vitesse de rotation N est réglée entre 0,5 et 12 rpm à l'aide du variateur sur le moteur du tube tournant et en fonction du jeu de pignons installés ;
- le taux de remplissage Z (en %) ou la charge totale (en kg) dépendent de tous les paramètres précédents et peuvent également être ajustés grâce aux diaphragmes (de 0 à 33,5 mm de haut) qu'il est possible d'installer à la sortie du tube.

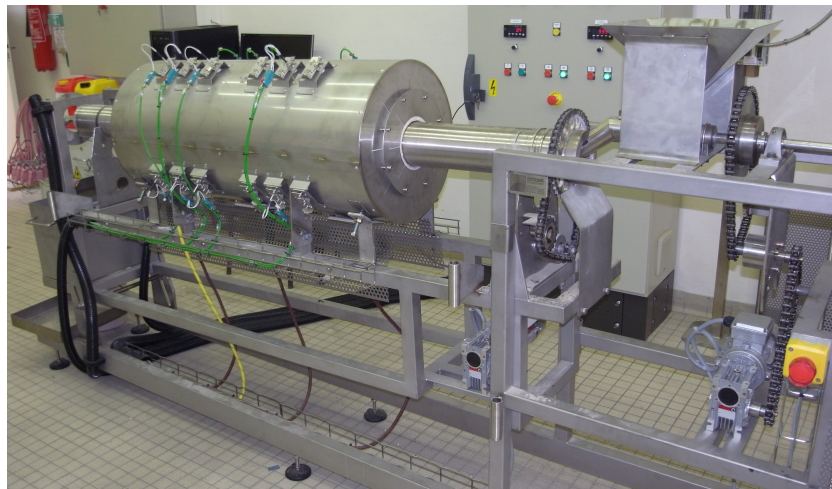


FIGURE 1.22 – Photographie du pilote de four tournant

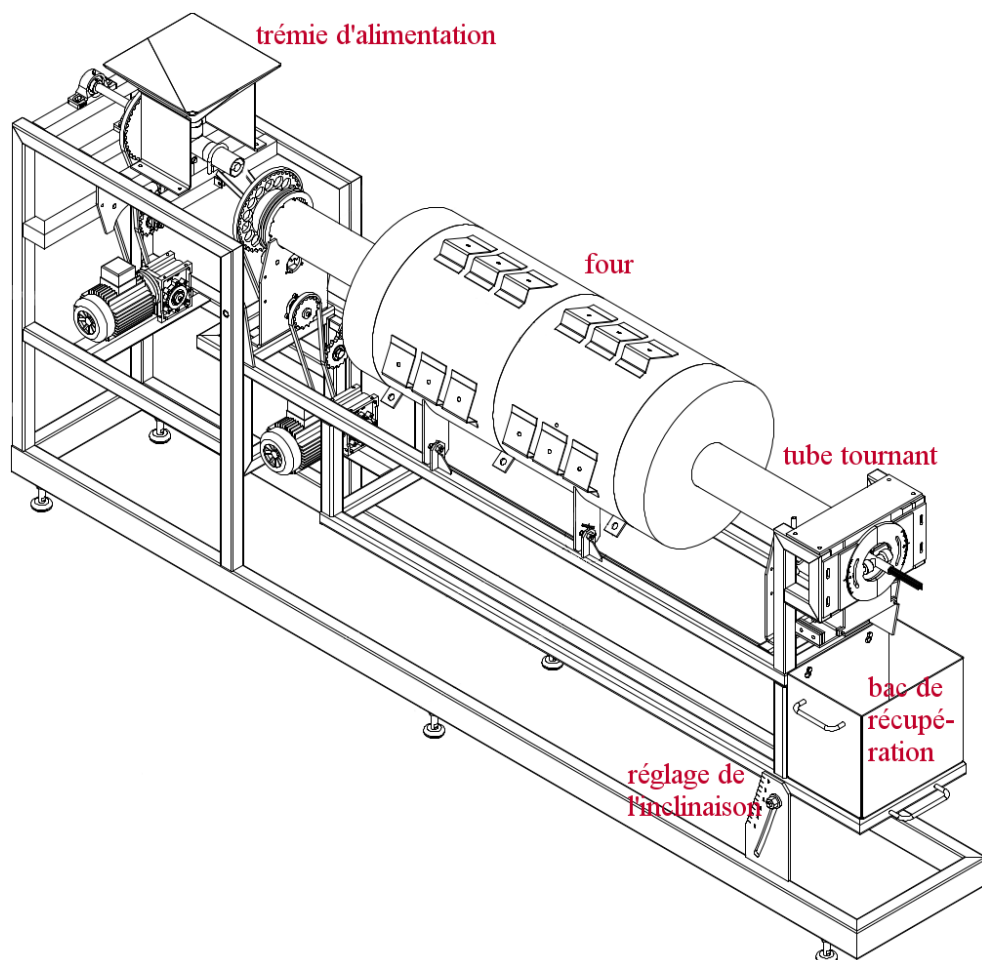


FIGURE 1.23 – Schéma du pilote de four tournant

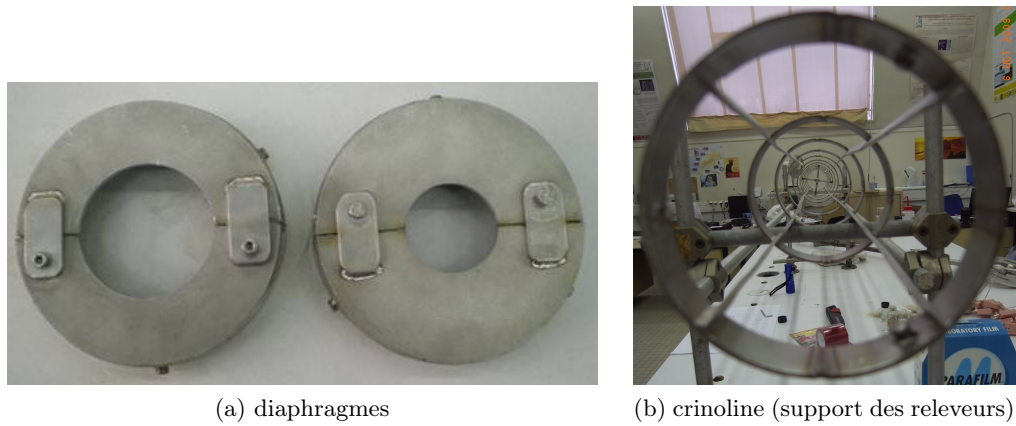


FIGURE 1.24 – Équipements internes du pilote de four tournant

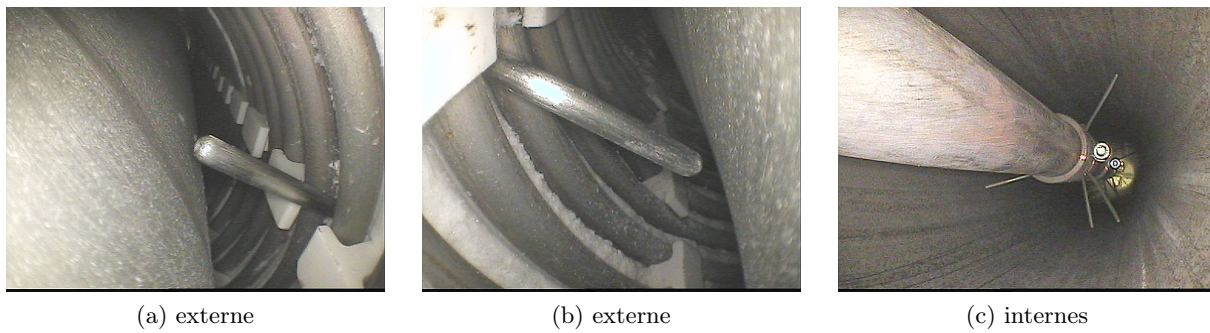


FIGURE 1.25 – Thermocouples installés sur le pilote de four tournant

Les différents types de relevés disponibles sont schématisés sur la FIGURE 1.29-a page 49.

L'ensemble constitué par le tube, le four et le jeu complet de thermocouples est orientable et peut être ajusté selon l'angle de talus de la poudre étudiée (FIGURE 1.26).

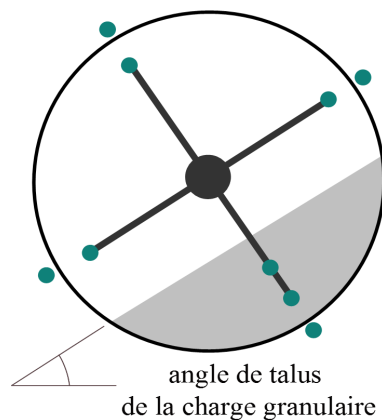


FIGURE 1.26 – Position des thermocouples (points verts sur cette coupe transversale)

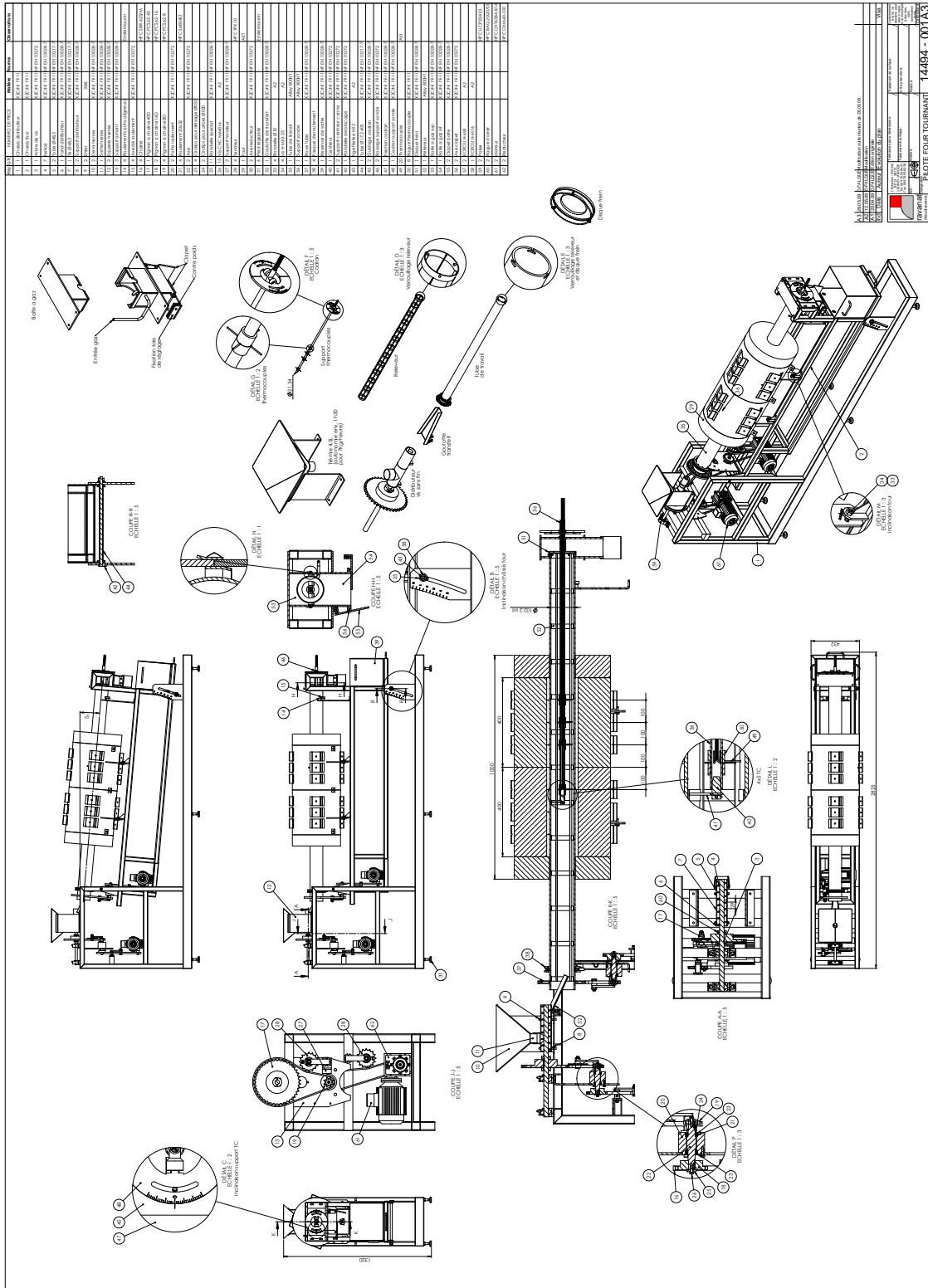


FIGURE 1.27 – Plan détaillé du pilote de four tournant - imprimer en A3

La conception de ce pilote de four tournant est détaillée dans : Phahath THAMMAVONG, Marie DEBACQ, Stéphane VITU, Marc DUPOIZAT, 2011. Experimental Apparatus for Studying Heat Transfer in Externally Heated Rotary Kilns. *Chemical Engineering & Technology* 34, 707–717. DOI :[10.1002/ceat.201000391](https://doi.org/10.1002/ceat.201000391) - [hal-00984180](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00984180)

1.5.2 Pilote de four tournant du centre Rapsodee

Pour la thèse d'Alex BONGO NJENG, des essais ont été réalisés sur le four tournant du centre Rapsodee à Albi (FIGURE 1.28). Il est environ deux fois plus grand que celui du Cnam, permet de travailler sous atmosphère contrôlée et de réaliser des réactions puisqu'il est étanche et équipé d'un système de traitement des fumées ([Descoins, 2003]).

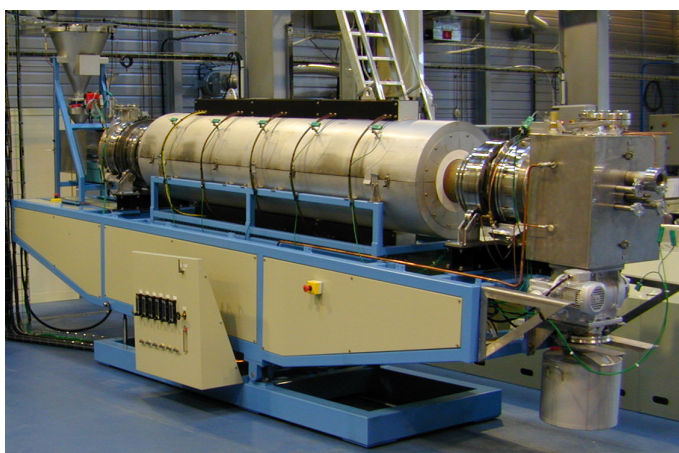


FIGURE 1.28 – Photographie du pilote de four tournant du centre Rapsodee

Un comparatif des principales caractéristiques des deux fours est présenté dans le TABLEAU 1.1.

TABLEAU 1.1 – Dimensions et géométrie des pilotes de four tournant

Caractéristique	Cnam Paris	Rapsodee Albi	Remarques
D [m]	0,101	0,21	diamètre interne
L [m]	1,95	4,2	longueur du tube
N [rpm]	0,5 - 12	0,5 - 21	vitesse de rotation
S [°]	0 - 5	0 - 7	inclinaison
Q_m [kg ⁻¹]	0,5 - 3	0,5 - 10	débit de solide
Capacité [L]	5	300	trémie
h_{dam} [mm]	0 - 33,5	-	hauteur des diaphragmes
Types de relevateurs	NL ; SL ; RL	NL ; G ; 3SL ; 6SL	voir FIGURE 1.29
Zones de chauffe	2 × 40 cm	5 × 50 cm	1000°C maximum
Thermocouples externes	4 × 4 type K	5 × 2 type K	voir FIGURE 1.30
Thermocouples internes	5 × 4 type N	6 × 1 type K	voir FIGURE 1.30

Les différents jeux de relevateurs disponibles sont présentés sur la FIGURE 1.29.

Les deux dispositifs de mesures de températures sont schématisés sur la FIGURE 1.30.

Le TABLEAU 1.2 fournit les propriétés des différentes poudres utilisées avec les deux fours tournants.

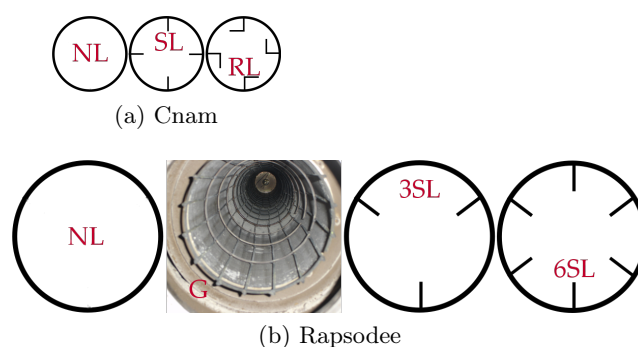


FIGURE 1.29 – Releveurs disponibles pour les deux pilotes de four tournant

TABLEAU 1.2 – Propriétés des poudres utilisées avec le four tournant

	Poudre	Sable fin	Sable médian	Riz concassé	Plaquettes hêtre
masse volumique	ρ [kg m ⁻³]	1053	1422	889	260
rapport d'Hausner	HR [-]	1,111	1,085	1,051	1,092
taille des particules	d_p [mm]	0,1	0,55	3,8 × 1,9	10 × 4,5 × 2
angle de talus	θ [°]	33	39	36	42

Le TABLEAU 1.3 donne les propriétés thermiques du sable médian, de l'air et de l'Inconel utilisés sur le pilote du Cnam.

TABLEAU 1.3 – Propriétés thermiques utilisées pour le four tournant du Cnam

	Matériau	Sable médian	Air	Inconel
masse volumique	ρ [kg m ⁻³]	1422	0,616	7950
capacité calorifique	c_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	835	1045	514
conductivité thermique	λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	0,1836	0,0449	18,75
émissivité	ε [-]	0,76	<0,01	0,9

*
* *

Comme cela avait été discuté en introduction de ce chapitre, la phase de conception d'un pilote pour des travaux de recherche en génie des procédés est très importante, car elle conditionne ensuite notre capacité à produire des résultats exploitables et fiables. C'est grâce à ces pilotes que nous avons pu réaliser de « bonnes » productions scientifiques sur le mélange gravitaire, l'ozonation et le four tournant. Pour ce qui concerne la cristallisation, ce sont aussi les travaux de qualité à l'échelle laboratoire puis pilote, qui ont permis des transpositions industrielles couronnées de succès.

Malheureusement, pour des raisons de difficulté de réalisation et/ou de délai pour mobiliser les financements nécessaires, certains des procédés qui viennent d'être présentés (OVH ; traitement biologique) n'ont été opérationnels qu'en fin de thèse ou de stage. Par conséquent seuls quelques essais ont pu être réalisés et il n'y a pas été possible de mettre en œuvre de nouvelles études pour mettre à profit ces installations ultérieurement.

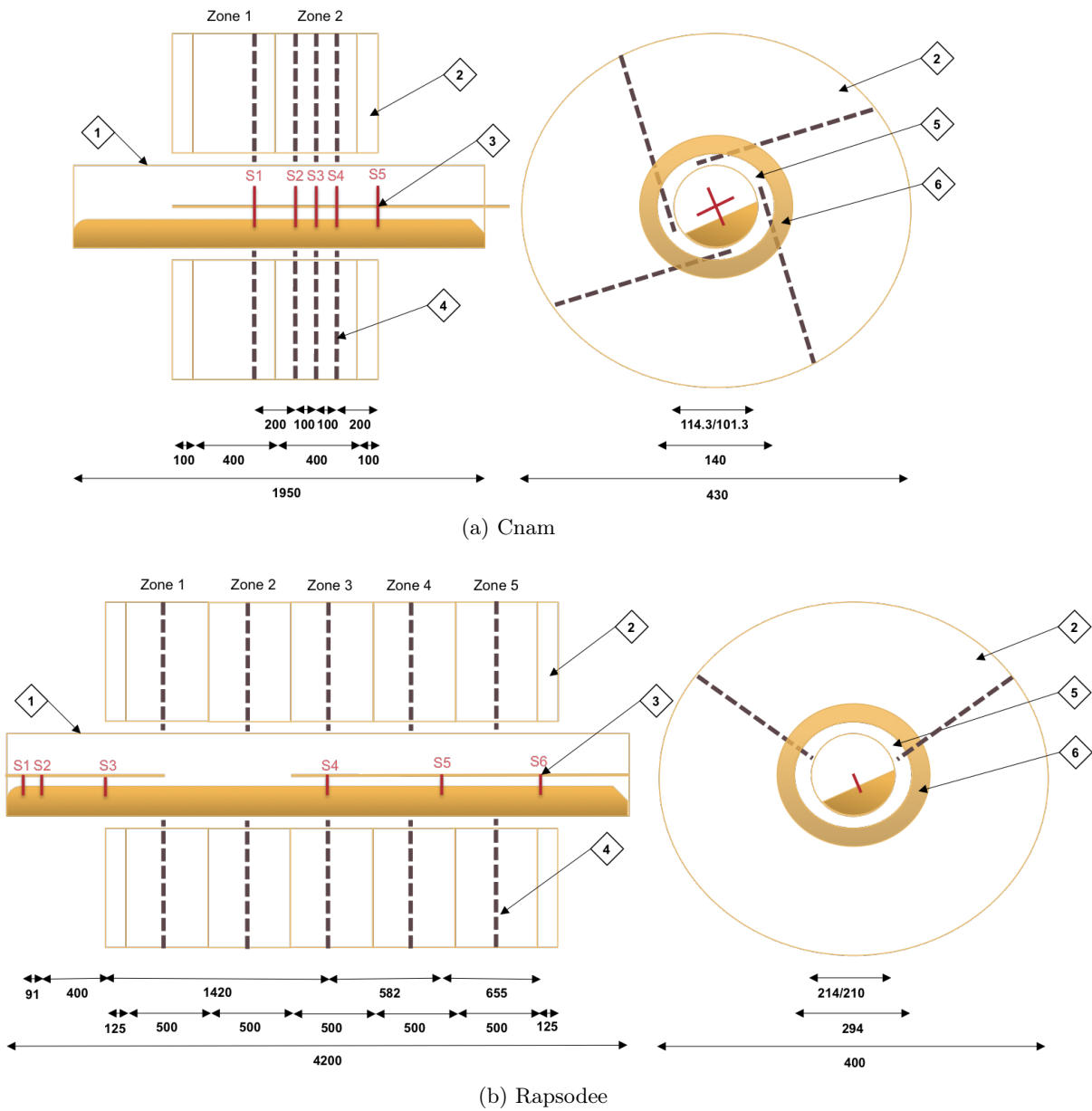


FIGURE 1.30 – Position des thermocouples sur les deux pilotes de four tournant (1=tube ; 2=isolant ; 3=canne de mesure de températures ; 4=thermocouples externes traversant l'épaisse couche d'isolant ; 5=air ; 6=résistances chauffantes)

Chapitre 2

Études hydrodynamiques

L'HYDRODYNAMIQUE est partout présente dans les procédés.

« Le génie des procédés est l'ensemble des connaissances nécessaires à la conception, la mise en œuvre et l'optimisation de l'appareillage dans lequel on réalise la transformation physico-chimique et biologique des matières premières en produits fonctionnels à l'échelle industrielle. »

Parmi les appareillages mentionnés dans cette définition, on trouve :

- ceux permettant d'amener les fluides vers un appareil donné, sous une certaine pression, avec un certain débit : les tuyauteries, ainsi que des pompes (pour les liquides) ou bien des compresseurs (dans les gaz) ou encore des bandes transporteuses (pour les solides) par exemple ; on peut leur donner le nom générique d'appareils de liaison ;
- ceux dans lesquels se produit une ou plusieurs réactions chimiques ou biologiques : les réacteurs ou bioréacteurs ;
- tous les autres (décanteurs, colonnes à distiller, filtres, échangeurs thermiques, etc.), que l'on a l'habitude en génie des procédés de classer par opérations unitaires.

« La mécanique des fluides a pour objet l'étude de l'action des forces s'exerçant sur les fluides ; par conséquent d'une part l'étude des comportements statique et dynamique des fluides et d'autre part l'étude des interactions entre fluides et solides. »

La statique des fluides correspond à l'étude des fluides au repos : les applications en génie des procédés sont le stockage et la mesure de pression. La dynamique des fluides correspond à l'étude des fluides en mouvement : en génie des procédés, on s'intéressera au transport des fluides dans les appareils de liaison -c'est l'hydraulique- et dans les appareillages dédiés aux opérations unitaires et aux réactions -c'est l'hydrodynamique. Ce terme d'hydrodynamique, comme le rappellent Étienne GUYON, Jean-Pierre HULIN et Luc PETIT dans l'introduction de leur ouvrage "Hydrodynamique physique", a l'avantage d'exclure les écoulements de gaz à grande vitesse. En revanche il intègre les interactions fluide/particule ou encore fluide/milieu poreux, qu'il est indispensable d'étudier en génie des procédés.

Les études hydrodynamiques que j'ai menées ont pris des formes diverses selon les procédés, des petites échelles aux écoulements macroscopiques, en vue d'un important et long travail d'analyse et de modélisation ou comme simple et rapide vérification. Car, comme en génie des procédés de manière plus générale, on peut envisager plusieurs échelles d'études hydrodynamiques [Li and Kwauk, 2003] :

- l'échelle macroscopique : c'est l'échelle humaine, celle des choses ou des phénomènes que l'on peut observer « à l'œil nu » (même si c'est parfois par l'intermédiaire d'une caméra) ;
- l'échelle microscopique : c'est l'échelle des films et des particules, quoique ces dernières puissent avoir des tailles très variées ; disons pour simplifier que c'est l'échelle des objets

et des phénomènes autour du μm ;

- et entre les deux, l'échelle mésoscopique : elle consiste en génie des procédés à aller regarder à l'intérieur des appareillages sans pour autant descendre jusqu'au μm .

On pourrait aussi mentionner l'échelle moléculaire (de l'ordre du nm ou en-dessous) et l'échelle méta ou méga, qui est celle des unités de fabrication, des sites de production, voire des entreprises. Ces différentes échelles sont montrées sur la FIGURE 2.1.

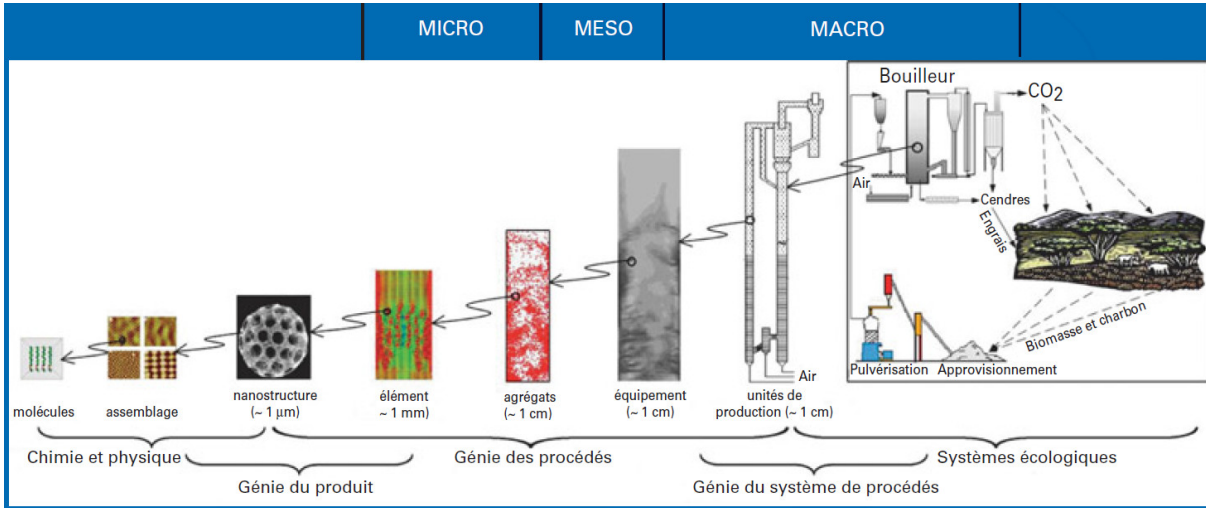


FIGURE 2.1 – Différentes longueurs/échelles hydrodynamiques dans le cas d'un réacteur catalytique à lit fluidisé [Jean-Claude CHARPENTIER, Techniques de l'ingénieur J500 (2013)]

Bien que ce chapitre s'intitule "Études hydrodynamiques", on y évoquera aussi pour certains procédés les transferts de matière et de chaleur. Après tout l'hydrodynamique n'est autre que le transfert de la quantité de mouvement.

Ce chapitre est organisé au premier niveau par méthodes d'étude et au second niveau, lorsqu'il y a lieu, par exemples d'application.

Sommaire

2.1	Analyse d'images	53
2.1.1	Mélange gravitaire en tube vertical	53
2.1.2	Hydrodynamique transverse dans les fours tournants	56
2.2	Distribution des Temps de Séjour (DTS)	61
2.2.1	Cas des fours tournants	62
2.2.2	Cas de la colonne à bulles	69
2.2.3	Cas du pilote de traitement biologique	69
2.3	Mécanique des fluides numériques	70
2.4	Mesure de $k_L \cdot a$: cas des réacteurs d'ozonation	74
2.5	Agitation : cas des cristalliseurs	76
2.6	Une « jauge » à niveaux de sable pour le four tournant	77

2.1 Analyse d'images

Les travaux que j'ai réalisés par analyse d'images datent maintenant de plus de quinze ans. Entre temps, les progrès technologiques et logiciels ont été immenses. Pourtant à cette époque déjà, l'outil avait démontré sa puissance.

2.1.1 Mélange gravitaire en tube vertical

[Baird et al., 1992] a analysé le mélange d'un volume de solution saline injecté au sommet d'un tube rempli d'eau mais la dépendance en temps du profil de concentration n'a pas été identifiée et cette géométrie n'est pas symétrique. [Zukoski and Cannon, 1975] a étudié le mélange entre l'air chaud et l'air froid lors d'un incendie dans une cage d'escalier ou dans un ascenseur, également en géométrie dissymétrique. Enfin [Cook and Dimotakis, 2001] a simulé les premiers instants du mélange.

Le dispositif expérimental que nous avons utilisé est celui de la FIGURE 1.1 (page 25). Après ouverture rapide de la vanne à guillotine située à mi-hauteur, on étudie l'évolution du mélange le long du tube pendant environ vingt minutes. La méthode consiste à acquérir à intervalles réguliers (toutes les 2 s) des images de l'intensité lumineuse traversant le tube (éclairé uniformément de l'arrière par des tubes fluorescents), à l'aide d'une caméra digitale refroidie (1300×20 pixels). Une seconde caméra conventionnelle est focalisée sur les trente premiers centimètres au-dessus de la vanne à guillotine, afin d'observer de plus près les mouvements des fluides.

Pour obtenir des mesures de qualité :

- Il est tout d'abord important de préparer avec grand soin l'expérience, en veillant notamment à ce qu'il n'y ait aucune bulle au niveau de la vanne à guillotine et que les deux fluides soit parfaitement purs et séparés de part et d'autre de cette vanne.
- Il faut ensuite que la caméra soit parfaitement positionnée par rapport au tube et bien refroidie.
- Il faut enfin que la pièce soit bien occultée pour éviter toute lumière parasite.

Des informations quantitatives sont obtenues en traduisant (à l'aide d'un étalonnage effectué au préalable⁵) les images de l'intensité lumineuse en cartes de concentration. Cette concentration est normalisée entre deux images de référence obtenues avec les solutions pures (0 pour le fluide lourd incolore et 1 pour le fluide léger coloré), puis moyennée sur la section du tube. On peut alors juxtaposer les profils successifs sous la forme d'un diagramme spatiotemporel, où les niveaux de gris correspondent à la concentration moyenne normée C : noir pour la solution légère et blanc pour la solution lourde. Ces diagrammes représentant l'évolution le long du tube (sur 2,6 m) et au cours du temps (sur 1200 à 1800 s) de la concentration relative des deux fluides $C(x, t)$ dans une section du tube et à un instant donnés.

Observations qualitatives

Aux faibles contrastes de densité (FIGURE 2.2-b), l'instabilité initiale se développe sous la forme d'un champignon, le nombre de Reynolds est d'environ 10 et le sillage se déstabilise : il prend la forme d'une hélice et se déplace sur toute la demi hauteur du tube. En arrière du front, des volumes de fluides de plus fort contraste de densité (par rapport à leur environnement) sont visibles sur la FIGURE 2.2-b (zones sombres) : ils suivent précisément le sillage de la première

5. Plusieurs images sont enregistrées pour diverses concentrations bien définies de solutions emplissant le tube : nous avons ainsi pu confirmer que l'intensité lumineuse varie de manière exponentielle avec la concentration de colorant.

instabilité, mais se déplacent plus vite (vitesse figurée par la ligne pointillée). Si le front se propageait seul, son contraste de densité, et par suite sa vitesse locale, diminueraient par mélange avec le fluide environnant. L'arrivée successive de volumes de fluide de densité plus contrastée, permet de maintenir cette vitesse approximativement constante.

Aux forts contrastes de densité (FIGURE 2.2-a), l'instabilité initiale est rapidement détruite et le mélange paraît nettement plus homogène sur une section. Des volumes de fluide de l'ordre du cm^3 se meuvent aléatoirement à des vitesses de quelques mm s^{-1} sur des distances comparables au diamètre du tube. Cet écoulement faiblement turbulent induit un mélange efficace à petite échelle contrairement au cas des faibles contrastes de densité.

Régimes de mélange

La FIGURE 2.2-d présente un résultat typique obtenu à fort contraste de densité. Le diagramme spatiotemporel présente une variation continue et lente des nuances de gris, ce qui indique que les fluctuations de concentration sont faibles (FIGURE 2.2-a et g) et reflète un mélange homogène à petite échelle. Les paraboles pointillées d'iso-concentration $C = 0,95$ (partie basse) et $C = 0,05$ (partie haute) sur la FIGURE 2.2-d marquent approximativement les frontières (floues) de la zone mélangée, ce qui suggère un processus diffusif, confirmé par le fait que les profils successifs de la concentration se superposent sur une même courbe lorsqu'ils sont tracés en fonction de $\frac{x}{\sqrt{t}}$ (FIGURE 2.2-g). La courbe $C\left(\frac{x}{\sqrt{t}}\right)$ est en outre parfaitement ajustée par une fonction erreur (trait foncé sur la FIGURE 2.2-g), ce qui signifie que C satisfait l'équation de la diffusion ($\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$) et permet de déterminer la diffusivité correspondante D . Ce type de comportement est observé pour les grands nombres d'Atwood : $4 \cdot 10^{-3} < At < 9 \cdot 10^{-2}$.

Le comportement est différent aux faibles contrastes de densité (FIGURE 2.2-e) : $1,5 \cdot 10^{-4} < At < 2 \cdot 10^{-3}$. Premièrement, la zone de mélange présente cette fois une frontière nette et approximativement droite (lignes pointillées) correspondant à la position du front de l'instabilité de digitation initiale (FIGURE 2.2-b). Deuxièmement, des stries obliques sont clairement visibles sur le diagramme spatiotemporel (FIGURE 2.2-e). Elles marquent les mouvements internes observés sur la FIGURE 2.2-b, et mettent en évidence des fluctuations de concentrations plus importantes qu'à fort contraste de densité FIGURE 2.2-h). Toutefois, les profils successifs de concentration se superposent encore lorsqu'ils sont tracés en fonction de $\frac{x}{\sqrt{t}}$ (FIGURE 2.2-h), et ils peuvent à nouveau être ajustés par une fonction erreur (trait plus foncé sur la FIGURE 2.2-h).

Aux contrastes de densité encore plus faibles ($At < At_m = 1,5 \cdot 10^{-4}$), les profils de concentration se superposent toujours approximativement lorsqu'ils sont tracés en fonction de $\frac{x}{\sqrt{t}}$, mais ils ne peuvent plus être ajustés par une fonction erreur : le mélange n'est plus diffusif. Une région de concentration moyenne normée d'environ 0,5 se développe dans la partie médiane du tube : elle correspond à un contre-écoulement stable des deux fluides, qui ne se mélangent plus (FIGURE 2.2-c). Sur le diagramme spatiotemporel, le front de mélange est très marqué (FIGURE 2.2-f). On y remarque le développement d'une « plaine » dans la zone centrale, qui correspond elle-aussi au contre-écoulement stable des deux fluides.

Nous avons aussi fait varier la viscosité des fluides et le diamètre du tube et ainsi pu cartographier les régimes de mélange sur la FIGURE 2.3. Le nombre d'Atwood correspondant à la transition entre le régime de contre-écoulement stable et le régime diffusif décroît comme le diamètre du tube à la puissance trois, en revanche la transition entre les deux types de régimes diffusifs n'est pas aussi bien définie.

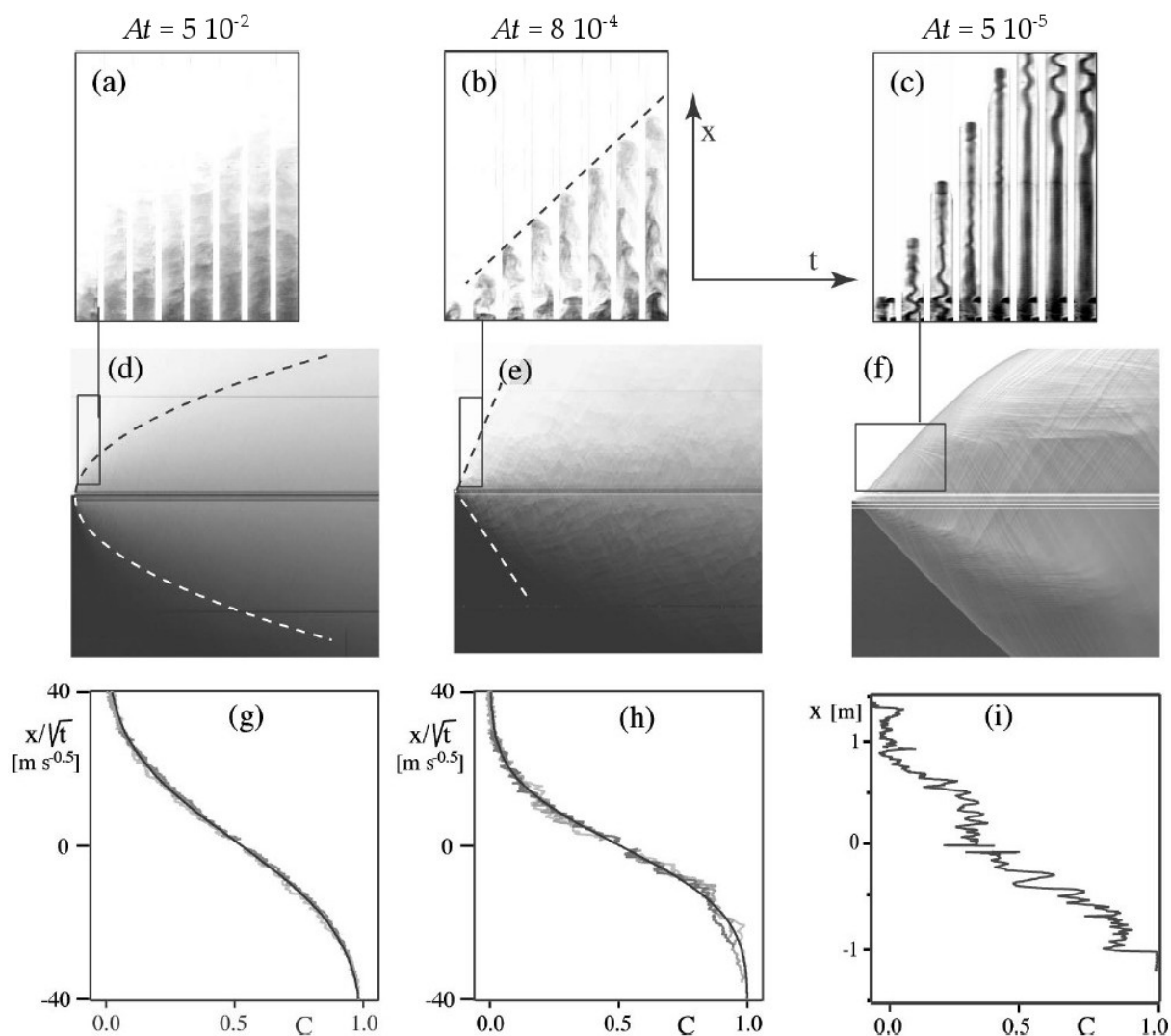


FIGURE 2.2 – Régimes de mélange : (a), (b) et (c) = séquences d'images des 30 cm au-dessus de la vanne guillotine, à respectivement $At = 5 \cdot 10^{-2}$ (intervalle de 7 s entre les images), $At = 8 \cdot 10^{-4}$ (intervalle de 5 s entre les images) et $At = 5 \cdot 10^{-5}$ (intervalle de 20 s entre les images); (d), (e) et (f) = diagrammes spatiotemporel correspondant aux mêmes At (l'échelle verticale correspond à la distance le long du tube (2,65 m au total) et l'échelle horizontale au temps (1200 s)); (g) et (h) = profils de concentration normalisée associés aux expériences (a) et (b) à $t = 120$, 360 et 960 s tracés en fonction de $\frac{x}{\sqrt{t}}$, la ligne plus sombre correspondant au meilleur ajustement de la fonction erreur; (i) = profil concentration normalisée tracé en fonction de x à $t = 190$ s et correspondant à l'expérience (c)

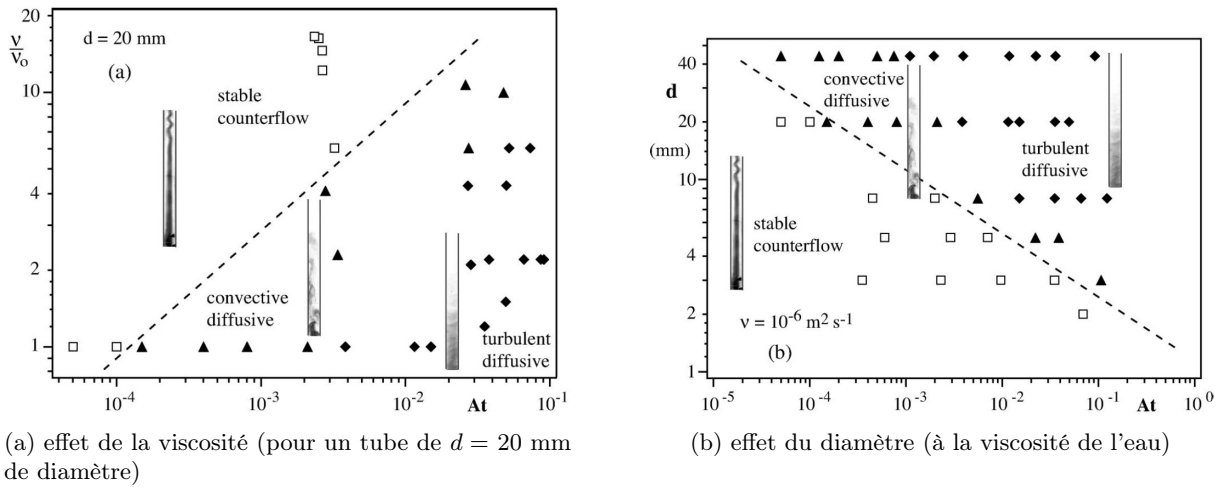


FIGURE 2.3 – Domaines d’observation des différents régimes de mélange :

□ : contre-courant stable ; ▲ : régime convectif-diffusif ; ◆ : régime de mélange faiblement turbulent

Ces travaux sont détaillés dans :

Marie DEBACQ, Vincent FANGUET, Jean-Pierre HULIN, Dominique SALIN, Bernard PERRIN, 2001. Self-similar concentration profiles in buoyant mixing of miscible fluids in a vertical tube. *Physics of Fluids* 13, 3097–3100. DOI :[10.1063/1.1405442](https://doi.org/10.1063/1.1405442)

2.1.2 Hydrodynamique transverse dans les fours tournants

L’étude de l’écoulement transversal d’une charge solide dans un four tournant a fait l’objet de nombreuses publications. La plupart concernent le mouvement de cette charge dans des fours dépourvus d’équipements internes [Henein et al., 1983, Mellmann, 2001]. À l’époque de ma thèse, peu d’études concernant le cas de fours tournants munis de releveurs avaient été publiées. Généralement, les auteurs déterminaient tout d’abord théoriquement et vérifiaient ensuite expérimentalement la loi de déchargement des releveurs (relation entre la fraction de volume de poudre contenue dans un releveur et sa position angulaire par rapport à l’horizontale dans une section droite de four). [Kelly, 1992] a vérifié expérimentalement que la surface de poudre dans un releveur forme constamment l’angle d’avalanche δ , dont Schofield et Glikin avaient établi l’expression en fonction du coefficient de frottement cinétique et du rapport des forces centrifuges et gravitationnelles, mais cette loi dépend de la position angulaire du releveur γ . [Blumberg and Schlünder, 1996] suppose, en s’appuyant sur un bilan de forces, que cet angle est constant et n’est autre que l’angle de repos θ . Si cette hypothèse d’un angle constant formé par la poudre dans les releveurs peut être vérifiée, il est ensuite possible de déterminer la répartition transversale de la poudre (indispensable à la description des transferts de matière) et les surfaces d’échanges thermiques (nécessaires à l’écriture des bilans thermiques) par simples calculs géométriques.

Pendant ma thèse, j’ai donc étudié le mouvement transversal des poudres d’ UO_2F_2 , d’ U_3O_8 type COGEMA, d’ U_3O_8 type FBFC et d’ UO_2 à température ambiante dans deux maquettes, représentant chacune une tranche de four, avec le même diamètre et les mêmes équipements internes que le four industriel correspondant. Chacune de ces maquettes est munie d’une face en verre permettant l’observation et s’adapte sur un châssis équipé d’un moteur avec variateur de

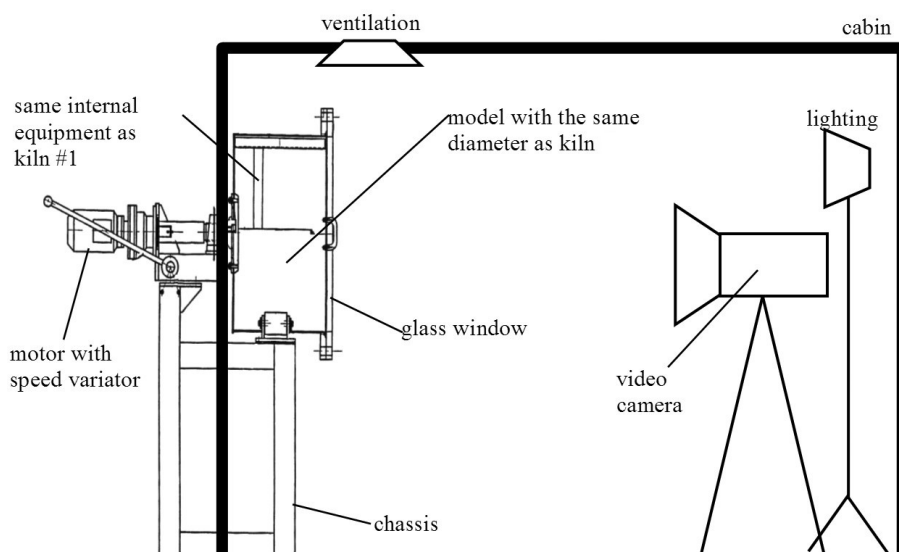


FIGURE 2.4 – Dispositif expérimental pour la détermination des lois de déchargement

TABLEAU 2.1 – Propriétés des poudres utilisées pour déterminer les lois de déchargement des releveurs

Poudre	UO ₂ F ₂	U ₃ O ₈ type C	U ₃ O ₈ type F	UO ₂
Masse volumique apparente [kg m ⁻³]	380	1140	590	800
Taille des grains [µm] *	20 et 300	10 et 40	3 et 60	3 et 60
Rapport d'Hausner [-]	1,2	1,8	1,6	2,0
Angle de repos statique [°]	43	50	51	45
Angle de repos dynamique [°]	42 ± 11	33 ± 8	39 ± 3	33 ± 13

* : pics majoritaires des distribution bimodales de tailles de grains

vitesse, installés sous un sas fermé et ventilé (FIGURE 2.4). Les remplissages et les vidanges sont effectués en manipulation étanche. Le mouvement des poudres est filmé à l'aide d'un caméscope numérique à travers la face en verre (la zone correspondant au four sur les images obtenues fait environ 500 × 500 pixels). Les domaines de variation des paramètres ont été choisis en fonction des conditions de fonctionnement des fours industriels : le taux de remplissage varie entre 4 et 24% et la vitesse de rotation entre 2 et 7 rpm.

Les propriétés des différentes poudres sont données dans le TABLEAU 2.1. On peut remarquer que ces poudres sont très cohésives, avec des rapports d'Hausner supérieurs à 1,2 et allant jusqu'à 2 pour les oxydes. Les angles de repos statiques (ou angles de talus) sont très élevés, autre signe du caractère très cohésif de ces poudres. On note aussi la forte variation de masse volumique et de taille de grains entre l'UO₂F₂ en entrée de four et les oxydes en sortie. Les angles de repos dynamiques ont été mesurés en tambour tournant, afin de disposer d'éléments de comparaison avec les travaux de [Blumberg and Schlünder, 1996].

Analyse des images de maquette froide

Les images extraites des films tournés lors de ces essais, permettent de mesurer d'une part le volume de poudre contenu dans un releveur en fonction de sa position angulaire -c'est la loi de déchargement- et de déterminer d'autre part les bornes de cette loi que sont les angles de

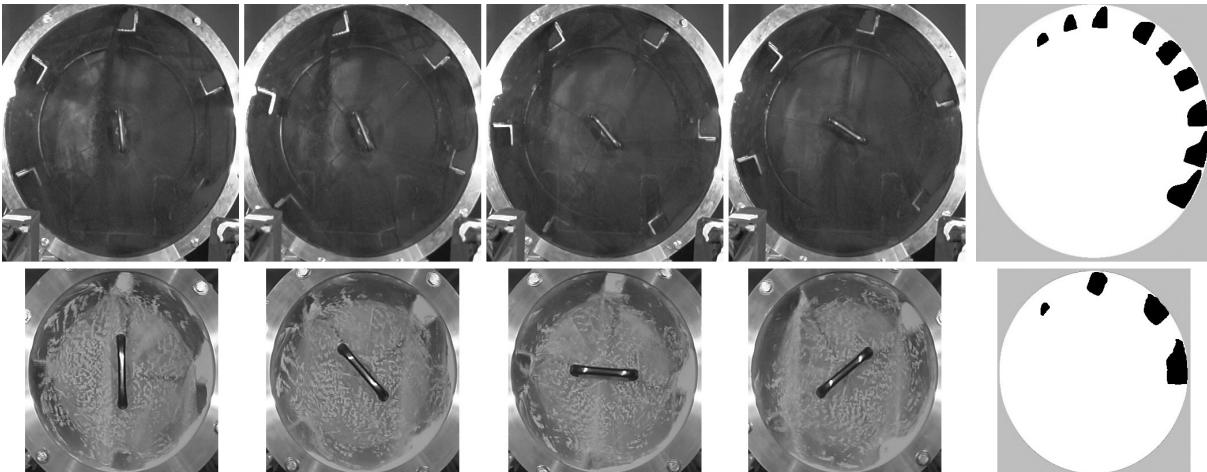


FIGURE 2.5 – Images types utilisées pour déterminer les lois de déchargement des releveurs

détachement γ_D , de début γ_I et de fin γ_F de déchargement (FIGURE 2.6-a).

Pour chaque essai, correspondant à environ 2 min de tournage en plan fixe pendant le régime permanent, quatre séries d'images sont extraites du film. La première comporte une image par seconde. Sur ces images (voir quelques exemples sur la FIGURE 2.5), on mesure la fraction de surface (rapportée à la section du four) ξ occupée par la poudre contenue dans chaque releveur et la position γ de celui-ci. La deuxième série comporte les images sélectionnées parce qu'elles correspondent au détachement des releveurs (lorsqu'ils quittent la poudre au fond du four); sur ces images, on mesure l'angle γ_D . La troisième série comporte les images sélectionnées parce qu'elles correspondent à la fin de déchargement; sur ces images, on mesure l'angle γ_F . La quatrième et dernière série comporte les images sélectionnées parce qu'elles correspondent au début de déchargement « efficace », lorsque la poudre qui chute du releveur traverse le gaz (et ne roule pas simplement en surface du lit); sur ces images, on mesure l'angle γ_I .

La première série d'images est analysée de manière semi-automatique à l'aide du logiciel Aphélon et d'un algorithme de traitement et mesure spécialement développé. La position d'un releveur est repérée par rapport à l'horizontale, le caméscope étant toujours placé de façon à ce que l'horizontale de l'image corresponde à l'horizontale de l'installation. La quantité de poudre contenue dans un releveur est obtenue en mesurant l'aire délimitée par la poudre contre la face en verre (en pixels). Nous avons en effet vérifié visuellement, d'une part que la quantité de poudre contenue dans un releveur est la même quelle que soit la section droite de maquette considérée, et d'autre part que la face en verre n'a pas d'effet sur la quantité de poudre relevée. Les autres séries d'images sont analysées à l'aide du logiciel Vision Explorer MA, plus simple d'utilisation. Les angles de détachement γ_D , de début et de fin de déchargement γ_I et γ_F , sont mesurés par rapport à l'horizontale pour chaque essai. On obtient ainsi une courbe ξ vs γ dont l'intersection γ_F avec l'axe des abscisses est parfaitement définie et qui est valable, selon le phénomène que l'on souhaite caractériser, entre γ_D et γ_F ou entre γ_I et γ_F .

Résultats à température ambiante

Pour toutes les poudres étudiées, la fraction de poudre contenue dans un releveur décroît linéairement en fonction de l'angle caractérisant sa position (FIGURE 2.6-b). Aucune influence notable de la vitesse de rotation, du type de poudre et même du four n'est observée, tant sur les pentes des lois de déchargement que sur les angles caractéristiques.

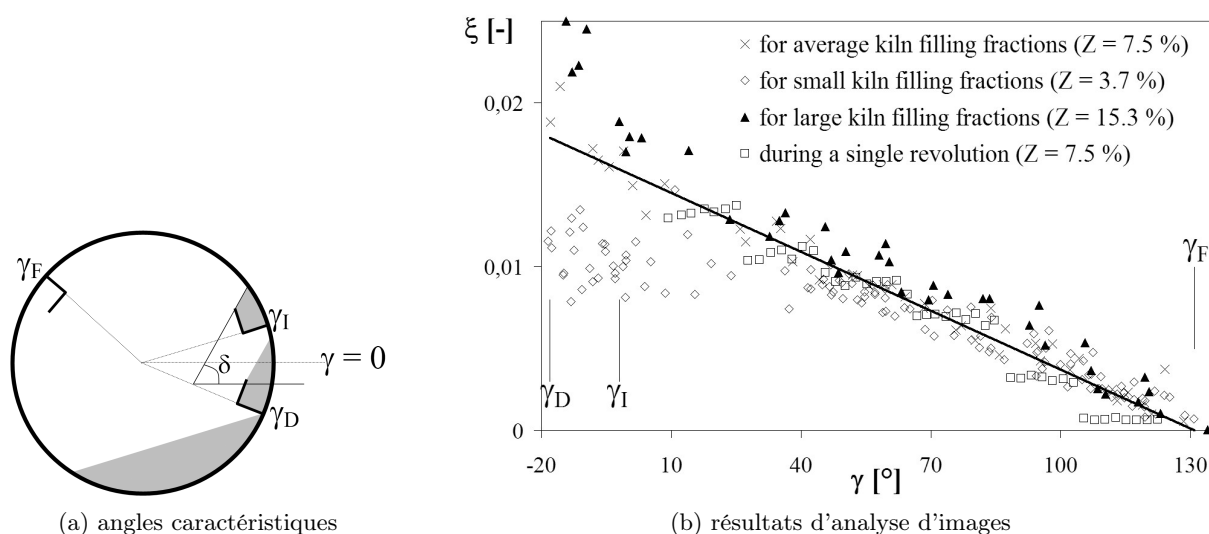


FIGURE 2.6 – Résultats de déchargement des releveurs à température ambiante

La loi de déchargement ainsi obtenue est $\xi = 0,00012 \cdot (\gamma_F - \gamma)$. Cette relation est spécifique pour les géométries des fours et les propriétés des poudres étudiées. Elle a été déterminée à température ambiante et en l'absence de gaz circulant axialement.

Les angles caractéristiques ont pour valeurs moyennes : $\gamma_D = -18^\circ$, $\gamma_I = -2^\circ$ et $\gamma_F = 131^\circ$ et varient relativement peu (écart-types respectivement de 7° , 6° et 3°) avec les paramètres opératoires dans les domaines explorés.

Pour des taux de remplissage Z très faibles, les releveurs ne peuvent se remplir complètement, et aux petits angles, la fraction de poudre dans un relevateur est plus faible que lorsque le taux de remplissage est suffisant. Pour des taux de remplissage élevés, le relevateur se remplit davantage aux petits angles, que lorsque le taux de remplissage est moyen. Pour des taux de remplissage très faibles ou élevés, la forme de la courbe de déchargement est donc modifiée aux petits angles (jusqu'à 5° environ). Les angles de détachement et de début de déchargement sont également modifiés, alors que l'angle de fin de déchargement reste inchangé.

Résultats à haute température

Le comportement de la charge solide pouvant être différent à température ambiante et aux températures rencontrées dans le procédé, il était nécessaire d'étudier le déchargement d'un relevateur à différentes températures. Une maquette à haute température dans laquelle il soit possible de filmer était cependant difficilement réalisable, en particulier pour des produits tels que les oxydes d'uranium. C'est pourquoi une installation spécifique a été mise en œuvre dans un four approprié, afin de quantifier le déchargement d'un relevateur unique monté sur un axe et mis en rotation à l'aide d'un volant manuel. Des mesures ont été réalisées d'une part à température ambiante (pour vérifier que les résultats sont comparables à ceux obtenus en maquette) et d'autre part à quelques températures représentatives des installations industrielles, pour les différents types de poudres. Le déchargement d'un relevateur est obtenu sur le même principe que dans les maquettes précédentes : un relevateur est rempli de poudre, il est mis en rotation et la masse de poudre tombée est périodiquement mesurée (ce qui permet de déduire la fraction ξ correspondant aux mesures précédentes), ainsi que la position γ de ce relevateur, afin de tracer la loi de

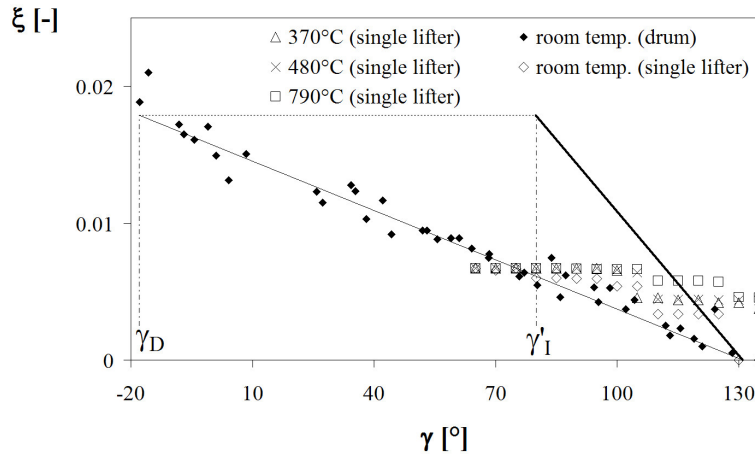


FIGURE 2.7 – Loi de déchargement des releveurs à diverses températures pour l' U_3O_8 type C

déchargement.

Il n'y a pas d'influence notable de la température sur le déchargement de UO_2F_2 (dans le domaine de température où il ne se décompose pas, soit jusqu'à $500^\circ C$).

Dans le cas des oxydes (U_3O_8 type COGEMA, U_3O_8 type FBFC et UO_2), l'écoulement à haute température est très particulier : les poudres semblent comme « grasses », se déchargeant par « gros paquets », comme si on démoulait un paté de sable en l'air. Le déchargement du releveur commence pour une position angulaire beaucoup plus élevée à haute température qu'à la température ambiante. En revanche il s'achève à environ 130° , comme à température ambiante (FIGURE 2.7). La loi de déchargement pour UO_2F_2 jusqu'à $500^\circ C$ est toujours donnée par $\xi = 0,00012 \cdot (\gamma_F - \gamma)$, entre γ_I et γ_F . La loi de déchargement pour les oxydes vers $700-800^\circ C$ est quant à elle donnée par $\xi = 0,00035 \cdot (\gamma_F - \gamma)$, entre γ'_I et γ_F . Lors des essais à haute température, il n'est pas possible de charger le releveur complètement, contrairement à ce qui était généralement le cas dans les maquettes froides. Par suite, les mesures ne sont effectuées qu'entre un angle de 75° environ et γ_F . Toutefois, il semble raisonnable de supposer qu'aux températures élevées, le releveur se charge de la même façon qu'à température ambiante ; γ'_I vaudrait alors 80° environ.

Modélisation des résultats

Si l'on fait l'hypothèse d'un angle d'avalanche δ constant, il est possible de calculer géométriquement la fraction ξ de poudre contenue dans un releveur en fonction de sa position angulaire γ . À partir des expressions obtenues, nous avons calculé l'évolution de la fraction de poudre présente dans un releveur en fonction de la position angulaire et nous avons comparé les résultats obtenus avec les résultats expérimentaux. Si l'angle d'avalanche n'a pas de réalité physique dans le cas de poudres cohésives (qui chutent à des angles extrêmement variables), il est possible de trouver une valeur de δ représentant correctement les mesures expérimentales.

L'intérêt de définir ce « pseudo angle d'avalanche », est de permettre ensuite de dérouler tous les calculs de quantités de poudre et de surfaces d'échange, indispensables à l'établissement des bilans matière et thermiques. On voit sur la FIGURE 2.8 que ce pseudo-angle pourra être pris égal à 55° , c'est-à-dire plus élevé que l'angle de talus proposé par [Blumberg and Schlünder, 1996].

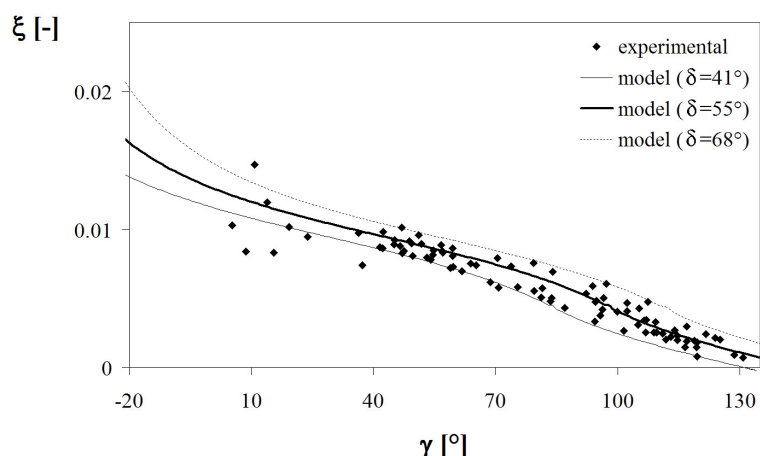


FIGURE 2.8 – Modélisation des résultats de déchargement des releveurs pour les divers types de poudres à température ambiante

Ces travaux sont détaillés dans :

Marie DEBACQ, Stéphane VITU, Denis ABLITZER, Jean-Léon HOUZELOT, Fabrice PATISSON, 2013. Transverse motion of cohesive powders in flighted rotary kilns : Experimental study of unloading at ambient and high temperatures. *Powder Technology* 245, 56–63. DOI :[10.1016/j.powtec.2013.04.007](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.04.007) - [hal-00823592](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00823592)

Ces travaux, réalisés vers 1998, n'ont pu être publiés qu'en 2013 pour des raisons de confidentialité. À la même période, d'autres papiers ont été publiés sur cette thématique [Ajayi and Sheehan, 2012, Sunkara et al., 2013, Sunkara et al., 2015], avec des moyens d'analyse d'image forcément plus modernes quinze ans plus tard, mais jamais sur des poudres aussi cohésives que les poudres d'uranium.

*

Comme on a pu le voir sur ces deux exemples, l'analyse d'images est un outil puissant pour caractériser l'hydrodynamique à l'échelle mésoscopique, en déterminant des concentrations, des fractions de surface, voire des vitesses. D'autant plus que l'on trouve aujourd'hui des logiciels libres performants pour réaliser automatiquement ce type d'analyse et que les technologies actuelles de caméra rendent cette technique accessible. Il n'est en effet pas forcément besoin d'utiliser des caméras très onéreuses, sauf dans le cas de phénomènes très rapides ou si l'on cherche à descendre à l'échelle microscopique. À cette échelle, des techniques comme le *PIV* peuvent être utilisées pour accéder à des champs de vitesse.

2.2 Distribution des Temps de Séjour (DTS)

Les mesures de Distribution des Temps de Séjour [Danckwerts, 1952, Villiermaux, 1993] sont une méthode de diagnostic des défauts d'écoulement (en particulier les courts-circuits, volumes morts et recirculations) et aussi une précieuse méthode de modélisation des écoulements macroscopiques dans les équipements.

Le principe est d'injecter un traceur en entrée du système à étudier et de détecter la concentration de ce traceur dans le courant de sortie en fonction du temps. Il est important de choisir

un traceur qui ne perturbe pas l'écoulement et qui ait le même comportement hydrodynamique que la phase étudiée. Le dépouillement des courbes de Distribution des Temps de Séjour obtenues à partir des mesures de concentration de traceur permet d'évaluer le temps de séjour moyen et la dispersion. Ces courbes permettent aussi de proposer un modèle d'écoulement macroscopique conduisant ensuite à l'écriture de bilans matière et thermique.

2.2.1 Cas des fours tournants

À l'époque de ma thèse, il existait très peu d'études publiées à propos de mesures de DTS dans des fours tournants [Hehl et al., 1978, Sai et al., 1990, Hatzilyberis and Androutsopoulos, 1999a] et une seule sur des four munis de releveurs [Hatzilyberis and Androutsopoulos, 1999b]. Par la suite quelques travaux expérimentaux ont été publiés [Li et al., 2002, Sherritt et al., 2003, Abouzeid and Fuerstenau, 2010, Bensmann et al., 2010], toujours sans releveur et ils ne présentaient à chaque fois qu'un petit nombre de mesures (une vingtaine pour les études les plus « fournies »).

Mesures de DTS sur fours industriels

Pendant ma thèse, quelques mesures de distribution des temps de séjour ont été réalisées sur les fours industriels (5 essais + 1 répétition sur chaque four). L'objectif était d'évaluer la dispersion axiale, afin de définir le nombre de réacteurs parfaitement agités en cascade à considérer dans le modèle global de fours. Nous avons mis à profit la radioactivité de l'uranium pour réaliser des mesures sans prélèvement, par mesure de rayonnement γ . Compte tenu de la configuration des installations, il n'était pas possible de réaliser l'injection en entrée du four tournant. Nous avons donc opté pour la méthode à deux points de mesure : l'injection se fait en amont du four tournant et on mesure le rayonnement à l'entrée et à la sortie du four (FIGURE 2.9). Il n'était pas non plus possible pour les opérateurs de réaliser une véritable impulsion, c'est donc un créneau qui a été réalisé : pendant une production à faible teneur en ^{235}U , un créneau à forte teneur a été réalisé, pendant environ une demi-heure pour le four COGEMA et pendant quelques minutes pour le four FBFC.

La répétabilité des essais était satisfaisante et nous avons pu déterminer, après déconvolution des signaux, le temps de séjour moyen et la dispersion axiale (exprimée sous la forme d'un nombre de réacteurs parfaitement agités en cascade). Quelques essais ayant été réalisés à différentes valeurs de débit de solide et de vitesse de rotation du tube, sans aller jusqu'à une véritable corrélation avec si peu d'essais (sur chaque four : 5 essais + 1 répétition), nous avons pu en tenir compte pour la définition du nombre de tranches de discrétisation dans le modèle global ultérieur (voir section 3.2 page 90).

Mesures de DTS sur les pilotes de four tournant

Le pilote de four tournant décrit à partir de la page 44, que nous avons conçu pour l'étude des transferts thermiques, s'est avéré parfaitement adapté aux mesures de distribution des temps de séjour. Les essais préliminaires réalisés pendant la thèse de Phahath THAMMAVONG avaient permis de quantifier le temps de séjour moyen dans quelques configuration et avaient montré que notre pilote se comporte -dans ces configurations- comme un piston faiblement dispersif. La méthode de mesure était cependant fastidieuse, puisque le traceur était simplement du sable coloré (nous travaillions sur du sable médian pendant cette thèse) : il fallait donc trier les grains colorés ou non dans chaque échantillon prélevé en sortie de four.

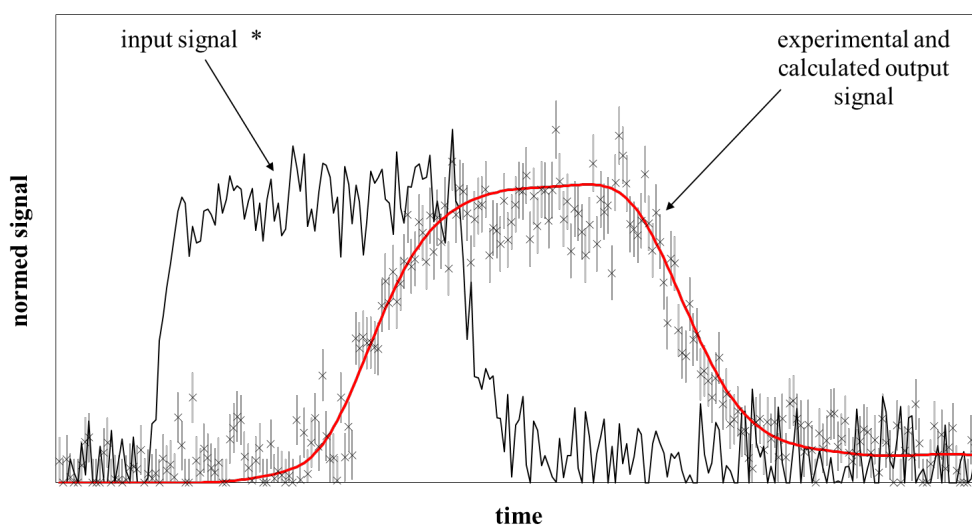


FIGURE 2.9 – Exemple de signaux mesurés sur le four COGEMA pour la détermination de la DTS : l'axe vertical correspond à la mesure de rayonnement γ et l'axe horizontal au temps (tous deux en unités arbitraires) ; les barres d'erreur grises représentent l'incertitude sur la statistique de comptage du rayonnement ; la ligne rouge correspond au produit de convolution du signal d'entrée avec la fonction distribution déterminée par optimisation à l'aide du logiciel D.T.S. (modèle piston dispersif)

Par la suite, nous avons testé et validé une méthode moins fastidieuse, consistant à utiliser des grains calibrés de sel (NaCl) comme traceur ; il suffisait de dissoudre chaque échantillon de sable + sel recueilli en sortie de four dans de l'eau distillée et d'en mesurer la conductivité, pour remonter -moyennant un étalonnage- à des courbes de distribution des temps de séjour très satisfaisantes. Bien que la masse volumique du sel soit plus faible que celle du sable, les résultats étaient tout à fait concordant avec ceux obtenus par la méthode de tri des grains colorés.

Pendant la thèse d'Alex BONGO NJENG, une campagne de mesure de grande ampleur a été menée, en faisant varier tous les paramètres possibles sur notre installation :

- vitesse de rotation du tube ;
- inclinaison du four ;
- débit de solide ;
- hauteur du diaphragme en sortie ;
- présence ou absence et type de releveurs ;
- type de poudre.

Nous avons même pu faire varier les dimensions du four lui-même, puisqu'une série de mesures a été réalisée sur le four du centre Rapsodee à Albi (FIGURE 1.28 page 48). Cela représente un total d'environ 190 expériences réalisées à ce jour, chacune comportant au moins une cinquantaine de points de mesure. Pour chacune de ces expériences, nous avons ajusté les courbes de distribution expérimentales par le modèle de piston à dispersion axiale. Nous avons alors pu déterminer :

- le temps de séjour moyen,
- la dispersion axiale et le nombre de Peclet,
- le chargement total du four était par ailleurs déterminé à chaque expérience par vidange, afin d'accéder au temps de passage et de donner une estimation de la hauteur du lit de poudre dans le four ; celle-ci permet de remonter à la vitesse axiale moyenne de déplacement de la poudre dans le four, nécessaire au calcul du coefficient de dispersion axiale à

partir de la valeur du nombre de Peclet.

La FIGURE 2.10 montre par exemple les résultats obtenus pour le sable médian avec les relevés plats (SL sur la FIGURE 1.29 page 49) ; tandis que la FIGURE 2.11 montre les résultats pour le même sable mais avec les relevés rectangulaires (RL sur la FIGURE 1.29 page 49). La FIGURE 2.12 présente quant à elle les résultats pour le riz concassé avec les relevés rectangulaires. Enfin la FIGURE 2.13 présente les résultats pour les plaquettes forestières avec six relevés plats sur le four du centre Rapsodee. Sur toutes ces figures, les lignes continues correspondent au meilleur ajustement des points expérimentaux obtenu avec le modèle piston à dispersion axiale ; les lignes pointillées correspondent à ce même modèle tracé pour la valeur du nombre de Peclet calculé à partir du second moment de la distribution expérimentale.

L'observation de ces courbes (et de toutes celles qui ne sont pas montrées ici) permet de dégager les tendances suivantes, tous les autres paramètres étant maintenus constants :

- les relevés ont pour effet d'augmenter le temps de séjour moyen et la dispersion axiale ; cet effet est d'autant plus prononcé que la capacité de « relevage » du relevé et/ou leur nombre sont grands ;
- plus les particules sont grosses, plus le temps de séjour moyen est faible ; en revanche la taille des particules a peu d'effet sur la dispersion axiale ;
- le temps de séjour moyen et la dispersion axiale sont d'autant plus faibles que la vitesse de rotation du tube est grande ;
- de même pour l'inclinaison du four ;
- le débit de solide n'a que peu d'effet sur le temps de séjour moyen (qui diminue légèrement lorsque le débit de poudre augmente) ; en revanche la diminution de ce débit augmente drastiquement la dispersion axiale ;
- il apparaît un effet de seuil pour les diaphragmes : en-dessous d'environ 45% de la surface de sortie couverte par un diaphragme, sa présence n'a pas d'effet ; au-delà de 45%, plus le diaphragme a une surface importante, plus le temps de séjour moyen et la dispersion axiale augmentent.

Toutes ces observations sont cohérentes avec l'intuition que l'on pouvait en avoir naturellement, ainsi qu'avec les observations des quelques auteurs qui ont travaillé sur la DTS dans les fours tournants [Hehl et al., 1978, Abouzeid and Fuerstenau, 2010]. L'intérêt de notre travail est d'avoir quantifié ces effets et de les avoir modélisés à partir d'un grand nombre de mesures (voir section 3.1.2 page 84), permettant par la suite de prédire leurs valeurs pour d'autres configurations.

Ces travaux sont détaillés dans :

Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Marc CLAUSSE, Jean-Louis DIRION, Marie DEBACQ, 2015. Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln : Part I. Experimental RTD and axial dispersion study. *Powder Technology* 269, 554–565. DOI :[10.1016/j.powtec.2014.03.066](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.03.066) - [hal-00974052](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00974052)

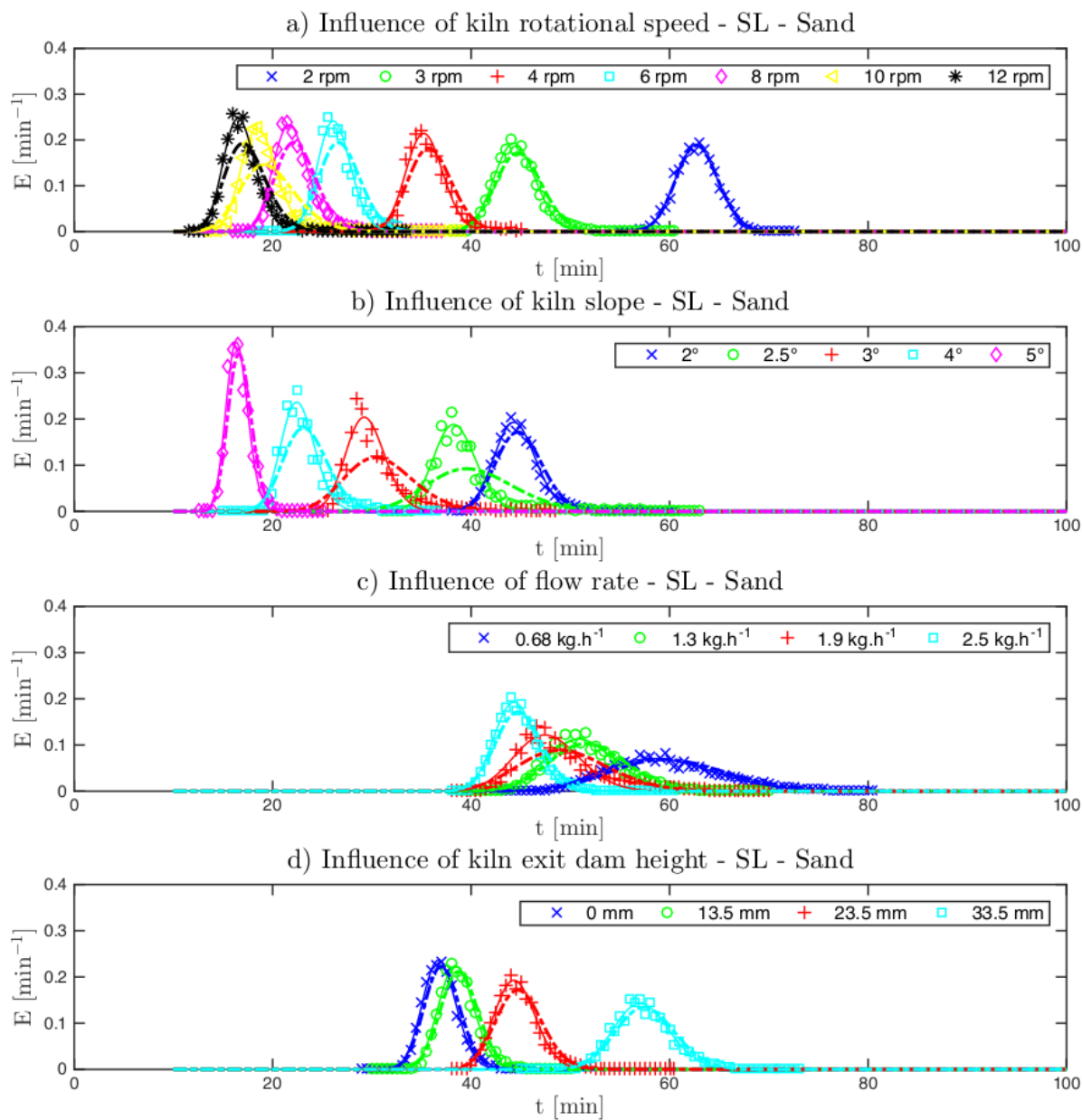


FIGURE 2.10 – DTS pour le sable médian avec les relevés plats (SL) dans le four tournant du Cnam

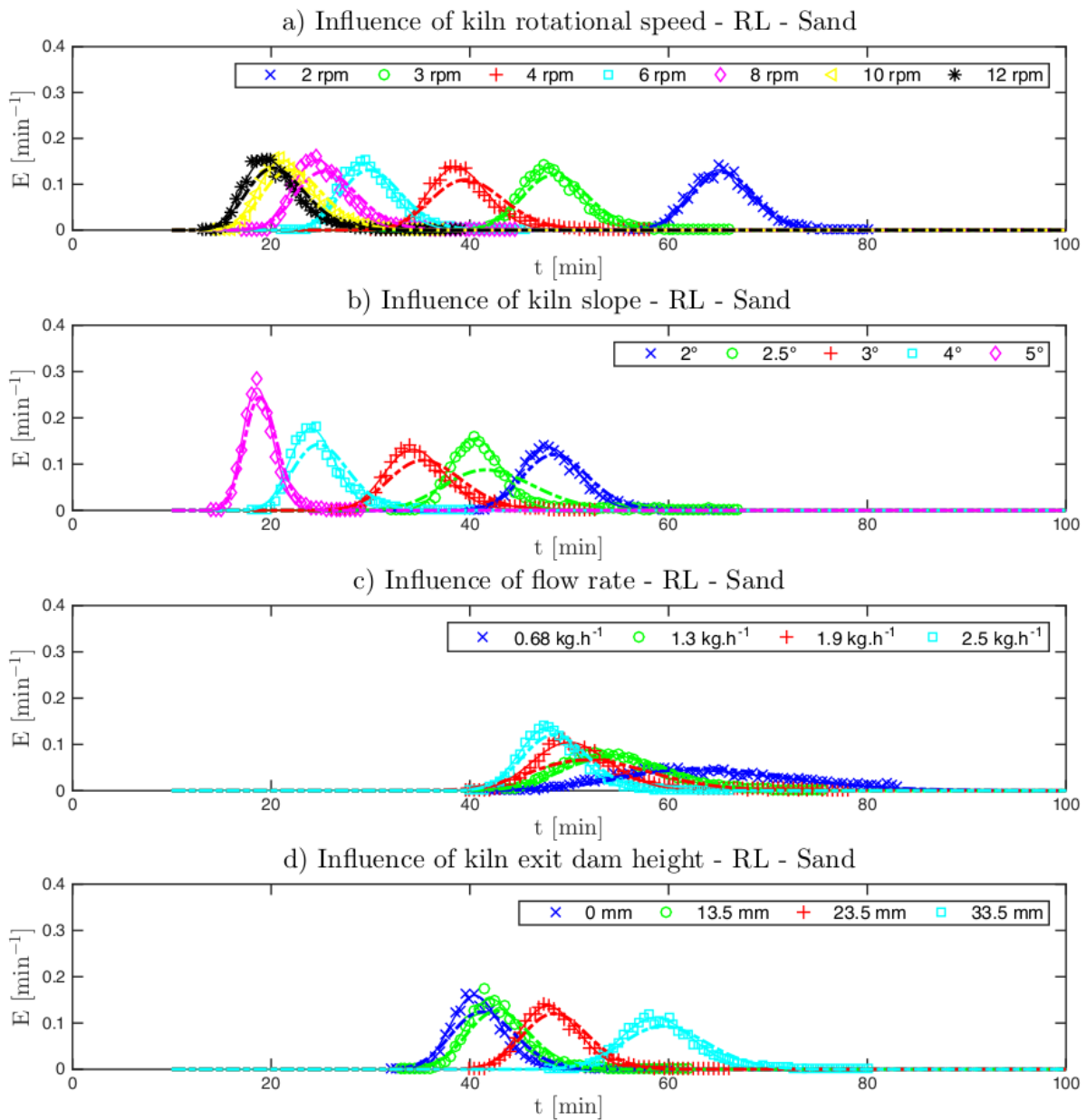


FIGURE 2.11 – DTS pour le sable médian avec les relevés rectangulaires (RL) dans le four tournant du Cham

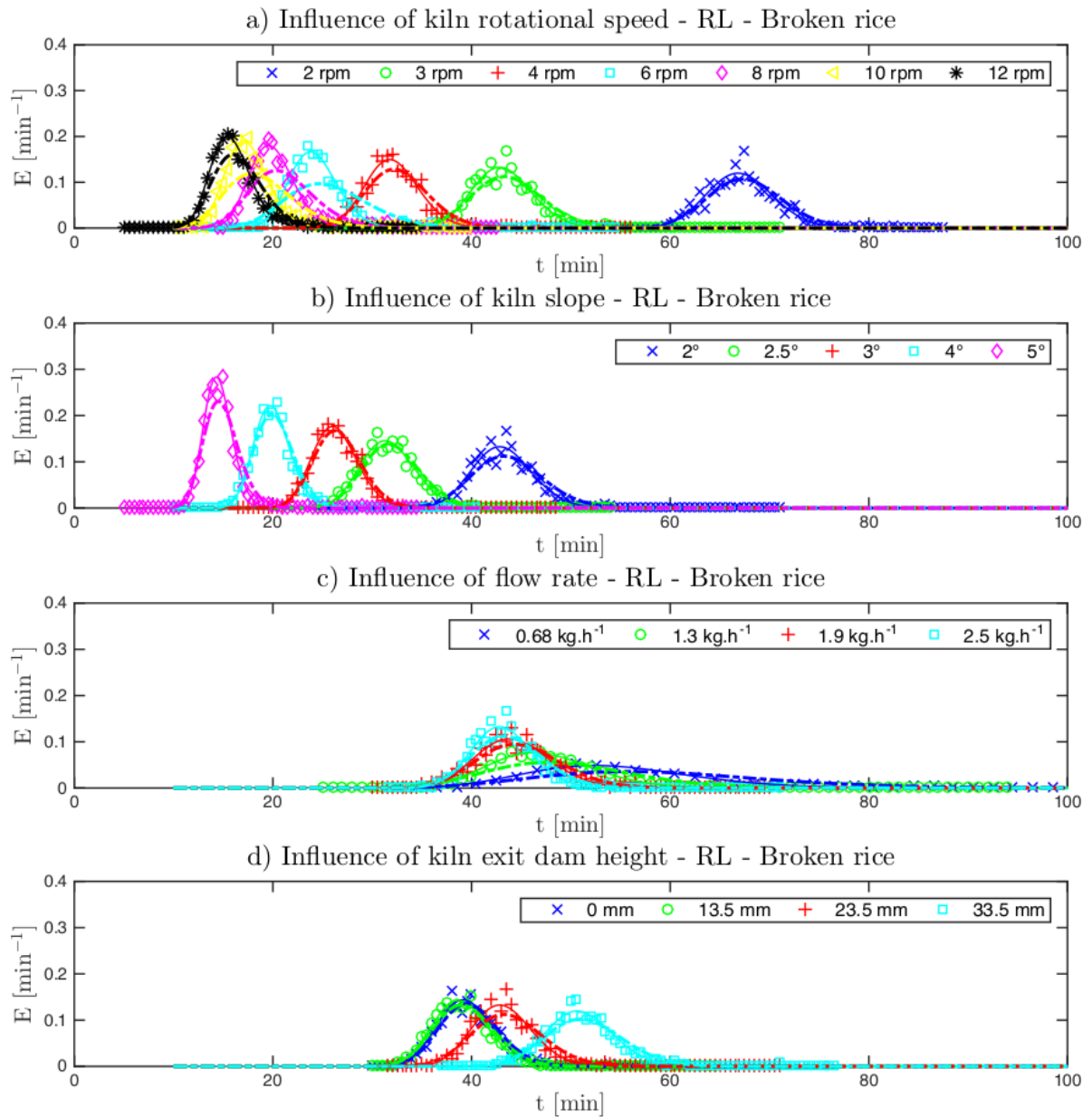


FIGURE 2.12 – DTS pour le riz concassé avec les releveurs rectangulaires (RL) dans le four tournant du Cnam

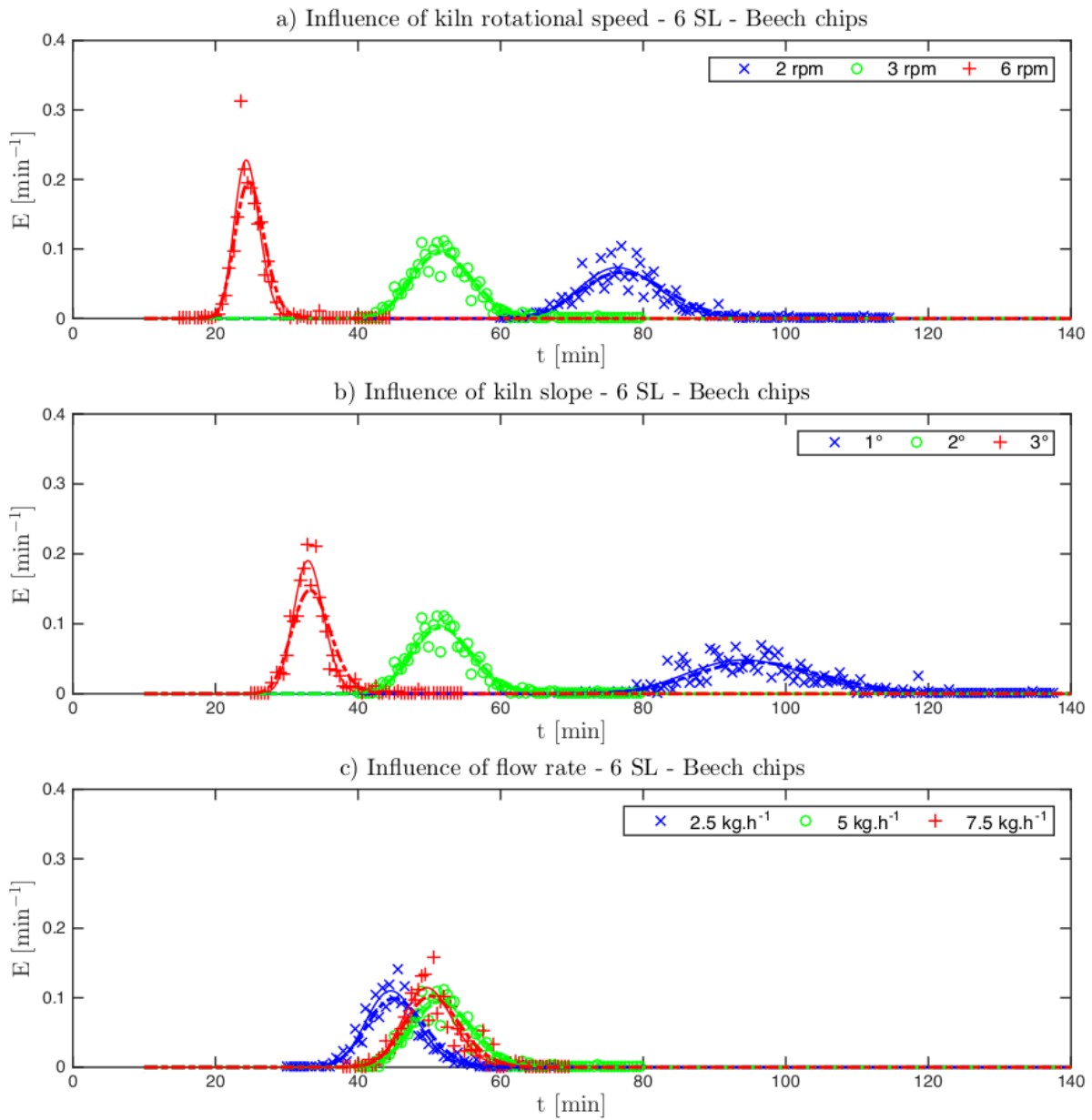


FIGURE 2.13 – DTS pour les plaquettes de hêtre avec 6 relevés plats (6SL) dans le four tournant de Rapsodee

2.2.2 Cas de la colonne à bulles

L'écoulement du liquide dans le pilote de colonne à bulles décrit à la section 1.3.2 (page 34) a été caractérisé par quelques mesures de DTS. Il s'agissait de déterminer le temps de séjour moyen et de vérifier le bon fonctionnement de l'installation que nous avons construite. Le traceur utilisé était du sel (NaCl) et sa détection en sortie de procédé était effectuée par conductimétrie, en plongeant la sonde directement dans le courant de sortie.

Nous avons pu vérifier l'absence de défaut d'écoulement. L'écoulement du liquide dans la colonne à bulle est -comme on s'y attendait- de type piston avec dispersion axiale. Nous avons également pu constater que la dispersion et le temps de séjour moyen sont affectés par le débit de liquide (FIGURE 2.14) mais pratiquement pas par le débit gazeux.

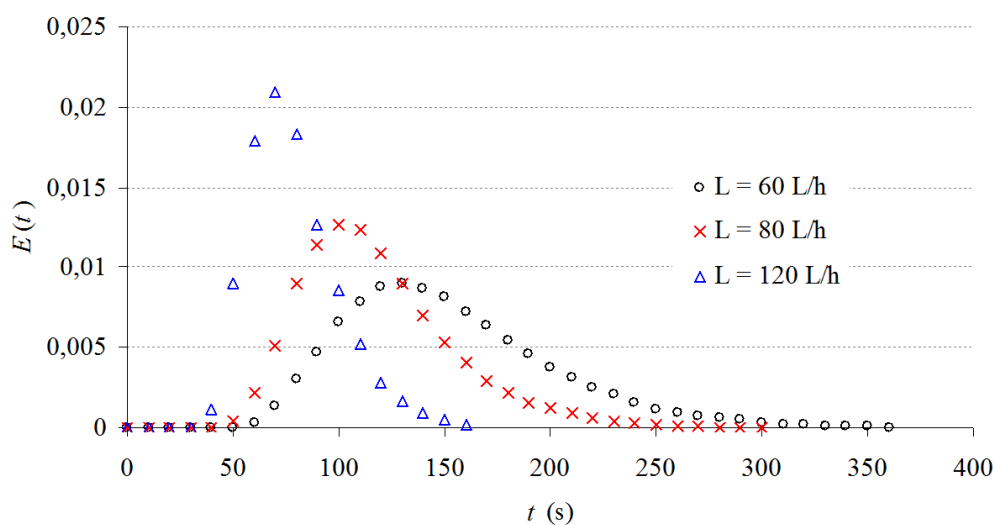


FIGURE 2.14 – DTS sur la phase liquide dans la colonne à bulles : effet du débit de liquide L

L'accessibilité autour de l'éjecteur n'a pas permis de réaliser des mesures de DTS sur ce procédé. Nous avons simplement calculé les temps de passage en fonction des débits liquide et gazeux, en faisant une correction sur le débit de gaz à partir d'une estimation des pertes de charge.

Nous avons ainsi constaté que le temps de séjour moyen du liquide dans la colonne à bulle est de 1 à 2 min ; alors que dans l'ensemble éjecteur + tube de mélange, le temps de passage est seulement de l'ordre de la seconde.

Nous n'avons pas poussé plus avant les investigations, puisque ce n'était pas l'objet de notre étude sur l'ozonation.

2.2.3 Cas du pilote de traitement biologique

Afin de caractériser le pilote de traitement biologique que nous avons construit (voir section 1.3.3 page 34), nous avons réalisé quelques mesures de DTS sur la phase liquide. Nous avons ainsi pu vérifier que le réacteur aéré avait un comportement de type réacteur bien agité. Les mesures sur l'ensemble réacteur + décanteur montrent que ce dernier joue bien son rôle de rétention. Fort logiquement, le recyclage accentue cette rétention ; c'est l'effet recherché pendant les phases de maintien de la population de microorganismes. Ces mesures de DTS permettaient d'accéder aux valeurs de temps de séjour moyen qui auraient été très utiles si nous avions pu poursuivre la mise en œuvre de la dépollution avec ce système.

*

La pratique de la mesure de distribution des temps de séjour en phase aqueuse est assez aisée (NaCl + mesures de conductivité par exemple) et permet d'une part de s'assurer du bon fonctionnement de l'installation et d'autre part de quantifier le temps de séjour moyen et la dispersion axiale. Sur les charges solides, ces mesures sont souvent beaucoup plus délicates et fastidieuses ; elles conduisent toutefois aux mêmes observations et aux mêmes paramètres que sur les phases aqueuses. Je n'ai pas eu l'occasion de la mettre en œuvre dans ces cas de figures, mais la DTS peut bien sûr également s'appliquer au cas des liquides en général (pas seulement les solutions aqueuses), mais aussi des gaz. Il « suffit » de trouver le bon traceur, associé à son moyen de détection.

Comme le rappelle [Houzelot, 2013], la Distribution des Temps de Séjour ne fait plus aujourd'hui l'objet de développements en recherche : c'est une méthode mature. Elle demeure un outil très efficace et toujours d'actualité pour caractériser les écoulements macroscopiques dans les équipements. Son usage s'est en outre étendu aux installations de traitement des eaux et plus généralement au génie environnemental, mais aussi du côté des applications biomédicales. Le développement des outils de mécanique des fluides numériques ne concurrence en rien la DTS : ce sont deux outils différents, parfois complémentaires, qui donnent accès à des paramètres différents. La DTS permet de caractériser par l'expérience les écoulements macroscopiques dans un équipement existant, avec éventuellement tous ses défauts de conception ou de réalisation. La *CFD* donne accès à des informations méso- voir microscopiques de manière prédictive par le calcul ; mais pour que la prédiction soit performante, il faut être capable de fournir tous les paramètres adéquats aux modèles contenus dans le logiciel de simulation.

2.3 Mécanique des fluides numériques

La mécanique des fluides numériques (*computational fluid dynamics* - *CFD* en anglais) est un outil de simulation des écoulements de fluides par la résolution des équations qui les régissent (l'équation de Navier-Stokes notamment), à partir de la discrétisation de ces équations qui sont résolues sur un maillage de la géométrie étudiée ; ils permettent ainsi d'accéder à des cartes de champs de pression, de vitesse, etc. Aujourd'hui les logiciels de *CFD* résolvent aussi l'équation de l'énergie et fournissent donc des cartographies de température. Certains permettent même de prendre en compte des réactions chimiques. J'ai connu l'époque où Fluent (l'un des logiciels commerciaux phares dans ce domaine) ne convergait pas toujours, ce qui était pédagogiquement beaucoup plus intéressant que les versions actuelles, qui fournissent toujours un résultat, sous forme de belles cartographies en couleur, dont il faut apprendre à critiquer la pertinence et la qualité. Il n'en reste pas moins que cet outil est aujourd'hui devenu incontournable en génie des procédés ; il suffit pour s'en convaincre d'observer le nombre de communications utilisant -plus ou moins adroitement- cet outil dans les congrès de notre discipline.

Je ne suis assurément pas spécialiste de la mécanique des fluides numériques. J'ai eu cependant l'occasion d'y faire appel ponctuellement à diverses reprises.

Cas des fours tournants

Pendant ma thèse sur les fours tournants, un projet d'étudiants de deuxième année ingénieur a permis de déterminer le champ de vitesse du gaz circulant à contre-courant dans les fours tournants type FBFC, qui sont munis de chicanes dont nous soupçonnions qu'elles pouvaient

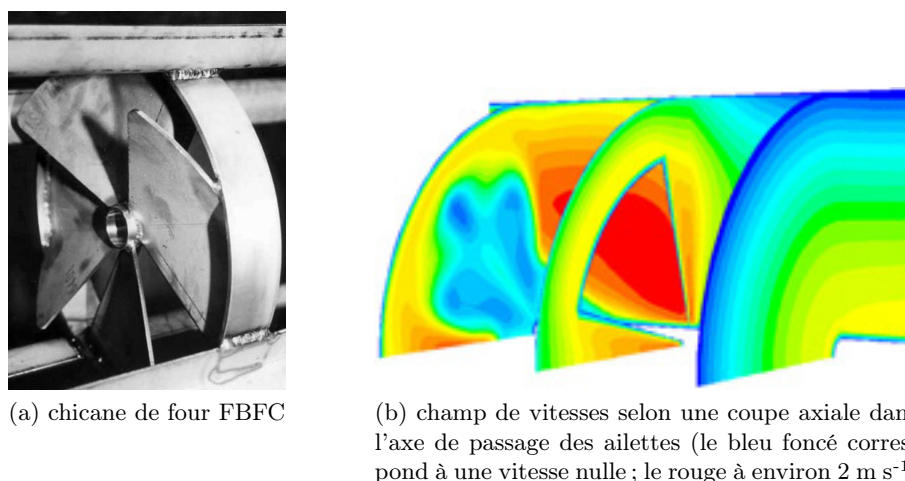


FIGURE 2.15 – Simulation de l'écoulement dans une portion de four tournant muni d'une chicane

entraver singulièrement la circulation du gaz. Le travail de simulation nécessitait d'être approfondi pour répondre précisément à cette question, mais les simulations effectuées avaient permis de confirmer l'ordre de grandeur de la vitesse moyenne du gaz dans ces fours, que j'avais par ailleurs calculé grossièrement.

Le stage de Charles DOIREAU avait pour objectif d'explorer l'intérêt de la *CFD* pour représenter les transferts thermiques. La difficulté principale pour la mise en place de cette simulation, a paradoxalement résidé dans la description de l'écoulement de la charge granulaire. La piste explorée a consisté à s'appuyer sur une description du mouvement transversal du lit de poudre par couche active / couche passive (approche classique pour les fours tournants sans releveur [Boateng, 1998]) et de simuler le mouvement axial de la poudre en décalant le champ de température à chaque pas de temps de simulation ; le tout à l'aide de fonctions utilisateur dans Fluent. Les résultats quantitatifs ne furent hélas guère probants. La *DEM* aurait probablement été mieux adaptée à cette étude.

Cas des cristalliseurs agités

Le stage de DEA de Damien DESPINOY avait pour objectif d'améliorer la cristallisation de la glycine en travaillant sur la vitesse d'agitation. Une réflexion sur les mécanismes qui se produisent au cours d'une cristallisation (croissance, agglomération, attrition) nous a conduit à envisager de faire varier cette vitesse d'agitation au cours de la cristallisation. Pour ce faire des simulations 2D ont été réalisées à l'aide du logiciel MixSim® 1.7 (associé à Fluent® 4.5) : une carte de référence a été établie, représentant la fraction volumique de cristaux en fin de cristallisation, lors d'une opération à 350 tr/min (vitesse maximale admissible pour éviter l'attrition dans notre configuration [Rabesiaka, 2002]). Pour chaque instant au cours de la cristallisation, des simulations ont été réalisées pour chercher une vitesse d'agitation qui permette d'obtenir une carte de fraction volumique la plus semblable possible à cette carte de référence. Pour quantifier cette « similarité », un critère a été défini, correspondant à la portion de cristalliseur riche en solide (fraction volumique supérieure à 40%), déterminé à l'aide du code couleur Fluent (du jaune au rouge). Le logiciel Photoshop® 7.0 disposant de fonctions bien adaptées, permettait d'isoler rapidement cette surface en passant tout le reste en niveau de gris, puis de la mesurer (FIGURE 2.16). Dans le cas de la carte de référence, 6,4% de la surface totale est riche en cristaux.

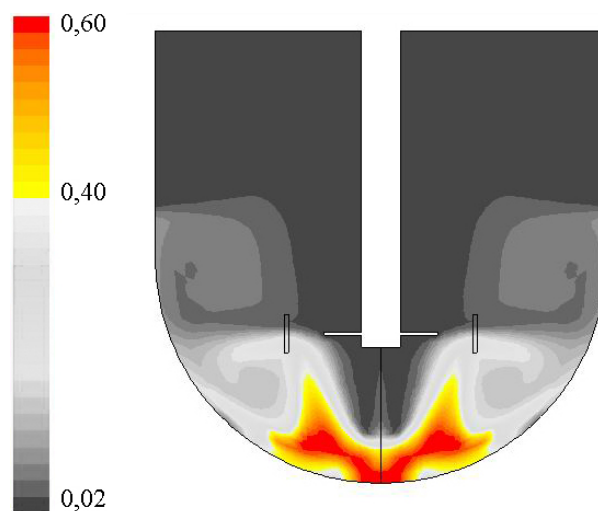


FIGURE 2.16 – Simulation de la répartition de la fraction volumique de cristaux dans la cuve agitée (les parties du cristalliseur où la fraction volumique de glycine est inférieure à 40% ont été passées en niveaux de gris)

Pour chaque instant, la vitesse d'agitation a donc été déterminée de telle sorte que la portion de cristalliseur riche en solide soit également d'environ 6,4%.

La taille moyenne des cristaux à chaque instant peut être obtenue en utilisant la loi de croissance à vitesse constante. Les fractions volumiques moyennes de cristaux de glycine pour chaque température sont quant à elles calculées à partir de la courbe de solubilité. Enfin le profil de refroidissement convexe (établi lors d'une étude précédente [Moscosa-Santillan, 2000]) donne la température à chaque instant au cours de la cristallisation. Pour chaque « pas » de 5°C de refroidissement, la vitesse d'agitation permettant d'obtenir l'image type recherchée a donc été déterminée.

Le profil de vitesse d'agitation ainsi déterminé (FIGURE 2.17-a) a ensuite été mis en œuvre : il a conduit à une distribution de taille des cristaux beaucoup moins bonne (présence de nombreuses fines) qu'avec une vitesse d'agitation constante de 350 tr/min.

Supposant que ce mauvais résultat pourrait s'expliquer par le fait qu'en début de cristallisation, la vitesse d'agitation très faible aurait empêché la croissance des cristaux au profit de l'agglomération et que de plus, les agglomérats, plus fragiles que les cristaux, auraient éclaté lorsque la vitesse d'agitation a été augmentée, libérant ainsi de nombreuses fines particules dans la suspension, nous avons décidé de démarrer la cristallisation sous une vitesse d'agitation plus élevée, puis de la diminuer légèrement, pour l'augmenter à nouveau (FIGURE 2.17-b). Avec ce profil dit « parabolique », la distribution de taille des cristaux obtenue était sensiblement améliorée (histogramme en noir sur la FIGURE 2.18) par rapport à celle obtenue sous agitation constante à 350 tr/min (histogramme en bleu sur la FIGURE 2.18).

En fin de cristallisation, nous procédions à un palier de température, pendant lequel la croissance cristalline est négligeable car la sursaturation est très faible. Il y avait donc peu de risque de voir se former des agglomérats si on diminuait la vitesse d'agitation au cours de ce palier, or cette diminution pouvait permettre de limiter l'attrition. Un nouveau profil d'agitation dérivé du précédent, mais avec une vitesse initiale plus élevée et une vitesse finale plus faible a donc été testé (FIGURE 2.17-c). La distribution de taille des cristaux qui en résulte présente un peu moins de fines et davantage de gros cristaux, avec un pic majoritaire un peu plus étalé qu'avec

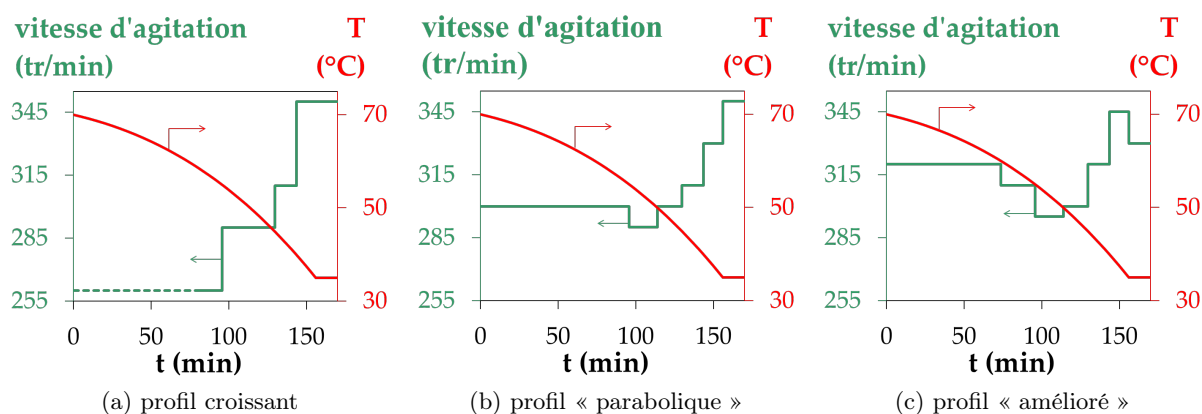


FIGURE 2.17 – Profils de vitesse d’agitation et de refroidissement utilisés pour la cristallisation de la glycine

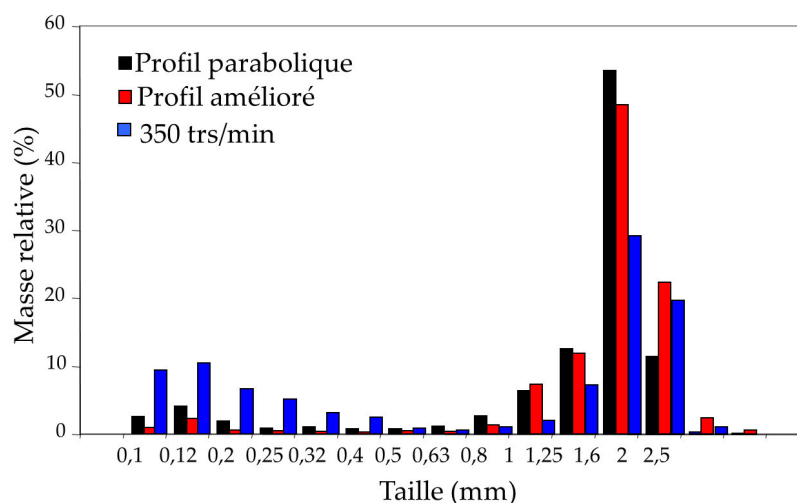


FIGURE 2.18 – Distributions de taille de cristaux pour différents profils d’agitation

le profil dit « parabolique » (histogramme en rouge sur la FIGURE 2.18).

Même si la détermination du profil d’agitation s’est faite par tâtonnement, nous avons démontré l’intérêt de ne pas agiter le cristalliseur à vitesse constante au fil de la cristallisation.

Ces travaux sont détaillés dans :

Damien DESPINOY, Marie DEBACQ, Mihasina RABESIAKA, Béatrice SOMARRIBA, Catherine PORTE, 2003. Mise en place d’un profil de vitesse d’agitation pour améliorer la distribution granulométrique des cristaux de glycine. article de 6 pages paru dans les actes [communication orale *Congrès CRISTAL2*, novembre 2003, Toulouse - France] – [hal-01500270](#)

*

De ma petite expérience, la *CFD* peine à représenter correctement les écoulements mettant en jeu des particules. La *DEM* (*discrete element method*), est une méthode numérique permettant

de simuler le mouvement d'un grand nombre de particules, en modélisant leurs chocs et leurs rebonds; certains simulateurs actuels permettent de rendre également comptes des transferts thermiques entre ces particules [Lu et al., 2015]. Cette méthode n'est aujourd'hui pas encore capable de représenter l'écoulement d'un très grand nombre de petites particules pour une application sur les fours tournants par exemple; les quelques tentatives que j'ai pu voir utilisent des particules beaucoup plus grosses que les grains réels ou bien conduisent à des temps de calcul pour l'instant tout à fait rédhibitoires. On assiste à de plus en plus de conférences sur des travaux couplant la *CFD* et la *DEM* afin de simuler à la fois le comportement des grains et celui du fluide qui l'entoure.

Malgré les défauts actuels que je viens de mentionner, je crois que les progrès de la *DEM* méritent qu'on s'y attarde, en s'associant avec des spécialistes de ce domaine. Comme avec tout simulateur, se pose la question de « caler » correctement les paramètres pour tenter de reproduire les résultats d'une expérience. Jusqu'à présent je n'ai vu que des comparaisons « à l'œil nu », c'est-à-dire que les auteurs présentent une image issue de la simulation à côté d'une prise de vue expérimentale et concluent que les deux « se ressemblent ». Avec des collègues de l'UMR Genial, nous pensons qu'il y a lieu de rendre un peu plus quantitative cette comparaison, en utilisant par exemple des outils d'analyse d'image qui faisaient l'objet de la première partie de ce chapitre. On pourrait imaginer effectuer tout d'abord une étape de « calage » quantitatif, en affinant les paramètres de la simulation *DEM* à partir de résultats expérimentaux dans des cas simples. On aurait alors davantage confiance dans les prédictions que le simulateur pourrait fournir, dans un avenir proche grâce aux progrès des puissances de calcul, sur un tronçon de four tournant par exemple, voire sur un four complet.

2.4 Mesure de $k_L \cdot a$: cas des réacteurs d'ozonation

Le premier chapitre de la thèse d'Olivier CHEDEVILLE s'intitule « Étude hydrodynamique ». Il s'agissait plus précisément de déterminer le produit de la conductance de transfert par l'aire interfaciale $k_L \cdot a$, qui caractérise à la fois de l'hydrodynamique du procédé et des transferts de matière qui s'y produisent.

Le $k_L \cdot a$ est déterminé à partir d'expériences réalisées en régime transitoire en l'absence de réaction chimique et après coupure de l'alimentation en ozone. On identifie ensuite le $k_L \cdot a$ à partir d'un modèle de transfert basé sur un bilan de matière. L'ozone dissous était quantifié par la méthode au carmin indigo. Ces expériences ont permis de déterminer parallèlement la valeur de constante de décomposition de l'ozone dans l'eau, en écrivant le bilan de matière transitoire correspondant à la mise en régime de l'installation avant la coupure de l'ozone.

Des expériences similaires ont été conduites sur la colonne à bulles.

Le $k_L \cdot a$ dans l'éjecteur est de l'ordre de 5 à 8 min^{-1} ; il est de l'ordre de 2 min^{-1} dans la colonne à bulles. L'un comme l'autre dépendent du débit gazeux, mais pratiquement pas du débit liquide. Ces valeurs sont cohérentes avec celles trouvées classiquement pour ce type de contacteurs gaz/liquide. [Roustan, 2003]

Ces résultats sont brièvement repris dans :

Olivier CHEDEVILLE, Marie DEBACQ, Mauro FERRANTE ALMANZA, Catherine PORTE, 2007. Use of an ejector for phenol containing water treatment by ozonation. *Separation and Purification Technology* 57, 201–208. DOI :[10.1016/j.seppur.2007.04.004](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.04.004) - [hal-00984185](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00984185)

Dans la suite de cette thèse, la dégradation du phénol a été étudiée par ozonation dans

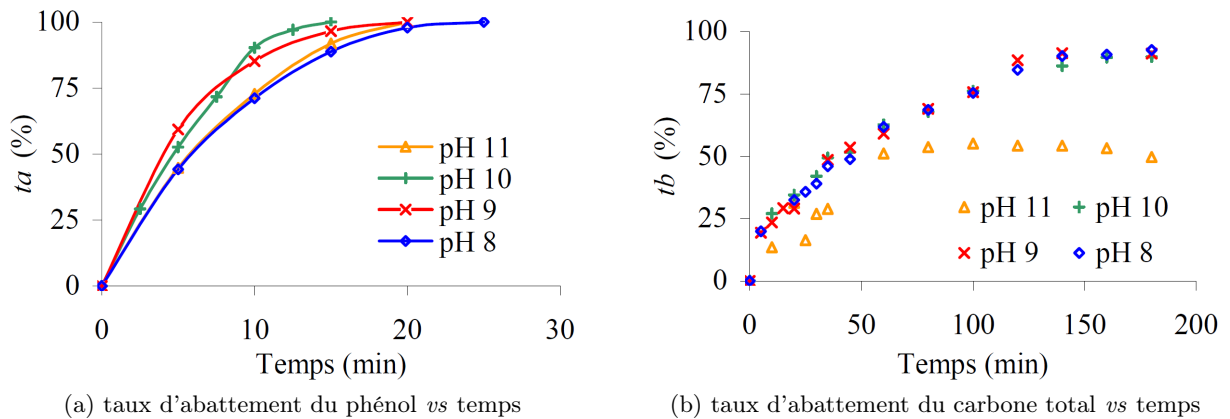


FIGURE 2.19 – Exemple d'expérience de dépollution d'eau phénolée dans l'éjecteur à différents pH

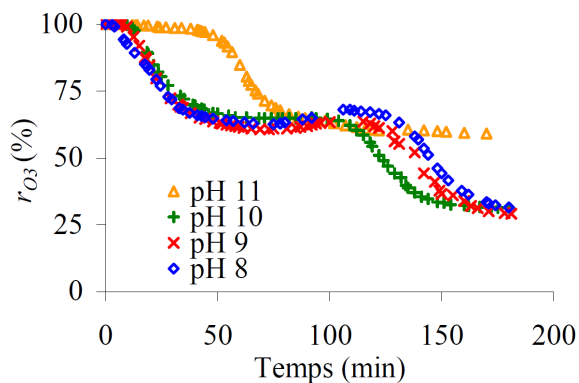


FIGURE 2.20 – Ratio de transfert d'ozone pour la même expérience

l'éjecteur. Un exemple de résultats est montré sur les FIGURES 2.19 et 2.20 pour un débit de liquide de $0,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, un débit de gaz de $0,25 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$, à 20°C et pour des concentrations initiales de 36 g Nm^{-3} en ozone, 5 mM d' H_2O_2 et $4 \cdot 10^{-2} \text{ g m}^{-3}$ en phénol.

Il apparaît que, jusqu'à pH 10, plus le pH est élevé, plus le phénol est rapidement éliminé. En revanche, à pH 11, l'élimination est quasiment aussi lente qu'à pH 8. Il semble donc exister une valeur optimale du pH située aux environs de pH 10 permettant une dégradation rapide du polluant. Dans tous les cas, une élimination totale du polluant est obtenue. En ce qui concerne l'évolution de l'abattement de carbone total, elle est similaire pour les expériences à pH 8, 9 et 10, l'abattement final étant d'environ 90%. À pH 11, le taux de minéralisation est moins élevé, et l'évolution est moins rapide. Enfin, l'évolution du ratio de transfert r_{O_3} montre aussi que l'expérience à pH 11 se détache nettement des autres. Pour les expériences à pH 8, 9 et 10, il existe un première phase correspondant à l'élimination du phénol où le transfert est maximal ($> 90\%$), puis un premier palier (ratio de transfert de 60%) correspondant à l'oxydation des sous-produits (cinétiques réactionnelles plus lentes) et enfin r_{O_3} se stabilise à une valeur seuil (environ 25%). Sur la FIGURE 2.19-b, il apparaît que cette valeur seuil, synonyme de la fin de la réaction est atteinte d'autant plus tôt que le pH est élevé. À pH 11, le palier de transfert maximal est plus long et la réaction n'est toujours pas terminée au bout de 180 min. L'efficacité du traitement n'étant pas améliorée (FIGURE 2.19), il existe donc une décomposition parasite de l'ozone qui

pourrait être due à l'excès de HO_2^- ($pK_{a_{\text{H}_2\text{O}_2/\text{HO}_2^-}} = 11,6$). Les résultats montrent que jusqu'à pH 10, l'augmentation du pH permet d'accélérer la décomposition du phénol et de minimiser la quantité d'ozone nécessaire pour atteindre le même résultat (élimination complète du polluant et abattement du carbone total de 90%). À pH 11, les résultats sont moins satisfaisants : le phénol a été dégradé moins vite, l'abattement du carbone total est seulement d'environ 50% et la quantité d'ozone nécessaire est plus importante. Il semble ainsi exister une valeur optimale du pH située autour de 10.

Les principaux résultats de cette thèse sont présentés dans :

Olivier CHEDEVILLE, Marie DEBACQ, Mauro FERRANTE ALMANZA, Catherine PORTE, 2007. Use of an ejector for phenol containing water treatment by ozonation. *Separation and Purification Technology* 57, 201–208. DOI :[10.1016/j.seppur.2007.04.004](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.04.004) - [hal-00984185](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00984185)

et dans :

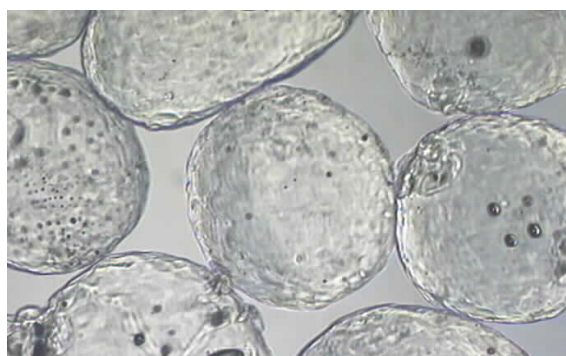
Olivier CHEDEVILLE, Marie DEBACQ, Catherine PORTE, 2009. Removal of phenolic compounds present in olive mill wastewaters by ozonation. *Desalination* 249, 865–869. DOI :[10.1016/j.desal.2009.04.014](https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.04.014)

2.5 Agitation : cas des cristalliseurs

Pendant sa thèse Cifre réalisée à la SNPE, Florent MUSCATELLI a travaillé à l'amélioration des procédés de fabrication de poudres par cristallisation. Pour ce faire il a travaillé sur l'amélioration du profil de température, mais également de l'agitation (choix du mobile et de la vitesse d'agitation). Je ne détaillerai pas sa démarche ni ses résultats ici ; j'illustrerai simplement sur la FIGURE 2.21, un exemple où le contrôle du profil de la température et de l'agitation ont permis d'éliminer les inclusion dans les cristaux de perchlorate d'ammonium.



(a) cristaux obtenus par le procédé antérieur



(b) cristaux obtenus après amélioration du procédé

FIGURE 2.21 – Exemple d'amélioration de la qualité des cristaux de perchlorate d'ammonium

J'ai décrit précédemment (page 71) comment nous avons pu améliorer la distribution de tailles de cristaux en appliquant non pas une vitesse d'agitation constante au cours de la cristallisation, mais en faisant varier cette vitesse pour s'adapter aux phénomènes en cours dans le cristalliseur.

De manière générale, les travaux sur l'agitation des cristalliseurs nous ont permis de produire des cristaux de meilleure qualité, notamment en ce qui concerne leur distribution de taille, et parfois -comme illustré ici- la qualité des cristaux eux-même. Les travaux de Florent MUSCATELLI n'ont pas été publiés (thèse confidentielle) ; ils ont en revanche donné lieu à des progrès significatifs pour la production de divers composés au sein de la SNPE.

2.6 Une « jauge » à niveaux de sable pour le four tournant

Pour calculer les surfaces d'échange thermique, nous avons besoin de connaître la hauteur du lit de poudre dans le four. On peut donner une estimation de cette hauteur -supposée constante- à partir de la charge totale du four. Nous avons souhaité vérifier la vraisemblance de cette hypothèse et avons pour cela conçu un dispositif rudimentaire mais efficace pour mesure la hauteur du lit de poudre dans la zone où nous effectuons nos bilans thermiques. Une canne équipée de batonnets enduits de colle a été construite (FIGURE 2.22), avec des points de mesure concentrés dans la "zone 2" de chauffage du pilote de four tournant du Cnam, zone dans laquelle est établi le bilan thermique qui nous permet d'accéder au coefficient de transfert de chaleur paroi/poudre lors des essais thermiques.

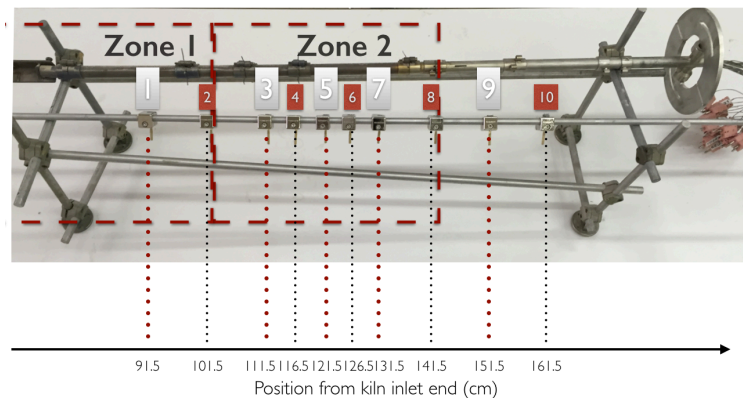


FIGURE 2.22 – Canne de mesure du profil de chargement du four tournant pilote (à côté de la canne de mesure de température)

Le protocole expérimental pour la mesure de hauteur de lit de poudre est résumé sur la FIGURE 2.23. Ces mesures ne sont toutefois réalisables qu'en l'absence de relevelleur.

Sur la FIGURE 2.24, les résultats expérimentaux (points bleus avec barres d'erreur, car chaque essai a été répété 2 voire 3 fois) sont comparés à l'estimation de hauteur de lit constante faite à partir de la mesure du chargement total : la concordance est satisfaisante. On pourra envisager dans le futur de prolonger cette étude en testant quelques autres poudres et configurations et en comparant les résultats avec le modèle classique de profil de chargement de fours tournants [Saeman, 1951].

Ces résultats sont utilisés dans :

Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Marc CLAUSSE, Jean-Louis DIRION, Marie DEBACQ. Wall-to-solid heat transfer coefficient in flighted rotary kilns : experimental determination and modeling. *Experimental Thermal and Fluid Science* 91, 197–213. DOI :[10.1016/j.expthermflusci.2017.10.024](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.10.024) - [hal-01624450](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01624450)



FIGURE 2.23 – Procédure de mesure du profil de chargement du four tournant pilote

*
* *

L'hydrodynamique dans les procédés est un champ d'étude riche, pour lequel de nombreuses techniques expérimentales et numériques existent à différentes échelles ; techniques que je suis d'ailleurs loin d'avoir toutes expérimentées. Les études fouillées à l'échelle macroscopique permettent d'accéder à des informations importantes sur le fonctionnement d'équipements existants (exemple des mesures de DTS sur les pilotes de fours tournants) et même de prendre un caractère prédictif, après une étape de modélisation comme on pourra le voir dans le chapitre suivant. Des études tout aussi fouillées à l'échelle mésoscopique permettent de comprendre, voire d'identifier et plus tard de modéliser, des phénomènes d'écoulement plus locaux (exemples des régimes de mélange en long tube vertical ou de l'hydrodynamique transverse dans les fours tournants munis de relevés). Des études plus rapides à l'échelle macroscopique ou mésoscopique permettent : soit de vérifier une hypothèse usuelle sur les écoulements, avant de poursuivre l'étude des performances d'un procédé innovant (exemple de l'ozonation) ; soit d'explorer, voir de qualifier, une piste d'amélioration des performances d'un procédé, basée sur l'amélioration de son hydrodynamique (exemples en cristallisation). J'ai plusieurs fois constaté que des méthodes qui pourraient sembler par trop artisanales dans le paysage des techniques expérimentales modernes, pouvaient donner des résultats tout à fait probants et parfaitement exploitables, y compris -à partir d'un grand nombre d'essais- en vue d'une modélisation par exemple (cas de la DTS avec du sel de cuisine ou bien de la « jauge » à niveaux de sable pour four tournant).

L'étude hydrodynamique est une étape importante dans l'étude d'un procédé, car comme cela a déjà été plusieurs fois évoqué et sera illustré au chapitre suivant, l'hydrodynamique conditionne l'écriture des bilans de matière et d'énergie, qui sont les piliers du génie des procédés.

Ayant fort à faire avec les travaux de recherche que j'ai encadrés ces quinze dernières années, plus mes importantes occupations en matière d'enseignement et de responsabilités diverses, j'ai un peu perdu le contact avec les travaux des physiciens. C'est pourtant une frontière avec le génie des procédés que je compte contribuer à ré-ouvrir dans le futur (comme beaucoup d'autres dans la communauté du génie des procédés, en particulier dans le domaines des poudres). Car je suis persuadée que nous avons beaucoup à apprendre d'eux en termes de méthodes expérimentales comme numériques. Nous pourrions probablement aussi, comme toujours quand le génie des procédés côtoie les sciences fondamentales, les enrichir de cas d'études qui les challengent.

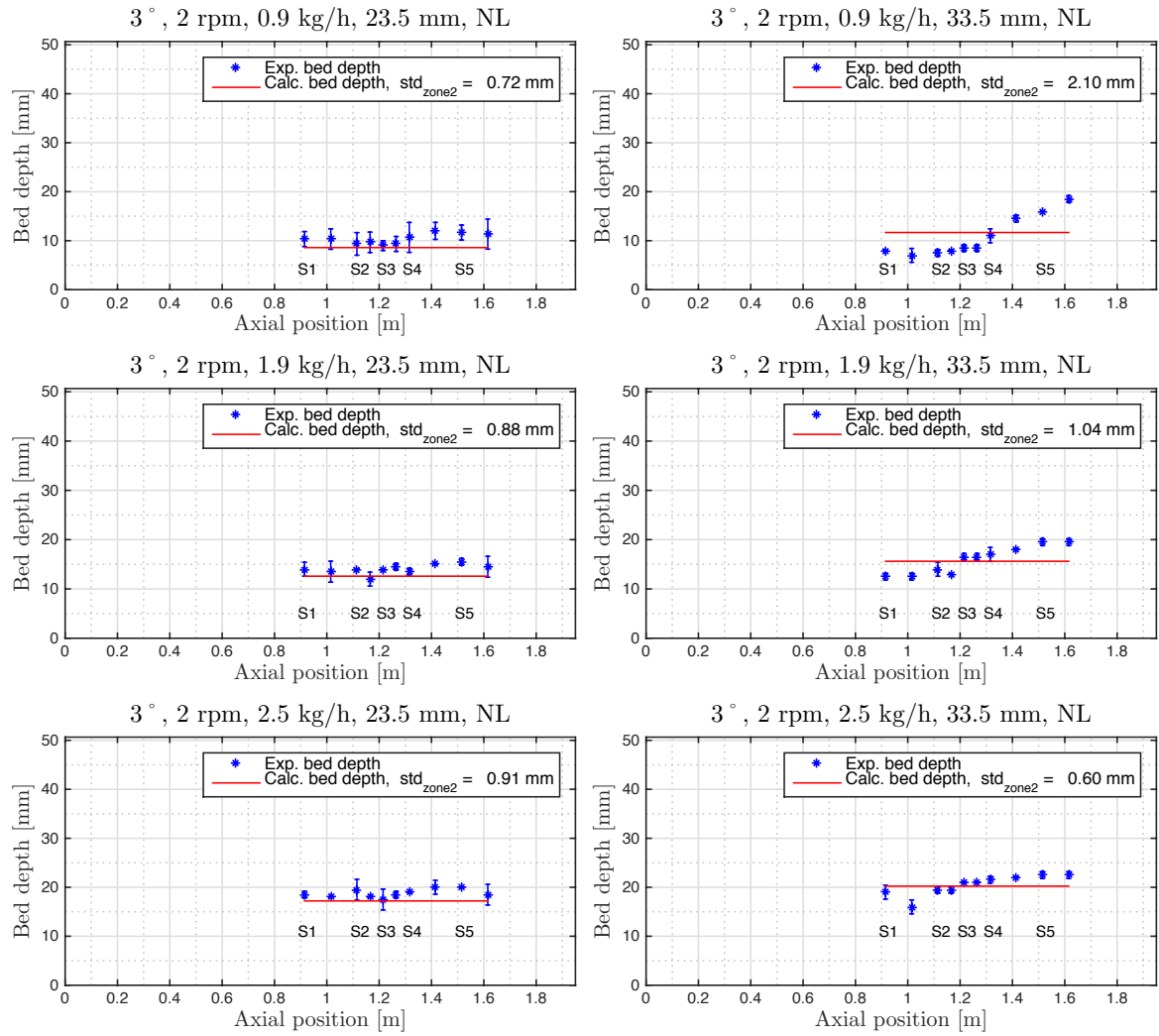


FIGURE 2.24 – Résultats des mesures du profil de chargement du four tournant du Cnam

Chapitre 3

Modélisations

LA MODÉLISATION a pour objectifs d'une part d'organiser/capitaliser la connaissance et d'autre part de fournir « une » représentation du réel. Ainsi MINSKY en 1985 donne la définition suivante : « Un objet A est un modèle d'un objet B si un observateur peut utiliser A pour répondre aux questions qui l'intéresse à propos de B. » MARQUARDT en 1994 précise qu'un modèle est une « abstraction de la réalité qui peut être utilisée pour représenter certains aspects d'un procédé réel, considérés comme importants par le modéleur ». Ces deux définitions figurent sur la première page de la présentation que je fais aux auditeurs du Cnam du cours de modélisation/simulation de procédés. Elles soulignent parfaitement le fait que d'un même procédé, on pourrait proposer de nombreux modèles, selon le degré de complexité que l'on est capable de décrire ou plutôt selon l'objectif que l'on veut atteindre. Je les invite donc à réfléchir avant de se lancer à ce qu'ils souhaitent obtenir et aux moyens dont ils disposent pour cela, puis choisir le type de modèle à mettre en œuvre et l'outil de simulation associé. Sur la deuxième page du même cours, figure une définition de la simulation : « c'est un calcul (généralement non-manuel), la résolution d'une (ou plusieurs) équation(s couplées) à partir de données d'entrée, éventuellement sous contraintes. »

Il est d'usage en génie des procédés, comme le fait Xuan-Mi MEYER [[Techniques de l'ingénieur J1021 \(2012\)](#)], de différencier quatre catégories de modèles, par ordre de connaissance décroissante et de nombre d'expériences à mener croissant :

- le modèle de connaissance pure, basés uniquement sur la connaissance théorique du système, qu'il est aujourd'hui encore difficile d'écrire et encore plus difficile de simuler ;
- le modèle phénoménologique (également dit « boîte grise »), basés le plus possible sur des lois physiques, mais dans lesquels on a recours pour certains aspects à des corrélations empiriques, soit pour simplifier la simulation, soit par manque de connaissance ; on commence par écrire les bilans de matière et d'énergie, mais aussi de conservation de la quantité de mouvement (c'est le modèle hydrodynamique), auxquels on ajoute des équations constitutives (modèles thermodynamiques, corrélations diverses) et des équations de contraintes (équations de fermeture, conditions aux limites, équations d'équilibres, contraintes mathématiques liées au contrôle et à l'optimisation par exemple) ;
- le modèle hybride, qui combine par exemple l'écriture de bilans et des réseaux de neurones ; on peut y avoir recours notamment pour des systèmes réactifs très complexes comme les combustions ou les systèmes biologiques, mettant en jeu des dizaines voire des centaines de réactions chimiques ;
- le modèle empirique ou modèle comportemental (dit « boîte noire »), basés uniquement sur l'information expérimentale et qui peut se présenter sous la forme d'une fonction de transfert, d'un réseau de neurones ou simplement d'un polynôme.

Xuan-Mi MEYER classe les modèles obtenus par analyse dimensionnelle (objet de la première partie de ce chapitre) dans la dernière catégorie tout en soulignant que « cette approche mérite de garder toute l'attention de la communauté de génie des procédés ».

Le second type de modèle que j'ai eu l'occasion de développer (voir seconde partie de ce chapitre) est clairement à classer dans les modèles phénoménologiques.

Pour faire le parallèle avec l'approche multi-échelle présentée en introduction du précédent chapitre, on peut aussi montrer les différentes échelles de modélisations comme sur la FIGURE 3.1. Dans cette classification, je me concentre sur l'échelle nommée ici "Simulation de réacteurs", entre le mm et le m.

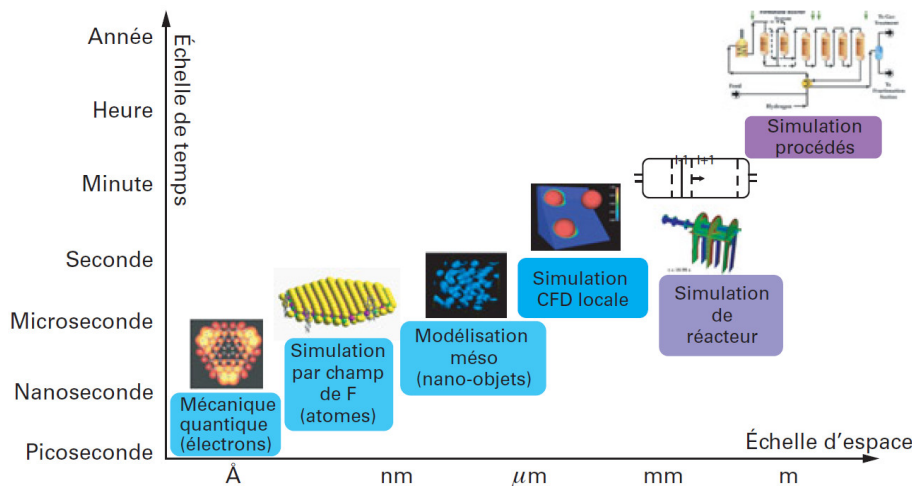


FIGURE 3.1 – Différentes échelles de modélisation et simulation en génie des procédés [Jean-Claude Charpentier, Techniques de l'Ingénieur J500 (2013)]

Comme le précédent, ce chapitre est organisé au premier niveau par méthodes de modélisation et au second niveau, lorsqu'il y a lieu, par exemples d'application.

Sommaire

3.1 Analyse dimensionnelle	82
3.1.1 Cas du mélange gravitaire	83
3.1.2 Cas du four tournant	84
3.2 Modélisation phénoménologique basée sur l'hydrodynamique : cas du four tournant	90

3.1 Analyse dimensionnelle

L'analyse dimensionnelle (AD) a une longue histoire et a été développée par de nombreux grands scientifiques : Galilée, Newton, Fourier, Froude, Reynolds, etc.. Elle est notamment remarquable pour son universalité d'application : en mathématiques, en physique, en génie des procédés pour ce qui nous occupe ici, mais aussi en finance ou en économie. Comme son nom l'indique, elle est basée sur l'analyse des unités de grandeurs étudiées. Elle permet de déterminer *a priori* la forme d'une équation à partir d'hypothèses sur les grandeurs qui gouvernent l'état d'un système. L'analyse dimensionnelle a en particulier été utilisée ces derniers temps de plus en plus comme guide de conception expérimentale, pour l'établissement de lois de similarité ou

la corrélation de données expérimentales, en vue de se confronter à l'extrapolation, comme en témoignent quelques exemples dans [Delaplace et al., 2014].

3.1.1 Cas du mélange gravitaire

Cette section est consacrée à la modélisation des résultats expérimentaux obtenus sur le tube de mélange (voir 2.1.1 page 53).

Le caractère diffusif du mélange est associé aux mouvements aléatoires dans la zone d'interpénétration des fluides. Comme pour tout processus de marche au hasard, le coefficient de diffusion D peut être considéré comme étant le produit de la vitesse caractéristique V des particules fluides et de leur taille caractéristique l . La vitesse V est déterminée quantitativement grâce aux diagrammes spatio-temporels : elle correspond à la pente des lignes obliques plus sombres et plus claires que l'on distingue dans la zone de mélange (voir FIGURE 2.2-d,e,f page 55). V croît avec le nombre d'Atwood, avec la viscosité des fluides et avec le diamètre du tube. L'augmentation de D et V avec la viscosité des fluides peut paraître *a priori* surprenante. Toutefois, nous avons observé qu'en augmentant la viscosité des fluides (tous les autres paramètres étant conservés), l'écoulement est moins turbulent, donc le mélange est moins efficace à petite échelle et les contrastes de densité locaux sont plus élevés. Ainsi, pour un même contraste de densité global (reflété par le nombre d'Atwood), les contrastes locaux sont d'autant plus grands que la viscosité des fluides est élevée. Ce contraste local élevé augmente la flottabilité et donc la vitesse V des particules fluides. Le coefficient de diffusion macroscopique D augmente lui-aussi, puisqu'il est le produit de V par une longueur caractéristique.

Le nombre de Reynolds calculé à partir de la vitesse V mesurée, de la viscosité cinématique ν et du diamètre d du tube ($Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$) varie de 30 à 1000 pour nos expériences. La vitesse caractéristique la plus adaptée, et qui peut être exprimée à partir des paramètres de contrôles de l'expérience, est alors celle de Taylor, déterminée par l'équilibre entre inertie et flottabilité. Cependant, pour des raisons de commodité, nous utiliserons une vitesse de Taylor définie, non pas à partir du rapport $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ comme habituellement, mais faisant apparaître le nombre d'Atwood : $V_t = \sqrt{At \cdot g \cdot d}$. On peut alors calculer le nombre de Reynolds $Re_t = \frac{V_t \cdot d}{\nu}$ correspondant à cette vitesse, toujours avec le diamètre du tube comme longueur caractéristique.

On voit sur la FIGURE 3.2 que lorsque l'on trace $\frac{D}{\nu}$ vs Re_t l'ensemble de nos mesures se rassemblent sur une seule courbe maîtresse : jusqu'à Re_t autour de 1000, $\frac{D}{\nu}$ est à peu près constant, égal à 200 ; $\frac{D}{\nu}$ croît ensuite avec Re_t .

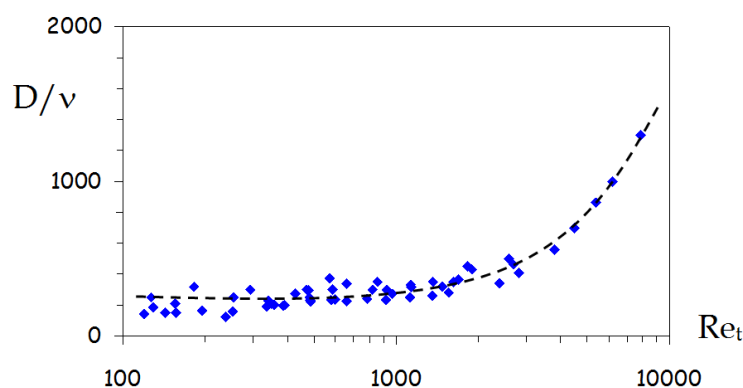


FIGURE 3.2 – Synthèse sous forme adimensionnelle de l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur le tube de mélange

Ces travaux sont détaillés dans :

Marie DEBACQ, Jean-Pierre HULIN, Dominique SALIN, Bernard PERRIN, E. John HINCH, 2003. Buoyant mixing of miscible fluids of varying viscosities in vertical tubes. *Physics of Fluids* 15, 3846–3855. DOI :[10.1063/1.1624838](https://doi.org/10.1063/1.1624838)

La construction du couple de nombre adimensionnels pour obtenir une unique courbe maîtresse est en particulier discutée dans la section V de cette publication.

Le coefficient de diffusion étant ainsi corrélé, il devient possible de prédire la hauteur de mélange en fonction du temps pour les paramètres du problème (nombre d'Atwood, viscosité et diamètre du tube).

3.1.2 Cas du four tournant

Dans le cadre de la thèse d'Alex BONGO NJENG, l'analyse dimensionnelle a été utilisée dans le but de corréliser les résultats expérimentaux obtenus d'une part sur l'hydrodynamique et d'autre part sur les transferts thermiques. Cette analyse nécessite d'identifier au préalable au moins les variables les plus importantes influençant le phénomène à décrire.

Modélisation de l'hydrodynamique macroscopique des fours tournants par analyse dimensionnelle

Les mesures de distribution des temps de séjour décrites dans la seconde partie de la section 2.2.1 page 62 ont ainsi permis de modéliser :

- le temps de séjour moyen \bar{t} ou MRT ,
- la dispersion axiale D ,
- le taux de chargement global.

Un premier modèle a été établi à partir des 69 premières expériences réalisées sur le four du Cnam avec du sable médian et du riz concassé, dont les propriétés sont données dans le TABLEAU 1.2 page 49. Le modèle #1 correspondant pour le temps de séjour moyen par exemple, est celui de l'ÉQUATION 3.1.

$$\bar{t} = k \cdot \frac{\rho_{bulk} L D^2}{Q_m} \left(\frac{N^2 D}{g} \right)^\alpha \left(\frac{D_{open}}{D} \right)^\beta (\theta)^\gamma (S)^\delta \left(\frac{Q_m}{\rho_{bulk} N L D^2} \right)^\epsilon \left(\frac{4 S_{lift}}{\pi D^2} \right)^\epsilon \left(\frac{\rho_{bulk}}{\rho_{tapped}} \right)^\zeta \left(\frac{L}{D} \right)^\eta \quad (3.1)$$

où L est la longueur du four tournant, D son diamètre, S son inclinaison et N sa vitesse de rotation; ρ_{bulk} et ρ_{tapped} sont les masses volumique apparentes et tassées de la poudre; θ est l'angle de talus de la poudre; Q_m est son débit massique; $S_{lift} = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{n_{lift}-1}{2} \cdot S_{horlift}$ permet de tenir compte du nombre n_{lift} de releveurs et de leur capacité de relevage ($S_{horlift}$ étant la section de poudre dans le releveur en position horizontale); cette définition a l'avantage de rendre la corrélation opérationnelle avec comme sans releveurs (en l'absence de releveurs, $\frac{4 S_{lift}}{\pi D^2} = 1$).

On peut reconnaître dans cette équation le nombre de Froude $\frac{N^2 D}{g}$, le rapport d'aspect du four $\frac{L}{D}$ ou encore le rapport d'Hausner $\frac{\rho_{bulk}}{\rho_{tapped}}$. Les groupes $\frac{\bar{t} Q_m}{\rho_{bulk} L D^2}$ ou $\frac{Q_m}{\rho_{bulk} N L D^2}$ sont similaires à ceux proposées par [Chatterjee et al., 1983]. $\frac{D_{open}}{D}$ quantifie la fraction de section laissée ouverte à l'écoulement de la poudre par le diaphragme en sortie; de même ce rapport a du sens avec ou sans diaphragme (dans ce second cas il vaut 1).

Le TABLEAU 3.1 donne les valeurs des coefficients du modèle #1 : sur les deux premières lignes les valeurs obtenues avec une seule poudre et sur la dernière celles déterminées à partir de

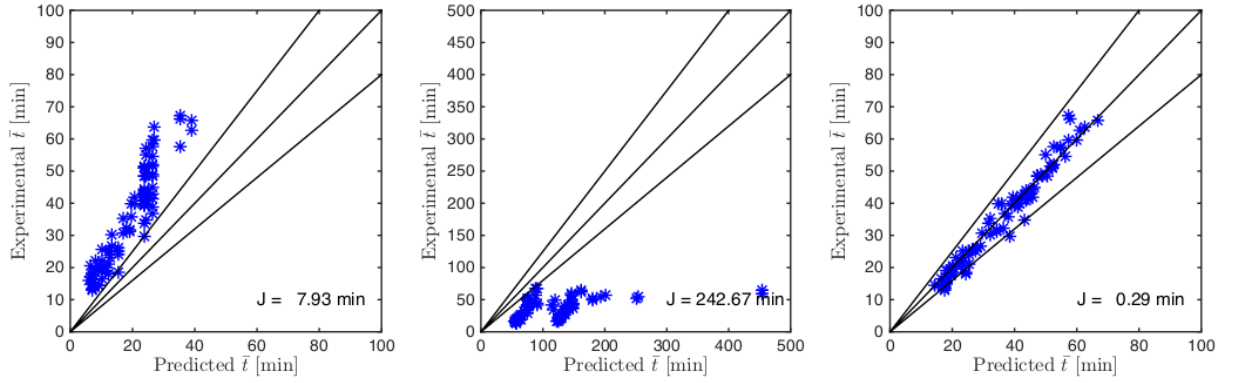


FIGURE 3.3 – Comparaison entre les résultats expérimentaux pour le temps de séjour moyen et les prédictions du modèle #1 ou d’autres modèles de la littérature à gauche, modèle de [Chatterjee et al., 1983] ; au centre modèle de [Shahhosseini et al., 2000] ; à droite notre modèle (Le facteur J quantifie l’erreur du modèle : plus il est faible, meilleure est la prédiction du modèle.)

l’ensemble des 69 essais. Comme nous n’étions pas en mesure de faire varier le rapport d’aspect du four, la valeur $\eta = 1.1$ est issue des résultats de [Chatterjee et al., 1983].

TABLEAU 3.1 – Coefficients du modèle #1 pour le temps de séjour moyen

	k	α	β	γ	δ	ϵ	ε	ζ
Sable médian	0,1363	0,0508	-0,4008	0,8749	-0,9814	0,8115	-4,5285	0,7723
Riz concassé	0,0792	-0,0218	-0,3387	0,8749	-1,2277	0,8184	-8,0175	0,7723
Sable & Riz	0,2611	0,0842	-0,3649	0,8749	-1,1243	0,8350	-5,5283	0,7723

Comme on peut le voir sur le dernier graphique de la FIGURE 3.3, ce modèle #1 représente de manière très satisfaisante l’ensemble des résultats à partir desquels il a été établi. Ses performances ont également été comparées avec celles d’autres modèles de la littérature sur cette FIGURE 3.3.

Des modèles similaires et d’aussi bonne qualité ont pu être établis pour la dispersion axiale et le taux de chargement.

Plus important encore, ce modèle prédit remarquablement les résultats obtenus sur le four du centre Rapsodee, deux fois plus gros et travaillant avec des plaquettes forestières, comme on peut le voir sur la FIGURE 3.4.

Le modèle #1 a ensuite été enrichi avec les mesures réalisées à Albi et a été amélioré dans sa conception, après lecture attentive de [Delaplace et al., 2014], pour obtenir le modèle #2 de l’ÉQUATION 3.2 avec les paramètres du TABLEAU 3.2.

$$\bar{t} = k \cdot \sqrt{gL} \left(\frac{N^2 D_i}{g} \right)^\alpha \left(\frac{D_{open}}{D_i} \right)^\beta \left(\frac{\theta}{S} \right)^\gamma \left(\frac{Q_m}{\rho_{bulk} D_i^2 \sqrt{gL}} \right)^\delta \left(\frac{4S_{lift}}{\pi D_i^2} \right)^\epsilon \left(\frac{\rho_{bulk}}{\rho_{tapped}} \right)^\zeta \left(\frac{L}{D_i} \right)^{1.1} \quad (3.2)$$

Les notations sont les mêmes que pour le modèle #1. D_i est le diamètre interne du tube tournant, qui nous a finalement semblé plus pertinent pour cette étude.

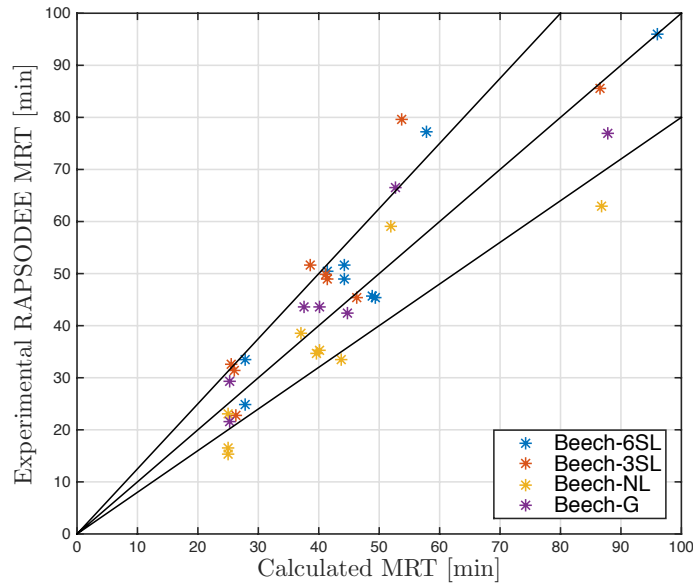


FIGURE 3.4 – Comparaison entre les prédictions du modèle #1 pour le temps de séjour moyen et les nouveaux résultats obtenus sur le four du centre Rapsodee avec les plaquettes forestières

TABLEAU 3.2 – Coefficients du modèle #2 pour le temps de séjour moyen

k	α	β	γ	δ	ϵ	ζ
0,0026	-0,4422	-0,3597	0,9276	-0,1130	-8,8835	-2,4641

La FIGURE 3.5 démontre que ce nouveau modèle représente de manière très satisfaisante l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur les 2 fours avec les 3 types de poudres.

Comme pour le modèle #1, des résultats similaires (en forme et en performance) ont été obtenus pour la dispersion axiale et le taux de chargement.

Une fois bien décrites les différentes grandeurs qui apparaissent dans ces modèles, et pour peu que l'on ait quelque confiance dans leur pouvoir prédictif, il devient possible de prédire le temps de séjour moyen, la dispersion axiale et le taux de chargement de n'importe quel four tournant. Or notre expérience récurrente auprès d'industriels de secteurs variés est qu'ils n'ont généralement aucune idée du « simple » temps de séjour moyen dans leurs équipements.

Nous souhaitons à présent récolter un maximum de résultats expérimentaux obtenus sur des installations variées, afin de mettre à l'épreuve notre modèle et le cas échéant l'améliorer.

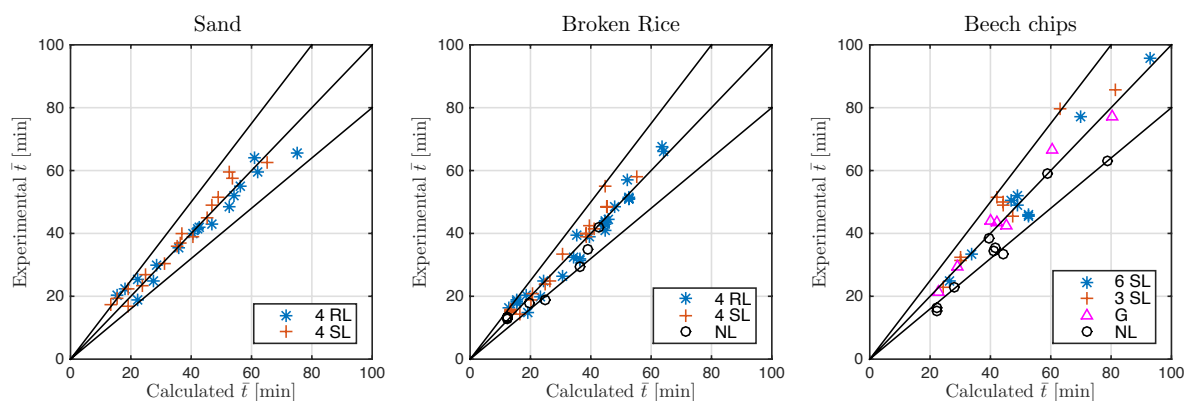


FIGURE 3.5 – Vérification de la qualité du modèle #2

Ces travaux sont détaillés dans :

Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Marc CLAUSSE, Jean-Louis DIRION, Marie DEBACQ, 2015. Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln : Part II. Experimental hold-up and mean residence time modeling. *Powder Technology* 269, 566–576. DOI :[10.1016/j.powtec.2014.05.070](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.070) - [hal-01071437](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071437) et

Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Marc CLAUSSE, Jean-Louis DIRION, Marie DEBACQ, 2016. Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln : Part III. Up-scaling considerations and segregation analysis. *Powder Technology* 297, 415–428. DOI :[10.1016/j.powtec.2016.04.052](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.04.052) - [hal-01486593](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01486593)

Modélisation du coefficient de transfert thermique paroi/poudre dans les fours tournants par analyse dimensionnelle

Des expériences ont été menées pour diverses conditions opératoires dans le pilote de four tournant du Cnam (à chauffage indirect), pendant lesquelles nous avons enregistré les profils de température du gaz, du solide et de la paroi du tube (FIGURE 3.6).

À partir de bilans d'énergie, de ces relevés de température et de l'enregistrement de la puissance fournie au système, la valeur du coefficient d'échange paroi/solide a pu être déterminée. Il faut souligner que ce bilan thermique repose sur le modèle hydrodynamique, car pour calculer les surfaces d'échanges thermiques nécessaires, il faut connaître la hauteur du lit de poudre ; celle-ci est déduite du chargement total en supposant que le lit est plat (hypothèse qui avait pu être vérifiée grâce aux mesures réalisées avec la « jauge » à niveaux de sable - voir section 2.6 page 77).

L'influence des paramètres opératoires, tels que la vitesse de rotation du four, le taux de remplissage, la forme des relevés ou la température de consigne de chauffage sur le coefficient d'échange a été étudiée et analysée. Une corrélation est proposée pour l'estimation du coefficient d'échange paroi/solide pour des températures comprises entre 100 et 500°C. La comparaison des prédictions du modèle avec les résultats expérimentaux est satisfaisante (FIGURE 3.7). Une comparaison a aussi été faite avec des modèles existants ; bien que l'ordre de grandeur des prédictions soit cohérent avec les valeurs expérimentales, ces modèles permettent de prendre en compte les variables opératoires beaucoup moins bien que le modèle que nous avons développé (FIGURE 3.8).

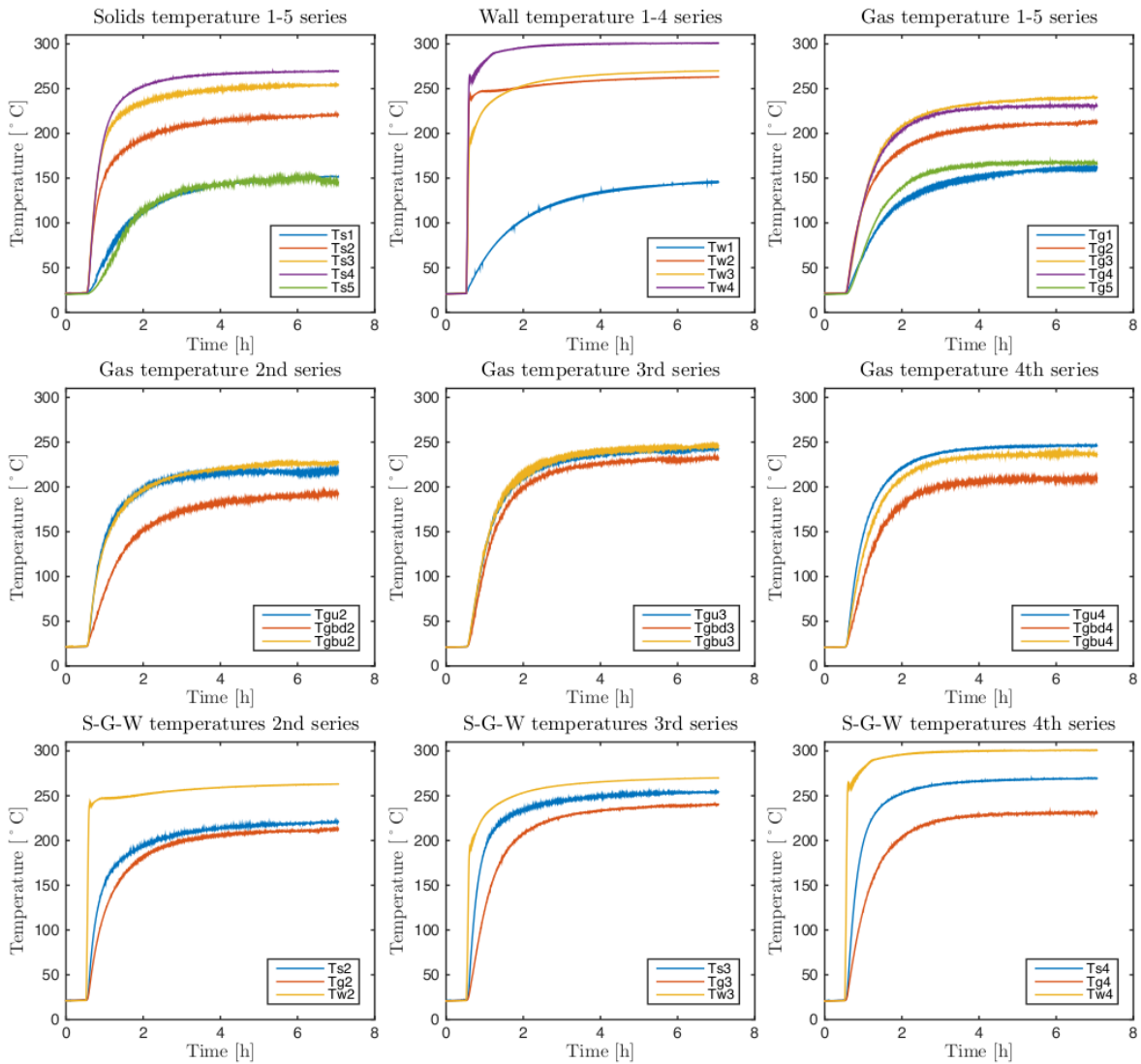


FIGURE 3.6 – Profils de température obtenus sur le four tournant pilote du Cnam avec une vitesse de rotation de 2 rpm, une inclinaison de 3° , un débit de solide de $3,5 \text{ kg h}^{-1}$, une hauteur de diaphragme en sortie de 33,5 mm, 4 relevés plats et une consigne de température à 300°C sur la zone 2 (la zone 1 n'étant pas chauffée); les numéros de séries correspondent à ceux de la FIGURE 1.30 page 50

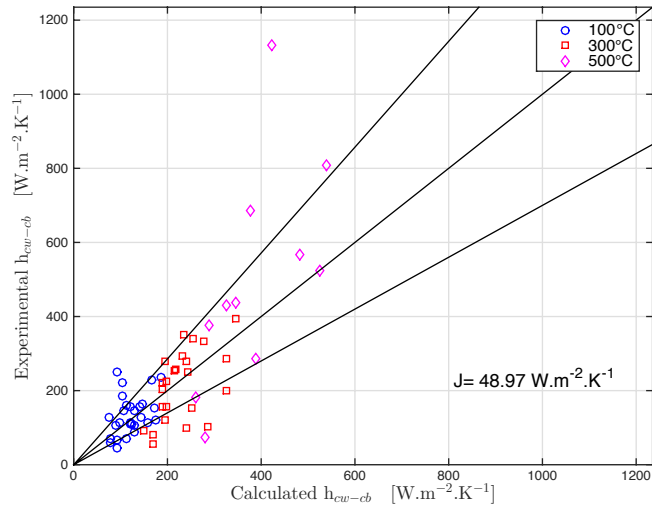


FIGURE 3.7 – Vérification de la qualité du modèle pour le coefficient de transfert thermique paroi/poudre

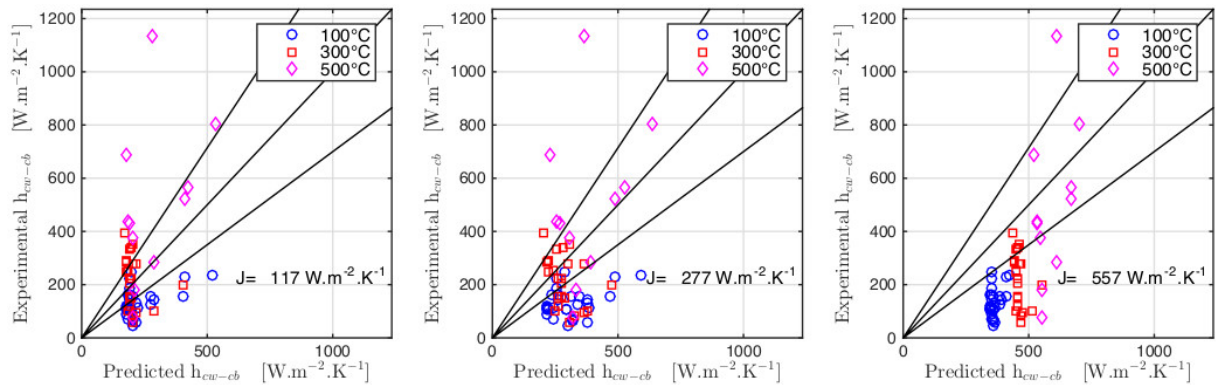


FIGURE 3.8 – Comparaison de la qualité de notre modèle pour le coefficient de transfert thermique paroi/poudre avec d'autres prédictions
à gauche modèle [Wes et al., 1976]; au centre modèle [Tscheng and Watkinson, 1979]; à droite modèle [Li et al., 2005]

Ces travaux sont détaillés dans :

Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Marc CLAUSSE, Jean-Louis DIRION, Marie DEBACQ. Wall-to-solid heat transfer coefficient in flighted rotary kilns : experimental determination and modeling. *Experimental Thermal and Fluid Science* 91, 197–213. DOI : [10.1016/j.expthermflusci.2017.10.024](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.10.024) - [hal-01624450](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01624450)

Le bilan thermique qui permet d'accéder au coefficient de transfert repose sur de nombreuses hypothèses et certaines grandeurs nécessaires à son écriture sont difficiles à estimer. Il est donc nécessaire de poursuivre cette étude afin d'une part de renforcer notre confiance dans la détermination du coefficient d'échange thermique solide/paroi et d'autre part d'accroître l'assise expérimentale afin de rendre le modèle adimensionnel plus prédictif.

*

L'analyse dimensionnelle est parfaitement adaptée à la capitalisation de connaissances. Bien que classée comme modèle empirique, elle a montré -au moins pour le cas de l'hydrodynamique macroscopique dans les fours tournants- un pouvoir prédictif remarquable.

3.2 Modélisation phénoménologique basée sur l'hydrodynamique : cas du four tournant

Enseigner le Génie de la réaction chimique m'a rappelé combien l'hydrodynamique conditionne la manière d'écrire les bilans de matière et de chaleur sur les réacteurs et plus généralement toutes les opérations du génie des procédés. En effet, avant d'écrire le bilan matière sur l'espèce clé dans un réacteur homogène idéal par exemple, on doit se poser la question de savoir s'il est piston ou parfaitement agité.

À ce jour je n'ai qu'un seul exemple à décrire dans cette section. Plusieurs autres procédés sur lesquels j'ai eu l'occasion de travailler auraient pu faire l'objet d'une démarche similaire ; nous ne l'avons pas fait faute de temps ou faute d'avoir su convaincre les décideurs de la pertinence de cette approche.

Le modèle global des fours tournants de défluoration et réduction du difluorure d'uranyle est obtenu par discrétisation des équations régissant les phénomènes : hydrodynamiques ; de transferts de matière et de réactions chimiques ; de transferts thermiques. Les paramètres de ce modèle ont été mesurés expérimentalement ou estimés à l'aide de corrélations de la littérature.

J'ai pris le parti de ne montrer ici aucune équation. Le lecteur intéressé pourra se reporter pour plus de détails, au dernier chapitre de [ma thèse](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00974273/document) <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00974273/document>>.

Discrétisation des fours

Les mesures de Distribution des Temps de Séjour ont montré que le mouvement axial de la charge solide était de type piston avec dispersion axiale. Les fours peuvent donc être décrits par un modèle de cascade de réacteurs parfaitement agités. Les travaux rapportés dans la littérature [[Barr et al., 1989](#), [Boateng and Barr, 1996](#)] soulignent en outre le caractère essentiellement transversal des échanges thermiques. Ceci nous a conduit à envisager une modélisation des fours par discrétisation en tranches successives, dans lesquelles sont résolus les bilans thermiques et

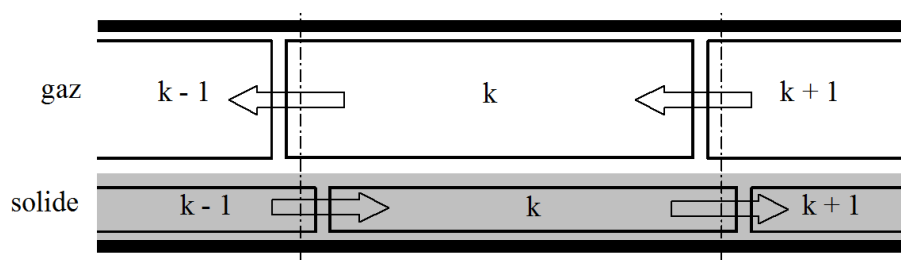


FIGURE 3.9 – Décalage des tranches de discrétisation côté solide et côté gaz pour la modélisation des fours tournants

les bilans de matière. Le nombre de ces tranches est déterminé à partir des mesures de DTS. Il reste à décrire en détail chacune de ces tranches.

Le contre-courant gaz/solide crée une difficulté, car les débits gazeux ne sont connus qu'au niveau de la sortie du four et les débits de solide qu'au niveau de l'entrée. Pour limiter le nombre d'itérations nécessaires au calcul, nous avons repris l'idée de [Nicole, 1996] : les tranches de discrétisation de la phase solide et de la phase gazeuse sont décalées, comme illustré sur la FIGURE 3.9. Le sens de calcul choisi est celui de l'écoulement du solide. Dans chaque tranche, chaque phase se comportant comme un réacteur parfaitement agité, les grandeurs sont uniformes dans la tranche et à sa sortie (le terme sortie s'entend ici en lien avec le sens de circulation de la phase considérée). Ainsi, avec cette représentation, lors de la résolution des bilans dans une tranche k , toutes les grandeurs concernant le gaz sont connues, car elles ont été calculées à la tranche précédente (comme étant celles du gaz qui entre dans la tranche $k - 1$).

Modèle hydrodynamique

Pour déterminer le taux de remplissage dans chaque tranche, il faut calculer le profil de chargement axial à partir du modèle de [Saeman, 1951], c'est-à-dire résoudre une équation différentielle du premier ordre reformulée par [Kramers and Croockewit, 1952] à l'aide de la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4. La condition limite suggérée par [Afacan and Masliyah, 1990] en l'absence de diaphragme, consiste à imposer une hauteur de lit en sortie de four égale à la hauteur des relevateurs dans la direction orthogonale à la paroi.

Du fait de la variation de densité du solide en cours de réaction (voir TABLEAU 2.1 page 57), le débit volumique de solide n'est pas constant le long du four et dépend du profil de conversion. Or les bilans matière dépendent également étroitement du taux de remplissage. Ce fort couplage implique un processus itératif dans le code de calcul afin de converger sur le profil de chargement.

L'écoulement transversal de la poudre est caractérisé par la répartition moyenne de la poudre dans chaque tranche (FIGURE 3.10-a).

Cette répartition moyenne est calculée en fonction du taux de remplissage dans cette tranche et de la vitesse de rotation à partir du modèle hydrodynamique décrit dans :
 Marie DEBACQ, Phahath THAMMAVONG, Stéphane VITU, Denis ABLITZER, Jean-Léon HOUZELOT, Fabrice PATISSON, 2013. A hydrodynamic model for flighted rotary kilns used for the conversion of cohesive uranium powders. *Chemical Engineering Science* 104, 586–595. DOI :[10.1016/j.ces.2013.09.037](https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.09.037) - [hal-00908458](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00908458)

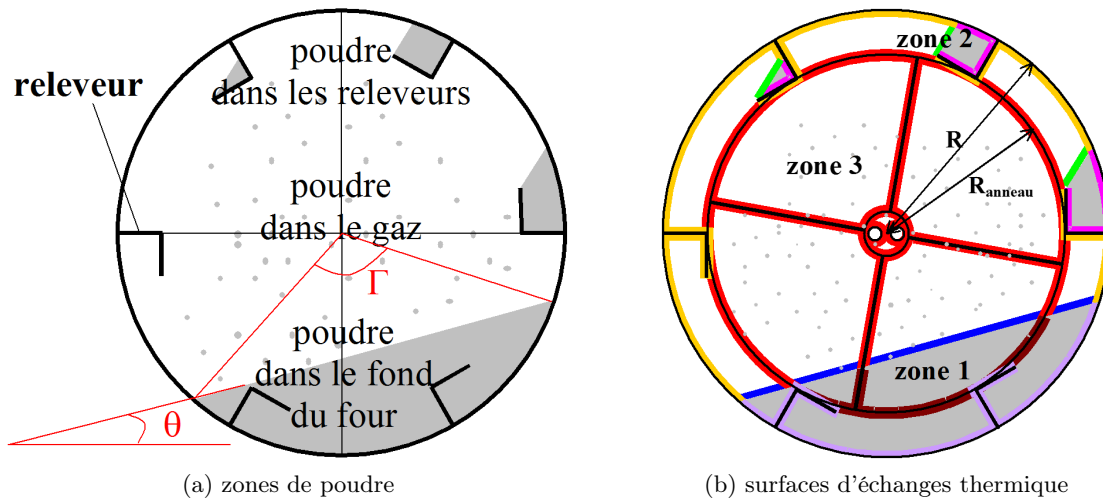


FIGURE 3.10 – Coupes transversales d'une tranche de four

Transferts de matière et réactions chimiques

Pour résoudre les bilans matière dans chaque tranche, il est nécessaire de calculer l'avancement de chacune des trois réactions suivantes dans la tranche considérée :

- (1) $\text{UO}_2\text{F}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{UO}_3 + 2 \text{HF}$
- (2) $\text{UO}_3 \rightarrow \frac{1}{3} \text{U}_3\text{O}_8 + \frac{1}{6} \text{O}_2$
- (3) $\frac{1}{3} \text{U}_3\text{O}_8 + \frac{2}{3} \text{H}_2 \rightarrow \text{UO}_2 + \frac{2}{3} \text{H}_2\text{O}$

Pour plus de commodité, U_3O_8 est représenté dans le modèle par son équivalent monomère : $\text{UO}_{8/3}$.

Aux températures du procédé, la réaction de recombinaison de l'hydrogène et de l'oxygène doit aussi être prise en compte :

- (0) $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Modèle de transfert de matière Dans chaque tranche de four, on distingue trois zones de poudres (FIGURE 3.10) où les transferts de matière sont différents. Dans le fond du four (zone 1), la poudre est brassée et le gaz emprisonné entre les grains de solide est donc régulièrement renouvelé. Dans les releveurs (zone 2), au contraire, le gaz n'est pas renouvelé. Enfin les paquets de poudre chutant à travers le gaz (zone 3) sont supposés réagir en régime purement chimique. Nous avons utilisé l'approche des temps caractéristiques additifs de [Szekely and Sohn, 1976] : le temps nécessaire pour obtenir une conversion donnée est la somme des temps qui seraient nécessaires pour obtenir cette même conversion en régime de transfert externe, en régime de diffusion interne et en régime chimique. Cette méthode est exacte pour une réaction du premier ordre dans le cas de particules non poreuses, mais selon Szekely et Sohn, elle peut être étendue, sous sa forme différentielle, à la plupart des réactions gaz-solide. La loi des temps caractéristiques additifs est habituellement utilisée à l'échelle des particules solides. Dans le cas présent nous nous proposons de l'appliquer (dans une tranche donnée) à l'ensemble du lit de poudre d'une part, et à l'ensemble de la poudre contenue dans un relevateur d'autre part.

Pour les réactions (1) et (3), il faut déterminer une équation différentielle pour chacune des trois zones afin de déterminer sa contribution à l'avancement de la réaction considérée. La réaction (2), décomposition thermique ne faisant pas intervenir de réactif gazeux, est supposée avoir lieu

en régime chimique. La réaction (1) étant renversable, l'expression de sa vitesse tient compte de la teneur en acide fluorhydrique. Les réactions (1) et (2) sont en outre accélérées en présence d'hydrogène, d'après les études cinétiques réalisées par thermogravimétrie. Dans la zone 1, pour rendre compte du brassage dû aux releveurs, nous avons dû ajuster la valeur du temps caractéristique de « diffusion ». Actuellement, il est pris égal au temps de mélange du lit de poudre, qui est, comme le temps caractéristique de diffusion, une expression du temps de renouvellement du gaz. Ce temps de mélange avait pu être estimé lors de l'étude hydrodynamique : il correspond à environ deux révolutions de four. Les équations relatives à la zone 1 font intervenir l'angle de remplissage correspondant à cette zone, qu'il aurait été nécessaire de déterminer à partir du modèle hydrodynamique par le biais d'une équation implicite. Pour limiter le temps de calcul, cette équation implicite a été approchée par une expression explicite.

La conductance de transfert externe est estimée à partir de la relation de Churchill. Le coefficient de diffusion interne tient compte de la diffusivité moléculaire ordinaire et de la diffusivité de Knudsen. Les paramètres cinétiques avaient été déterminés à l'aide d'essais thermogravimétriques.

Bilans matière L'alimentation du four tournant, côté solide, contient uniquement de l' UO_2F_2 ; côté gaz, c'est un mélange H_2O , H_2 , N_2 . Dans le cas des fours COGEMA, l'alimentation en H_2 est répartie sur plusieurs points d'injection ; le flux molaire dans chaque orifice n'étant pas accessible, on a supposé que le flux total se répartit équitablement. En outre la vapeur d'eau et l'azote n'étant pas forcément injectés tout à fait en sortie de four, leur injection est prise en compte à l'aide du terme source supplémentaire dans les tranches concernées. On calcule l'avancement de chaque réaction dans chaque zone de poudre à partir du temps de séjour dans la tranche (lui-même déterminé à l'aide du modèle hydrodynamique). L'avancement moyen de chaque réaction dans la tranche est alors calculé comme la moyenne des trois avancements zone par zone, pondérés par les fractions de quantité de poudre présentes dans chacune de ces zones.

L'oxygène produit par la réaction (2) est supposé se recombiner instantanément avec l'hydrogène disponible selon la réaction (0). Pour homogénéiser le formalisme des bilans, cette réaction est explicitée sous la forme d'un avancement.

On obtient finalement les flux molaires de chaque espèce solide et gazeuse à l'aide de bilans classiques sur la tranche uniforme, en n'oubliant pas les éventuels termes sources liés aux injections ponctuelles de gaz.

Bilans thermiques

Quatre zones distinctes sont à prendre en considération pour les bilans thermiques : la charge solide, le gaz, la paroi et les équipements internes (constitués d'anneaux, de tirants plats et de chicanes, qui représentent de 15 à 30% de la surface d'échange). Conformément aux conclusions des chercheurs de l'équipe de Brimacombe ([Barr et al., 1989, Boateng and Barr, 1996, Brimacombe and Watkinson, 1978]), nous avons supposé que ces quatre zones ont une température uniforme dans une tranche donnée. Les releveurs sont considérés comme des ailettes thermiques liées à la paroi. Enfin la température de la paroi est une donnée d'entrée du modèle (profil imposé le long du four). Le rayonnement est représenté à l'aide de lois simplifiées. Les émissivités des poudres et des parois ont été mesurées expérimentalement ; celles des gaz sont supposées égales à celle de la vapeur d'eau. Le coefficient d'échange thermique solide/paroi avait été déterminé expérimentalement selon la procédure décrite par [Wes et al., 1976], dans un four tournant de laboratoire. Les autres coefficients d'échange avaient été estimés à partir de corrélations de la littérature. Les facteurs de forme sont calculés en fonction de la géomé-

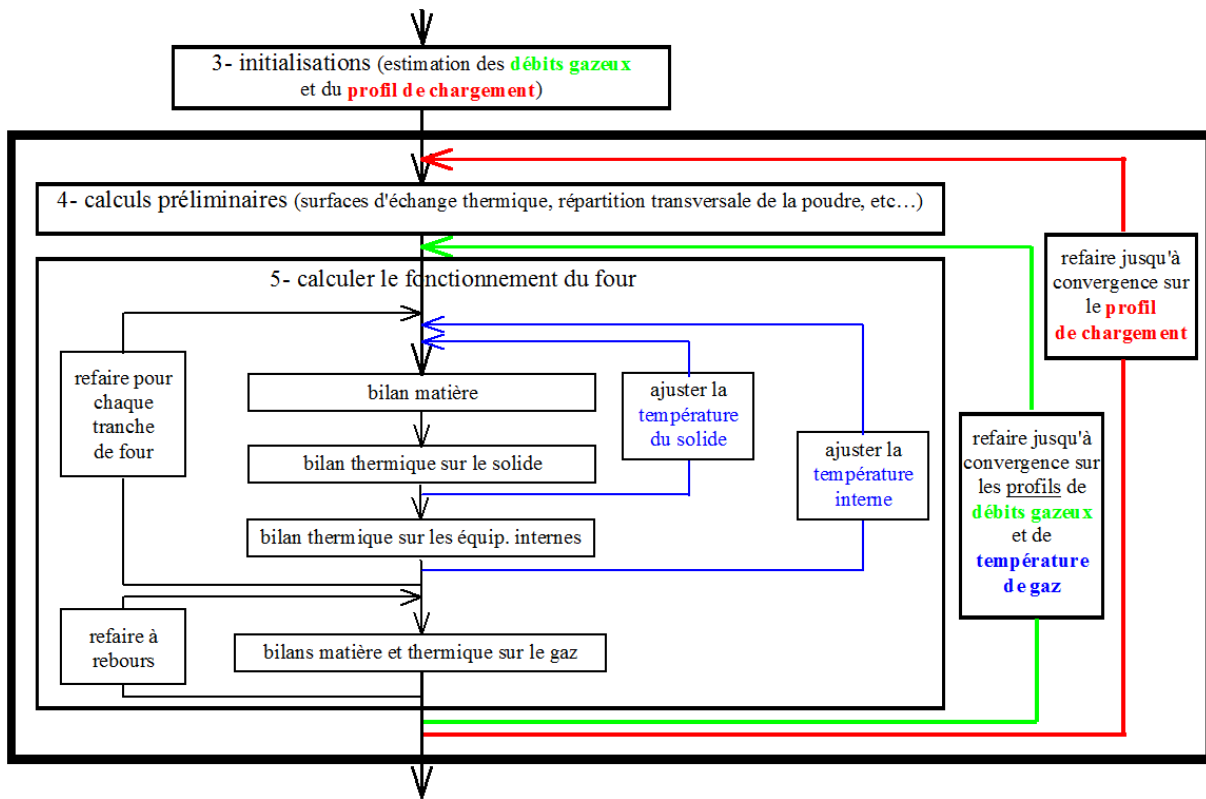


FIGURE 3.11 – Cœur de l'organigramme du code de calcul Fluranox

trie des surfaces exposées. Les surfaces d'échange sont déterminées précisément par des calculs géométriques basés sur les plans des fours et sur les résultats de répartition de poudre fournis par le modèle hydrodynamique. Huit surfaces ont ainsi été prises en compte comme l'illustre par des couleurs différentes sur la FIGURE 3.10-b. Les bilans thermiques pour le solide et le gaz permettent de calculer leurs températures respectives. La température des équipements interne doit être initialisée dans chaque tranche avant de réaliser les bilans de matière et de chaleur. Si le bilan thermique sur les équipements internes n'est pas satisfait après les différents calculs de bilans, la température des équipements internes doit être ajustée et l'ensemble des bilans doit être recalculé jusqu'à la convergence.

Organisation générale du code de calcul

Les données d'entrée du code de calcul peuvent être renseignées par l'intermédiaire d'un fichier de données ou directement *via* une interface graphique donnant accès aux paramètres (différents selon le niveau des droits d'accès de l'utilisateur). La présentation des résultats se fait sous forme graphique, avec sauvegarde d'un fichier lisible avec un tableur. L'organigramme général du code de calcul présenté sur la FIGURE 3.11 montre les différents niveaux d'itérations nécessaires. La partie amont (récupération des données et initialisations) et la partie aval (calcul des résultats globaux et sauvegarde des résultats) n'y sont pas représentées. Pour accélérer la convergence, un calcul à rebours (c'est-à-dire dans le sens inverse du sens habituel du calcul) est ajouté, pour les bilans sur la phase gazeuse. En effet, les débits gazeux n'étant connus qu'en sortie de four, il est nécessaire de les estimer à l'entrée avant de commencer un nouveau calcul.

Les tests de convergence globaux sont effectués sur deux profils successifs. Les résidus utilisés

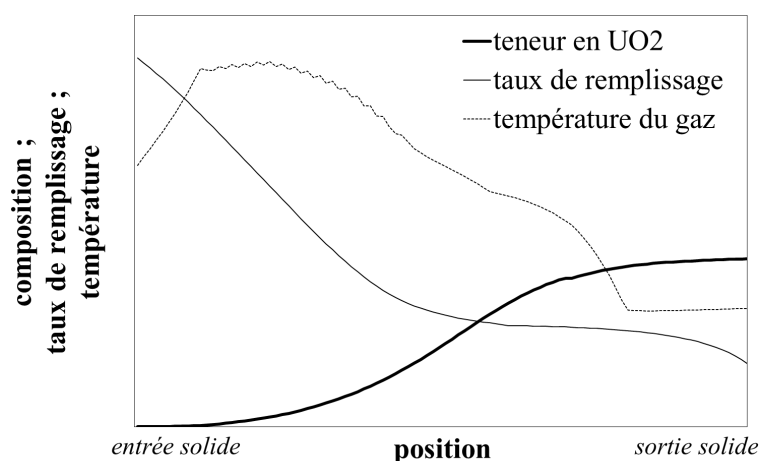


FIGURE 3.12 – Exemple de résultat obtenu pour FBFC. Ce graphique est sous forme muette du fait du caractère confidentiel de cette étude.

(définis comme la racine de la somme des carrés des écarts divisée par le nombre de tranches) sont les suivants : 0,01 K pour les températures, 10^{-6} mol s^{-1} pour les débits molaires et 0,5 % pour le taux de remplissage. Les tests de convergence au niveau de chaque tranche sont effectués avec les mêmes exigences de précision. On vérifie en outre en fin de calcul la conservation du nombre de moles de chaque atome, ainsi que le bilan thermique global.

Résultats

Pour des conditions de fonctionnement données (débits, températures de chauffe, géométrie, etc.), le modèle fournit des résultats globaux (taux de conversion, composition de la solution d'acide fluorhydrique produite, temps de séjour moyen, etc.) et des profils comme ceux de la FIGURE 3.12 : profils de flux molaires des espèces solides et gazeuses, profils de températures de la poudre, du gaz et des équipements internes, ainsi que le profil de chargement. L'étude de sensibilité a révélé que les paramètres les plus sensibles du modèle sont aussi les moins bien connus expérimentalement (coefficients d'échange et paramètres cinétiques). La validation du modèle s'est trouvée limitée par la difficulté d'effectuer des mesures locales sur les installations industrielles. Seuls les flux sortants mesurés et calculés ont pu être comparés jusqu'ici.

Ce modèle nous a permis de progresser vers une meilleure connaissance du procédé sur de nombreux points : les flux échangés par rayonnement sont moins intenses qu'attendu ; l'essentiel de la conversion a lieu lors du passage de la poudre à travers le gaz ; les équipements internes jouent un rôle important, au niveau thermique notamment ; la poudre est en permanence relevée sur les deux derniers tiers du four FBFC. Le modèle dans son état final permettait de donner de premières pistes pour améliorer le fonctionnement des fours. Pour le cas des fours COGEMA, les positions des injections d'hydrogène semblent avoir une grande importance : judicieusement placées, elles permettraient de limiter la corrosion en évitant la présence d'oxygène dans les zones chaudes des fours. L'augmentation de la vitesse de rotation favorise certes la pyrohydrolyse d' UO_2F_2 , mais également la production parasite d' UO_2 . Pour le cas des fours FBFC, il paraît possible de diminuer sans dommage les débits d'alimentation en hydrogène et surtout en vapeur d'eau. La vitesse de rotation ne semble pas être un paramètre intéressant à faire varier. Enfin l'optimisation des relevés en terme de forme et de nombre permettrait d'augmenter la capacité de production sans altérer la qualité de la poudre.

Le modèle de four tournant mis au point lors de cette étude répond au cahier des charges : il est rapide, ergonomique et donne de premiers résultats intéressants pour l'amélioration des installations et de leur conduite. Il faut également souligner que le même modèle simule les deux types de fours tournants, bien qu'ils diffèrent par le produit final obtenu, par leurs dimensions et par les débits traités.

Ce modèle présente toutefois quelques limitations. Il faudrait affiner la définition du temps caractéristique de diffusion dans le lit brassé. Des mesures supplémentaires doivent être effectuées pour déterminer les paramètres sensibles et incertains du modèle (coefficients d'échange thermiques et paramètres de cinétiques chimiques). La taille caractéristique des amas de poudre chutant à travers le gaz doit être définie plus précisément (elle intervient pour les calculs de surfaces d'échange thermique). Le profil de chargement doit être déterminé à l'aide d'une relation mieux adaptée au cas des fours tournants munis de relevateurs. Enfin c'est un modèle en régime permanent, qui n'est donc que peu exploitable pour la commande des procédés.

Le modèle global est présenté dans :

Marie DEBACQ, André FEUGIER, Didier HARTMANN, Fabrice PATISSON, Jean-Léon HOUZELOT, Denis ABLITZER, 2003. Modélisation des fours tournants de défluoration et réduction du difluorure d'uranyle. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 90, 1553–1560. [communication orale 9^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2003, septembre 2003, Saint-Nazaire]

Depuis quelques mois, j'ai entrepris de moderniser, généraliser et passer en dynamique, le modèle de four tournant que j'avais développé pendant ma thèse. Ce travail n'est pas encore assez abouti pour pouvoir être présenté ici...

*
* *

Albert EINSTEIN recommandait de conserver les choses « *as simple as possible, but not simpler* ». Je m'inscris totalement dans cette recherche de simplicité, sans tomber dans le simplisme, pour les modèles que je développe. Leur finalité étant d'être exploitables par des industriels : les modèles obtenus par analyse dimensionnelle doivent être aisés à appliquer à un cas industriel ; le code de calcul réalisant la simulation d'un modèle phénoménologique doit être facile à paramétrer et fournir des résultats rapidement, afin de pouvoir être utilisés par les exploitants des installations.

Le développement d'un modèle phénoménologique nécessite des allers-retours permanents avec les expérimentations : pour déterminer la valeur d'un paramètre du modèle, pour vérifier une hypothèse de celui-ci, pour améliorer la compréhension d'un phénomène et alors pouvoir correctement le modéliser. Exactement comme j'aime être à la fois enseignante et chercheuse et ne conçois pas n'être que l'un des deux, j'apprécie de pratiquer parallèlement l'expérimentation et la modélisation. Diverses contraintes m'avaient un temps éloignée de la modélisation/simulation, mais j'y reviens aujourd'hui

On n'instera jamais assez sur l'importance de la validation des modèles : la confrontation des résultats de simulation à ceux de l'expérience correspondante est une étape crucial de ce type de développement. Si cette condition est facile à énoncer, elle peut s'avérer délicate à mettre en pratique, en particulier sur une installation industrielle. De plus, lorsque simulation et expérience ne concordent pas, il n'est pas toujours évident de savoir laquelle incriminer. En effet la métrologie nous enseigne que la mesure n'est qu'une interprétation que donne un capteur d'une grandeur à mesurer.

Chapitre 4

Pédagogie numérique

DANS un récent billets sur le blog EducPros "**Éducation Supérieure : le vrai risque n'est pas l'ubérisation mais la kodakisation !**" (27 septembre 2017), Nicolas GLADY expose sa vision de l'enseignement du futur, qui sera selon lui « à n'en pas douter une combinaison judicieuse de présentiel, de distanciel, d'expérientiel, et de tout ce que recherche quelqu'un qui veut apprendre un sujet pratique ou théorique ». Je partage pleinement cette vision, que nous appelons au Cnam la formation hybride et qui est la déclinaison de la révolution numérique dans l'éducation. Nicolas GLADY conclut son billet en expliquant que l'enseignement supérieur doit « absolument « prendre le train » du numérique, sous peine de rester sur le quai, et sans espoir de « deuxième chance » ».

Avec l'accès de tout un chacun *via* Internet à des bases de connaissances sans commune mesure avec ce qui existait par le passé, si dans la partie recherche de son métier, l'enseignant-chercheur reste un créateur de savoir, dans son métier d'enseignant il n'est plus le seul « sachant ». Il n'est pas facile de proposer nouveau terme : « médiateur » permet de faire le lien avec la diffusion de la culture, scientifique ou non ; « catalyseur » a l'avantage de filer la métaphore en génie des procédés : celui qui, sans rendre possible un processus qui ne l'est pas thermodynamiquement, l'accélère et permet de le réaliser dans des conditions plus douces. Je retiendrai finalement un terme parfois utilisé dans le cadre de la classe inversée : un « guide », qui se tient à côte-à-côte des apprenants et non face-à-face. L'Internet 2.0 a ajouté une dimension de coopération entre pairs à la mise à disposition des connaissances, il est ainsi devenu un autre lieu de formation (pas seulement *via* les MOOC⁶), en plus de l'école et de l'entreprise.

Le public et la mission très particuliers du Cnam en matière de formation, nous ont conduit à développer à la fois une offre de formation singulière et des méthodes pédagogiques spécifiques, s'appuyant fortement sur les outils numériques. J'ai réalisé il y a quelques temps que notre expérience dans ce domaine, pourrait alimenter la réflexion générale de l'enseignement supérieur, confronté à la mutation de ses missions au sein d'une société elle-même en mutation, notamment du fait de la révolution numérique. C'est la raison d'être du présent chapitre : faire connaître nos pratiques et ouvrir une réflexion sur ce qui pourrait être transposé ou généralisé de la formation professionnelle hors temps de travail vers la formation initiale.

Le Conservatoire National des Arts et Métiers (le Cnam) est un établissement public dédié à la formation professionnelle supérieure des adultes.

6. *Massive Open Online Course*, type ouvert de formation à distance capable d'accueillir un grand nombre de participants.

Il fut créé par la Convention en 1794 sur proposition de l'abbé Henri Grégoire pour « éclairer l'ignorance qui ne connaît pas et la pauvreté qui n'a pas les moyens de connaître ». Sa mission est donc d'offrir une formation ouverte à tous et partout : *Omnes docet ubique*.

Le Cnam n'est pas seulement un établissement public parisien, c'est un réseau de centres Cnam, sous statut associatif ou privé, répartis sur toute la France métropolitaine et ultramarine, mais aussi à l'étranger (Maroc, Liban, Côte d'Ivoire et Madagascar). La spécialité génie des procédés était par le passé présente dans certains centres Cnam en région (Normandie, Nord, Lorraine, Paca). Cependant la filière y a progressivement disparu, le nombre d'auditeurs y était en effet relativement faible, alors que les subventions régionales n'ont cessé de baisser. En revanche, compte tenu du fort besoin de formation au Liban, notre filière s'y est implantée récemment et est très active.



Le public du Cnam est très différent de celui d'une école d'ingénieurs ou d'une université en formation initiale. Tout d'abord nos auditeurs sont généralement en activité et certains ont déjà un conjoint et des enfants : leur disponibilité pour la formation est donc souvent limitée et quoi qu'il en soit variable. Ensuite le temps passé « devant » un enseignant est environ deux fois plus court qu'en formation initiale, cette différence est en partie compensée par l'expérience professionnelle, mais le travail personnel est également accru, d'autant que le niveau initial des auditeurs est extrêmement hétérogène. Enfin un temps de réadaptation aux études et de reprise de confiance dans ses propres capacités est souvent nécessaire au début de la formation.

Pour le cas particulier du diplôme d'ingénieur, qui -s'il n'est pas la seule formation proposée- reste le diplôme phare au Cnam pour les « sciences inhumaines », s'ajoute un phénomène que nous appelons « le devenir ingénieur » : c'est un processus propre à chaque auditeur, qui consiste à passer de sa posture de technicien à celle d'ingénieur. Pour des raisons diverses, ce passage ne va pas de soi et nécessite un travail d'introspection de l'auditeur, qui peut être aidé par son entreprise, sa famille, ses camarades et ses enseignants, mais qui est avant tout un chemin personnel, qui peut prendre un certain temps.

Le rythme d'apprentissage doit donc pouvoir s'adapter à ce public. Ainsi nos enseignements en présentiel ont lieu hors temps de travail (HTT) : les soirs de semaine et les samedis en journée ; quelques formations de niveau M2 ont lieu en semaine en journée. Parallèlement, depuis 2000, la formation à distance s'est massivement et rapidement développée au Cnam, j'y reviendrai un peu plus loin.

Les parcours de formation sont très différents au Cnam par rapport à la formation initiale : en formation hors temps de travail, les notions d'année de formation et de promotion n'ont pas de sens ; nous pratiquons la formation « à la carte ». Ainsi si l'on reprend l'exemple du diplôme d'ingénieur, à partir d'un bac+2, quelques auditeurs très disponibles et pouvant bénéficier de VES⁷ réalisent leur formation en trois ans, pour d'autres il en faudra sept ou huit, parfois plus de dix, la moyenne se situant autour de quatre à cinq ans. De surcroît à peu près aucun des auditeurs commençant leur formation la même année ne seront diplômés en même temps, les parcours étant totalement individualisés et fonction de bien d'autres paramètres que le seul niveau initial de l'auditeur : sa disponibilité (elle-même liée à son emploi et sa famille), les différents types de validation dont il peut bénéficier, ses choix d'options, l'alternance d'ouverture

7. Validation des Études Supérieures, dispositif permettant de faire valider des études supérieures suivies antérieurement (université, école, institut, organisme de formation, etc.), en France ou à l'étranger dans un domaine en rapport avec le diplôme visé.

des unités d'enseignement (UE), son accompagnement par l'entreprise, etc.

On identifie trois grandes raisons pour lesquelles nos auditeurs n'ont pas poursuivi leurs études en formation initiale :

1. à cause de contraintes financières ;
2. de leur propre volonté, parce qu'ils en avaient assez des études ;
3. contraints par des résultats insuffisants, en particulier pour ce qui concerne les auditeurs de génie des procédés, en mathématiques.

Dans le premier cas, on pourra trouver des auditeurs tout à fait brillants, pouvant parfaitement s'épanouir dans les modes de formations traditionnels, mais qui ne peuvent se permettre d'arrêter de travailler un à trois ans pour poursuivre leurs études. Ils viennent donc chercher au Cnam la possibilité de se former partout, tout en ayant une activité professionnelle. Dans les deuxième et troisième cas, il ne suffit pas de plaquer les formes pédagogiques traditionnelles sur une organisation adaptée à la poursuite de l'activité professionnelle en parallèle des études : il faut leur proposer une autre philosophie de formation et d'autres méthodes pédagogiques.

On classait autrefois le public du Cnam en génie des procédés selon deux grandes catégories :

- La première catégorie -majoritaire- correspond à des auditeurs techniciens supérieurs, titulaires d'un BTS ou d'un DUT, qui souhaitent obtenir le titre RNCP⁸ niveau II⁹, le diplôme d'ingénieur ou le master, dans le cadre d'une promotion et d'une mobilité professionnelle leur permettant d'accéder au statut de cadre.
- La seconde catégorie d'auditeurs est constituée des titulaires de diplômes jusqu'à bac+5, dans d'autres spécialités plus ou moins proches et qui souhaitent, soit compléter leur formation en suivant quelques unités d'enseignement, soit obtenir un diplôme en génie des procédés en vue de réorienter leur carrière professionnelle ou tout simplement de trouver du travail.

Aujourd'hui, avec la multiplication des formations intermédiaires (licences, brevets divers, formations internes, formations interrompues mais pour lesquelles un certain nombre d'ECTS¹⁰ avait été obtenus) et la variabilité des objectifs de formation, il est à peu près impossible de définir une telle catégorisation, sauf à multiplier considérablement la combinatoire. On en revient par conséquent aux fondamentaux du Cnam : la formation est totalement individualisée et bien souvent évolutive, nous obligeant d'une part à établir et actualiser chaque année le plan de formation de chacun de nos auditeurs et d'autre part à veiller constamment à maintenir les passerelles entre nos formations, en dépit des évolutions réglementaires de chacune d'elle, sans oublier les mesures transitoires permettant à ceux qui avaient commencé une formation, de ne pas se trouver pénalisés par son évolution.

Les trois grands principes de la formation au Cnam sont les suivants :

L'expérience professionnelle fait partie intégrante de la formation. Dans presque tous les cursus, des crédits sont attribués à cette expérience. Tous les dispositifs de validation sont à l'œuvre pour construire le plan de formation d'un auditeur : validation

8. Répertoire National des Certifications Professionnelles, constamment mis à jour avec les diplômes et titres à finalité professionnelle ainsi que les certificats de qualification figurant sur les listes établies par les commissions paritaires nationales de l'emploi des branches professionnelles.

9. Le niveau II dans la nomenclature RNCP correspond aux bac+3 à bac+4 ; au niveau I, on retrouve par exemple les diplômes d'ingénieur et masters ; au niveau III, des diplômes tels que le BTS ou le DUT.

10. *European Credits Transfer System* : système de points développé par l'Union européenne, qui a pour but de faciliter la lecture et la comparaison des programmes d'études des différents pays européens ; les « règles » de base de ce système de points étant : 1 an = 60 crédits ; 1 crédit = 25 à 30 heures de travail (sans préciser comment se répartit ce travail entre le temps de face-à-face avec l'enseignant et le temps de travail personnel).

de l'expérience professionnelle (VAE et/ou VAP85); validation des études supérieures (VES). Au contraire de la formation initiale, qui intègre des stages avec définition préalable du sujet et des objectifs, nous pratiquons ces validations *a posteriori* avec un contrôle individualisé.

Nos formations sont accessibles sans sélection. À l'exception de quelques cursus, on ne s'inscrit pas à nos titres, diplômes ou certificats, mais aux UE¹¹ qui les constituent. Or si pour chacune de nos UE, nous affichons des niveaux d'accès et des prérequis, nous proposons des rendez-vous individuels pour aider les auditeurs à construire leur parcours, ils n'ont aucun justificatif à fournir pour s'inscrire. On observe en revanche une forme de « sélection naturelle » : environ la moitié des auditeurs qui s'inscrivent une première fois au Cnam, ne s'y réinscrivent jamais. Si ce chiffre peut sembler énorme, la principale raison d'abandon est le manque de disponibilité : mener de front vie professionnelle, vie familiale et formation n'a rien de trivial. La seconde raison majeure est que les auditeurs qui s'inscrivent n'ont pas toujours les capacités de leurs ambitions. À l'opposé, il nous arrive régulièrement de penser, quand nous faisons connaissance avec certains auditeurs, qu'ils ne parviendront malheureusement pas au bout ; pourtant un certain nombre d'entre eux « se révèle » en cours de formation. Aussi, instaurer une forme de sélection préalable serait contraire à la mission et aux valeurs du Cnam.

Toute unité d'enseignement validée est acquise à vie. Non seulement la formation au Cnam, hors temps de travail, dure plus longtemps qu'en formation initiale ; mais les interruptions sont également courantes dans un cursus, pour des raisons professionnelles ou personnelles. Par principe, un auditeur doit pouvoir revenir, même des années plus tard et poursuivre sa formation. Compte tenu des évolutions régulières de nos cursus, cela nous oblige à concevoir, pour chaque réforme, les mesures transitoires, qui décrivent les équivalences entre ancien et nouveau cursus. Il n'est pas rare que nous ayons à faire des doubles mesures transitoires, lorsque plus d'une réforme du cursus a eu lieu entre le moment où un auditeur a commencé sa formation et le moment où il la termine.

Les principales contraintes de la formation au Cnam sont de même nature qu'en formation initiale, mais elles ont des conséquences différentes.

Nos ressources (humaines, financières et en locaux) ne nous permettent pas d'ouvrir l'ensemble de nos unités d'enseignement chaque année et encore moins chaque semestre. Or compte tenu de l'individualisation des parcours de nos auditeurs, cela impose d'une part de penser les ouvertures par année et par semestre pour ne pas pénaliser les auditeurs dans leur plan de formation et d'autre part de rendre au maximum autonomes nos unités d'enseignement pour qu'elles puissent être suivies dans n'importe quel ordre. Il arrive ainsi couramment d'enseigner l'extraction liquide-liquide avant la thermodynamique, le calcul des coefficients de transfert avant le nombre de Reynolds, les opérations unitaires avant les bilans. Cette idée peut sembler épouvantable aux enseignants habitués à la formation initiale. L'expérience montre pourtant qu'avec quelques astuces pédagogiques, cela se passe naturellement bien, en favorisant la coopération entre auditeurs (certains ont fait les choses « dans l'ordre » ou ont une connaissance des prérequis par leurs études antérieures ou leur pratique professionnelle) et en développant les interactions et aller/retour entre les cours (beaucoup de nos auditeurs ont une maturité et un recul remarquables sur leur formation).

Les contenus de nos formations sont soumis aux mêmes règles qu'ailleurs, par les organismes de certification. Nous avons l'habitude de travailler parallèlement avec plusieurs

11. unité d'enseignement

d'entre eux : la CTI¹² pour nos diplômes d'ingénieur, la CNC¹³ pour nos titres professionnels, l'HCERES¹⁴ pour nos licences et master et le conseil des formations du Cnam pour nos certificats (mais aussi toutes les formations précédemment listées). Or nos formations étant totalement imbriquées, à chaque modification d'un cursus, il faut veiller à maintenir la continuité, les passerelles et la bonne marche de l'ensemble, sans oublier les conséquences sur le réseau des centres Cnam, les modalités d'enseignement et les calendriers d'ouverture. Ainsi les enseignants du Cnam sont fortement impliqués dans l'ingénierie de formation à l'échelle nationale. Nous sommes tous « responsable national » de plusieurs unités d'enseignement et plusieurs formations.

Dans ce contexte, **la pédagogie numérique** peut schématiquement recouvrir trois aspects : des outils, des méthodes et des contenus. Dans la continuité des précédents chapitres, on peut distinguer pour chacun de ces aspects plusieurs échelles, comme illustré dans le tableau suivant, où le contenu de chaque case ne cherche pas à être exhaustif, mais propose un exemple :

échelle	contenus	méthodes	outils
micro	ressources pédagogiques	classe virtuelle	nombreux !
méso	unités d'enseignement	classe inversée	plateforme
macro	blocs de compétences	Compte Personnel de Formation	sites web externes
méta	cursus	continuité de l'offre de formation	site web interne

Sommaire

4.1 L'offre de formation du Cnam	101
4.1.1 Organisation générale de l'offre de formation en génie des procédés	102
4.1.2 Contenus des formations en génie des procédés	103
4.2 Petite histoire de l'enseignement à distance en génie des procédés au Cnam	104

4.1 L'offre de formation du Cnam

Compte tenu des éléments exposés en introduction (la mission du Cnam, son public, les principes et les contraintes de ses formations), l'offre du Cnam est organisée à partir d'UE capitalisables : la capitalisation d'un ensemble cohérent d'unités d'enseignement permet l'obtention d'un certificat, d'un diplôme ou d'un titre. Les auditeurs qui suivent ces formations cherchent soit à compléter ponctuellement leurs connaissances sur un sujet précis, soit à obtenir un nouveau diplôme pour progresser dans leur entreprise ou se réorienter. Le système par UE capitalisables est parfaitement adapté à notre public ; le Cnam fonctionnait déjà sur ce principe bien avant le processus de Bologne.

Les unités d'enseignement pouvant être suivies indépendamment dans le cadre d'un complément de formation, on constate que cela peut devenir une voie de recrutement pour les formations diplômantes : un auditeur venu chercher simplement un complément de formation ou une compétence spécifique, pourra ensuite décider de s'engager dans une formation plus longue et diplômante. Il est d'ailleurs courant qu'un auditeur change son objectif en cours de formation :

12. Commission des Titres d'Ingénieur

13. Commission Nationale de la Certification Professionnelle

14. Haut Conseil de l'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur

soit parce qu'il réalise que son projet initial était ambitieux et qu'il convient, si ce n'est de ne pas aller jusqu'au bout, d'au moins se donner des étapes ; soit au contraire parce qu'il s'aperçoit de sa capacité à aller plus loin que son projet initial. Dans tous ces cas, il est important d'assurer une continuité maximale entre nos certificats, diplômes et titres : les études au Cnam sont déjà longues, les années ne sauraient s'additionner au gré des ajustements d'objectifs.

Les briques de Lego sont une assez bonne manière de représenter notre offre de formation : les mêmes briques (= les UE, l'expérience professionnelle et certaines activités d'apprentissage spécifiques) permettent de construire différentes formations ; un ensemble de briques peut s'empiler sur un autre, pour former les « marches » de nos formations (par exemple : la licence générale, puis le titre RNCP II et enfin le diplôme d'ingénieur ; avec éventuellement entre temps un certificat) ou se réarranger pour construire un autre cursus que celui qui était prévu au départ. On peut même pousser la métaphore avec les couleurs des briques, pour représenter la diversité des modalités de formations (présentiel HTT, formation à distance, hybride) et des modalités de validation (en passant un examen, en bénéficiant de VAE ou de VES) : un même cursus peut être construit avec une seule couleur ou à partir d'un mélange très bariolé.

L'offre de formation du Cnam en génie des procédés est aujourd'hui entièrement accessible à distance, à l'exception des travaux pratiques expérimentaux (soit autour de 10% de notre offre), j'y reviendrai. Cependant nous sommes convaincus, et cela rejoint les propos de Nicolas GLADY que je citais en introduction de ce chapitre, que la formation « tout à distance », si elle est le seul choix pour certains auditeurs, n'est pas la formule idéale. Avec les outils numériques que je mentionnerai un peu plus loin, nous sommes capable de mettre « beaucoup de présence dans la distance », mais nous pensons que des séquences en véritable présentiel doivent demeurer le plus possible, en étant bien sûr repensées dans le dispositif global de formation. La spécialité génie des procédés, avec quelques centres en région, est ainsi à l'origine d'un nouveau paradigme au Cnam : la Fod distribuée. Le principe est de coupler la formation « tout à distance » développée par un centre (pas forcément Paris) et des séquences en présentiel déclinées sur l'ensemble du territoire. C'est une manière tout à la fois de ré-impliquer les centres Cnam en région dans nos formations à moindre coût, d'offrir un meilleur service à nos auditeurs et d'en attirer d'autres, que la formule « tout à distance » rebutait. Pour l'instant la communication autour de ce dispositif a été trop timide et nous n'avons pas encore pu la mettre en œuvre. Nous restons cependant convaincus que c'est l'avenir du Cnam en réseau, pour des spécialités telles que le génie des procédés.

4.1.1 Organisation générale de l'offre de formation en génie des procédés

Si en apparence, notre offre de formation est semblable à celle de la formation initiale, elle a la particularité de concentrer dans un même établissement des types de formations qui sont généralement proposées par des institutions différentes, mais surtout elle est pensée différemment, avec « des marches » et « des passerelles à tous les étages ».

Nos formations s'étendent de bac+2 à bac+5 ; sauf mention contraire elles ont un déploiement national :

- à bac+3 : une licence générale et trois licences professionnelles :
 - L3 Génie des procédés de la licence générale Sciences pour l'ingénieur parcours Chimie,
 - licence pro Génie des procédés et bioprocédés industriels (déployée à Paris),
 - licence pro Génie des procédés pour l'environnement (déployée en Martinique),
 - licence pro Industries pharmaceutiques, cosmétologiques et de santé : gestion, production et valorisation (qui était déployée à Paris, mais n'est actuellement plus active) ;
- à environ bac+4 : deux titres RNCP de niveau II (ce titre comporte 120 ECTS et est accessible à partir d'un niveau bac+2) :

- Génie chimique,
- Pharmacotechnie ;
- à bac+5 : un master et un diplôme d'ingénieur avec deux options :
 - ingénieur Génie des procédés chimiques (qui est en fait un cursus généraliste en génie des procédés),
 - ingénieur Génie des procédés pharmaceutiques,
 - master Ingénierie chimique (mention Génie des procédés et bioprocédés) en cohabilitation avec l'Université Pierre et Marie Curie - Paris VI ;
- mais aussi des certificats (30 ECTS chacun) : un certificat de compétence (CC - niveau L3) et trois certificats de spécialisation (CS - niveau M1-M2) :
 - CC Traitement et gestion des eaux (déployé à Limoges par le Cnam Nouvelle-Aquitaine, accessible à plus de 95% à distance),
 - CS Bioprocédés (déployé à Paris par le Cnam établissement public, accessible à environ 80% à distance),
 - CS Génie des produits (qui doit être déployé à Nancy par le Cnam Grand Est),
 - CS Génie des procédés pétrochimiques (déployé par le Cnam Liban, uniquement en présentiel).

Ces « marches » sont l'échelle méta de nos formations, qui sont constituées à l'échelle mésoscopique :

- d'unités d'enseignements, les « briques élémentaires » de la plupart des formations du Cnam, qui dans le cas du génie des procédés sont presque toutes utilisées dans plusieurs diplômes, titres et certificats ;
- d'unités d'activités spécifiques à un diplôme, un titre ou un certificat : mémoire ingénieur, projets tuteurés, etc. ;
- d'expérience professionnelle (sauf pour les certificats), reconnue au Cnam comme faisant partie intégrante de la formation et qui fait l'objet d'un contrôle et d'une validation individualisés.

Nous commençons le travail à l'échelle macroscopique : les blocs de compétences, dont la définition devient indispensable vis-à-vis de certains de nos organismes certificateurs et surtout des financeurs.

Cette offre de formation est souvent qualifiée de pléthorique, foisonnante voire surabondante. S'il faut reconnaître que sa soutenabilité économique est régulièrement questionnée, les principes d'ingénierie pédagogique sur lesquels se fonde cette offre sont incontournables pour offrir une réponse aux besoins divers et changeants de notre public, en adéquation avec ceux de l'industrie. Ces principes conduisent forcément à une offre abondante.

4.1.2 Contenus des formations en génie des procédés

Par le passé, le contenu de l'offre de formation en génie des procédés au Cnam a varié en fonction du titulaire de la chaire : de la chimie appliquée aux arts au XIX^e siècle, à la chimie industrielle et au génie chimique de manière alternative dans le courant du XX^e, jusqu'à la disparition des chaires avec la réforme des statuts de 2009. Le reformatage de nos unités d'enseignement, imposé par le passage à la semestrialisation en 2005, m'avait permis :

- de faire entamer le virage vers le génie des procédés en se conformant aux recommandations de l'*EFCE* ;
- d'imposer le principe d'unicité : afin de faciliter le « jonglage » entre les UE, chaque thématique n'est présente que dans une seule unité d'enseignement et enseignée de manière à limiter au strict minimum les prérequis ;

- de mettre fin à la séparation cours/TD : le développement de la Fod¹⁵ a eu pour effet d'une part de diminuer fortement le nombre d'auditeurs présents dans les salles de cours et d'autre part d'accroître le besoin de scénarisation des enseignements ; une séance en présentiel alterne désormais des moments de présentation de notions théoriques, de démonstrations, de descriptions technologiques, parfois de débats et des exercices.

La réorganisation profonde du Cnam en 2009 et le renouvellement de l'accréditation par la CTI en 2011, ont permis de parachever cette réforme. Aujourd'hui le diplôme d'ingénieur Cnam en génie des procédés a les mêmes contenus que n'importe quel autre diplôme d'ingénieur en génie des procédés ; en revanche les modalités d'enseignement et les méthodes pédagogiques sont sensiblement différentes de celles de la formation initiale.

Cette réforme est en partie présentée dans :
 Marie DEBACQ, Wafa GUIGA, Serge STAINMESSE, 2011. Un ingénieur Cnam en génie des procédés, c'est possible? même à distance? *Récents Progrès en Génie des Procédés* 101, article 433 (6 pages). [poster 13^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2011, décembre 2011, Lille]

Il ne me paraît pas utile de détailler ici nos unités d'enseignement et leurs contenus, le lecteur intéressé pourra se reporter au [site Internet de l'équipe Génie des procédés et ingénierie pharmaceutique du Cnam](http://gpip.cnam.fr/co/GPIP_UE.html) : <http://gpip.cnam.fr/co/GPIP_UE.html>

4.2 Petite histoire de l'enseignement à distance en génie des procédés au Cnam

Afin de comprendre comment nous en sommes arrivés à notre « modèle pédagogique » actuel, il est utile de raconter comment la formation à distance s'est développée dans notre spécialité (FIGURE 4.1). Je jalonne mon récit de sept focus méthodologiques.

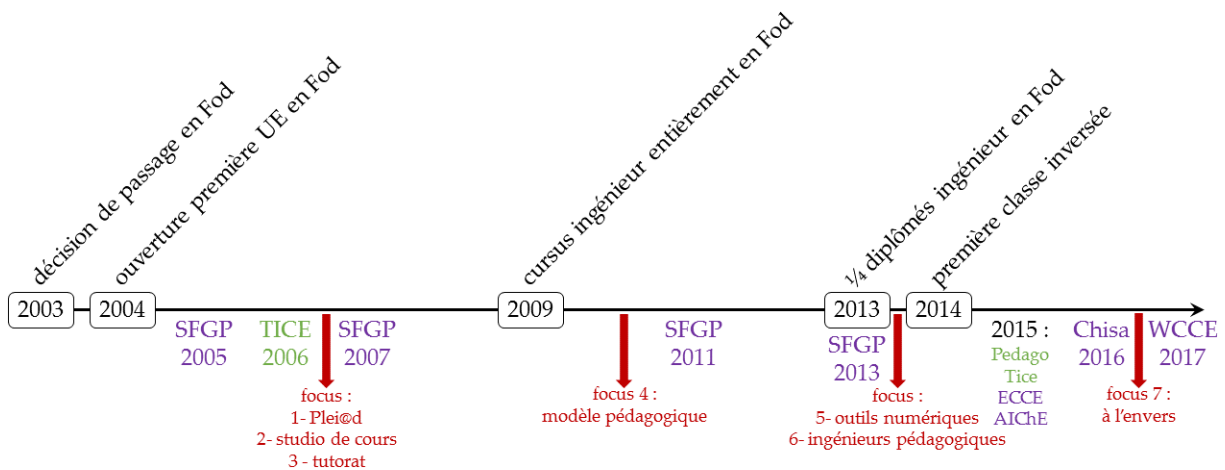


FIGURE 4.1 – Chronologie du développement de la formation à distance en génie des procédés au Cnam (en violet les congrès de génie des procédés ; en vert les congrès de pédagogie numérique)

La vocation du Cnam est d'enseigner partout. Or le public de la spécialité génie des procédés n'est majoritairement pas en Île-de-France. Cependant pour des raisons financières, mais aussi de défaut de communication, l'enseignement du génie des procédés a disparu des centres Cnam en région. Les auditeurs potentiels de la spécialité, ne peuvent de toutes façons pas toujours se

15. formation ouverte et à distance

déplacer chaque semaine dans un lieu commun, pour cause de distance ou bien de compatibilité entre les horaires de cours et leurs horaires de travail : le travail de nuit ou le week-end et les astreintes sont courants chez les auditeurs de la spécialité génie des procédés ; un certain nombre d'entre eux ont en plus à assurer des missions lointaines, sur des durées parfois longues, pour des démarrages d'unités par exemple. Nous avons donc pris en [2003], la décision de déployer progressivement l'ensemble de notre offre de formation (de niveau bac+2 à bac+5) à distance (en Fod) ; seuls les travaux pratiques doivent obligatoirement être réalisés en présentiel.

Notre première expérience d'ouverture d'une unité d'enseignement à distance en [2004], nous a encouragé à poursuivre compte tenu des résultats, mais nous a aussi permis d'identifier un certain nombre de facteurs importants pour la généralisation du dispositif :

- Si la Fod offre des avantages indéniables (souplesse dans le choix des moments d'accès, de la durée et du rythme d'apprentissage ; économie des temps de déplacement), l'auditeur doit se montrer plus volontaire et fournir un travail plus important qu'en présentiel. Il doit également réunir certaines conditions :
 - aptitudes personnelles à la formation à distance : motivation à apprendre, autonomie dans la gestion de ses apprentissages, capacité à organiser son travail et à le planifier, à respecter des échéances ;
 - disponibilité en temps : on considère qu'en moyenne le temps de travail en Fod est multiplié par 1,5 à 2 par rapport à la même UE au présentiel (hors temps de transports) ;
 - aspects matériels : l'auditeur doit disposer, à son domicile ou sur son lieu de travail (s'il a l'accord de son employeur), d'un poste informatique avec accès Internet et imprimante, dans un endroit calme propice à la concentration et à la réflexion.
- L'une des grandes difficultés en Fod est l'abandon des auditeurs en cours de formation. Pour lutter contre ce phénomène, il faut développer des moyens de maintenir une interactivité continue tout au long du semestre entre auditeurs et enseignant. Les forums de discussion sont l'un des éléments d'un tel dispositif, mais l'expérience montre qu'ils ne s'activent pas « tous seuls » : l'enseignant doit déployer des stratégies pour « amorcer la pompe » de ces échanges.
- Le passage à la Fod permet une individualisation encore plus prononcée qu'en présentiel des rythmes et des parcours des auditeurs. De plus, les auditeurs acquièrent parallèlement aux connaissances scientifiques, des compétences d'autoformation et d'autoévaluation qui leurs seront utiles à l'avenir. Alors que les spécialistes s'accordent à dire que bon nombre des métiers de demain n'existent pas encore et à défaut de se transformer en devins pour définir aujourd'hui ce que nos auditeurs devront savoir demain ou après-demain, développer leur capacité d'apprentissage en autonomie nous semble important.
- L'accompagnement des enseignants par des ingénieurs pédagogiques est indispensable à un développement efficace de la Fod. Car il ne suffit pas de mettre à la disposition des enseignants des outils pour le passage au numérique, ni même de les former à ces outils, il faut aussi réfléchir ensemble à la méthode pédagogique qui mettra en œuvre ces outils.
- La gestion des examens est considérablement alourdie : le sujet doit être mis à disposition de tous les centres d'examen ; il ne doit comporter aucune erreur puisqu'il serait impossible de signaler une erreur équitablement dans l'ensemble des centres ; il faut ensuite gérer le décalage horaire avec les centres ultramarins et étrangers sans risquer de « fuite » des sujets ; il faut enfin récupérer toutes les copies avant de les corriger, pour une meilleure équité de correction.
- Enfin la production de Fod pour les enseignants est extrêmement chronophage, or si notre premier passage en Fod a fait l'objet d'un financement de quelques centaines d'euros et

d'un petit aménagement de service, il nous fallait poursuivre le développement à moyens constants. Il était donc important d'imaginer des procédures plus efficaces.

Cette première expérience est décrite dans :

Marie DEBACQ, Catherine PORTE, Radia SCHMITT-SOUKEHAL, Vincent DALMEYDA et François DELASTRE, 2005. Une expérience d'enseignement à distance en génie des procédés. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 92, article P-1 (8 pages). [communication orale 10^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2005, septembre 2005, Toulouse]

En même temps que nous poursuivions le développement de notre offre de Fod, nous avons réalisé une analyse de différentes pratiques de formation à distance au Cnam, ce qui nous a permis non seulement d'avoir de nouvelles idées, mais aussi de relativiser le niveau d'exigence, afin de développer massivement et rapidement notre offre à distance.

Cette analyse est détaillée dans :

Marie DEBACQ, Marc CLAUSSE, Vincent DALMEYDA, Jean-Pierre DOMBLIDES, Clotilde FERROUD, Gilbert VILLOUTREIX, 2006. Quatre expériences de formation à distance dans le pôle Science et Techniques Industrielles du Cnam Paris. article de 6 pages en français paru dans les actes [communication orale colloque international *Technologies de l'Information et de la Communication dans l'Enseignement Supérieur et l'Entreprise - TICE 2006*, octobre 2006, Toulouse – France]

Autour de 2003, pour l'ensemble des spécialités couvertes par le Cnam, une cinquantaine de formations (principalement des UE) étaient ouvertes en Fod en Île-de-France, pour un total d'un peu plus de 2000 inscriptions (correspondant à environ 1400 auditeurs). À l'échelle nationale, ces chiffres montaient à environ 200 formations ouvertes à distance, plus de 11 000 inscriptions pour 6400 auditeurs.

Aujourd'hui il y a près de 500 formations ouvertes à distance sur l'ensemble du réseau Cnam, dont plus de 300 en Sciences et techniques. Pour 2017-2018, le centre Cnam Paris ouvre 318 Fod + 61 formations hybride ; nous n'avons pas encore les chiffres des inscriptions.

En ce qui concerne le génie des procédés, le nombre d'inscrits à nos UE est relativement stable depuis que nous avons commencé à développer la Fod, mais alors que les premières années nous avions environ 1/3 d'auditeurs inscrits en Fod, nous en sommes aujourd'hui entre 2/3 et 3/4.

Ce développement massif de la Fod au Cnam a été rendu possible par la mise à disposition des enseignants de deux outils : la plateforme de formation et les studios de cours, que nous considérons comme les deux piliers du développement de la Fod au Cnam.

FOCUS 1 (Plei@d) est une plateforme de formation à distance propriétaire, créée au tout début des années 2000. Elle permet, *via* le réseau Internet et un mécanisme d'authentification et de gestion des droits en fonction des profils d'utilisateurs (enseignants, tuteurs, administrateurs, auditeurs), d'avoir accès à des fonctions précises et aux types d'écrans correspondants.

L'interface auditeur est très intuitive et ne nécessite aucune formation particulière ; elle offre l'accès pour l'auditeur aux documents mis en ligne par l'enseignant -documents structurés en séquences-, ainsi qu'à des outils de communication (forum et messagerie électronique). L'interface enseignant est également très simple à appréhender ; deux heures de formation suffisent pour apprendre à utiliser toutes les fonctionnalités de Plei@d : structuration de l'UE, dépôt des fichiers et gestion de leur mise à disposition des auditeurs, gestion des forums, etc. Cette simplicité a permis un développement très rapide des usages de la plateforme.

Plei@d ne comporte pas d'outils éditoriaux, ni de système de QCM propre par exemple ; le principe est de préparer tous ses supports hors de la plateforme, puis de les insérer/organiser à l'intérieur. Il est possible d'y importer n'importe quel type de contenu, dès lors qu'il peut être mis sous format PDF, HTML ou bureautique. Il est notamment possible d'implémenter

dans un document Plei@d un mini site web, ce qui offre des possibilités de développement considérables. Il faut toutefois veiller à n'utiliser que des formats lisibles à l'aide de logiciels courants ou gratuits.

Actuellement, le Cnam abandonne progressivement sa plateforme propriétaire pour passer à une plateforme d'apprentissage en ligne sous licence libre : Moodle, très largement utilisée dans l'enseignement supérieur. La principale différence dans la philosophie de la plateforme Moodle par rapport à Plei@d est que Moodle propose divers outils éditoriaux ; il est donc possible de développer certains de ses supports directement dans la plateforme, au contraire de Plei@d. Moodle offre des potentialités énormes, notamment le développement de QUIZ très sophistiqués, très intéressants pour l'auto-apprentissage. En contrepartie, l'outil est beaucoup plus difficile d'accès pour les enseignants que Plei@d et nécessite davantage de formation. Il est prévu de contourner cette difficulté par le développement de modèles de cours (ou gabarits).

*

La plateforme de formation est l'enveloppe dans laquelle sont déposées les ressources et déployées les activités.

Pour les formations à distance ou hybrides, il est crucial d'apporter le plus grand soin à la section zéro qui regroupe au minimum la présentation de la méthode pédagogique et de l'organisation pratique qui en découle. Cela peut aussi être un des outils qui contribue à créer la relation entre l'enseignant et les auditeurs et entre les auditeurs entre eux. J'ai par exemple pris l'habitude d'ouvrir systématiquement dans cette section un forum intitulé Présentez-vous ici ! où j'invite les auditeurs à se présenter et où les enseignants se présentent également.

En génie des procédés, nous organisons les sections suivantes par thématique, ce qui est plus pertinent pour notre cas que l'organisation par semaine. Les ressources et activités apparaissent progressivement au fil du semestre dans ces sections thématiques. Nous ne fournissons pas tout dès le départ. Cela permet de donner aux auditeurs distants le même rythme qu'en présentiel, facilitant le passage de l'un à l'autre et favorisant les échanges entre auditeurs.

Lorsque plusieurs enseignants interviennent dans la même UE, l'enseignant responsable n'impose pas sa manière de travailler aux autres : chacun reste libre de ses choix pédagogiques et la plateforme (que ce soit Plei@d ou Moodle) permet cette pluralité. La « salle des profs » est une section cachée pour les auditeurs, qui permet le partage de ressources par exemple.

*

Dès le départ, nous avons pris le parti d'ouvrir systématiquement toutes les ressources et toutes les activités à tous les auditeurs, qu'ils soient inscrits en présentiel ou à distance. De la même manière, les auditeurs inscrits en Fod peuvent venir aux séances en présentiel et les auditeurs inscrits en présentiel aux regroupements (séances de questions/réponses et d'entraînement sur les archives d'examen, organisées 2 à 3 fois par semestre, initialement prévues pour les auditeurs distants mais désormais ouvertes à tous).

Le fait de pouvoir réécouter à tête reposée des explications non comprises, poser des questions à n'importe quelle heure, disposer de compléments de formation parfois ludiques, contribue à la motivation des auditeurs pour fournir un travail personnel régulier ; ceci leur évite de perdre pied et leur permet de suivre la formation jusqu'à son terme. De surcroît leurs contraintes professionnelles empêchaient parfois nos auditeurs d'assister régulièrement aux séances, et en cas d'absence prolongée (due par exemple à une mission loin d'Île-de-France ou à des changements d'horaires de travail), ils ne parvenaient plus à se raccrocher à leur retour.

Avec la mise à disposition pour tous de tous les supports, ils peuvent continuer à suivre les enseignements à distance pendant leur période de déplacement ou de travail de nuit, puis revenir en présentiel, une fois cette période terminée.

Parmi les ressources d'apprentissage à distance, les auditeurs demandent unanimement des vidéos, sans quoi la formation à distance se résumerait selon eux à lire un livre. Ces vidéos rapprochent effectivement l'enseignement à distance du présentiel. Le démarrage de notre investissement dans la Fod a coïncidé avec la création au Cnam de studios de cours, que nous avons rapidement adoptés.

FOCUS 2 (Les studios de cours) ont été ouverts au Cnam à partir de fin 2002. Ils se présentent comme une salle de cours ou un amphithéâtre classiques, équipés d'un matériel audio et vidéo complet pour la présentation de documents : tableau classique, tableau numérique sur lequel le vidéoprojecteur projette, banc-titre (dispositif muni d'une caméra, qui permet de projeter des « transparents papier », les pages d'un livre ou encore de montrer des objets, des échantillons, etc.), caméras et microphones, ainsi que d'un ordinateur permettant l'enregistrement de la séance et/ou sa diffusion en direct. Il est ainsi possible de diffuser uniquement ce qui apparaît sur le tableau numérique, ou bien de filmer l'enseignant devant le tableau numérique, ou encore l'enseignant écrivant au tableau classique, ou le banc-titre, ou la salle. Le basculement de l'un à l'autre se fait simplement par des interrupteurs placés à chaque position possible ou bien depuis la console de commande. Un moniteur de retour permet à l'enseignant de vérifier que la diffusion correspond à son attente. L'ensemble de l'équipement coûte 30 à 40 k€. Il a l'avantage de pouvoir être pris en main par un enseignant ou un intervenant en quelques minutes.

*

Comparativement à des formules où l'enseignant s'enregistre seul, les commentaires récurrents des auditeurs sont qu'ils trouvent cette méthode « plus humaine » et « plus équitable » : plus humaine car le discours est naturel, pas froid ; plus équitable car ils attachent beaucoup d'importance au fait que les auditeurs en présentiel et à distance reçoivent le même enseignement. Pour les enseignants, le ressenti est que cette façon d'enseigner à distance en moins chronophage, qu'elle s'adapte à toutes sortes de pédagogies (ceci étant lié au fait d'être dans une vraie classe et de pouvoir y avoir les gestes naturels de l'enseignant) et enfin elle est accessible aux intervenants extérieurs, ce qui était une condition importante pour la généralisation de l'offre de formation à distance au Cnam.

Les exercices en présentiel étant inclus dans le cours (pas de séances de TD distinctes), l'enregistrement se poursuit. Les auditeurs de Fod se disent satisfaits de cette méthode : la plupart cherchent « en même temps » que ceux en présentiel, entendent les compléments et commentaires de l'enseignant pendant qu'ils cherchent, puis suivent la correction au tableau ; quelques uns mettent la vidéo sur pause pendant qu'ils cherchent, puis en accéléré jusqu'à la correction.

Permettre le téléchargement des vidéos, si cela peut être utile pour les auditeurs n'ayant pas accès en permanence à une connexion Internet avec un débit suffisant, n'est pas forcément une bonne chose. Personnellement je ne crois pas une seconde que l'on puisse apprendre correctement le génie de la réaction chimique en regardant des vidéos dans le métro ! Il faut que l'auditeur s'installe correctement et au calme, avec son document papier sous la main, de quoi prendre des notes et faire les exercices, une calculatrice, etc.

Le tableau numérique réalise la fusion parfaite du rétro- et du vidéoprojecteur, alliant la flexibilité du premier avec la qualité de rendu et les possibilités d'animation du second ; c'est pourquoi il est également très apprécié pour les cours dispensés uniquement en présentiel.

*

Il y a quelques années, le Cnam avait proposé des « studios de cours portable », rassemblant dans une valise d'une dizaine de kilogrammes les différentes fonctions d'un studio de cours classique. Leur coût était d'environ 10 k€, mais ils nécessitaient une installation à chaque séance et surtout étaient encore lourds. Récemment j'ai conçu un « mini-studio de cours ultra-transportable », qui loge dans une mallette de la taille d'une feuille A4 pour une dizaine de centimètres d'épaisseur, le tout faisant moins de 3 kg pour environ 2000 € (hors l'ordinateur portable). Cette mallette me permet d'enregistrer un cours dans n'importe quelle salle, y compris en salle informatique ; en revanche il faut maîtriser son installation et gérer l'enregistrement, alors que les studios de cours classiques démarrent d'un simple clic avec publication du résultat directement sur le serveur de vidéos du Cnam.

Parallèlement au développement massif de la Fod au Cnam, des études ont été menées sur les résultats aux examens. Comme illustré sur la FIGURE 4.2, autour de 2003 à l'échelle du Cnam, le nombre d'auditeurs inscrits en Fod présents à l'examen était inférieur à 30% et le taux de validation des présents de l'ordre de 50 à 60%, soit un taux de validation global (par rapport au nombre d'inscrits) inférieur à 20%. Aujourd'hui, le taux moyen de présence à l'examen des auditeurs inscrits en Fod est entre 50 et 60% (il est d'un peu plus de 70% en présentiel) et le taux de validation des présents de l'ordre de 80% (environ 85% en présentiel), pour un taux de validation global (par rapport au nombre d'inscrits) de l'ordre de 45% en Fod (contre plus de 60% en présentiel). Je ne me hasarderai pas à tenter d'expliquer les raisons -probablement multiples- de ces progrès, car je ne connais pas suffisamment le public du Cnam dans son ensemble pour cela. On peut cependant retenir que les progrès sont tout à fait remarquables.

Entre 2006 et 2016, sur huit années d'ouverture d'une UE de niveau L3 en génie des procédés, comptant chaque fois une soixantaine d'inscrits, le taux moyen de présence à l'examen était de 58% en Fod et 65% en présentiel ; le taux de validation des présents de 68% en Fod et 56% en présentiel ; soit des taux globaux de validation similaires (autour de 35 à 40%). S'il y a des fluctuations dans ces chiffres d'une année sur l'autre, il n'y a pas de variation monotone. Comparativement aux résultats à l'échelle de l'ensemble du Cnam, on peut dire que notre Fod est plutôt performante. Il semble aussi que nous soyons plus exigeants sur le niveau à atteindre pour valider une UE (FIGURE 4.2).

Concernant les notes, toujours pour cette UE de génie des procédés, la moyenne des auditeurs inscrits en Fod était significativement supérieure (d'environ deux points) à celle des auditeurs inscrits en présentiel. Plus anecdotique, sur ces huit années de fonctionnement, la meilleure note a été obtenue six fois par un auditeur de Fod. Il devient compliqué aujourd'hui de poursuivre ces comparaisons, car l'inscription administrative n'a plus grand chose à voir avec la pratique réelle des auditeurs : de nombreux auditeurs d'Île-de-France, pourtant inscrits en présentiel, ne viennent pratiquement plus en cours. En effet, même si la Fod demande davantage de travail personnel, ceci est compensé par le temps gagné dans les transports.

Plus encore qu'en présentiel, l'implication des auditeurs conditionne leur réussite ; cette implication se manifeste par des connexions régulières sur la plateforme de formation, une participation active aux forums de discussion et la présence (autant que faire se peut) aux regroupements. Phénomène très intéressant (même si nous sommes actuellement encore incapables de le quanti-

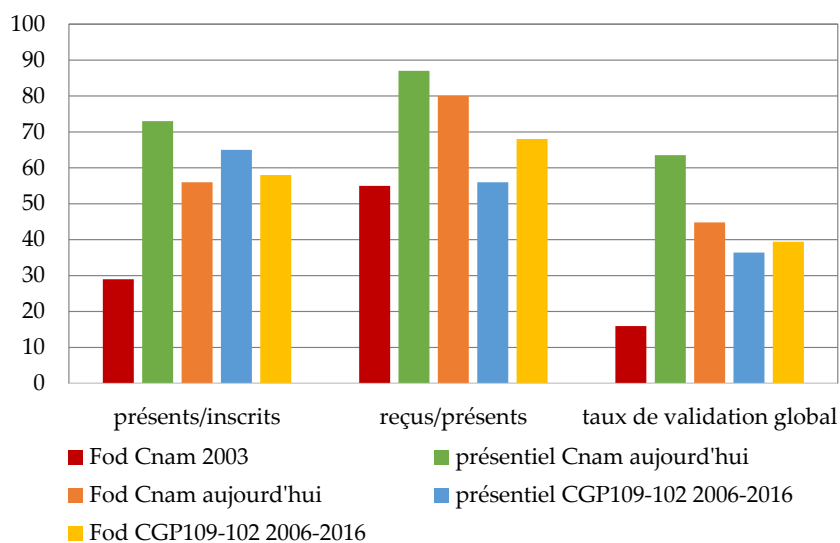


FIGURE 4.2 – Performances de la Fod au Cnam et dans une UE de génie des procédés

fier) : au fil des années, nous nous sommes aperçu que les auditeurs de Fod très actifs conservent connaissances et compétences sur les sujets qu'ils ont appris à distance de manière plus pérenne que ceux du présentiel. Ils sont se surcroît capables de retrouver par le raisonnement certaines choses qu'ils avaient oubliées entre temps.

Les constats chiffrés mentionnés plus haut ne sont nullement en contradiction avec le phénomène *no significant difference* de RUSSELL rapporté par [Endrizzzi, 2012, Thibert, 2012] : ce ne sont pas les outils numériques pour eux-mêmes qui permettent aux élèves de Fod de globalement mieux réussir que ceux du présentiel. L'enseignement à distance permet de choisir le moment et le rythme d'apprentissage, alors qu'en présentiel, afin de limiter les déplacements en Île de France, nous proposons des séances de trois heures les soirs ; or après une journée de travail, souvent un temps conséquent de transport, il est difficile pour les élèves en présentiel d'être efficace pendant ces trois heures. L'autre point important est que les élèves en Fod travaillent tout simplement davantage : conscient de la difficulté de maintenir le cap tout au long du semestre, ils redoublent d'effort et utilisent beaucoup plus largement que les élèves en présentiel les différentes composantes du modèle pédagogique présenté plus loin. Bien que disposant des mêmes outils et supports, les élèves inscrits en présentiel semblent continuer de suivre cette formation de manière classique, font assez peu usage des compléments et quasiment pas du forum de discussion ; bien qu'ils y soient bienvenus, peu d'entre eux participent aux regroupements. Il ne faudrait surtout pas en conclure hâtivement que la modalité présentiel doit être éliminée ! D'une part parce qu'un certain nombre d'élèves affirment que ce modèle traditionnel de formation leur convient nettement mieux ; ils disent avoir besoin de ce rendez-vous hebdomadaire, de « l'ambiance » de la classe, pour maintenir leur effort tout au long du semestre. D'autre part parce que l'enseignant nourrit constamment sa pédagogie des réactions de ses élèves en direct (expressions d'incompréhension sur les visages, questions « à chaud », etc.). On retrouve ici la plupart des conclusions de l'analyse effectuée par [Endrizzzi, 2012] à partir d'un grand nombre d'études en sciences de l'éducation menées dans l'enseignement supérieur.

FOCUS 3 (Le tutorat) est un élément essentiel pour la réussite des auditeurs. Il peut prendre plusieurs formes, qu'il est généralement recommandé de combiner.

Lorsque le nombre d'auditeurs dépasse une masse critique (de l'ordre de 15 inscrits dans

les disciplines scientifiques d'après une étude des ingénieurs pédagogiques du Cnam), les forums de discussion peuvent être extrêmement dynamiques. Mais cela ne se fait pas « tout seul » : l'enseignant doit provoquer l'usage des forums. Pour cela il peut par exemple : faire en sorte de ne pas corriger en présentiel la fin d'un exercice et inviter les auditeurs à poster leurs résultats et discuter de leurs méthodes en cas de divergence des résultats ; lancer un débat ou poser une question ; voire dire volontairement une bêtise en séance... Il semble en outre que lorsque le public est très hétérogène, le forum fonctionne mieux et les auditeurs ont des échanges plus riches. Comme lors des cours en présentiel, il apparaît, après le démarrage du forum grâce à quelques auditeurs, que les autres s'y mettent plus volontiers. Il appartient à l'enseignant de rassurer les auditeurs et de tenter de les désinhiber pour que le forum s'active. Enfin une corrélation semble exister entre la participation au forum d'une UE et la réussite à l'examen correspondant.

Les regroupements sont généralement consacrés à des séances de questions et d'exercices. Dans la mesure du possible, ils ont lieu dans un studio de cours afin de permettre aux auditeurs qui n'ont pu se déplacer, de bénéficier malgré tout de leurs contenus en différé. Dans le cas contraire, l'enseignant et les auditeurs présents au regroupement peuvent en faire un compte-rendu sur le forum. La participation aux regroupements est souvent très faible (moins du quart de l'effectif), ce qui a conduit certaines spécialités à abandonner les regroupements, faute d'auditeurs intéressés par cette possibilité.

Aujourd'hui je pratique abondamment les classes virtuelles, plébiscitées par les auditeurs dès mes premières expérimentations. À l'aide d'un outil de webconférence, ces séances d'une heure en moyenne sont consacrées exclusivement aux questions. Certains collègues les utilisent pour faire cours et déplorent la passivité des auditeurs ; pour ma part j'en ai fait un outil d'interaction pure. Elles sont complémentaires des forums de discussion et peuvent s'articuler avec les regroupements. Généralement un peu timides lors de la première classe virtuelle, les auditeurs sont ensuite beaucoup plus bavards. Quelques uns participent sans poser de questions, profitant des questions des autres et de mes réponses. Ceux qui n'avaient pas pu se connecter en direct peuvent écouter l'enregistrement ultérieurement.

Nous avons pu proposer une offre complète de formation à distance en génie des procédés complète à partir de [2009] (ou 2011 si l'on considère également les UE optionnelles) : seuls les travaux pratiques, qui représente environ 10% du temps de formation, imposent le déplacement pour être réalisés en présentiel.

Ce développement est anticipé dans :

Marie DEBACQ, 2007. Vers la mise en place d'une offre complète de formation à distance en génie des procédés au Cnam : pragmatisme, efficacité et conséquences sur le présentiel. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 96 (8 pages). [communication orale 11^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2007, octobre 2007, Saint-Étienne]

FOCUS 4 (Le modèle pédagogique pour la Fod) développé par la spécialité Génie des procédés s'appuie sur les outils mis à disposition par le Cnam, est constitué de quatre éléments principaux :

1. le premier est un support en PDF : il s'agit soit du diaporama utilisé en cours, soit d'un « poly à trous » que l'élève doit compléter au fur et à mesure des séances, par exemple avec les démonstrations, explications de fonctionnement d'appareillage, corrigés d'exercices et notes diverses ; j'utilisais déjà ce type de support avant la formation à distance, mais dans ce cas le besoin pour l'auditeur de rester actif est encore plus important qu'en présentiel, j'ai donc longtemps continué d'utiliser mes « polys à trous » ;

2. le deuxième correspond aux enregistrements réalisés en studio de cours pendant les séances en présentiel ;
3. le troisième était déjà plus ou moins présent avant la mise en place de la plateforme, mais il s'est notablement développé en ligne : il s'agit de compléments de nature diverses, dans lesquels les auditeurs piochent à leur guise les éléments qui les intéressent (liens, vidéos, etc.) ou qui leur sont nécessaires pour mener à bien leur apprentissage (corrigés, archives et liste de savoirs et savoir-faire à acquérir) ;
4. le quatrième est intrinsèquement lié à l'enseignement à distance, même s'il se révèle utile aussi pour le présentiel, c'est le tutorat.

Plus encore qu'en présentiel, il faut prévoir des exercices très simples pour commencer et de manière générale davantage scénariser son intervention. Car si en présentiel, on peut improviser une nouvelle explication, un petit exercice complémentaire pour « raccrocher » les auditeurs que l'on voit perdus, par définition à distance on ne les voit pas et il faut avoir anticipé les difficultés qu'ils seront susceptibles d'avoir. Il est donc beaucoup plus facile et efficace de passer à distance un enseignement que l'on a déjà pratiqué avec le même type d'auditeurs en présentiel, que de se lancer directement dans la Fod sur un cours que l'on fait pour la première fois.

L'enseignement à distance pousse l'enseignant à perfectionner ses supports, à innover dans les présentations, à inventer de nouveaux outils, qui enrichissent aussi les cours en présentiel.

L'intérêt de ce modèle pédagogique construit autour des outils numériques était significatif ; il restait à convaincre les élèves du présentiel de s'y consacrer, pour que eux aussi progressent. Une meilleure appropriation de la discipline est en effet sous-jacente au développement de la Fod, mais reste difficilement quantifiable : elle est probablement due à la fois au travail plus conséquent et plus en profondeur fourni par les élèves grâce aux outils développés pour eux, mais aussi au partage d'expérience professionnelle entre les auditeurs, qui peut s'additionner et se confronter à celle des autres et à ce qu'affirme l'enseignant. Elle représente une véritable richesse pour la formation au Cnam : une forme encore balbutiante du connectivisme¹⁶. D'après le constat d'[Endrizzi, 2012], le public particulier du Cnam (élèves déjà en situation professionnelle, plus âgés, souvent plus matures) est sans doute pour beaucoup dans le relatif succès des outils numériques pour la formation. Le rôle de l'enseignant évolue également avec le numérique [Endrizzi, 2012, Thibert, 2012] ; les enseignants du Cnam y sont peut-être davantage préparés, car déjà habitués à une relation avec leurs élèves bien différente de celle de la formation initiale. Nous avons en effet l'habitude d'avoir dans la classe quelqu'un qui connaît beaucoup mieux que nous un appareillage particulier, parce qu'il travaille tous les jours avec depuis des années ; nous savons gérer et tourner à l'avantage de tous, des situations où quelqu'un d'autre que l'enseignant sait beaucoup de choses. On retrouve ici le rôle de « guide » de l'enseignant.

Ce modèle finalement assez simple a permis le développement massif de la Fod en génie des procédés sans la phase transitoire qu'a connu le Cnam dans sa globalité, où la Fod était très peu efficace. Plus intéressant encore, nous nous sommes aperçu que nos auditeurs de Fod avaient acquis des connaissances et des compétences plus pérennes que ceux du présentiel.

En [2013], plus d'un quart des diplômés de la spécialité Génie des procédés du diplôme d'ingénieur Cnam s'étaient formés quasiment exclusivement à distance, ne suivant en présentiel que les travaux pratiques. De surcroît, chaque diplômé de ce niveau avait suivi, pour des raisons

16. Théorie de l'apprentissage, développée notamment par Stephen DOWNES pour expliquer les effets de la technologie sur la façon dont les gens vivent, communiquent et apprennent.

variées, au moins une unité d'enseignement à distance, généralement davantage. Aujourd'hui il est pratiquement impossible de mettre ces chiffres à jour, car il n'y a plus véritablement de distinction entre présentiel et distance, qui forment un continuum ; la distinction au niveau de l'inscription administrative n'a plus de sens au regard des pratiques réelles des auditeurs.

Ces éléments sont exposés dans :

Marie DEBACQ, 2013. Pédagogie 2.0 : outils efficaces ou gadgets pour une formation en génie des procédés au Cnam? *Récents Progrès en Génie des Procédés* 104 (8 pages). [communication orale 14^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2013, octobre 2013, Lyon]

FOCUS 5 (Outils numériques) Mon propos n'est pas du tout de faire ici le catalogue des nombreux outils numériques que j'ai expérimentés jusqu'à aujourd'hui. Je vais donc me focaliser sur deux d'entre eux, liés à la création des ressources pédagogiques :

L'enregistrement en studio de cours a deux avantages : l'égalité entre les auditeurs et la rapidité de production pour l'enseignant. Cependant au fil du temps, en accumulant des heures de séances en présentiel enregistrées, d'une qualité parfois peu satisfaisante, je me suis posé la question des capsules vidéos, qui se développent un peu partout et j'ai décidé de tester cette formule. Pour le développement de ses MOOC, le Cnam s'est doté d'un studio d'enregistrement professionnel. Bien qu'il soit très occupé, j'ai pu en profiter à des périodes plus creuses et enregistrer mes capsules. J'ai bénéficié pour préparer ces enregistrements des conseils des ingénieurs pédagogiques du Cnam. Tout d'abord concernant la durée des capsules : 5 à 10 min ; en-dessous, on est dans la catégorie du film publicitaire ou distrayant et l'auditeur n'entre pas dans le sujet ; au-delà, il « décroche ». Je ne suis pas particulièrement friande d'apparaître sur ces vidéos, mais selon des études que nos collègues ingénieurs pédagogiques ont analysées, cela semble important pour créer l'interaction avec l'auditeur. Le dernier point, je l'avais constaté depuis longtemps avec les auditeurs en présentiel et dans les studios de cours : il faut écrire, dessiner. À l'époque du rétroprojecteur, j'utilisais des transparents imprimés que je complétais à la main en direct pendant la séance. Lorsque nos salles se sont équipées de vidéoprojecteur, j'ai pensé qu'écrire les équations serait préférable car elles seraient plus lisibles. Mais je suis vite revenue en arrière : lorsque l'on fait défiler ses diapos, l'auditeur suit vaguement mais ne comprend pas grand chose et ne retient presque rien ; lorsqu'on écrit les démonstrations, c'est-à-dire qu'on les fait avec eux, que l'on dessine ensemble les allures de courbes, etc., ils comprennent et retiennent mieux. Dans les capsules vidéos, il faut se mettre un peu en scène, faute de quoi la vidéo devient rapidement froide et ennuyeuse. Mes expériences passées de théâtre amateur m'ont aidée à réaliser ces capsules ; les conseils du réalisateur et des ingénieurs pédagogiques sont également précieux.

Le second outil que je voudrais mettre ici en avant est la chaîne éditoriale. J'utilise Scenari, qui est une suite logicielle libre développée par l'UTC pour la conception et l'utilisation de chaînes éditoriales permettant la création de documents multimédia (édition structurée et publication multi-support). Parmi les différents modèles proposés par Scenari, Opale est celui qui a été conçu pour la production de ressources pédagogiques. Scenari a été conçu par des chercheurs et jouit d'une communauté très active. Je considère qu'Opale est l'outil dont j'avais toujours rêvé pour produire des ressources pédagogiques complètes. Un module de formation développé avec Opale est constitué de grains : ce sont des éléments de connaissance hautement structurés (à l'aide de balises pédagogiques) et que l'on peut ensuite agencer à sa guise, en les associant avec des éléments de quiz, pour construire des activités, elles-mêmes structurées en divisions au sein du module. Pour chaque échelle de cette structure, on définit des objectifs, on rédige une introduction et une conclusion. Cette organisation conduit naturellement l'auteur à davantage réfléchir à sa pédagogie. D'ailleurs si Scenari demande un certain temps

d'appropriation, ce n'est pas à cause d'une difficulté particulière du logiciel, mais parce qu'il oblige à revoir ses mécanismes pédagogiques. Avec Scenari l'auteur se concentre sur le contenu, dans le cas d'Opale sur son message pédagogique. C'est le *WYSIWYM* - *what you see is what you mean*, au contraire du *WYSIWYG* - *what you see is what you get* des outils bureautiques traditionnels. L'auteur ne s'occupe plus de la forme, qui sera gérée automatiquement et selon divers formats (support papier, diaporama, ressource interactive) au moment de la publication. Enfin Scenari facilite la réutilisation, la gestion de versions (y compris de traductions) et le travail collaboratif.

Les capsules vidéos et la chaîne éditoriale fonctionnent de concert et la réflexion sur la conception d'un grain dans Scenari est de même nature que celle pour la préparation d'une capsule vidéo : aller à l'essentiel, avec des grains et des capsules « autonomes ». C'est probablement la partie la plus difficile de l'exercice.

Développer des capsules vidéos et un module de formation demande énormément de temps. Il faut donc y aller progressivement, par exemple : concevoir la structure du module la première année en réutilisant des vidéos de studio de cours ; enregistrer les capsules vidéos la deuxième année ; développer les quiz la troisième ; etc.

Plus globalement, les financements pédagogiques ne doivent pas se limiter aux infrastructures (matérielles et logiciels), il faut aussi financer l'accompagnement : d'une part avec des postes d'ingénieurs pédagogiques et d'autre part avec du temps dégagé pour que les enseignants-chercheurs s'approprient ces outils et en fassent des ressources pensées dans un schéma pédagogique.

FOCUS 6 (Le rôle des ingénieurs pédagogiques) est très important parce que ce sont eux qui font toute la veille, la bibliographie. Leur rôle transverse par rapport aux disciplines et aux niveaux de formation, permet de faire diffuser les idées, les outils et les méthodes. Ils ne se bornent pas à apporter à l'enseignant une trousse à outils, ni même à lui apprendre à se servir de ces outils, ils l'amènent à réfléchir sur sa pratique pédagogique, à concevoir son modèle pédagogique et alors à choisir les outils appropriés. Inversement ils ont besoin du retour des enseignants pour enrichir leur connaissance de la pédagogie, de l'effet de telle méthode sur tel public, etc. Pour réaliser des progrès significatifs en pédagogie, la relation entre enseignants et ingénieurs pédagogiques doit se construire dans la durée. En ce sens je vois le tandem enseignant - ingénieur pédagogique (même s'il ne faut pas que le même enseignant travaille toujours avec le même ingénieur pédagogique et réciproquement) comme la clé du passage de la pédagogie à la recherche.

En [2014], j'ai mené ma première expérience de classe inversée, puis plusieurs autres dans les années qui ont suivi. Je considère le passage à ce type de pédagogie comme la suite logique de tous les développements qui ont précédé en Fod et qui avaient diffusé dans le présentiel : la classe inversée étant en quelque sorte une manière de fusionner ces deux modalités et de proposer une formule hybride, à la fois unifiée et à curseur variable entre les degrés de présence et de distance.

Après avoir mis de la présence dans la distance, en développant notamment le tutorat pour accompagner les auditeurs de Fod, j'ai ainsi entrepris de mettre de la distance dans la présence pour pousser les auditeurs du présentiel à une meilleure appropriation des connaissances et des compétences.

FOCUS 7 (« Enseigner à l'envers,) apprendre à l'endroit, ou l'inverse ? » : c'est ainsi que Marcel LEBRUN théorise et même modélise la classe inversée [Lebrun and Lecoq, 2015, Lebrun, 2016]. On lit dans la littérature que la *flipped classroom* est née dans les années 1990, notamment autour d'Eric MAZUR, professeur de physique à Harvard. Pourtant la méthode SCHWARTZ, du nom du directeur de l'École des Mines de Nancy dans les années 1960¹⁷, fonctionnait sur un principe similaire bien avant l'ère numérique : les parties essentiellement transmissives sont étudiées en autonomie par les apprenants, tandis que les activités très interactives et/ou difficiles sont réalisées avec l'enseignant. Cette méthode favorise le travail en groupe, les recherches, les débats et permet de monter plus haut dans la taxonomie de BLOOM (FIGURE 4.3) que l'enseignement traditionnel.

Au Cnam nous inversions déjà beaucoup de choses :

- apprendre « dans le désordre » (les opérations unitaires avant les phénomènes de transfert) ; l'examen probatoire en fin de cursus étant là pour vérifier que tout avait été remis à l'endroit dans l'esprit des auditeurs ;
- accumuler de l'expérience professionnelle (et la valider *a posteriori*) avant d'apprendre la théorie ;
- perfectionner la Fod puis améliorer le présentiel ; etc.

Ma première expérience d'enseignante s'est faite avec le professeur Denis ABLITZER, qui continuait de pratiquer la méthode SCHWARTZ à la fin des années 1990. Ce souvenir, l'écoute des conférences de Marcel LEBRUN et toute l'histoire du développement de la Fod par notre équipe au Cnam, ne pouvaient que me conduire à expérimenter la classe inversée avec des outils numériques :

- Le poly ou le livre est devenu un module d'auto-formation développé avec Scenari et parsemé de capsules vidéos que j'ai enregistrées ou moissonnées sur YouTube et LearnChemE <<http://www.learncheme.com/>>.
- Les séances de questions au professeur en amphi se sont transformées en classes virtuelles et en discussions nourries sur les forums.
- Les TD se passent dans un espace réorganisé pour favoriser le travail de groupe, s'inspirant de l'expérience d'Annick CARTER, qui pratique la classe inversée au Canada avec des élèves âgés de 8 à 13 ans <<https://annickcarter1.wordpress.com//>>. Lorsque je fais travailler chaque groupe sur un problème différent, il y a toujours au moins un auditeur de chaque groupe qui accepte d'aller enregistrer un corrigé pour tous les autres, y compris ceux qui sont à distance.
- J'ai expérimenté une première fois avec les apprentis en énergétique la recherche en autonomie et la restitution sous la forme d'un mini-exposé de 3 à 5 min sur divers sujets en distillation. Les auditeurs de HTT en génie des procédés le feront sur les technologie d'extraction liquide-liquide en janvier 2018.

17. Dans un récent billet "Un p'tit coup d'œil dans le rétro et ça repart..." sur son blog personnel (7 Septembre 2017), Frédéric HAEUW rappelle par ailleurs combien Bertrand SCHWARTZ fut visionnaire en matière d'éducation en général. Ainsi dès 1973, il anticipait la possibilité de « chacun de disposer de « n'importe quel document » et, avec une installation très légère et très souple (...) d'être en situation de dialoguer avec un formateur, de le voir et de se faire entendre et voir par lui ». Poursuivant ainsi : « il apparait impensable que tous les canaux ainsi mis à disposition de la population soient utilisés pour passer des programmes élaborés (...) on verra ainsi se développer de véritables possibilités pour tous et de produire et de participer à des discussions sur les productions ». Et enfin « sur le plan de l'utilisation de ces moyens par l'appareil éducatif, cela ne peut pas ne pas avoir des conséquences considérables ».

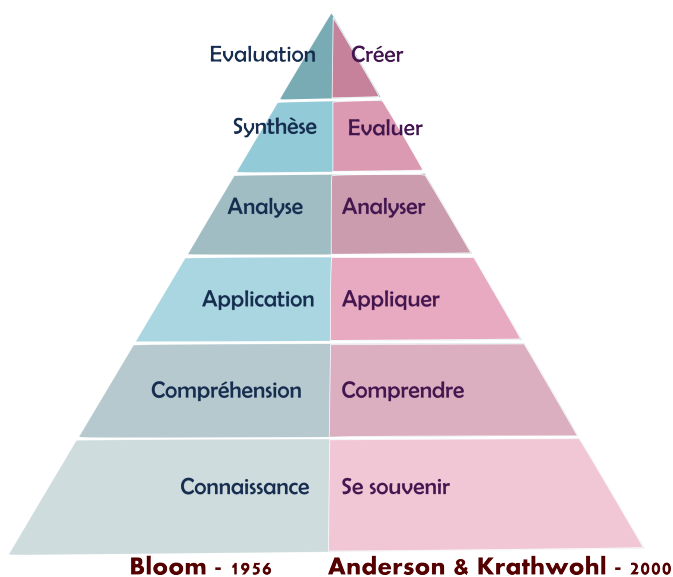


FIGURE 4.3 – Versions originale et révisée de la taxonomie de BLOOM [[blog de Frédéric DURIEZ Didac2b](#)]

TABLEAU 4.1 – Synthèses de mes expériences de classe inversée

années	thématique	nombre auditeurs	ni-veau	durée*	période	interactions
2014 & 2016	Hydraulique	50-60	L3	18h (2 ECTS)	6 à 7 semaines	3 à 4 classes virtuelles présentiel enregistré : 1 TD, 2 séances par groupes, 1 séance en salle info
2015 & 2017	Transferts de matière	60-70	L3	6h	3 semaines	2 classes virtuelles 1 TD par groupes
2015 & 2017	Extraction liquide-liquide	60-70	L3	18h (2 ECTS)	6 semaines	3 classes virtuelles 2 TD par groupes 1 séance de mini-exposés
2016 & 2017	Distillation	13 à 18 apprentis	L3	4 à 5h	1 mois	1 séance en présentiel : mini-exposés puis exercices de difficulté croissante
2015 & 2017	Réacteurs poly-phasiques	10-15	M2	6h sans exercice	7 semaines	3 classes virtuelles 3 TD par groupes

* : équivalente en présentiel

Le TABLEAU 4.1 synthétise mes expériences de classe inversée jusqu'à présent.

Les auditeurs sont généralement réticents au début, puis la plupart d'entre eux adoptent la méthode. L'adaptation est plus difficile pour les auditeurs de présentiel. Quelques uns restent réfractaires à cette pratique. Cette année pour la première fois un de mes auditeurs avait déjà pratiqué la classe inversée et a confirmé, lors de ma classe virtuelle de présentation, les avantages de cette pédagogie.

Il est malheureusement actuellement impossible de quantifier l'effet de la classe inversée sur les notes aux examens : d'une part je n'ai pas passé toute l'UE en pédagogie inversée, or l'exercice sur la thématique pour laquelle je l'ai pratiquée n'a pas la même difficulté d'une année sur l'autre, les autres exercices étant également de difficulté variable ; d'autre part la forme d'examen que nous pratiquons aujourd'hui n'est probablement pas la meilleure façon d'évaluer les nouvelles compétences acquises avec la classe inversée.

Comme il est souvent dit dans la littérature, la classe inversée entraîne un changement de posture de l'enseignant, qui devient le « guide » déjà évoqué, tandis que les apprenants sont plus actifs et ouverts. Ils acquièrent d'autres compétences que celles purement scientifiques : autonomie, coopération et communication dans les cas où on les fait travailler sur la restitution de connaissance.

Pour l'enseignant comme pour les auditeurs, la classe inversée demande plus de travail. C'est le prix de l'accroissement des compétences.

Ces expériences sont présentées dans :

Marie DEBACQ, Nicole CORSYN, François DELASTRE, 2015. Scenari + Moodle = une première expérience de classe inversée en génie des procédés au Cnam. article de 5 pages en français paru dans les actes [communication orale *colloque PédagoTice*, juin 2015, Toulouse]

mais aussi

Marie DEBACQ, 2015. A Flipped Classroom Experiment In The Context Of Lifelong Learning In Chemical Engineering. résumé 783. [communication orale *10th European Congress of Chemical Engineering - ECCE2015*, septembre 2015, Nice – France]

et

Marie DEBACQ, 2015. Scenari + Moodle = Self-training module for a flipped classroom in distance lifelong learning or in traditional teaching. [communication orale *AIChE Annual Meeting 2015*, novembre 2015, Salt Lake City – États-Unis]

ou encore

Marie DEBACQ, 2016. Self-training module and serious game for a flipped classroom about liquid-liquid extraction for future engineers in lifelong learning. [poster *22th International Congress of Chemical and Process Engineering - Chisa2016*, août 2016, Prague – République Tchèque]

Je terminerai cette « petite histoire de la Fod en génie des procédés au Cnam » avec quelques commentaires et recommandations personnels :

- Il faut expliquer aux apprenants sa méthode pédagogique. En particulier lorsqu'elle est en phase expérimentale, il faut aussi leur dire que l'on attend d'eux un retour, des commentaires, des critiques, des suggestions. Souvent il faut les forcer un peu au début ; notamment si votre méthode leur demande plus d'effort, il faut donc leur annoncer au départ quels bénéfices ils en retireront et débattre avec eux à la fin de cette expérience commune.
- Il ne faut pas vouloir tout faire d'un coup : sauf soutien exceptionnel de l'institution, nous n'en avons tout simplement pas le temps ; il faut donc y aller pas à pas. Cela a aussi l'avantage de permettre de rectifier au fur et à mesure ce qui ne fonctionne pas, de tester plusieurs pistes pour ne retenir que les plus efficaces.
- Il est très important d'échanger/discuter/bavarder avec d'autres enseignants (y compris, voire de préférence, avec des enseignants d'autres disciplines et d'autres niveaux) et avec

les ingénieurs pédagogiques.

- Puisque le développement de ressources numériques est très chronophage, nous devons partager les ressources que nous développons. Je pense que nous avons d'ailleurs intérêt à partager plutôt des grains élémentaires qu'une ressource complète, car cette dernière est conçue pour un public particulier par un enseignant ayant une certaine manière de travailler. Alors que des grains élémentaires peuvent être repris et re-scénarisés à la guise des autres enseignants. Je ne vois pas d'autre explication aux plus de 14 000 vues en un an de l'animation que j'ai conçue avec un graphiste pour expliquer le fonctionnement d'un échangeur à plaques ou aux presque 36 000 vues en un an et demi de la vidéo où j'explique les courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge, alors que les autres vidéos du même module ont seulement autour de 3000-4000 vues. Pour ma part, je ne crains pas de phénomène de standardisation, souvent évoqué dans les articles consacrés aux MOOC : la coopération entre enseignants conduit à la réutilisation de ressources élémentaires (les grains), pas à la duplication à l'infini d'une seule et unique méthode pédagogique.
- Je ne crois pas que l'ordinateur remplacera l'enseignant dans un avenir proche ou lointain. Je suis par contre sûre que notre métier va évoluer, comme beaucoup d'autres, dans un monde aujourd'hui global et numérique. Le plus important est de continuer à prendre du plaisir dans ce que l'on fait et à jouir de la liberté que nous offre notre statut ; je suis convaincue que ce sont les deux moteurs de la plupart des enseignants-chercheurs. Notre enthousiasme se transmet remarquablement bien aux apprenants.

Une compilation de ma quinzaine d'années d'expériences de pédagogie numérique a fait l'objet de : Marie DEBACQ, 2017. Chemical engineering education in the digital age. [keynote 10th World Congress of Chemical - WCCE10, octobre 2017, Barcelone – Espagne]

Désormais la formation des enseignants-chercheurs à la pédagogie est obligatoire et je pense que c'est une bonne chose sur le principe. Toute la question est de savoir comment et par qui cette formation sera faite. Dès 2011, [Endrizzi, 2011] expliquait très bien les enjeux de cette formation, qui doit s'inscrire dans la durée, en lien avec des ingénieurs pédagogiques, mais aussi des chercheurs en sciences de l'éducation pour mettre en œuvre de vrais outils d'évaluation de l'impact de toute nouvelle forme pédagogique. À la fin de son article, elle soulève aussi la question du changement et de la manière dont les nouvelles pratiques peuvent diffuser. De manière beaucoup plus caustique, [Albero, 2011] analysait la même année les relations technologies - formation « entre supercherie et opportunité ». Elle termine son article sur la nécessité de développer la recherche dans ce domaine.

Puisque d'un côté, la carrière des enseignants-chercheurs se fait sur leur production scientifique et que de l'autre côté, l'innovation pédagogique demande du temps (et des moyens), faisons entrer nos innovations et réflexions pédagogiques au rang de productions scientifiques ! Cela ne peut se faire qu'avec la collaboration des ingénieurs pédagogiques et de chercheurs en sciences de l'éducation.

*
* *

Lors de la journée du Groupe Formation de la SFGP "Modification des programmes : quel impact sur les formations en génie des procédés du bac au master ?" que nous avons organisée le 15 octobre 2015 au Cnam à Lyon, un certain nombre de difficultés ont été exprimées par les enseignants d'IUT et d'école d'ingénieur en formation initiale, liées non seulement aux modifications des programmes au lycée, en classes préparatoires et en IUT, mais aussi à l'évolution des étudiants et de leur comportement face à l'apprentissage.

Nous avons d'ailleurs invité à la table ronde finale de cette journée Laure ENDRIZZI et Florence SIBUT suite à leur article "Les nouveaux étudiants, d'hier et d'aujourd'hui" [Endrizzi and Sibut, 2015]. Elles concluent de leur étude que la population des étudiants est plus hétérogène et moins captive que par le passé. Leurs conditions de vie sont de plus en plus difficiles ; ils pratiquent l'« autosélection » et subissent plus qu'ils ne choisissent leur orientation. Leur parcours sont en conséquence plus complexes et nécessitent davantage de différenciation. [Feyfant, 2016] a d'ailleurs étudié en détails cette question et relève plusieurs niveaux de différenciation : contenus ; processus d'apprentissage ; productions des élèves. Elle évoque la structuration de la classe (en espace et en temps) comme un moyen de parvenir à cette différenciation. [Reverdy, 2016] s'est penchée sur la question de la coopération entre élèves et définit les notions d'entraide et de guidance. Elle donne également des pistes sur le rôle de l'enseignant pour favoriser cette coopération. [Endrizzi and Sibut, 2015] notent enfin qu'il n'y a pas de transfert des pratiques numériques privées vers les comportements d'apprentissage et pas d'attente réelle pour les pédagogies innovantes.

À la fois dans les difficultés qu'évoquent les collègues de formation initiale et dans l'évolution des étudiants pointées par les chercheurs en sciences de l'éducation, j'ai retrouvé des traits caractéristiques des auditeurs du Cnam. En guise de conclusion, j'aimerais donc lister quelques propositions de transposition qui pourraient être réalisées de nos expériences en formation professionnelle supérieure hors temps de travail vers la formation initiale.

- Les lacunes en mathématiques sont une problématique ancienne avec les auditeurs du Cnam. Nous les contournons de deux manières : en « épiluchant » un peu plus les démonstrations en cours et en fournissant des corrigés d'exercices détaillés où toutes les étapes des calculs sont fournies ; en contournant les développements analytiques avec des résolutions numériques et en formant nos auditeurs à réaliser ces résolutions avec un tableur ou un langage de programmation type Matlab.
- Les auditeurs du Cnam ont des lacunes, mais aussi des qualités et des compétences différentes des « anciens » étudiants de formation initiale : ils ont de l'expérience professionnelle, davantage de maturité et de sens physique, autant d'éléments que nous exploitons dans nos enseignements. Les nouveaux étudiants ont eux aussi de nouvelles compétences qui peuvent être exploitées : un comportement globalement plus actif, davantage de culture scientifique même si elle est souvent très superficielle, des aptitudes expérimentales, des compétences en communication et restitution d'informations, un appétence pour la coopération entre pairs et le travail en équipe. Toutes ces qualités peuvent être mises en œuvre dans des modes pédagogiques différents, dit actifs.
- Le manque de confiance en soi est aussi une caractéristique courante chez les auditeurs du Cnam. L'enseignant a un rôle important pour surmonter ce handicap en les amenant à constater qu'ils ne sont « pas si nuls », même en mathématiques ! La bienveillance des enseignants est un élément important de la réussite des auditeurs au Cnam. Elle n'empêche pas l'exigence scientifique, bien au contraire. @lendrizz (chercheur à l'Institut Français de l'Éducation - Ifé) évoque régulièrement combien il faut « bienveillance et exigences pour faire réussir les élèves ».
- L'hétérogénéité de la population étudiante et le besoin de différenciation se gèrent au Cnam à l'échelle des cursus, qui sont à la carte, et à l'échelle des UE, avec la disparition progressive du cours magistral et le développement des TD multi-exercices. Les outils numériques permettent d'individualiser l'apprentissage au sein même des UE et responsabilisent les auditeurs vis-à-vis de leur formation.
- La coopération entre auditeurs est un élément très efficace pour leur réussite. Elle est cultivée bien sûr par les auditeurs eux-même, mais aussi par l'enseignant. Elle doit être

réactivée à chaque semestre, puisque c'est un nouveau groupe d'auditeurs que nous avons pour chaque UE.

- Concernant le cloisonnement entre les connaissances acquises, il y a peut-être une piste à creuser du côté de l'inversion dans l'ordre d'apprentissage...
- Pour ce qui est des difficultés de raisonnement et le manque de rigueur méthodologique, il me semble que le rôle des enseignants ne se borne pas à transmettre des concepts scientifiques, mais aussi à faire acquérir de la méthode ; si elle n'a pas été acquise avant, il nous appartient de leur apprendre.
- Enfin, si les auditeurs du Cnam ne manquent pas de motivation, le manque de travail personnel est une réalité pour certains d'entre eux. Lorsqu'il s'agit de la difficulté de mener de front vie professionnelle, vie familiale et études, la solution est généralement dans la révision (et l'allongement) du plan de formation. En cas de manque de travail personnel pur et simple, une fois rappelé que l'on ne devient pas ingénieur sans travailler, je considère que mon rôle n'est pas de faire la morale à des adultes.

Nous avons voulu ouvrir ce débat avec :

Marie DEBACQ, Veronica BELANDRIA, 2017. Nos étudiants ne sont pas des mutants, il faut pourtant faire évoluer notre pédagogie : réflexions croisées sur l'enseignement du génie des procédés dans le supérieur. [communication orale *Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2017*, juillet 2017, Nancy]

« **La voie royale** », tentative de définition des étapes rationnelles de la conception d'une pédagogie numérique. Comme Jacques VILLERMAUX, je limiterai mon propos au cas du développement d'une méthode pédagogique particulière adaptée à un public donné et non au cas de ce qu'en génie de la réaction chimique on nommerait les réacteurs polyvalents, dont un équivalent dans le domaine pédagogique pourrait être les MOOC.

La démarche que je propose est une première ébauche, qui aura besoin d'être maturée en collaboration avec des ingénieurs pédagogiques et des chercheurs des sciences de l'éducation :

1. La connaissance du public me semble être la première et incontournable étape de la mise en place d'une pédagogie, qu'elle soit numérique ou non. Il faut recueillir un maximum d'informations sur les apprenants : leurs connaissances, leurs compétences (y compris non-scolaires), leurs motivations, leurs objectifs et leur disponibilité.
2. Il faut également définir clairement les objectifs et savoir de quels moyens on dispose pour les atteindre. Le numérique n'est pas une finalité en soi, en revanche il offre de nouvelles possibilités pédagogiques. Les objectifs peuvent par exemple se définir en termes de savoirs, de savoirs-faire et de savoirs-être à acquérir.
3. En fonction des points précédents, on choisit un modèle pédagogique ; il en existe trois types :
 - (a) Le modèle transmissif (ou encyclopédiste), centré sur l'enseignant : ce modèle s'appuie sur le fait que l'apprenant n'a aucune conception préalable du sujet traité (tête vide) et que le savoir est reçu sans déformation tel que l'enseignant le perçoit (tête pleine).
 - (b) Le modèle comportementaliste (ou béhavioriste), centré sur l'objet de l'apprentissage : l'apprenant résout des tâches successives, décomposées et planifiées par l'enseignant.
 - (c) Le modèle constructiviste, centré sur l'élève : l'enseignant définit un problème qui implique une déstabilisation (conflit cognitif) de l'apprenant face à sa prise de conscience sur l'insuffisance de ses connaissances et compétences initiales, qu'il va devoir transformer, compléter, réorganiser voire éliminer pour résoudre le problème complexe. Le modèle socioconstructiviste implique une résolution en équipe du problème.

Comme en génie des procédés, il est possible de faire des modèles hybrides à partir de ces trois types de modèles. Évidemment le modèle choisi permet de monter plus ou moins haut dans la taxonomie de BLOOM (FIGURE 4.3).

4. Le modèle pédagogique débouche sur une réflexion à propos la chronologie de l'apprentissage, les ressources et activités qu'il implique, le temps consacré à chacune : c'est la scénarisation.
5. Il faut ensuite rassembler ou créer les ressources et préparer les activités : c'est la médiatisation. Une plateforme de formation comme Moodle permet leur organisation et articulation ; l'accès à certaines ressources ou activités peut être conditionné à la réalisation préalable d'une ou plusieurs conditions. Lorsque les moyens sont modestes ou que le temps manque, on pourra se limiter à des ressources peu sophistiquées ou « recyclées », au moins dans un premier temps.
6. Vient ensuite l'expérimentation, la mise en œuvre. Cette étape impose toujours des allers-retours sur les points précédents pour améliorer la pédagogie par exemple selon un processus du type roue de Deming (*PDCA*, *plan-do-check-act*).
7. Enfin vient la généralisation, le passage à la production de masse. Cependant comme l'enseignant est lui-même une donnée d'entrée du modèle, celui-ci n'est jamais immédiatement généralisable, mais peut être transposé, y compris vers un public différent du public initial.

Conclusion générale

MA VISION du génie des procédés est en totale cohérence avec la mission que l'Abbé Grégoire a confié au Cnam en matière de recherche lors de sa création en 1794 : « perfectionner l'industrie nationale ». On peut d'ailleurs voir les statues de Denis PAPIN et de Nicolas LEBLANC côte-à-côte dans la cour d'honneur, un duo annonciateur du génie des procédés... Pour moi la mission confiée par l'Abbé Grégoire portait déjà en elle, en ces temps de révolution, l'idée que l'industrie ne doit pas seulement s'améliorer pour augmenter ses profits, mais également contribuer à l'amélioration de la société en veillant au bien-être du citoyen. La déclinaison moderne de cette seconde préoccupation se retrouve dans les défis sociétaux que sont l'environnement, l'énergie, la santé et l'alimentation. Il est amusant de remarquer que les trois premiers termes figuraient dans le précédent nom de mon laboratoire¹⁸ et que le quatrième résume le champ de recherches de celui qui sera peut-être mon prochain laboratoire¹⁹.

Quant à la mission de formation que l'Abbé Grégoire confia au Cnam en 1794, il la résumait alors ainsi : « éclairer l'ignorance qui ne connaît pas et la pauvreté qui n'a pas les moyens de connaître ». Ne dénigrant nullement la formation initiale des plus jeunes, je crois bien que cette mission de promotion sociale est LA plus belle de l'enseignement supérieur ; une particularité hexagonale qui nous honore et que nos collègues étrangers -quand ils ont l'opportunité de la connaître- nous envient.

J'ai contribué à la mise en place de **six installations pilotes** depuis mon arrivée au Cnam. L'exercice n'a pas toujours été simple, car il fallait jongler entre nos connaissances du procédé (maigres dans certains cas), les contraintes techniques et budgétaires, l'habileté technologique et expérimentale des doctorants et stagiaires, les désirs des étudiants et les prescriptions des responsables du laboratoire. Les installations qui en résultent ont toutes fait l'objet d'un important travail de conception et de mise en place ; elles sont plus ou moins ingénieuses et efficaces, mais elles ont toutes permis de produire des résultats. C'est pourquoi je tenais à les présenter relativement en détails dans le premier chapitre de ce mémoire.

L'idée de présenter mon mémoire d'HDR autour de l'**hydrodynamique** s'est imposée depuis plusieurs années déjà : par goût, par conviction et parce que c'est bien le fil rouge de mes travaux, qui pouvaient sembler de prime abord très dispersés. J'ai eu jusqu'ici l'opportunité de travailler en hydrodynamique aux échelles méso- et macroscopiques, avec des techniques « modestement sophistiquées ». J'entends par là que nous ne disposons pas au laboratoire de techniques de mesures de pointe, mais nous ne manquons pas d'idées pour réaliser des dispositifs astucieux permettant de répondre à nos besoins d'informations expérimentales. Notre force est peut-être notre capacité à produire des résultats en grand -voir très grand- nombre, ce qui nous poussera un jour ou l'autre à nous intéresser aux nouveaux développements en matière de stratégie expérimentale, voire aux frontières avec le très en vogue *big data*.

18. Laboratoire de génie des procédés pour l'environnement, l'énergie et la santé - EA21

19. GENIAL (Ingénierie, procédés, aliments) - UMR1145

Je vois l'hydrodynamique comme la fondation sur laquelle on peut bâtir la maison de la connaissance d'un procédé et de sa **modélisation**. Souvenons-nous que les modèles dits de connaissance pure sont souvent fondés sur la résolution des équations de Navier-Stokes, équations aux dérivées partielles non linéaires qui décrivent le mouvement des fluides. Dans les modèles phénoménologiques, on écrit le premier principe de la thermodynamique (conservation de l'énergie) et l'équation de continuité (conservation de la matière), mais on simplifie habituellement la représentation de l'hydrodynamique (conservation de la quantité de mouvement) : soit en utilisant des corrélations, soit en formulant des hypothèses de fonctionnement (écoulement piston, mélange parfaitement agité...). J'essaie de faire un peu mieux. Sans pour autant tendre vers des modèles de connaissance pure, parce que mon travail sur l'hydrodynamique s'appuie sur des études expérimentales fournies et non sur la *CFD* et/ou la *DEM*. Ces deux approches ne s'excluent pas : comme je l'ai déjà discuté dans le deuxième chapitre de ce mémoire, j'envisage au contraire une association avec des spécialistes de ces outils, en vue de contribuer à l'amélioration de la représentation de l'hydrodynamique dans les modèles phénoménologiques.

Il n'est pas nécessaire de me convaincre des liens indéfectibles entre recherche et enseignement : l'un se nourrissant de l'une, mais aussi réciproquement, en particulier avec le public du Cnam. J'ai d'ailleurs largement puisé dans ma manière de transmettre ce que je présente à mes auditeurs comme la « substantifique moelle » du génie des procédés, pour introduire les différents chapitres qui constituent ce mémoire. Je terminerai donc mon survol de ce document par un mot sur la **pédagogie** : je ne méconnais pas le chemin qu'il reste encore à parcourir pour en faire pleinement un sujet de recherche, reconnu par la communauté. Cependant : d'une part je crois que nos activités d'enseignement assez particulières au Cnam, ainsi que nos liens étroits et même amicaux avec les ingénieurs pédagogiques, nous ont bien armés pour investir ce nouveau champ de recherche ; d'autre part -un peu pour les mêmes raisons qui m'ont fait choisir la thématique four tournant il y a quelques années- je suis convaincue que c'est un « bon » sujet pour une petite équipe de recherche, aux moyens modestes, mais ayant quelques idées sur la question et disposant d'un terrain d'expérimentation favorable.

Au fil des pages qui précèdent, transparait la question transversale et importante de la **mesure** : moyens analytiques ou capteurs ; mesures quantitatives ou qualitatives ; approches locales ou globales ; mesures en ligne ou hors ligne. L'organisation générale de ce mémoire ne me permettait pas de détailler les travaux menés dans le cadre de la thèse de Baptiste MULOT, centrée sur la métrologie, industrielle et à des fins de suivi en ligne de la cristallisation. Plus généralement, la question du choix de la mesure pertinente revient en permanence lorsque l'on mène des campagnes expérimentales. Elle est présente en amont de la modélisation, quand il s'agit de comprendre des phénomènes et qu'il se pose une fois encore le problème du « bon degré » de simplicité. Elle est tout aussi nécessaire en aval de cette modélisation, lors de l'étape de validation, où il n'est pas toujours possible de mesurer les grandeurs que prédit le modèle et où il faut souvent établir un pont entre ce que l'on calcule et ce que l'on est capable de mesurer avec un niveau de confiance suffisant pour être susceptible, soit de réfuter le modèle, soit de le conforter.

En guise de résumé, j'ai repris ici, sous une forme un peu plus compacte, le tableau que je montrais en fin d'introduction générale :

étude	phases *	pilote(s) et échelle indus.	faisa- bilité	hydro- dynamique	modé- lisation	thèses stages	production scientifique
mélange gravitaire	LL	tube 4 m (tube 20 m)	⊗	méso	AD	1	2 publis + 5 comm
cristal- lisation	LS	1 L à 5000 m ³	×	macro	non	2+4	0 publi ★ + 1 comm
ozo- nation	GL	pilotes éjecteur, CàB et bio.	×	méso macro	non	1+3	2 publis + 5 comm
OVHC	GLS	pilote lit fixe arrosé	×	non	non	2+3	0 publi ○ + 3 comm
four tournant	GS	« <i>baby kiln</i> » fours indus.	⊗	méso macro	AD code1D	3+2	7 publis + 14 comm

* : G pour gaz ; L pour liquide ; S pour solide

⊗ : Ces procédés existaient déjà à l'échelle industrielle, il n'y avait donc pas lieu de démontrer leur faisabilité.

★ : thèses confidentielles

○ : doctorants sans financement

L'introduction volumineuse de ce mémoire permettait de planter le décor, de contextualiser mes travaux dans le génie des procédés et de mettre en valeur la diversité de mes activités de recherche. Au travers des trois chapitres qui ont suivi, j'ai tenté d'illustrer la complémentarité expérimentation/modélisation dans notre domaine, la nécessité d'aborder les problèmes complexes que nous soumettent les industriels à plusieurs échelles de taille et enfin les méthodologies qui en résultent. Dans le dernier chapitre, je tenais à ramener la pédagogie du côté de la recherche en relatant comment mon expérience de près de quinze ans d'enseignement à distance a complètement revisité ma façon de « faire apprendre ».

J'espère avoir montré tout au long de ces pages ma **capacité à identifier les enjeux** d'un problème scientifique ou pédagogique, **déployer une stratégie** adaptée aux ressources disponibles pour traiter ce problème, **obtenir des résultats** grâce à cette stratégie, **faire une analyse critique** de ces résultats et les **transférer** vers l'utilisateur auquel ils étaient destinés. J'entends ici par ressources, non seulement les moyens techniques et financiers à disposition pour mener à bien l'étude, mais aussi les ressources humaines, avec leurs qualités et leurs compétences propres, mais aussi leur disponibilité.

Je dirais que mon identité scientifique se résume en quatre points, correspondant précisément aux quatre chapitres de ce mémoire :

1. un fort ancrage expérimental,
2. l'hydrodynamique comme base de toute étude de procédé,
3. le développement de modèles simples et transposables au niveau industriel (le cas échéant après ajout des transformations chimiques ou physiques, dont les équipements de production sont le siège),
4. la pédagogie comme un véritable champ de recherche.

Parmi les critères que j'ai pu lire dans les recommandations concernant la délivrance de l'habilitation à diriger les recherches, la **capacité à encadrer des doctorants** en mentionnée en premier lieu, c'est somme toute logique. J'ai eu l'occasion de codiriger sept doctorants au cours de ces quinze dernières années de recherche. Pendant les premières années, j'en avais cinq en parallèle, sur des sujets différents pour lesquels je n'avais aucune expertise scientifique particu-

lière : j'ai adapté ma manière de les encadrer aux savoir, savoirs-faire et savoirs-être de chacun d'eux ; j'ai endossé à plusieurs reprises la responsabilité de situations difficiles contre lesquelles j'avais pourtant certaines fois mis en garde (et que d'autres fois je n'avais pas su anticiper). Le contexte était très différent (disons plus « normal ») ces dernières années où je retrouvais un sujet pour lequel j'ai quelques compétences, une vision, et seulement un doctorant à la fois. Ces sept thèses ont néanmoins toutes été soutenues, pour plusieurs d'entre elles avec brio, associées à une production scientifique ou une transposition industrielle significative. Tous ces docteurs ont obtenu un emploi dans la continuité de leurs travaux de thèse ou en conformité avec leurs nouvelles aspirations. Je regrette que l'un d'eux subisse encore aujourd'hui la politique de précarité de la fonction publique et j'espère pour lui un avenir plus stable rapidement.

Pour ce qui est de ma **capacité à mener une recherche de manière autonome avec un esprit d'ouverture thématique** ou encore à m'affranchir des objectifs fixés pour ma thèse, la question pourrait se poser puisque je suis revenue à la thématique four tournant. Toutefois, comme je l'ai déjà évoqué, ce retour fut un choix murement réfléchi, dans le contexte d'un petit laboratoire méconnu. Je suis convaincue que la seule stratégie dans ce contexte était de se centrer sur un tel sujet « niche », mettant à profit la formidable chance de disposer du pilote que j'avais pu faire financer *via* le contrat industriel que j'ai obtenu en 2008. Aujourd'hui le contexte pourrait changer, si le rapprochement avec le laboratoire Genial se concrétise. Ce serait alors pour moi l'opportunité de ré-ouvrir mon champ de recherche vers d'autres thématiques, tout en conservant la démarche que je chéris : allier expérimentation et modélisation « la plus simple mais pas trop simple » ; toujours partir de l'hydrodynamique pour développer la représentation des transferts de matière et de chaleur, puis l'écriture des bilans aboutissant au modèle phénoménologique complet.

Projet scientifique

LES PROJETS de recherche sur lesquels je souhaite m'investir s'articulent autour des fours tournants, en développant une approche couplant expérimentation et modélisation et visant à prendre en compte les problématiques spécifiques rencontrées par les industriels de divers secteurs. Cette approche pourra être transposée à d'autres types de contacteurs gaz/solide et s'enrichir en s'étendant vers d'autres domaines scientifiques. Je propose parallèlement de contribuer à la création d'une thématique de recherche sur l'enseignement du génie des procédés en France.

Avertissement : J'ai à dessein rédigé ce projet de sorte qu'il puisse être lu de manière autonome. Si le lecteur assidu, ayant consulté l'ensemble de ce mémoire, pourra y trouver quelques redondances ; j'ai supposé que le lecteur focalisé sur l'avenir, pourrait apprécier une (re)mise en situation systématique des différentes sections qui vont suivre.

1 Fours tournants munis de releveurs

Les fours tournants sont des contacteurs gaz/solide de conception assez simple : un tube long, légèrement incliné par rapport à l'horizontale, dans lequel circulent le gaz et la charge solide, le plus souvent à contre-courant. Le tube est chauffé soit par l'extérieur (on parle alors de chauffage indirect), soit par l'intérieur par circulation du gaz chaud ou en présence d'une flamme (chauffage direct). Grâce à leur grande polyvalence, ils sont utilisés dans de nombreux domaines de l'industrie : de la fabrication du ciment au séchage dans l'agroalimentaire, en passant par la calcination des minerais, la production du combustible nucléaire, ou encore le traitement des déchets ménagers ou de la biomasse.

Bien qu'utilisés à l'échelle industrielle depuis plus d'un siècle [Richards, 1904], leur conception et leur mise en œuvre demeurent le plus souvent très empiriques. Pourtant on trouve dans la littérature de nombreux travaux concernant les fours tournants. Mais : d'une part il en existe encore relativement peu concernant les fours tournants munis d'équipements internes tels que des releveurs (qui sont pourtant souvent très utiles à une bonne conversion des produits dans le four) ; d'autre part ces travaux s'attachent généralement soit à un aspect très pointu du fonctionnement des fours tournants [Emady et al., 2016, Specht et al., 2010] qui ne s'avère pas directement transposable aux problématiques industrielles, soit proposent une description globale très simplifiée du fonctionnement des fours pour une application bien spécifique [Cao and Langrish, 2000, Martins et al., 2001, Mujumdar et al., 2006].

1.1 Hydrodynamique

Avec les travaux rapportés dans la littérature concernant l'écoulement transverse de la charge solide dans un four tournant [Henein et al., 1983, Mellmann, 2001, Ajayi and Sheehan, 2012, Sunkara et al., 2013], y compris mes propres travaux (réalisés à l'époque de ma thèse et publiés

récemment) [Debacq et al., 2013a, Debacq et al., 2013b], on dispose aujourd’hui d’une bonne capacité à représenter cet écoulement. Pour des poudres trop spécifiques (cohésives notamment), il est toujours possible de réaliser quelques expériences en maquette (tambour tournant) afin de caler les paramètres des modèles disponibles. Le très gros travail expérimental réalisé pendant la thèse d’Alex BONGO NJENG [Bongo Njeng et al., 2015a, Bongo Njeng et al., 2015b, Bongo Njeng et al., 2016] et depuis, nous a également doté d’un modèle d’écoulement macroscopique longitudinal robuste, qui nous permet de prédire le temps de séjour moyen, la dispersion axiale et la charge totale dans toutes sortes de configurations, avec ou sans releveurs et pour divers types de poudre. Aussi sur la partie hydrodynamique, j’estime que nous avons aujourd’hui une connaissance suffisante pour les besoins de la modélisation globale des fours tournants munis de releveurs. Il demeurera intéressant de confronter les modèles hydrodynamiques actuels avec de nouveaux résultats expérimentaux, comme par exemple ceux de [Maione, 2017].

1.2 Transferts thermiques

L’un des aspects particulièrement peu investigués par des études suffisamment macroscopiques pour pouvoir être utilisables par les industriels, concerne la représentation des transferts thermiques dans les fours tournants munis de releveurs, vraisemblablement essentiellement du fait de la complexité que ces derniers engendrent par leur passage périodique au sein de la charge. Les dernières mesures expérimentales tenant compte de l’ensemble des paramètres de fonctionnement d’un four tournant, datent de plusieurs décennies [Tscheng and Watkinson, 1979, Wes et al., 1976] et concernaient des fours sans équipement interne. Depuis, des études locales ont été menées [Ding et al., 2001, Herz et al., 2012, Lee and Choi, 2013], pas toujours appuyées sur des mesures expérimentales et qui ne permettent de prendre en compte ni le mouvement d’ensemble de la charge solide, ni les transferts thermiques longitudinaux [Suzuki et al., 2008]. Les modèles physiques très détaillés, basés par exemple sur la théorie de la pénétration [Li et al., 2005] ou encore un couplage entre approche *DEM* (*Discrete Element Method*) et transferts thermiques [Chaudhuri et al., 2010, Figueroa et al., 2010], se heurtent tout à la fois à la difficulté de déterminer les paramètres de ces modèles et aux temps de calcul très vite rédhibitoires avec la *DEM*. Même les travaux macroscopiques les plus récents [Nhuchhen et al., 2016] se heurtent à la problématique de la détermination de la valeur des coefficients de transfert thermique, pour lesquels les corrélations disponibles sont à ce jour peu fiables.

Mon projet consiste donc dans une première étape à recenser les principales caractéristiques des différentes applications industrielles utilisant des fours tournants pour en distinguer les points communs et les différences majeures. Ce travail se fera par étude bibliographique et, lorsque c’est possible, par échanges avec des industriels. À partir de ce recensement, un travail d’analyse permettra de définir quels sont les hypothèses et modes de transfert à intégrer dans un outil numérique facilement exploitable pour différents domaines d’application. Des essais sur pilote permettront d’enrichir par de nouvelles données expérimentales le(s) modèle(s) numérique(s) développé(s). Mon approche est basée le plus possible sur des paramètres physiques « mesurables » (disons plus exactement accessibles par des essais expérimentaux spécifiques), tels que des coefficients de transfert. Nous disposons au Cnam d’un pilote de four tournant équipé de nombreux thermocouples et d’un compteur de puissance. Nous avons déjà « bien défriché » le problème de la détermination expérimentale du coefficient de transfert thermique paroi/solide avec les thèses de Phahath THAMMAVONG et Alex BONGO NJENG et il convient de poursuivre ces travaux par la détermination de valeurs fiables des coefficients de transfert afin de les intégrer dans des modèles prédictifs. Le très récent rapprochement avec des chercheurs du laboratoire Genial est une source de pistes nouvelles, comme par exemple l’exploration de l’histoire thermique d’un

« grain » se déplaçant le long du fur à l'aide de thermo-boutons ou encore l'exploitation d'essais en régime instationnaire avec variation de consigne (dans notre cas le plus simple consisterait à varier la vitesse de rotation du tube tournant), réputés fournir des informations plus riches que les essais en régime permanent, dans la communauté des automaticiens.

1.3 Transferts de matière

Si la littérature foisonne d'études spécifiques à telle ou telle application (par exemple parmi les plus récentes : [Csernyei and Straatman, 2016, Phounglamcheik et al., 2017, Agrawal and Ghoshdastidar, 2017]), on trouve peu d'études génériques sur les transferts de matière dans les fours tournants [Heydenrych et al., 2002], et à peu près aucune pour le cas de fours tournants munis de releveurs. Durant ma thèse, j'avais pu développer une approche s'appuyant sur la transposition du modèle dit « à cœur rétrécissant » (traditionnellement appliqué à l'échelle d'un grain pour des réactions à solide consommable), à l'échelle du lit de poudre (travail non publié en dehors de la seconde partie du chapitre 2 du manuscrit de thèse). Cette approche n'a pas été poursuivie jusqu'à présent, puisque nous nous étions concentrés -en lien avec nos partenaires- sur l'hydrodynamique et la thermique. À la lumière des travaux menés sur l'hydrodynamique, cette approche mérite d'être reprise et améliorée, afin de travailler non sur des volumes de poudre comme je l'avais fait pendant ma thèse, mais sur les temps passés par la charge granulaire dans les différentes zones réactionnelles soumises à des régimes différents : régime chimique pour la poudre chutant à travers le gaz ; régime limité par la diffusion inter-granulaire pour la poudre statique dans les releveurs ; régime mixte pour la poudre brassée située dans le lit en bas du four. Ceci permettra d'obtenir une estimation beaucoup plus fine des conversions par rapport aux bilans macroscopiques usuels.

1.4 Modèle dynamique global

Il s'agira ensuite de capitaliser les connaissances acquises sur l'hydrodynamique, les transferts thermiques et de matière, afin de mettre au point un modèle dynamique pour les fours tournants munis de releveurs, utilisable pour différentes applications industrielles. Ainsi je propose dans ce travail de construire un « pont » entre les approches très pointues mais trop locales disponibles dans la littérature et un outil exploitable par des industriels de domaines variés, qui pourront y introduire par la suite les caractéristiques de leurs transformations de matière spécifiques. Ces travaux pourront être menés en collaboration avec le centre Rapsodee (avec lequel nous avons déjà travaillé) et avec le laboratoire Genial (avec lequel des collaborations voire un rapprochement sont actuellement en pourparlers). L'adaptation future du fruit de ce travail à telle ou telle application industrielle pourra faire l'objet de co-financements privés.

1.5 Applications

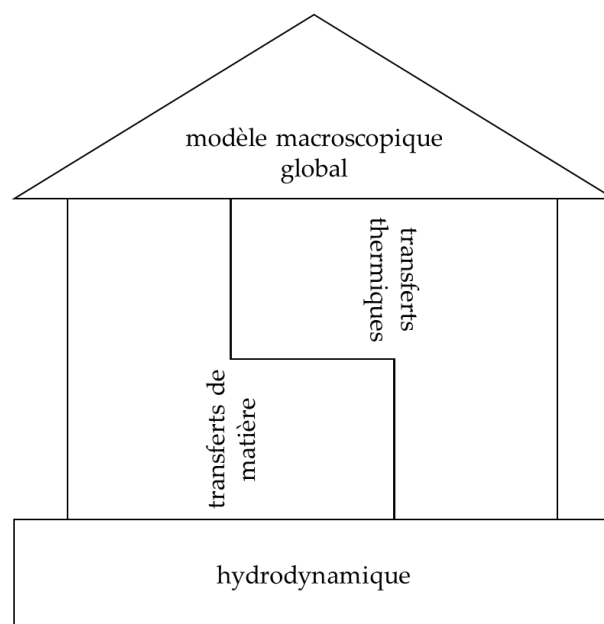
Les fours tournants sont employés dans de nombreux domaines industriels, dès lors qu'il est nécessaire d'appliquer un traitement thermique/thermochimique à un solide divisé (poudre, plaquettes, granulats, déchets solides, ...) en mode de fonctionnement continu. Les approches d'économie circulaire donnent d'ailleurs un regain d'intérêt pour cette thématique. Les applications couvrent tous les domaines de température, allant du séchage jusqu'à l'incinération voire la calcination. En conséquence, que le mode de fonctionnement soit en chauffage direct ou indirect, les dépenses énergétiques associées à ce type d'appareil sont importantes, ce qui constitue le premier enjeu de ces procédés. Bien que les fours tournants soient utilisés depuis très longtemps, nos expériences depuis de nombreuses années auprès d'acteurs économiques du domaine, montrent

que ces fours sont difficiles à piloter et que le choix des conditions opératoires reste majoritairement basé sur l'empirisme. Bien souvent les industriels ignorent jusqu'à l'ordre de grandeur du temps de séjour moyen de la charge solide dans leurs fours. Il existe donc une belle marge de progrès pour contrôler la qualité du produit final (au minimum lié à son temps de conversion) tout en minimisant la dépense énergétique. La maîtrise du produit constitue le second enjeu majeur en ce qui concerne les fours tournants.

C'est sur ce décalage entre la pratique industrielle très empirique et les publications très pointues mais peu exploitables par les industriels, que mon projet s'inscrit comme un « pont unificateur ». Il reste en effet un large champ d'action pour optimiser le dimensionnement et/ou les conditions de fonctionnement, et ainsi : d'une part accroître l'efficacité énergétique de ces appareils et par conséquent optimiser la dépense énergétique de ces procédés ; et d'autre part améliorer la maîtrise de la qualité du produit final, au minimum en termes de composition, mais aussi de granulométrie, de morphologie, etc. Les résultats espérés de ces travaux visent à pouvoir à terme mieux décrire l'hydrodynamique et les transferts dans les fours tournants d'un point de vue global (c'est-à-dire en prenant en compte la totalité du procédé) et proposer des méthodologies et des outils pour améliorer le fonctionnement de ces appareils par une optimisation du fonctionnement et une réduction des besoins énergétiques, à cahier des charges fixé en termes de qualité et propriétés du produit.

2 Transposition à d'autres types de contacteurs et extensions vers d'autres domaines scientifiques

Le domaine de recherche sur les fours tournants demeure extrêmement vaste, avec des applications en plein essor dans les domaines de la biomasse et des déchets notamment ; mais peut aussi ouvrir la voie vers d'autres réacteurs ou contacteurs gaz/solide, en reprenant la démarche développée pour les fours tournants : fondée sur l'étude hydrodynamique des procédés, y couplant les transferts thermiques et de matière, pour aboutir à un modèle macroscopique global, basé sur des bilans et des paramètres physiques, autrement dit un modèle phénoménologique :



En effet il existe dans différents secteurs industriels concernés par le génie des procédés, en dehors des lits fluidisés (faisant déjà l'objet de très nombreux travaux), des contacteurs gaz/solide peu étudiés au niveau recherche et présentant des comportements hydrodynamiques « exotiques » très enthousiasmants pour un chercheur dans le domaine. C'est notamment le cas du nucléaire, bien qu'il soit peu probable que les efforts d'investissement en recherche portent prochainement sur les procédés hors de ceux qui concernent le démantèlement et pour lesquels il faudra notamment se préoccuper du traitement des matériaux de construction. C'est aussi le cas de l'agroalimentaire, secteur qui nous intéressera d'autant plus en cas d'issue favorable au rapprochement de notre équipe de recherche avec le laboratoire Genial. C'est également le cas de la pharmacie, où la science du génie des procédés a de très belles perspectives de développement, tant l'empirisme est encore de mise, comme m'en témoignent très régulièrement les auditeurs du Cnam travaillant dans ce secteur. Cela peut aussi être le cas de la métallurgie (procédés de traitement des minerais après leur extraction ou de recyclage des matériaux) ou bien encore des procédés de fabrication et de régénération des catalyseurs (dans le domaine pétrochimique notamment).

En plus d'essayer vers d'autres applications ce que j'ai appris à faire sur les fours tournant, je souhaite en retour enrichir mes travaux, de démarches qui me sont encore peu familières :

- Je souhaite notamment approfondir l'aspect génie des produits, notamment alimentaires, auquel j'ai commencé à porter attention depuis quelques temps. Comme je viens de l'évoquer, la qualité du produit en sortie de four tournant est -avec l'aspect énergétique- l'enjeu majeur de cette thématique pour les industriels. Au-delà des seuls fours tournants, la démarche ingénierie inverse (en quelque sorte « à rebours ») du génie des produits par rapport à notre démarche habituelle de génie des procédés, c'est-à-dire des propriétés du produit désirées vers le procédé capable de le fabriquer et non l'inverse, me semble particulièrement pertinente pour le cas des produits alimentaires. Mes solides bases de génie des procédés, ainsi que mes compétences en modélisation, doivent me permettre de contribuer à des travaux selon ce type d'approche au sein de -ou en collaboration avec- l'UMR Genial.
- Je souhaite également (ré)ouvrir mes travaux de recherche vers l'hydrodynamique physique. J'avais initié cette réouverture en 2008 pour reprendre en main l'étude du lit fixe arrosé construit pour l'OVHC, mais les circonstances ont fait que cette tentative ne s'est pas concrétisée. Je reste persuadée que les deux communautés peuvent se ressourcer mutuellement ; j'ai d'ailleurs pu observer que l'interface entre elles est déjà largement poreuse. J'ai notamment été frappée aux congrès annuels de l'*AIChE* par le fait que les américains qui se rangent eux-mêmes dans la thématique *particle technology*, connaissent beaucoup mieux parmi les équipes de recherche françaises les mécaniciens de poudres que leurs homologues du *chemical engineering*.

3 Proposition d'ouverture vers une recherche sur l'enseignement du génie des procédés en France

Je m'intéresse depuis plusieurs années à l'éclairage des sciences de l'éducation sur ma pratique pédagogique quotidienne ; j'assume d'ailleurs la présidence du groupe Formation de la **SFGP** et le secrétariat de la *Working Party Education* de la fédération européenne (*EFCE*). Mon expérience de bientôt quinze ans d'enseignement à distance - numérique - par pédagogies « innovantes », mes participations et présentations à de nombreuses sessions formation des congrès nationaux et internationaux de génie des procédés mais aussi en lien avec la pédagogie numérique (MoodleMoot, rencontres Scenari, PédagoTice, etc.) et enfin mes lectures des travaux de chercheurs sur la

formation, font que je suis aujourd'hui convaincue de la nécessité de mener en France des travaux de recherche sur l'enseignement du génie des procédés. Au Royaume-Uni, il existe -quelques- profils de professeurs en *chemical engineering education* qui mènent précisément ce genre de travaux, en parallèle de leurs travaux de recherche scientifique plus classique.

La méthodologie que j'identifie est fondamentalement celle de la recherche scientifique : bibliographie, expérimentations, modélisation et communications/publications.

La bibliographie dans ce domaine ne s'appuie pas seulement sur des publications académiques [Endrizzi and Sibut, 2015, Basque, 2004, Feyfant, 2016, Reverdy, 2016, Houot and Tribby, 2014] et des congrès spécialisés (comme ce qui nous est familier en génie des procédés), mais aussi sur une communication informelle particulièrement riche et diffusée fortement sur les réseaux sociaux [@mlebrun2 ; @jourde ; @infoveille ; @batier ; @annickcarter1 ; @jmgilliot ; @rthibert ; @tkoscielniak ; @luiggisanso ; @JFCeci ; et bien d'autres].

Les expérimentations, nous les menons tous chaque semaine auprès de nos élèves/étudiants/auditeurs/apprenants. Il reste à construire des canaux pour les partager. Car si avec notre casquette de chercheur, nous avons l'habitude de communiquer sur nos travaux de recherche scientifique, nous oublions ces bonnes pratiques dès que nous endossons notre habit d'enseignant. Je remarque pourtant depuis quelques années, qu'alors qu'elles étaient désertées autrefois, les sessions formation des congrès de génie des procédés font désormais systématiquement salle comble. L'auditoire est donc bien présent et demandeur, il faut des orateurs. La reconnaissance d'une activité de recherche dans le domaine de la pédagogie les motiverait sans aucun doute. Il faut de surcroît apprendre à faire nos expériences pédagogiques avec la rigueur scientifique qui leur permettra d'être classées au rang de la recherche. Pour cela il est indispensable de se rapprocher de la communauté des sciences de l'éducation.

Je n'ai pas encore atteint la maturité suffisante pour la modélisation, comme la pratique par exemple Marcel LEBRUN [Lebrun, 2016]. Mais c'est une étape que je souhaite investiguer à moyen terme.

Enfin pour ce qui est des communications, j'en ai déjà un certain nombre à mon actif. La prochaine étape sera une publication, une fois que je me serai suffisamment « professionnalisée » dans le domaine de la recherche sur l'enseignement du génie des procédés.

On pourrait s'interroger sur l'opportunité de créer une communauté de chercheurs sur l'enseignement du génie des procédés en France, puisqu'il existe déjà sur le territoire des chercheurs en sciences de l'éducation et à l'étranger des professeurs en *chemical engineering education*. Je crois qu'en France l'enseignement des sciences de l'ingénieur en général et du génie des procédés en particulier, est assez spécifique pour mériter un tel développement (IUT, écoles d'ingénieur, formation tout au long de la vie diplômante, liens forts avec l'industrie). Cette communauté aurait bien sûr vocation à être en interaction avec celle des sciences de l'éducation et celles d'autres disciplines. Elle n'aurait d'ailleurs pas vocation à se focaliser uniquement sur les méthodes pédagogiques, mais aussi à explorer les conséquences des mutations de l'industrie et de la société sur notre science, sa recherche et son enseignement [André et al., 2017].

Glossaire

AD : analyse dimensionnelle, méthode permettant de prédire la forme d'une loi reliant les grandeurs qui influent sur un phénomène (physique, chimique, mais aussi financier, etc.), à partir de l'analyse des unités de ces grandeurs

BQR : Bonus Qualité Recherche, dispositif de financement interne des établissements

CaB : colonne à bulles, contacteur gaz/liquide permettant de développer une grande surface d'échange et une importante rétention liquide

Cifre : Conventions Industrielles de Formation par la REcherche, type de contrat doctoral financé par une entreprise, qui bénéficie d'une aide financière pour recruter un jeune doctorant

CFD : *computational fluid dynamics* = mécanique des fluides numérique, outil de simulation basé sur la résolution des équations de Navier–Stokes + des modèles de turbulence

CNCP : Commission nationale de la certification professionnelle, commission composée de représentants des ministères, des régions et des partenaires sociaux, chargée de l'homologation des titres et diplômes de l'enseignement professionnel <<http://www.cncp.gouv.fr/>>

CPF : Compte Personnel de Formation, dispositif de financement public de formation continue pour les salariés du secteur privé et les demandeurs d'emploi

CRCT : Congé pour Recherches ou Conversions Thématiques, période de 6 ou 12 mois pendant laquelle un enseignant-chercheur est déchargé de ses obligations d'enseignement afin de se consacrer à la recherche

CTI : Commission des Titres d'Ingénieur, structure autonome au sein du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche chargée de l'habilitation des formations d'ingénieurs en France <<http://www.cti-commission.fr/>>

DEM : *discrete element method*, méthode numérique permettant de simuler le mouvement d'un grand nombre de petites particules + éventuellement les transferts thermiques entre ces particules

DTS : distribution des temps de séjour, méthode de diagnostic des défauts et de modélisation des écoulements macroscopiques dans les équipements

EC : enseignant-chercheur

ECTS : *European Credits Transfer System*, système de points développé par l'Union européenne, qui a pour but de faciliter la lecture et la comparaison des programmes d'études des différents pays européens

EFCE : *European Federation of Chemical Engineering*, fédération des sociétés savantes européennes dans le domaine du génie des procédés <<http://efce.info/>>

Fod : formation ouverte et à distance

FT : four tournant, contacteur gaz/solide constitué d'un long tube légèrement incliné par rapport à l'horizontale

Hcéres : Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur, autorité administrative indépendante chargée de l'évaluation des établissements d'enseignement supérieur

et de recherche, des organismes de recherche, des unités de recherche, des formations et diplômes d'enseignement supérieur <<http://www.hceres.fr/>>

HTT : hors temps de travail

MOOC : *massive open online course*, type ouvert de formation à distance capable d'accueillir un grand nombre de participants

OVHC : oxydation par voie humide catalytique, technologie destructive basée sur l'oxydation en phase aqueuse des polluants organiques ou inorganiques, en utilisant de l'oxygène moléculaire ou de l'air comme source d'oxydant

PIV : *Particle image velocimetry*, méthode optique de visualisation des écoulements à l'aide de traceurs qui donne accès au champ de vecteurs vitesse

rappports d'Hausner : masse volumique apparente divisée par la masse volumique tassée, ce rapport permet de quantifier la coulabilité d'une poudre ; lorsqu'il est supérieur à 1,2, on considère que la poudre coule mal

RNCP : Répertoire National des Certifications Professionnelles, constamment mis à jour avec les diplômes et titres à finalité professionnelle ainsi que les certificats de qualification figurant sur les listes établies par les commissions paritaires nationales de l'emploi des branches professionnelles

SFGP : Société Française de Génie des et Procédés, société savante française dans le domaine du génie des procédés <<http://www.sfgp.asso.fr/>>

TC : thermocouple, sonde de température basée sur l'effet Seebeck et constituée de deux fils de métaux différents reliés par une soudure

TD : travaux dirigés, forme d'enseignement permettant l'application des connaissances acquises en cours théoriques : les apprenants travaillent individuellement sur des exercices en présence d'un enseignant

TP : travaux pratiques, type d'enseignement fondé sur la réalisation d'expériences (éventuellement numériques) permettant le plus souvent de vérifier et compléter les connaissances acquises en cours théoriques

UE : unités d'enseignement, ensembles d'activités d'apprentissage qui sont regroupées, parce qu'elles poursuivent des objectifs communs et constituent un ensemble pédagogique cohérent au niveau des acquis d'apprentissage attendus

Unit : Université Numérique Ingénierie et Technologie, la Fondation Unit, créée à l'initiative du Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, est une Fondation qui associe les acteurs publics et privés de la formation supérieure en Sciences de l'Ingénieur et Technologie désireux de partager des ressources numériques existantes, des outils, des expériences, et de co-piloter des projets. <<http://www.unit.eu/>>

VAE : validation des acquis de l'expérience : Toute personne, quels que soient son âge, sa nationalité, son statut et son niveau de formation, qui justifie d'au moins 1 an d'expérience en rapport direct avec la certification visée, peut prétendre à la VAE. Cette certification qui peut être un diplôme, un titre ou un certificat de qualification professionnelle doit être inscrite au Répertoire national des certifications professionnelles (RNCP). <<http://www.vae.gouv.fr/>>

VES : validation des études supérieures, dispositif permettant de faire valider des études supérieures suivies antérieurement (université, école, institut, organisme de formation, etc.

Références bibliographiques

- [Abouzeid and Fuerstenau, 2010] Abouzeid, A.-Z. M. and Fuerstenau, D. W. (2010). Flow of Non-Homogeneous Particulates in Rotating Drums. *KONA Powder and Particle Journal*, (28) :155–166.
- [Afacan and Masliyah, 1990] Afacan, A. and Masliyah, J. (1990). Solids hold-up in rotary drums. *Powder Technology*, 61(2) :179–184.
- [Agrawal and Ghoshdastidar, 2017] Agrawal, A. and Ghoshdastidar, P. (2017). Numerical simulation of heat transfer during production of rutile titanium dioxide in a rotary kiln. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106 :263–279.
- [Ajayi and Sheehan, 2012] Ajayi, O. and Sheehan, M. (2012). Design loading of free flowing and cohesive solids in flighted rotary dryers. *Chemical Engineering Science*, 73 :400–411.
- [Albero, 2011] Albero, B. (2011). Le couplage entre pédagogie et technologies à l’université : cultures d’action et paradigmes de recherche. *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire*, 8(1-2) :11.
- [André et al., 2017] André, J.-C., Schaer, E., and Falk, L. (2017). Formations et recherches futures en génie des procédés (GP) dans un monde en mutations rapides. In *actes du congrès SFGP2017*, Nancy, France.
- [Baird et al., 1992] Baird, M. H. I., Aravamudan, K., Rao, N. V. R., Chadam, J., and Peirce, A. P. (1992). Unsteady axial mixing by natural convection in a vertical column. *AIChE Journal*, 38(11) :1825–1834.
- [Barbierjr et al., 1998] Barbierjr, J., Delanoe, F., Jabouille, F., Duprez, D., Blanchard, G., and Isnard, P. (1998). Total oxidation of acetic acid in aqueous solutions over noble metal catalysts. *Journal of Catalysis*, 177(2) :378–385.
- [Barr et al., 1989] Barr, P. V., Brimacombe, J. K., and Watkinson, A. P. (1989). A heat-transfer model for the rotary kiln : Part II. Development of the cross-section model. *Metallurgical Transactions B*, 20(3) :403–419.
- [Basque, 2004] Basque, J. (2004). En quoi les TIC changent-elles les pratiques d’ingénierie pédagogique du professeur d’université ? *International Journal of Technologies in Higher Education*, 1(3) :7–13.
- [Batchelor and Nitsche, 1991] Batchelor, G. K. and Nitsche, J. M. (1991). Instability of stationary unbounded stratified fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 227 :357–391.
- [Batchelor and Nitsche, 1993] Batchelor, G. K. and Nitsche, J. M. (1993). Instability of stratified fluid in a vertical cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 252 :419–448.
- [Bensmann et al., 2010] Bensmann, S., Subagyo, A., and Walzel, P. (2010). Residence Time Distribution of Segregating Sand Particles in a Rotary Drum. *Particulate Science and Technology*, 28(4) :319–331.

- [Blumberg and Schlünder, 1996] Blumberg, W. and Schlünder, E.-U. (1996). Transversale Schüttgutbewegung und konvektiver Stoffübergang in Drehrohren. Teil 2 : Mit Hubschaufeln. *Chemical Engineering and Processing : Process Intensification*, 35(6) :405–411.
- [Boateng, 1998] Boateng, A. (1998). Boundary layer modeling of granular flow in the transverse plane of a partially filled rotating cylinder. *International Journal of Multiphase Flow*, 24(3) :499–521.
- [Boateng and Barr, 1996] Boateng, A. and Barr, P. (1996). A thermal model for the rotary kiln including heat transfer within the bed. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(10) :2131–2147.
- [Boateng, 2008] Boateng, A. A. (2008). *Rotary kilns transport phenomena and transport processes*. Elsevier/Butterworth-Heinemann, Amsterdam ; Boston.
- [Bongo Njeng et al., 2015a] Bongo Njeng, A. S., Vitu, S., Clause, M., Dirion, J. L., and Debacq, M. (2015a). Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln : Part I. Experimental RTD and axial dispersion study. *Powder Technology*, 269 :554–565.
- [Bongo Njeng et al., 2015b] Bongo Njeng, A. S., Vitu, S., Clause, M., Dirion, J. L., and Debacq, M. (2015b). Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln : Part II. Experimental hold-up and mean residence time modeling. *Powder Technology*, 269 :566–576.
- [Bongo Njeng et al., 2016] Bongo Njeng, A. S., Vitu, S., Clause, M., Dirion, J. L., and Debacq, M. (2016). Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln : Part III. Up-scaling considerations and segregation analysis. *Powder Technology*, 297 :415–428.
- [Brimacombe and Watkinson, 1978] Brimacombe, J. K. and Watkinson, A. P. (1978). Heat transfer in a direct-fired rotary kiln : I. Pilot plant and experimentation. *Metallurgical Transactions B*, 9(2) :201–208.
- [Cao and Langrish, 2000] Cao, W. F. and Langrish, T. A. G. (2000). The Development and Validation of a System Model for a Countercurrent Cascading Rotary Dryer. *Drying Technology*, 18(1-2) :99–115.
- [Caqueret, 2002] Caqueret, V. (2002). Oxydation photocatalytique du phénol dans les eaux résiduaires industrielles : couplage avec un éjecteur tubulaire de type Venturi. rapport de DEA, Université Pierre et Marie Curie, Cnam Paris.
- [Chatterjee et al., 1983] Chatterjee, A., Sathe, A. V., and Mukhopadhyay, P. K. (1983). Flow of materials in rotary kilns used for sponge iron manufacture : Part II. Effect of kiln geometry. *Metallurgical Transactions B*, 14(3) :383–392.
- [Chaudhuri et al., 2010] Chaudhuri, B., Muzzio, F. J., and Tomassone, M. S. (2010). Experimentally validated computations of heat transfer in granular materials in rotary calciners. *Powder Technology*, 198(1) :6–15.
- [Contreras et al., 2003] Contreras, S., Rodriguez, M., Momani, F., Sans, C., and Esplugas, S. (2003). Contribution of the ozonation pre-treatment to the biodegradation of aqueous solutions of 2,4-dichlorophenol. *Water Research*, 37(13) :3164–3171.
- [Cook and Dimotakis, 2001] Cook, A. W. and Dimotakis, P. E. (2001). Transition stages of Rayleigh–Taylor instability between miscible fluids. *Journal of Fluid Mechanics*, 443.

-
- [Csernyei and Straatman, 2016] Csernyei, C. and Straatman, A. G. (2016). Numerical modeling of a rotary cement kiln with improvements to shell cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102 :610–621.
- [Dalziel et al., 1999] Dalziel, S. B., Linden, P. F., and Youngs, D. L. (1999). Self-similarity and internal structure of turbulence induced by Rayleigh–Taylor instability. *Journal of Fluid Mechanics*, 399 :1–48.
- [Danckwerts, 1952] Danckwerts, P. (1952). Continuous flow systems. Distribution of residence times. *Chemical Engineering Science*, 50(24) :3857–3866.
- [Debacq et al., 2013a] Debacq, M., Thammavong, P., Vitu, S., Ablitzer, D., Houzelot, J.-L., and Patisson, F. (2013a). A hydrodynamic model for flighted rotary kilns used for the conversion of cohesive uranium powders. *Chemical Engineering Science*, 104 :586–595.
- [Debacq et al., 2013b] Debacq, M., Vitu, S., Ablitzer, D., Houzelot, J.-L., and Patisson, F. (2013b). Transverse motion of cohesive powders in flighted rotary kilns : Experimental study of unloading at ambient and high temperatures. *Powder Technology*, 245 :56–63.
- [Debellefontaine and Foussard, 2000] Debellefontaine, H. and Foussard, J. N. (2000). Wet air oxidation for the treatment of industrial wastes. Chemical aspects, reactor design and industrial applications in Europe. *Waste Management*, 20(1) :15–25.
- [Delaplace et al., 2014] Delaplace, G., Loubière, K., Ducept, F., and Jeantet, R. (2014). *Modélisation en génie des procédés par analyse dimensionnelle : Méthode et exemples résolus*. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- [Descoins, 2003] Descoins, N. (2003). *Outils de simulation des fours tournants dédiés à la pyrolyse de déchets : modélisation dynamique du couplage transport de la charge-transferts de chaleur-réactions chimiques*. thèse, Institut national polytechnique de Toulouse, Albi.
- [Ding et al., 2001] Ding, Y. L., Forster, R. N., Seville, J. P. K., and Parker, D. J. (2001). Some aspects of heat transfer in rolling mode rotating drums operated at low to medium temperatures. *Powder Technology*, 121(2–3) :168–181.
- [Emady et al., 2016] Emady, H. N., Anderson, K. V., Borghard, W. G., Muzzio, F. J., Glasser, B. J., and Cuitino, A. (2016). Prediction of conductive heating time scales of particles in a rotary drum. *Chemical Engineering Science*, 152 :45–54.
- [Endrizzi, 2011] Endrizzi, L. (2011). Savoir enseigner dans le supérieur : un enjeu d’excellence pédagogique. *Dossier de veille de l’Ifé*. 64.
- [Endrizzi, 2012] Endrizzi, L. (2012). Les technologies numériques dans l’enseignement supérieur, entre défis et opportunités. *Dossier de veille de l’Ifé*. 78.
- [Endrizzi and Sibut, 2015] Endrizzi, L. and Sibut, F. (2015). Les nouveaux étudiants, d’hier et d’aujourd’hui. *Dossier de veille de l’Ifé*. 106.
- [Feyfant, 2016] Feyfant, A. (2016). La différenciation pédagogique en classe. *Dossier de veille de l’Ifé*. 113.
- [Figuroa et al., 2010] Figuroa, I., Vargas, W. L., and McCarthy, J. J. (2010). Mixing and heat conduction in rotating tumblers. *Chemical Engineering Science*, 65(2) :1045–1054.
- [Hatzilyberis and Androutsopoulos, 1999a] Hatzilyberis, K. and Androutsopoulos, G. (1999a). An Rtd Study for the Flow of Lignite Particles Through a Pilot Rotary Dryer Part I : Bare Drum Case. *Drying Technology*, 17(4-5) :745–757.
- [Hatzilyberis and Androutsopoulos, 1999b] Hatzilyberis, K. and Androutsopoulos, G. (1999b). An Rtd Study for the Flow of Lignite Particles Through a Pilot Rotary Dryer Part II : Flighted Drum Case. *Drying Technology*, 17(4-5) :759–774.

- [Hehl et al., 1978] Hehl, M., Kroger, H., Helmrich, H., and Schugerl, K. (1978). Longitudinal mixing in horizontal rotary drum reactors. *Powder Technology*, 20(1) :29–37.
- [Henein et al., 1983] Henein, H., Brimacombe, J. K., and Watkinson, A. P. (1983). Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns. *Metallurgical Transactions B*, 14(2) :191–205.
- [Herz et al., 2012] Herz, F., Mitov, I., Specht, E., and Stanev, R. (2012). Influence of operational parameters and material properties on the contact heat transfer in rotary kilns. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(25–26) :7941–7948.
- [Heydenrych et al., 2002] Heydenrych, M., Greeff, P., Heesink, A., and Versteeg, G. (2002). Mass transfer in rolling rotary kilns : a novel approach. *Chemical Engineering Science*, 57(18) :3851–3859.
- [Houot and Triby, 2014] Houot, I. and Triby, E. (2014). Espaces et dispositifs de formation des adultes. In *La médiation éducative entre dispositif et espace. Essai de conceptualisation.*, Pédagogie : crises, mémoires, repères. L’Harmattan.
- [Houzelot, 2013] Houzelot, J.-L. (2013). Distribution des temps de séjour et efficacité des réacteurs chimiques. *Techniques de l’ingénieur*, (J4014).
- [Hu and Yu, 1994] Hu, S.-T. and Yu, Y.-H. (1994). Preozonation of Chlorophenolic Wastewater for Subsequent Biological Treatment. *Ozone : Science & Engineering*, 16(1) :13–28.
- [Imamura et al., 1988] Imamura, S., Fukuda, I., and Ishida, S. (1988). Wet oxidation catalyzed by ruthenium supported on cerium(IV) oxides. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 27(4) :718–721.
- [Kelly, 1992] Kelly, J. (1992). Flight design in rotary dryers. *Drying Technology*, 10(4) :979–993.
- [Klein et al., 1997] Klein, J., Boistelle, R., and Dugua, J. (1997). Cristallisation industrielle – aspect théoriques. *Techniques de l’ingénieur*, (J1500).
- [Kramers and Croockewit, 1952] Kramers, H. and Croockewit, P. (1952). The passage of granular solids through inclined rotary kilns. *Chemical Engineering Science*, 1(6) :259–265.
- [Lebrun, 2016] Lebrun, M. (2016). Essai de modélisation et de systémisation du concept de Classes inversées. <http://lebrunremy.be/WordPress/?p=740>, consulté le 09/10/2017.
- [Lebrun and Lecoq, 2015] Lebrun, M. and Lecoq, J. (2015). *Classes inversées : enseigner et apprendre à l’endroit!* Canopé éditions.
- [Lee and Choi, 2013] Lee, H. and Choi, S. (2013). Lifter design for enhanced heat transfer in a rotary kiln reactor. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(10) :3191–3197.
- [Li and Kwauk, 2003] Li, J. and Kwauk, M. (2003). Exploring complex systems in chemical engineering—the multi-scale methodology. *Chemical Engineering Science*, 58(3-6) :521–535.
- [Li et al., 2005] Li, S.-Q., Ma, L.-B., Wan, W., and Yao, Q. (2005). A Mathematical Model of Heat Transfer in a Rotary Kiln Thermo-Reactor. *Chemical Engineering & Technology*, 28(12) :1480–1489.
- [Li et al., 2002] Li, S.-Q., Yan, J.-H., Li, R.-D., Chi, Y., and Cen, K.-F. (2002). Axial transport and residence time of MSW in rotary kilns : Part I. Experimental. *Powder Technology*, 126(3) :217–227.
- [Lu et al., 2015] Lu, G., Third, J., and Müller, C. (2015). Discrete element models for non-spherical particle systems : From theoretical developments to applications. *Chemical Engineering Science*, 127 :425–465.
- [Maione, 2017] Maione, R. (2017). *Modélisation d’un système de pyrogazéification de la biomasse.* thèse, Université de Lorraine, Nancy, France.

-
- [Martins et al., 2001] Martins, M. A., Oliveira, L. S., and Franca, A. S. (2001). Modeling and simulation of petroleum coke calcination in rotary kilns. *Fuel*, 80(11) :1611–1622.
- [Meade, 1914] Meade, R. K. (1914). The Development of the Rotary Kiln and Its Application to Various Chemical and Metallurgical Processes. *Industrial & Engineering Chemistry*, 6(9) :754.
- [Mellmann, 2001] Mellmann, J. (2001). The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior. *Powder Technology*, 118(3) :251–270.
- [Merrouche, 1998] Merrouche, S. (1998). *Ejecteur tubulaire gaz-liquide : comparaison des méthodes chimique et physique pour la détermination des surfaces d'échange. étude de l'influence des paramètres géométriques, opératoires et physico-chimiques sur les performances*. thèse, Université Pierre et Marie Curie, Cnam Paris.
- [Moscosa-Santillan, 2000] Moscosa-Santillan, M. (2000). *Conception de systèmes de supervision pour le contrôle-commande des procédés : applications d'intérêt pédagogique, industriel et de recherche*. thèse, Université Pierre et Marie Curie, Cnam Paris.
- [Mujumdar et al., 2006] Mujumdar, K. S., Arora, A., and Ranade, V. V. (2006). Modeling of rotary cement kilns : applications to reduction in energy consumption. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(7) :2315–2330.
- [Mullin and Nývlt, 1971] Mullin, J. and Nývlt, J. (1971). Programmed cooling of batch crystallizers. *Chemical Engineering Science*, 26(3) :369–377.
- [Nhuchhen et al., 2016] Nhuchhen, D. R., Basu, P., and Acharya, B. (2016). Investigation into mean residence time and filling factor in flighted rotary torrefier. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94(8) :1448–1456.
- [Nicole, 1996] Nicole, C. (1996). *Étude et modélisation de l'hydrofluoration du dioxyde d'uranium en four tournant*. thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France.
- [Phounglamcheik et al., 2017] Phounglamcheik, A., Babler, M. U., Donaj, P., Amovic, M., Ljunggren, R., and Engvall, K. (2017). Pyrolysis of Wood in a Rotary Kiln Pyrolyzer : Modeling and Pilot Plant Trials. *Energy Procedia*, 105 :908–913.
- [Pintar et al., 2001] Pintar, A., Besson, M., and Gallezot, P. (2001). Catalytic Wet-Air Oxidation of Kraft Bleach Plant Effluents in a Trickle-bed Reactor. *Chimie Ingenieur Technik*, 73(6) :657–657.
- [Prausnitz, 2001] Prausnitz, J. (2001). Chemical engineering and the postmodern world. *Chemical Engineering Science*, 56(12) :3627–3639.
- [Rabesiaka, 2002] Rabesiaka, M. (2002). Contrôle de la distribution en taille de particules dans la cristallisation de la glycine. rapport de DEA, Université Pierre et Marie Curie, Cnam Paris.
- [Rayleigh, 1882] Rayleigh (1882). Investigation of the Character of the Equilibrium of an Incompressible Heavy Fluid of Variable Density. *Proceedings of the London Mathematical Society*, s1-14(1) :170–177.
- [Reverdy, 2016] Reverdy, C. (2016). La coopération entre élèves : des recherches aux pratiques. *Dossier de veille de l'Ifé*. 114.
- [Richards, 1904] Richards, J. W. (1904). The thermal efficiency of a rotary cement kiln. *Journal of the American Chemical Society*, 26(1) :80–88.
- [Roustan, 2003] Roustan, M. (2003). *Transferts gaz-liquide dans les procédés de traitement des eaux et des effluents gazeux*. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- [Saeman, 1951] Saeman, W. C. (1951). Passage of solids through rotary kilns. Factors affecting time of passage. *Chemical Engineering Progress*, 47 :508–14.

- [Sai et al., 1990] Sai, P. S. T., Surender, G. D., Damodaran, A. D., Suresh, V., Philip, Z. G., and Sankaran, K. (1990). Residence time distribution and material flow studies in a rotary kiln. *Metallurgical Transactions B*, 21(6) :1005–1011.
- [Shahhosseini et al., 2000] Shahhosseini, S., Cameron, I., and Wang, F. (2000). A simple dynamic model for solid transport in rotary dryers. *Drying Technology*, 18 :867–886.
- [Sherritt et al., 2003] Sherritt, R. G., Chaouki, J., Mehrotra, A. K., and Behie, L. A. (2003). Axial dispersion in the three-dimensional mixing of particles in a rotating drum reactor. *Chemical Engineering Science*, 58(2) :401–415.
- [Specht et al., 2010] Specht, E., Shi, Y.-C., Woche, H., Knabbe, J., and Sprinz, U. (2010). Experimental investigation of solid bed depth at the discharge end of rotary kilns. *Powder Technology*, 197(1-2) :17–24.
- [Sunkara et al., 2015] Sunkara, K. R., Herz, F., Specht, E., and Mellmann, J. (2015). Transverse flow at the flight surface in flighted rotary drum. *Powder Technology*, 275 :161–171.
- [Sunkara et al., 2013] Sunkara, K. R., Herz, F., Specht, E., Mellmann, J., and Erpelding, R. (2013). Modeling the discharge characteristics of rectangular flights in a flighted rotary drum. *Powder Technology*, 234 :107–116.
- [Suzuki et al., 2008] Suzuki, T., Okazaki, T., Yamamoto, K., Nakata, H., and Fujita, O. (2008). Improvements in Pyrolysis of Wastes in an Externally Heated Rotary Kiln (Measurement of the Overall Heat Transfer Coefficient from the Wall to the Wastes). *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 74(743) :1586–1592.
- [Szekely and Sohn, 1976] Szekely, J. and Sohn, H. (1976). *Gas-solid reactions*. Academic Press, New-York.
- [Taylor, 1950] Taylor, G. (1950). The Instability of Liquid Surfaces when Accelerated in a Direction Perpendicular to their Planes. I. *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 201(1065) :192–196.
- [Taylor, 1954] Taylor, G. I. (1954). Diffusion and Mass Transport in Tubes. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 67(12) :857–869.
- [Thibert, 2012] Thibert, R. (2012). Pédagogie + Numérique = Apprentissages 2.0. *Dossier de veille de l’Ifé*. 79.
- [Torres Torres, 2003] Torres Torres, J. G. (2003). *L’Oxydation par Voie Humide (OVH) à l’oxygène moléculaire dans un réacteur tubulaire catalytique à lit fixe automatisé*. thèse, Université Pierre et Marie Curie, Cnam Paris.
- [Tosun-Bayraktar et al., 2003] Tosun-Bayraktar, A., Porte, C., Delacroix, A., and Martin-Moreno, C. (2003). Catalytic oxidation of sodium sulfite in a gas-liquid tubular ejector : optimization of the operational conditions by Simplex method. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 65(1) :113–117.
- [Tscheng and Watkinson, 1979] Tscheng, S. H. and Watkinson, A. P. (1979). Convective heat transfer in a rotary kiln. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 57(4) :433–443.
- [Villermaux, 1993] Villermaux, J. (1993). *Génie de la réaction chimique : Conception et fonctionnement des réacteurs*. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- [Wes et al., 1976] Wes, G. W. J., Drinkenburg, A. A. H., and Stemerding, S. (1976). Heat transfer in a horizontal rotary drum reactor. *Powder Technology*, 13(2) :185–192.
- [Zukoski and Cannon, 1975] Zukoski, E. and Cannon, J. (1975). Turbulent mixing in vertical shafts under conditions applicable to fires in high rise buildings. Technical Fire Report to the National Science Foundation No. 1, Pasadena, California.

CURRICULUM VITÆ

1997 ingénieur de l'École Nationale Supérieure des Industries Chimiques (Ensic) Nancy

1997-2000 docteur "Génie des Procédés" de l'Institut National Polytechnique de Lorraine

2000-2001 demi-ATER (sections 60-62) à l'Université Paris XI, Orsay (laboratoire Fast)

2001-2002 ATER (62^e section) à l'École Normale Supérieure de Cachan (laboratoire PPSM)

depuis 2002 maître de Conférences en génie des procédés (62^e section) au Cnam à Paris
(laboratoire EA21 → EA7341)

Annexe A

Encadrement scientifique

J'ai été membre du jury de soutenance de tous les étudiants que j'ai encadrés, que ce soit en thèse ou en master, ainsi que d'un grand nombre de jurys de mémoires d'ingénieurs Cnam en plus de ceux dont j'étais la tutrice.

Sommaire

A.1 Thèses codirigées (7)	143
A.2 DEA et masters encadrés (13)	144
A.3 Mémoires d'ingénieur Cnam tuteurés et soutenus (9)	145

A.1 Thèses codirigées (7)

Florent MUSCATELLI « Mise en forme par cristallisations de charges granulaires énergétiques » 01/10/2002 - 06/09/2005 (thèse Cifre)

taux de co-encadrement : 30% (co-encadrants : Morad AMADJI *pour la SNPE* ; Alain DELACROIX, directeur de thèse)

pas de publication ni communication (sujet confidentiel)

actuellement responsable du département Risques Technologiques - SME Environnement - Airbus Safran Launchers

Olivier CHEDEVILLE « Combinaison de procédés d'oxydation avancée et d'un éjecteur pour le traitement d'effluents industriels aqueux » 01/10/2003 - 12/06/2006 (bourse ministérielle)

taux de co-encadrement : 80% (co-encadrante : Catherine PORTE, directrice de thèse)

2 publications & 4 communications communes

actuellement maître de conférences à l'IUT d'Orléans

Alexis El KHOURY « CONCEPTION ET MISE EN PLACE D'UN PROCEDE AUTOMATISE D'OXYDATION PAR VOIE HUMIDE EN CATALYSE HETEROGENE (OVHC) : Application au traitement d'effluents aqueux pollués au Méthyltertiobutyléther (MTBE) » 01/09/2003 - 15/05/2008 (autofinancement du doctorant)

taux de co-encadrement : 80% (co-encadrant : Alain DELACROIX, directeur de thèse)

3 communications communes

dernière situation connue : ingénieur d'étude en mission pour Alstom

Bouchra BEJJANY « Oxydation par voie humide catalytique dans un réacteur à lit fixe gaz/liquide/solide de micropolluants organiques : mise en place du pilote, étude du catalyseur hétérogène » 01/11/2002 - 23/05/2008 (autofinancement de la doctorante)
taux de co-encadrement : 80% (co-encadrant : Alain DELACROIX, directeur de thèse)
3 communications communes
actuellement professeur assistant à la Faculté des sciences et techniques de Mohammedia au Maroc

Baptiste MULOT « Utilisation des moyens d'analyse en ligne pour la robustesse des procédés d'isolement des principes actifs pharmaceutiques » 01/10/2004 - 24/11/2008 (bourse ministérielle + convention avec Sanofi-Aventis)
taux de co-encadrement : 60% (co-encadrantes : Caroline BONDOUX-WISNIEWSKY *pour Sanofi-Aventis* ; Catherine PORTE, directrice de thèse)
pas de publication ni communication (sujet confidentiel)
actuellement ingénieur procédés chez TEMBEC TARTAS

Phahath THAMMAVONG « Conception et mise au point d'un pilote de four tournant pour l'étude des transferts de chaleur » 01/10/2007 - 14/12/2010 (bourse ministérielle + contrat avec Areva) taux de co-encadrement : 45% (co-encadrants : Alain DELACROIX, directeur de thèse ; Stéphane VITU)
1 publication sur ce travail de thèse & 3 communications communes + 4 rapports industriels
actuellement ingénieur de recherche contractuel au Cnam

Alex BONGO NJENG « Étude expérimentale et modélisation de fours tournants munis de relevés » 01/11/2012 - 10/10/2015 (co-financement des laboratoires CMGPCE et Rapsodee)
taux de co-encadrement : 25% (co-encadrants : Marc CLAUSSE, co-directeur de thèse ; Jean-Louis DIRION, co-directeur de thèse *pour Rapsodee* ; Stéphane VITU)
4 publications & 6 communications communes
actuellement analyste informatique et parallèlement autoentrepreneur

A.2 DEA et masters encadrés (13)

Olivier CHEDEVILLE DEA « Combinaison de procédés d'oxydation avancée et d'un éjecteur pour le traitement d'effluents industriels aqueux » 2003

Maryanna DE MELO SOLEDADE master 1 « Étude expérimentale de l'hydrodynamique dans les fours tournants munis de relevés par mesure de distribution des temps de séjour » 07/04/2016 - 19/07/2016

Damien DESPINOY DEA « Étude de nouvelles stratégies pour améliorer la distribution granulométrique - Application à la glycine » février 2003 - 07/07/2003
encadrement conjoint avec Catherine PORTE

Charles DOIREAU master 2 « Étude des transferts thermiques dans un four tournant par mécanique des fluides numérique » 13/03/2012 - 20/07/2012
encadrement conjoint avec Fawaz MASSOUH (professeur à l'Ensam) et Ivan DOBREV (ingénieur de recherche à l'Ensam)

Alexis El KHOURY DEA « Étude de l'Oxydation par Voie Humide du MTBE dans un réacteur tubulaire à lit fixe de catalyseur Ru/Ce-Al₂O₃ » 2003

Vincent FANGUET DEA « Étude du mélange par gravité de deux fluides miscibles dans un tube vertical » février 2001 - juin 2001
encadrement conjoint avec Jean-Pierre HULIN

Mauro FERRANTE master 2 « Installation d'une colonne à bulles pour le traitement d'effluents aqueux par ozonation » 01/02/2005 - 01/07/2005
encadrement conjoint avec Olivier CHEDEVILLE

Didier GRACIEN DEA « Dégradation du phénol au moyen d'un procédé d'oxydation avancée dans un réacteur de type éjecteur tubulaire - Étude de la faisabilité du couplage avec un traitement biologique » octobre 2003 - 25/06/2004
encadrement conjoint avec Olivier CHEDEVILLE et Catherine PORTE

Wael KHALIL DEA « Étude de la cristallisation du carbonate de calcium - Contrôle du polymorphisme » octobre 2002 - 15/09/2003
encadrement conjoint avec Catherine PORTE

Thao-Nguyen LE-VU DEA « Mise en œuvre de la cristallisation de la lysine à l'échelle laboratoire » octobre 2002 - 15/09/2003
encadrement conjoint avec Catherine PORTE

Ziyana ROSSANALY master 2 « Contribution à la conception d'un procédé d'Oxydation par Voie Humide » 01/02/2006 - 27/06/2006
encadrement conjoint avec Bouchra BEJJANY et Alexis El KHOURY

Phahath THAMMAVONG master 2 « L'utilisation de la réfractométrie et de la turbidimétrie pour contrôler la cristallisation par refroidissement d'un principe actif pharmaceutique en solution » 01/02/2007 - 05/07/2007
encadrement conjoint avec Baptiste MULOT

Yue Ying XU master 2 « Étude du vieillissement du catalyseur Ru-CeO₂/Al₂O₃ utilisé pour l'oxydation par voie humide catalytique (OVHC) du MTBE » 12/02/2008 - 16/07/2008
encadrement conjoint avec Bouchra BEJJANY et Alexis El KHOURY

A.3 Mémoires d'ingénieur Cnam tuteurés et soutenus (9)

Sébastien ARTOUS « Définition des caractéristiques techniques, réalisation et qualification du banc d'essais CATFISH (Caractérisation Analytique de la Filtration Sous Humidité) » mémoire soutenu le 18 novembre 2005 – dernière situation connue : ingénieur à l'IRSN

Nicolas BOUSQUET « Développement d'un four semi-pilote instrumenté et exploitation des résultats de la calcination à haute température » mémoire soutenu le 18 mars 2013 (spécialité Sciences nucléaires) – actuellement ingénieur technologies des procédés au CEA Marcoule

Luc CHAUCHAT « Étude sur les refroidisseurs/sécheurs dans l'alimentation du bétail » mémoire soutenu le 3 juillet 2009 – dernière situation connue : directeur d'une petite usine de fabrication d'aliments pour bétail (groupe Nutréa) et menant en parallèle des travaux de recherche sur les micro-algues pour Nutréa

Ivan CROUZET « Le recyclage de l'acide fluorhydrique dans le procédé W » mémoire soutenu le 8 juin 2010 – dernière situation connue : responsable d'unité (mise en œuvre des essais sur de nouvelles installations) chez Areva à Pierrelatte

Leslie LOUISY-JOSEPH « Amélioration des coûts variables de l'atelier de production de peroxyde d'hydrogène d'Arkema - usine de Jarrie » mémoire soutenu le 7 mai 2015 – actuellement responsable conception réacteurs chimiques chez DCNS

Julien PRADOUX « Mise en place de document de formation pour les opérateurs de conduite du four de silicomanganèse de l'usine de Dunkerque » mémoire soutenu le 18 juillet 2016 – actuellement minéralurgiste, chargé de projet chez Eramet Research

Mathieu RINAUDO « Formalisation du bilan matière de l'atelier chlorure de méthyle » mémoire soutenu le 3 octobre 2016 – actuellement technicien experimentation génie chimique-génie des procédés à l'IFPEN (passage cadre en cours ; processus long)

Alexis STERNICHA « Élimination de l'H₂S contenu dans les gaz de pétrole liquéfiés issus de l'hydrocraquage » mémoire soutenu le 19 janvier 2007 – dernière situation connue : ingénieur procédés chez Arkema

Virginie TESSON « Procédés de réduction des émissions d'oxydes d'azote sur une unité d'incinération de déchets dangereux » mémoire soutenu le 16 janvier 2008 – actuellement responsable d'exploitation (traitement et recyclage des transformateurs) chez Trédi (Groupe Séché)

Annexe B

Production scientifique

Mes communications sur les aspects pédagogiques sont présentées dans l'annexe C.

Sommaire

B.1 Articles (11)	147
B.2 Congrès (30)	148
B.2.1 Congrès internationaux avec actes (4)	148
B.2.2 Congrès nationaux avec actes (13)	148
B.2.3 Congrès internationaux (11)	150
B.2.4 Congrès nationaux (2)	151
B.3 Rapports de contrats industriels (8)	151

B.1 Articles (11)

Marie DEBACQ, Vincent FANGUET, Jean-Pierre HULIN, Dominique SALIN, Bernard PERRIN, 2001. Self-similar concentration profiles in buoyant mixing of miscible fluids in a vertical tube. *Physics of Fluids* 13, 3097–3100. DOI :[10.1063/1.1405442](https://doi.org/10.1063/1.1405442)

Marie DEBACQ, Jean-Pierre HULIN, Dominique SALIN, Bernard PERRIN, E. John HINCH, 2003. Buoyant mixing of miscible fluids of varying viscosities in vertical tubes. *Physics of Fluids* 15, 3846–3855. DOI :[10.1063/1.1624838](https://doi.org/10.1063/1.1624838)

Olivier CHEDEVILLE, **Marie DEBACQ**, Mauro FERRANTE ALMANZA, Catherine PORTE, 2007. Use of an ejector for phenol containing water treatment by ozonation. *Separation and Purification Technology* 57, 201–208. DOI :[10.1016/j.seppur.2007.04.004](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.04.004) - [hal-00984185](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00984185)

Olivier CHEDEVILLE, **Marie DEBACQ**, Catherine PORTE, 2009. Removal of phenolic compounds present in olive mill wastewaters by ozonation. *Desalination* 249, 865–869. DOI :[10.1016/j.desal.2009.04.014](https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.04.014)

Phahath THAMMAVONG, **Marie DEBACQ**, Stéphane VITU, Marc DUPOIZAT, 2011. Experimental Apparatus for Studying Heat Transfer in Externally Heated Rotary Kilns. *Chemical Engineering & Technology* 34, 707–717. DOI :[10.1002/ceat.201000391](https://doi.org/10.1002/ceat.201000391) - [hal-00984180](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00984180)

Marie DEBACQ, Stéphane VITU, Denis ABLITZER, Jean-Léon HOUZELOT, Fabrice PATISSON, 2013. Transverse motion of cohesive powders in flighted rotary kilns : Experimental study of unloading at ambient and high temperatures. *Powder Technology* 245, 56–63. DOI :[10.1016/j.powtec.2013.04.007](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.04.007) - [hal-00823592](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00823592)

Marie DEBACQ, Phahath THAMMAVONG, Stéphane VITU, Denis ABLITZER, Jean-Léon HOUZELOT, Fabrice PATISSON, 2013. A hydrodynamic model for flighted rotary kilns used for the conversion of cohesive uranium powders. *Chemical Engineering Science* 104, 586–595. DOI :[10.1016/j.ces.2013.09.037](https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.09.037) - [hal-00908458](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00908458)

Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Marc CLAUSSE, Jean-Louis DIRION, **Marie DEBACQ**, 2015. Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln : Part I. Experimental RTD and axial dispersion study. *Powder Technology* 269, 554–565. DOI :[10.1016/j.powtec.2014.03.066](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.03.066) - [hal-01071437](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071437)

Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Marc CLAUSSE, Jean-Louis DIRION, **Marie DEBACQ**, 2015. Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln : Part II. Experimental hold-up and mean residence time modeling. *Powder Technology* 269, 566–576. DOI :[10.1016/j.powtec.2014.05.070](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.070) - [hal-01071437](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071437)

Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Marc CLAUSSE, Jean-Louis DIRION, **Marie DEBACQ**, 2016. Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln : Part III. Up-scaling considerations and segregation analysis. *Powder Technology* 297, 415–428. DOI :[10.1016/j.powtec.2016.04.052](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.04.052) - [hal-01486593](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01486593)

Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Marc CLAUSSE, Jean-Louis DIRION, **Marie DEBACQ**, 2018. Wall-to-solid heat transfer coefficient in flighted rotary kilns : experimental determination and modeling. *Experimental Thermal and Fluid Science* 91, 197–213. DOI :[10.1016/j.expthermflusci.2017.10.024](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.10.024) - [hal-01624450](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01624450)

B.2 Congrès (30)

B.2.1 Congrès internationaux avec actes (4)

Danielle BARTH, **Marie DEBACQ**, Dominique PETITJEAN, Alain BREMBILLA, 1998. Supercritical carbon dioxide purification of n-octacosane obtained by chemical synthesis. article en anglais paru dans les actes [poster *5th Meeting on Supercritical Fluids*, mars 1998, Nice – France]

Marie DEBACQ, Didier HARTMANN, Jean-Léon HOUZELOT, Denis ABLITZER, 1999. Transport of Powders through Rotary Kilns : Experimental Study and Modelling. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 13-67, 121–128. [communication orale *2^e Congrès Européen de Génie des Procédés - ECCE2*, octobre 1999, Nice – France]

Marie DEBACQ, Vincent FANGUET, Jean-Pierre HULIN, Dominique SALIN, Bernard PERRIN, 2001. Gravity induced mixing in a vertical tube. article de 4 pages en anglais paru dans les actes [communication orale *International Workshop on Miscible Interfaces*, juillet 2001, Paris – France]

Alexis EL KHOURY, Bouchra BEJJANY, **Marie DEBACQ**, Catherine PORTE, 2007. Design of an automated fixed bed reactor used for a catalytic wet oxidation process. article de 4 pages en anglais paru dans les actes [poster *International Conference on Informatics in Control, Automation & Robotics - ICINCO 2007*, mai 2007, Angers – France]

B.2.2 Congrès nationaux avec actes (13)

Marie DEBACQ, Didier HARTMANN, Jean-Léon HOUZELOT, Denis ABLITZER, 1998. Étude expérimentale de l'écoulement de poudres en four tournant. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 12-61, 267–272. [poster *1^{er} Congrès Français Traceurs et Méthodes de Traçage*, novembre 1998, Nancy]

Marie DEBACQ, Alain. HAZOTTE, André FEUGIER, Didier HARTMANN, Jean-Léon HOUZELOT, Denis ABLITZER, 2001. Mesure par analyses d'image de lois de déchargement de releveurs dans des fours tournants. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 15-78, 223–228. [communication orale *Congrès Visualisation, Image, Modélisation - VIM 2001*, mai 2001, Nancy]

Marie DEBACQ, André FEUGIER, Didier HARTMANN, Fabrice PATISSON, Jean-Léon HOUZELOT, Denis ABLITZER, 2001. Écoulement transversal de poudres cohésives en four tournant : étude expérimentale et modélisation. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 15-88, 103–110. [communication orale *8^e Congrès Francophone de Génie des Procédés - SFGP2001*, octobre 2001, Nancy]

Marie DEBACQ, Jean-Pierre HULIN, Bernard PERRIN, Dominique SALIN, 2001. Mélange instable par gravité dans un tube vertical : diffusion ou convection? *Récents Progrès en Génie des Procédés* 15-83, 83–88. [poster *8^e Congrès Francophone de Génie des Procédés - SFGP2001*, octobre 2001, Nancy]

Marie DEBACQ, André FEUGIER, Didier HARTMANN, Fabrice PATISSON, Jean-Léon HOUZELOT, Denis ABLITZER, 2003. Modélisation des fours tournants de défluoration et réduction du difluorure d'uranyle. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 90, 1553–1560. [communication orale *9^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2003*, septembre 2003, Saint-Nazaire]

Marie DEBACQ, Jean-Pierre HULIN, Bernard PERRIN, Vincent FANGUET, Vincent RANCILLAC, Dominique SALIN, 2003. Mélange par gravité de fluides miscibles en tubes verticaux et inclinés. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 90, article 1-16 (8 pages). [communication orale *9^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2003*, septembre 2003, Saint-Nazaire]

Smain MERROUCHE, **Marie DEBACQ**, Catherine PORTE, Alain DELACROIX, 2003. Détermination de l'aire interfaciale dans un éjecteur tubulaire gaz-liquide : complémentarité d'une méthode chimique et d'une technique photographique avec analyse d'image. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 90, article B-37 (8 pages). [poster *9^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2003*, septembre 2003, Saint-Nazaire]

Damien DESPINOY, **Marie DEBACQ**, Mihasina RABESIKA, Béatrice SOMARRIBA, Catherine PORTE, 2003. Mise en place d'un profil de vitesse d'agitation pour améliorer la distribution granulométrique des cristaux de glycine. article de 6 pages paru dans les actes [communication orale *Congrès CRISTAL2*, novembre 2003, Toulouse - France]

Olivier CHEDEVILLE, **Marie DEBACQ**, Catherine PORTE, 2005. Traitement d'eaux résiduaires industrielles par oxydation avancée combinée avec un éjecteur. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 92, article C-5 (8 pages). [communication orale *10^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2005*, septembre 2005, Toulouse]

Olivier CHEDEVILLE, **Marie DEBACQ**, Catherine PORTE, 2007. Utilisation d'un contacteur gaz/liquide type éjecteur tubulaire pour l'ozonation de dérivés de l'acide cinnamique. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 95 (6 pages). [communication orale *5^{es} Journées Francophones sur les Réacteurs Gaz/Liquide et Gaz/Liquide/Solide - GLS07*, juin 2007, Carry Le Rouet]

Olivier CHEDEVILLE, Aurélien PHILIPPE, **Marie DEBACQ**, Hakim DEHOULI, Catherine PORTE, 2007. Évaluation d'un Contacteur Gaz / Liquide pour le Traitement des Margines par Ozonation : l'éjecteur. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 96 (7 pages). [communication orale *11^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2007*, octobre 2007, Saint-Étienne]

Alexis El KHOURY, Yue Ying XU, Bouchra BEJJANY, **Marie DEBACQ**, Alain DELACROIX, 2009. Oxydation par voie humide catalytique dans un réacteur à lit fixe

gaz/liquide/solide d'effluents aqueux pollués au méthyltertiobutyléther (MTBE). *Récents Progrès en Génie des Procédés* 98 (6 pages). [poster 12^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2009, octobre 2009, Marseille]

Phahath THAMMAVONG, **Marie DEBACQ**, Stéphane VITU, Marc DUPOIZAT, Alain DELACROIX, 2009. Étude expérimentale des échanges thermiques paroi/poudre dans des fours tournants munis de releveurs. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 98 (6 pages). [poster 12^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2009, octobre 2009, Marseille]

B.2.3 Congrès internationaux (11)

Marie DEBACQ, Vincent FANGUET, Jean-Pierre HULIN, Dominique SALIN, Bernard PERRIN, 2001. Rayleigh-Taylor induced diffusive mixing in vertical tubes. *American Physical Society* abstract DQ.005 [communication orale 54th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, novembre 2001, San Diego – États-Unis]

Marie DEBACQ, Jean-Pierre HULIN, Vincent RANCILLAC, Dominique SALIN, Bernard PERRIN, 2002. Gravity induced mixing of miscible fluids in a confined geometry. *American Physical Society* abstract EE.006 [communication orale 55th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, novembre 2002, Austin – États-Unis]

Alexis EL KHOURY, Bouchra BEJJANY, **Marie DEBACQ**, Catherine PORTE, 2004. Wet Air Oxidation of Methyl-tertiary-butyl-ether (MTBE) in a fixed bed tubular reactor over a Ruthenium-Cerium/Alumina catalyst. [poster *Conférence internationale "La chimie pour l'eau" Chemrawn XV*, juin 2004, Paris – France]

Olivier CHEDEVILLE, Didier GRACIEN, **Marie DEBACQ**, Catherine PORTE, 2004. Couplage de procédés d'oxydation avancée avec un éjecteur tubulaire pour le traitement d'eaux résiduelles industrielles. [poster *Conférence internationale "La chimie pour l'eau" Chemrawn XV*, juin 2004, Paris – France]

Phahath THAMMAVONG, **Marie DEBACQ**, Stéphane VITU, Marc DUPOIZAT, 2011. Heat transfer in an externally heated rotary kiln : Preliminary results obtained with a new experimental device. [poster 8th European Congress of Chemical Engineering - ECCE2011, septembre 2011, Berlin – Allemagne]

Alex Stéphane BONGO NJENG, **Marie DEBACQ**, Jean-Louis DIRION, Marc CLAUSSE, Stéphane VITU, 2013. A thorough experimental residence time distribution study in rotary kiln. [poster 9th European Congress of Chemical Engineering - ECCE2013, avril 2013, La Haie – Pays-Bas]

Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Marc CLAUSSE, Jean-Louis DIRION, **Marie DEBACQ**, 2014. Modeling of Mean Residence Time of Solid Particles in Rotary Kilns. [communication orale *AIChE Annual Meeting 2014*, novembre 2014, Atlanta – États-Unis]

Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Marc CLAUSSE, **Marie DEBACQ**, Jean-Louis DIRION, 2015. Wall-to-solids Heat Transfer Coefficient Determination in Flighted Rotary Kilns. [communication orale 10th European Congress of Chemical Engineering - ECCE2015, septembre 2015, Nice – France]

Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Jean-Louis DIRION, Marc CLAUSSE, **Marie DEBACQ**, 2015. Convective and Wall-to-Solids Heat Transfer Coefficients in Flighted Rotary Kilns : Experimental Measurement and Modeling. [communication orale *AIChE Annual Meeting 2015*, novembre 2015, Salt Lake City – États-Unis]

Maryanna DE MELO SOLEDADE, Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Jean-Louis DIRION, **Marie DEBACQ**, 2016. Residence Time Distribution of Fine to Coarse

Particles in Rotary Kilns. [communication orale *AIChE Annual Meeting 2016*, novembre 2016, San Francisco – États-Unis]

Marie DEBACQ, Clément HAUSTANT, Stéphane VITU, Jean-Louis DIRION, 2017. Characterization of solids transport within flighted rotary kilns : Synthesis of numerous experiments and modeling. [communication orale courte *10th World Congress of Chemical Engineering (WCCE10)*, octobre 2017, Barcelone - Espagne]

B.2.4 Congrès nationaux (2)

Marie DEBACQ, Phahath THAMMAVONG, Stéphane VITU, Marc DUPOIZAT, Alain DELACROIX, 2009. Profil de chargement dans des fours tournants munis de releveurs. [poster *Colloque Science et technologie des poudres et matériaux frittés - STPMF2009*, mai 2009, Montpellier]

Alex Stéphane BONGO NJENG, Stéphane VITU, Marc CLAUSSE, Jean-Louis DIRION, **Marie DEBACQ**, 2015. Evaluation of the Wall-to-solids Heat Transfer coefficient in Rotary Kilns. résumé en anglais d'une page paru dans les actes du colloque [communication orale *Colloque Science et technologie des poudres et matériaux frittés - STPMF2015*, avril 2015, Nancy]

B.3 Rapports de contrats industriels (8)

Marie DEBACQ, décembre 1997. Présentation du modèle de four tournant développé pour le four Comurhex G2001 - programme mis au point par Christophe NICOLE. rapport pour Cogema et FBFC - 32 pages (hors l'annexe comportant le listing commenté du programme)

Marie DEBACQ, Denis ABLITZER, Jean-Léon HOUZELOT, Fabrice PATISSON, juin 1998. ÉTUDE DYNAMIQUE des fours tournants de défluoration. rapport d'activité pour Cogema et FBFC - 41 pages

Marie DEBACQ, Denis ABLITZER, Jean-Léon HOUZELOT, Fabrice PATISSON, janvier 1999. COMPORTEMENT DYNAMIQUE des fours tournants de défluoration et conséquences sur les échanges thermiques. rapport d'activité pour Cogema et FBFC - 46 pages

Marie DEBACQ, Denis ABLITZER, Jean-Léon HOUZELOT, Fabrice PATISSON, septembre 1999. MODÉLISATION DES FOURS TOURNANTS de défluoration et réduction du difluorure d'uranyle. rapport d'activité pour Cogema et FBFC - 78 pages

Phahath THAMMAVONG, **Marie DEBACQ**, Stéphane VITU, décembre 2008. Modèle thermique pour les fours tournants munis de releveurs : conception du pilote. rapport d'activité pour Areva - 46 pages

Phahath THAMMAVONG, **Marie DEBACQ**, février 2009. Présentation de Fluranox 1. rapport d'activité pour Areva - 75 pages (hors listing du code de calcul)

Phahath THAMMAVONG, **Marie DEBACQ**, Stéphane VITU, février 2010. Étude thermique des fours tournants. rapport d'activité pour Areva - 68 pages

Phahath THAMMAVONG, **Marie DEBACQ**, Stéphane VITU, septembre 2011. Étude des transferts thermiques dans les fours tournants à chauffage électrique. rapport d'activité pour Areva - 40 pages

Annexe C

Enseignement

J'enseigne la **mécanique des fluides appliquée** aux procédés, les **opérations unitaires mécaniques**, l'**hydrodynamique**, les **transferts de matière**, l'**extraction liquide-liquide**, une introduction à la **distillation** pour des alternants en formation d'ingénieur en énergétique, le **génie de la réaction chimique** (réacteurs homogènes et réacteurs polyphasiques), la **modélisation et la simulation**. Par le passé, j'ai également enseigné le séchage, les transferts et échangeurs thermiques, l'instrumentation, les bilans, les unités et l'analyse dimensionnelle. J'enseigne pour l'essentiel à des salariés déjà en activité dans le domaine du génie des procédés, **en présentiel et à distance**. Plus de dix ans de pratique de l'enseignement à distance m'ont conduite à largement faire évoluer mon enseignement en présentiel, introduisant de nombreux outils numériques (classes virtuelles, exercices, forums de discussion, modules d'autoformation) et des pratiques pédagogiques telles que la classe inversée et les travaux collaboratifs.

Sommaire

C.1	Volume horaire assuré et répartition	155
C.2	Animation des formations	156
C.3	Animation de la vie de la spécialité	157
C.4	Animation de la communauté	157
C.5	Communications sur la pédagogie (11+3)	158
C.5.1	Congrès internationaux avec actes (1)	158
C.5.2	Congrès nationaux avec actes (5)	158
C.5.3	Congrès internationaux (4)	159
C.5.4	Congrès nationaux (1)	159
C.5.5	Séminaires invités (3)	159

Je suis responsable national des quatre diplômes et certificats du Cnam suivants. Ceci implique la rédaction des dossiers de création et/ou de renouvellement d'habilitation et la supervision du déploiement dans l'ensemble du réseau Cnam.

- licence professionnelle "Génie des procédés pour l'environnement" déployée en contrat de professionnalisation et en apprentissage au Centre Cnam Martinique avec deux parcours : "Aménagement et gestion des ressources en eau" & "Traitement et gestion des déchets" ;
- parcours "Génie des procédés" de la licence générale, disponible partout hors temps de travail et déployée certaines années en alternance en Normandie ;
- certificats de spécialisation "Bioprocédés" (dont j'ai été l'initiatrice et qui a démarré récemment) & "Génie des produits" (construit avec le Cnam Lorraine).

Je suis en moyenne chaque année responsable d'une demi-douzaine d'unités d'enseignement de 6 ECTS chacune, presque toutes également proposées en formation à distance ; plus les travaux pratiques réalisés en présentiel, mais pour lesquels il faut gérer des élèves venant de Lille jusqu'à Marseille en passant par Quimper et même du Maroc.

En plus des activités ordinaires de tout enseignant-chercheur, un enseignant du Cnam participe :

- à l'orientation des élèves, dont chaque parcours est différent, et auxquels un conseil voire un soutien individualisé est indispensable pour mener à bien une formation conduite de front avec une vie professionnelle et une vie personnelle ;
- aux soutenances de mémoires et autres examens oraux, pour lesquels –avant la mise en place du référentiel d'activité en juin 2010– aucun décompte d'heure n'était effectué ;
- à l'organisation de deux sessions d'examen pour chaque unité d'enseignement, avec toujours un sujet d'examen national (qui ne doit donc comporter absolument aucune erreur, puisqu'il ne sera pas possible de rectifier en cours d'épreuve, alors que celle-ci se déroule potentiellement dans tous les centres régionaux du Cnam, y compris outre-mer ou à l'étranger, parfois même dans des ambassades).

Peu après mon arrivée au Cnam, j'ai complètement reconstruit le pilote de TP "hydraulique" à partir d'éléments d'installations très anciennes et de quelques achats complémentaires (tuyauteries PVC, pompes et débitmètres) ; remis en service la colonne d'extraction liquide/liquide avec l'aide d'un stagiaire ; conçus et mis en place un TP "agitation" et un TP "caractérisation des poudres" à partir de matériels disponibles au laboratoire et d'achats complémentaires (moteur et mobiles d'agitation ; verrerie et divers accessoires bricolés). J'ai bien sûr à ces occasions complètement revus ou créés les protocoles opératoires correspondants et les manipulations à réaliser par les auditeurs.

Depuis 2004, je travaille au développement de l'enseignement à distance en génie des procédés au Cnam (12 ECTS de formation entièrement à distance créés entre 2004 et 2006 ; puis environ 8 autres ECTS créés progressivement par la suite). Ceci nécessite tout à la fois d'inventer une pédagogie adaptée, de créer des supports encore plus riches que pour l'enseignement présentiel : photocopiés à trous ; transparents animés et sonorisés pour certaines explications, enregistrement de capsules vidéos spécifiques ou bien un lourd travail de post-production des enregistrements réalisés en présentiel ; corrigés détaillés des exercices et archives d'examen ; compléments de cours divers tels que exercices, animations ou outils de simulation, listes de liens vers des illustrations disponibles sur Internet ; etc. Mais aussi d'offrir aux élèves un véritable tutorat, par le biais de forums de discussion et plus récemment de classes virtuelles. Cette forme d'enseignement est certes mal prise en compte dans le service d'enseignement, mais c'est une forme pédagogique très valorisante pour l'enseignant (de par les retours extrêmement positifs faits par les auditeurs), un défi pédagogique passionnant et en évolution constante avec les progrès technologiques. J'ai choisi depuis longtemps de valoriser ce travail par des communications nationales et internationales et je suis régulièrement invitée à donner des séminaires (je n'ai pu jusqu'à aujourd'hui honorer que 3 de ces invitations).

Récemment j'ai développé des modules de formation interactifs :

- « Hydraulique pour le génie des procédés » dans le cadre du projet Unit²⁰ numéro 2014-6, dont j'étais responsable (2,5 ECTS ; niveau L3, adaptable au niveau L2 ; 25 k€ de financement pour les développements informatiques et l'infographie), en partenariat avec

20. La Fondation **Unit** (Université Numérique Ingénierie et Technologie), créée à l'initiative du Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, est une Fondation qui associe les acteurs publics et privés de la formation supérieure en Sciences de l'Ingénieur et Technologie désireux de partager des ressources numériques existantes, des outils, des expériences, et de co-piloter des projets. <<http://www.unit.eu/>>

l'Insa de Rouen, l'Université Lyon 1 et l'IUT d'Orléans. L'expert qui a évalué ce module lui a donné comme appréciation générale "EXCELLENT" ; il souligne notamment que ce module "donne envie d'apprendre" ; il précise être lui-même "en général un inconditionnel des enseignements en salle et amphî avec contact direct étudiants-enseignant", mais indique avoir "été conquis par ce module". – **module public, disponible en ligne** <<http://gpip.cnam.fr/ressources-pedagogiques-ouvertes/hydraulique/>>

- « À la découverte des phénomènes de transfert en génie des procédés » & « Transfert de matière » - 1 ECTS - niveau L3 ;
- « Extraction liquide-liquide » - 2 ECTS - niveau L3 (avec un mini-jeu sérieux pour l'apprentissage de l'utilisation des diagrammes ternaires) ;
- « Introduction aux réacteur polyphasiques » - 1,5 ECTS - niveau M2 ;
- « Introduction à la distillation » - 0,7 ECTS - niveau L3.

Je suis porteur en 2017, avec une ingénieure pédagogique du Cnam, du projet Unit numéro 2016-7 « Génie de la Réaction Chimique : les réacteurs polyphasiques » (4 ECTS ; niveau M2 ; 20 k€ de financement). Ce projet concerne le développement d'un module de formation interactif en français et en espagnol, incluant un TP virtuel, des quiz, exercices interactifs et vidéos. Il est porté par le Cnam, avec le soutien de l'École des Mines d'Albi, l'École des Mines de Paris, l'Ensiacet, l'Université de Lorraine (Ensic), l'Université d'Orléans (IUT), l'Université Pierre et Marie Curie et l'Université de San Luis Potosí (Mexique).

C.1 Volume horaire assuré et répartition

Je réalise **environ 200 heures équivalent TD (HED) en moyenne par an**, réparties en cours, travaux dirigés (TD), travaux pratiques (TP) et, depuis 2012-2013, référentiel ; comme illustré sur le graphique ci-après (FIGURE C.1). Ces enseignements concernent quasi-exclusivement les niveaux L3, M1 et M2 ; pour des effectifs d'environ 50 à 80 auditeurs au niveau L3 (généralement entre la moitié et les deux tiers en formation à distance) et en moyenne une quinzaine aux niveaux M1 et M2 (avec environ la moitié en formation partiellement à distance). Travaillant au Cnam, mon enseignement concerne exclusivement la formation professionnelle supérieure : dans son immense majorité hors temps de travail (cours du soir et samedis) + 14h par an depuis 7 ans en alternance.

Je n'avais que des demi-services d'enseignement en 2006-2007, 2007-2008 et 2008-2009, car j'ai bénéficié d'un CRCT du 15/02/2007 au 14/02/2008 ; de plus, l'année suivant la naissance d'un enfant (mon fils est né le 24/06/2008), les enseignantes du Cnam n'ont qu'un demi-service à assurer. J'ai à nouveau bénéficié d'un CRCT au second semestre 2016-2017 et d'une modulation de -32 HED au premier semestre 2016-2017. Étant directrice du département Caser du 1^{er} octobre 2013 au 7 mars 2016, j'ai bénéficié de 20 HED de référentiel en 2013-2014, 50 HED en 2014-2015 et 25 HED en 2015-2016.

En moyenne, sur les sept dernières années (depuis que 1 heure TP compte 1 HED), mon service d'enseignement se répartit en **33% de cours, 21% de travaux dirigés, 21% de travaux pratiques et 25% de référentiel**. Ce fort pourcentage de référentiel est lié à ma responsabilité de directrice de département de 2013 à 2016 et au développement de ressources pédagogiques interactives pendant trois années. Le « pic » d'heures en 2012-2013 correspond à la mise en œuvre de la réforme du diplôme d'ingénieur.

Comme on peut le remarquer sur le graphique précédent, j'ai eu à assurer **un nombre conséquent d'heures de cours dès mes premières années au Cnam** ; tâche qui me passionne et dans laquelle je me suis investie sans compter : j'ai intégralement monté ou remonté ces cours

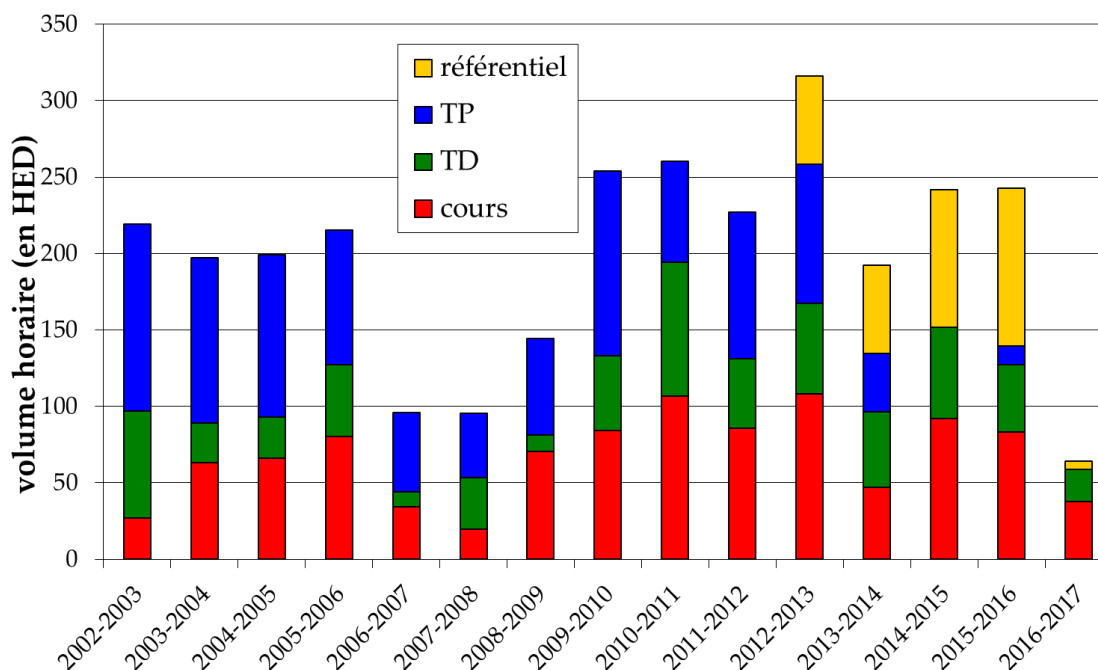


FIGURE C.1 – Composition de mon service d'enseignement

(environ 500 pages de photocopiés originaux créés depuis mon arrivée au Cnam), y compris souvent pour la formation à distance dès le démarrage de l'enseignement.

C.2 Animation des formations

Le passage à la semestrialisation en 2005, fut pour moi l'occasion d'insuffler **une évolution des contenus des unités d'enseignement et des diplômes vers une formation réformée, réorganisée et plus affirmée en génie des procédés**. Certaines de mes propositions n'avaient pas été concrétisées à l'époque ; c'est la restructuration du Cnam courant 2010 (disparition des chaires, mise en place des départements) qui fut l'occasion d'une réflexion animée sur la place du génie des procédés au Cnam et qui permit la construction d'un diplôme d'ingénieur résolument affiché en génie des procédés (et non comme simple option du diplôme d'ingénieur "chimiste") pour une mise en œuvre à partir de la rentrée 2012. Les contenus des UE ont été modernisés, certains ont été re-ventilés afin d'obtenir des ensembles plus cohérents. Ce travail a aussi permis une réflexion avec certains collègues ; ainsi le nouveau diplôme comporte deux parcours : un parcours généraliste et un second orienté vers l'industrie pharmaceutique. Une de mes publications nationales (en 2011) décrit cette évolution en deux étapes, dont j'ai été le moteur principal. Cette réforme concerne bien évidemment également les autres titres ou diplômes (en particulier licence et titre de niveau II) dans lesquels notre équipe pédagogique est impliquée. J'ai co-rédigé avec le professeur responsable du diplôme d'ingénieur génie des procédés du Cnam le dossier de demande de renouvellement de l'habilitation par la CTI en 2014 et participé aux audits de toutes les spécialités de mon département début 2015. Elles ont toutes été habilitées. J'ai largement contribué ces trois dernières années au **développement de l'offre de formation en lien avec les besoins et l'évolution industriels** : bioprocédés, recyclage,

génie des produits.

C.3 Animation de la vie de la spécialité

Outre le suivi individuel des auditeurs de la spécialité "génie des procédés" du Cnam, j'ai récemment mis en place un certain nombre de dispositifs pour les accompagner et les aider :

- **développement des réseaux sociaux** : Notre page Facebook CnamGP <<https://www.facebook.com/CnamGP/>> compte à ce jour plus de 2 886 « j'aime » et nos publications hebdomadaires sont très suivies ; notre très récente chaîne YouTube <<http://www.youtube.com/c/GenieDesProcedesCNAM>> compte 300 abonnés et plus de 30 000 vues (notre vidéo la plus vue est une animation 3D expliquant le **fonctionnement d'un échangeur à plaques** <<https://youtu.be/1UWcJ-Qxgn8>>) ; le groupe LinkedIn privé réservé à la spécialité a plus de 70 membres ; notre jeune compte Twitter @CnamGP est pour l'instant encore un peu poussif, avec une soixantaine d'abonnés et 109 tweets à ce jour. Ces chiffres peuvent sembler modestes, mais ils sont très satisfaisants comparativement aux autres au sein du Cnam et il faut se souvenir que la majorité des auditeurs du Cnam ne sont pas des « enfants du numérique » (*digital natives*).
- **création de vidéos** : J'ai initié et coordonné au printemps 2016 la création de vidéos pour expliquer le fonctionnement de nos formations, présenter nos diplômes, la formation à distance, etc. Au printemps 2017, nous avons produit avec le réalisateur du Cnam et des comédiens et équipes professionnelles, **un film professionnel pour la promotion du génie des procédés** <<https://youtu.be/UTQCrAGBkKY>>. Je produis également régulièrement des vidéos pédagogiques, dont certaines sont publiques et d'autres réservées aux auditeurs du Cnam. L'ensemble de nos vidéos publiques sont visibles sur notre chaîne YouTube.
- **conseils de perfectionnement** : Depuis 2014, notre spécialité organise un conseil de perfectionnement annuel ou bisannuel, réunissant industriels, enseignants correspondants en région, représentants des auditeurs et enseignants, pour réfléchir aux évolutions de nos formations. Je participe à l'organisation de ces conseils et j'en rédige les comptes rendus.
- **enquêtes** : Pour nous aider à mieux comprendre nos publics, améliorer nos formations mais aussi notre visibilité, j'ai réalisé à ce jour 4 enquêtes auprès de nos auditeurs et de nos diplômés (au printemps 2014, en décembre 2015, à l'été 2016 et au printemps 2017). Je rédige une synthèse d'une page pour chaque enquête.
- **alumni** : Les auditeurs du Cnam ayant des parcours différenciés, l'esprit de corps traditionnel des écoles d'ingénieurs, ne se crée pas naturellement comme en formation initiale. Notre spécialité avait une association *alumni* qui avait périclité. Fin 2016, j'ai organisé d'une journée anciens/nouveaux afin d'initier la renaissance de cet esprit et de l'association. J'ai également rédigé avec le comité d'organisation la **synthèse de cette journée** <<http://gpip.cnam.fr/koumoul/journeeGPIP10dec2016/synthese10dec2016.pdf>>.

C.4 Animation de la communauté

Membre assidu du groupe "Formation" de la **Société Française de Génie des Procédés** depuis le milieu des années 2000, je suis membre du bureau depuis fin 2012 et présidente depuis juin 2016. Ce groupe mène des réflexions sur les méthodes pédagogiques, le contenu des formations, l'attractivité, dans un esprit de partage et d'échanges. Nous organisons une journée tous les deux ans, ouverte à tous. Les deux dernières ont eu lieu en 2013 au Cnam à Paris : « Formations en génie des procédés : quels modes de formation pour quels contenus ? » et en 2015 au Cnam à

Lyon : « Modification des programmes : quel impact sur les formations en génie des procédés du bac au master ? ». La prochaine journée (fin 2017 - début 2018) devrait concerner les pédagogies actives, par projet, etc. Enfin le groupe mène des projets ; les derniers en date, cofinancés par Unit sont :

- constitution d'une communauté "Génie des Procédés", avec notamment le recensement et l'évaluation de ressources numériques francophones disponibles en génie des procédés ;
- réalisation du portail genie-des-procedes.fr, qui a pour but d'améliorer la visibilité du génie des procédés (auprès des étudiants notamment), de référencer les formations en génie des procédés ou incluant du génie des procédés en France et de répertorier les ressources pédagogiques disponibles et ouvertes à tous. Dans le cadre de ce projet, je réalise avec une graphiste un film d'animation intitulé « Que serait le monde sans le génie des procédés ? ».

Depuis un peu plus d'un an, je suis secrétaire de la *Working Party Education* de la fédération européenne de génie chimique (*ECCE*).

C.5 Communications sur la pédagogie (11+3)

C.5.1 Congrès internationaux avec actes (1)

Marie DEBACQ, Marc CLAUSSE, Vincent DALMEYDA, Jean-Pierre DOMBLIDES, Clotilde FERROUD, Gilbert VILLOUTREIX, 2006. Quatre expériences de formation à distance dans le pôle Science et Techniques Industrielles du Cnam Paris. article de 6 pages en français paru dans les actes [communication orale *colloque international Technologies de l'Information et de la Communication dans l'Enseignement Supérieur et l'Entreprise - TICE 2006*, octobre 2006, Toulouse – France]

C.5.2 Congrès nationaux avec actes (5)

Marie DEBACQ, Catherine PORTE, Radia SCHMITT-SOUKEHAL, Vincent DALMEYDA et François DELASTRE, 2005. Une expérience d'enseignement à distance en génie des procédés. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 92, article P-1 (8 pages). [communication orale *10^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2005*, septembre 2005, Toulouse]

Marie DEBACQ, 2007. Vers la mise en place d'une offre complète de formation à distance en génie des procédés au Cnam : pragmatisme, efficacité et conséquences sur le présentiel. *Récents Progrès en Génie des Procédés* 96 (8 pages). [communication orale *11^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2007*, octobre 2007, Saint-Étienne]

Marie DEBACQ, Wafa GUIGA, Serge STAINMESSE, 2011. Un ingénieur Cnam en génie des procédés, c'est possible ? même à distance ? *Récents Progrès en Génie des Procédés* 101, article 433 (6 pages). [poster *13^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2011*, décembre 2011, Lille]

Marie DEBACQ, 2013. Pédagogie 2.0 : outils efficaces ou gadgets pour une formation en génie des procédés au Cnam ? *Récents Progrès en Génie des Procédés* 104 (8 pages). [communication orale *14^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2013*, octobre 2013, Lyon]

Marie DEBACQ, Nicole CORSYN, François DELASTRE, 2015. Scenari + Moodle = une première expérience de classe inversée en génie des procédés au Cnam. article de 5 pages en français paru dans les actes [communication orale *colloque PédagoTice*, juin 2015, Toulouse]

C.5.3 Congrès internationaux (4)

Marie DEBACQ, 2015. A Flipped Classroom Experiment In The Context Of Lifelong Learning In Chemical Engineering. résumé 783. [communication orale *10th European Congress of Chemical Engineering - ECCE2015*, septembre 2015, Nice – France]

Marie DEBACQ, 2015. Scenari + Moodle = Self-training module for a flipped classroom in distance lifelong learning or in traditional teaching. [communication orale *AICHE Annual Meeting 2015*, novembre 2015, Salt Lake City – États-Unis]

Marie DEBACQ, 2016. Self-training module and serious game for a flipped classroom about liquid-liquid extraction for future engineers in lifelong learning. [poster *22th International Congress of Chemical and Process Engineering - Chisa2016*, août 2016, Prague – République Tchèque]

Marie DEBACQ, 2017. Chemical engineering education in the digital age. [keynote *10th World Congress of Chemical - WCCE10*, octobre 2017, Barcelone – Espagne]

C.5.4 Congrès nationaux (1)

Marie DEBACQ, Verónica BELANDRIA, 2017. Nos étudiants ne sont pas des mutants, il faut pourtant faire évoluer notre pédagogie : réflexions croisées sur l'enseignement du génie des procédés dans le supérieur. [communication orale *Congrès de la Société Française de Génie des Procédés - SFGP2017*, juillet 2017, Nancy]

C.5.5 Séminaires invités (3)

Marie DEBACQ, 2015. Formation à distance au Cnam. *Journée internationale du colloque CTI* - 9 février 2015 - Nancy

Marie DEBACQ, 2016. Retour d'expérience sur un dispositif de classe inversée en génie des procédés dans des contextes de formation initiale et continue. *Journée annuelle des enseignants de l'École des Ponts* - 26 janvier 2016 - Champs-sur-Marne

Marie DEBACQ, 2017. La chaîne éditoriale Scenari et son intégration à Moodle, retour d'expérience. *Journée du Schéma Directeur du Numérique du Cnam* - 28 mars 2017 - Paris

Annexe D

Administration, rayonnement, valorisation et transfert

Je me suis toujours impliquée dans le fonctionnement des collectifs de recherche et d'enseignement auxquels j'appartenais. S'il faut reconnaître que ce fut parfois au détriment de mon travail de recherche, toutes ces expériences, avec toute leur diversité, m'ont beaucoup appris -sur les organisations humaines et sur moi-même- et m'ont permis de côtoyer des chercheurs évoluant dans des environnements très différents du mien, source d'enrichissement personnel et d'ouverture.

Sommaire

D.1 Diffusion et rayonnement	161
D.1.1 Activités éditoriales	161
D.1.2 Diffusion du savoir	162
D.1.3 Activités au sein de sociétés savantes	163
D.2 Responsabilités scientifiques et financement de la recherche	164
D.3 Responsabilités administratives et mandats	165
D.3.1 Direction d'un département d'enseignement	165
D.3.2 Mandats électifs	165
D.3.3 Participation à des travaux d'intérêt collectif	166
D.3.4 Participation au recrutement des enseignants-chercheurs	166

D.1 Diffusion et rayonnement

D.1.1 Activités éditoriales

- J'ai à ce jour expertisé **une vingtaine d'articles pour des revues internationales** :
- 2 pour AICHe journal (en 2015),
 - 1 pour Chemical Engineering and Processing (en 2007),
 - 2 pour Chemical Engineering Science (en 2015 et 2016),
 - 5 pour Computers and Chemical Engineering (en 2008 et 2009),
 - 4 (dont 2 révisions) pour Experimental Thermal and Fluid Science (en 2011, 2012 et 2013),
 - 6 pour Powder Technology (4 en 2014 et 2 en 2017).

J'étais ou suis membre du comité scientifique de **5 congrès et colloques** :

- "Systèmes d'Information, Modélisation, Optimisation et commande en génie des procédés" (SIMO 2006 – 11-12 octobre 2006 à Toulouse) ;
- "18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering" (ESCAPE 18 – 1^{er}-4 juin 2008 à Lyon) + expertise de 4 communications ;
- "14^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés" (SFGP2013 – 8-10 octobre 2013 à Lyon) + expertise de 5 communications ;
- Colloque "Science et technologie des poudres et matériaux frittés" (STPMF 2015 – 8-10 avril 2015 à Nancy) + expertise de 7 communications ;
- "16^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés" (SFGP2017 – 11-13 juillet 2017 à Nancy) + expertise de 12 communications.

D.1.2 Diffusion du savoir

Dans le cadre de la **Fête de la Science**, j'ai réalisé des démonstrations d'un pilote automatisé au laboratoire en 2003 et des démonstrations sur le thème « Le verre au service de la chimie industrielle » au Musée des Arts et Métiers en 2005. En 2014, j'ai coordonné l'accueil de 80 lycéens dans les laboratoires du département Caser du Cnam à l'occasion de la Fête de la science. J'ai organisé des **activités dans le laboratoire pour un groupe de huit enfants** (deux demi-journées en 2005) dans le cadre d'un projet de photographie scientifique pour des enfants d'une dizaine d'année, dans le cadre de l'exposition du Musée des Arts et Métiers « Doisneau chez les Joliot-Curie : un photographe au pays des physiciens ». J'ai organisé et plusieurs fois animé des **mini-Travaux-Pratiques de découverte de la recherche en génie chimique pour des lycéens** en classe de seconde (tous les ans de 2007 à 2011) : les élèves participaient par groupes de 5-6 à trois ateliers "cristallisation", "extraction liquide/liquide" et "distribution des temps de séjour" pendant 35 min chacun (soit plus de 400 élèves depuis 2007). J'avais conçu des posters pour servir de support à ces ateliers.

J'ai créé en 2012 et j'organise depuis, le **cycle de conférences « Vous avez dit génie des procédés ? »** <<http://gpip.cnam.fr/co/VousAvezDitGP.html>> :

- 4 mai 2012 : « Vous avez dit le génie des procédés modernes verts ? Ou comment produire durablement des molécules aux enjeux environnementaux et économiques » par Jean-Claude CHARPENTIER ;
- 20 novembre 2012 : « Le génie des procédés et l'entreprise : Projets industriels et management du changement » par Jean-Pierre DAL PONT ;
- 20 mars 2013 : « Principes et applications de l'intensification en génie des procédés » par Laurent FALK ;
- 12 juin 2013 : « Un ingénieur Cnam en génie des procédés : pour quoi faire ? comment bien le former ? » table ronde préparée par Laurent PRAT et animée par Éric SCHAER ;
- 13 novembre 2013 : « Du génie des procédés au génie des produits » par Véronique FALK ;
- 8 avril 2014 : « L'innovation systématique : La quête du Graal en Génie des Procédés et en Génie industriel ? » par Jean-Marc LE LANN ;
- 3 juin 2014 : « Deux problématiques de modélisation dynamique en génie des procédés. Illustration par quelques exemples » par Christian JALLUT ;
- 9 juillet 2014 : « Alimentation : Quels défis pour l'ingénieur en procédés ? » par Mario MOSCOSA-SANTILLAN ;
- 5 novembre 2014 : « Innovation. Doit-on avoir des approches différentes selon le type d'industries ? » par Olivier POTIER et Gilles GAREL ;
- 14 avril 2015 : « Commande prédictive des processus industriels » par Jacques RICHA-

- LET ;
- 16 juin 2015 : « Le prix du danger : maîtriser la sécurité des procédés avec toutes les parties prenantes ? » par André LAURENT ;
 - 22 janvier 2016 : « Deux problématiques de modélisation dynamique en génie des procédés. Illustration par quelques exemples » réédition de la conférence donnée à Lyon en 2014 par Christian JALLUT ;
 - 14 avril 2016 : « Usage des micro-procédés pour la synthèse chimique en continu » par Laurent PRAT ;
 - 23 mars 2017 : « La distillation : de l'ancestral alambic à la sobriété énergétique des procédés de séparation » par Michel MEYER ;
 - janvier 2018 : conférence de Guillaume BOISSONNET sur les bioraffineries.

D.1.3 Activités au sein de sociétés savantes

Je suis membre actif du groupe de travail "Informatique et procédés" (IEP) de la Société Française de Génie des et Procédés (SFGP) depuis le début des années 2000. J'en suis la secrétaire/trésorière depuis septembre 2010. Le groupe a été récemment renommé "Ingénierie avancée des procédés" (IAP). Je suis également présidente du groupe "Formation" de la SFGP et secrétaire de la *Working Party Education* de la Fédération européenne de génie chimique (EFCE).

Avec le groupe IEP (devenu IAP) de la SFGP depuis 2008, outre les travaux réguliers du groupe, j'ai participé à l'organisation de 12 journées au Cnam et dans d'autres lieux :

- « Apport des outils informatiques à la sécurité des procédés » le 11 mars 2008 au Cnam à Paris ;
- « Optimisation énergétique des procédés » le 10 mars 2009 à l'IFP Solaize ;
- « Modélisation et simulation dans les procédés biotechnologiques et agroalimentaires » le 5 mai 2010 au Cnam à Paris ;
- « Enseignement des thématiques relevant de l'informatique et procédés : pratiques académiques et besoins industriels » le 19 octobre 2010 au Cnam à Paris ;
- « Développement et diffusion de modèles thermodynamiques : quelle(s) solution(s) pour l'industrie ? » le 12 mai 2011 à l'Ensiacet ;
- « Réseaux de neurones pour le contrôle et la surveillance de procédés » le 11 janvier 2012 à l'ESPCI-ParisTech conjointement avec le club Automatique et Automatisation Industrielle (AAI) de la Société de l'Électricité, de l'Électronique et des Technologies de l'Information et de la Communication (SEE) ;
- « Interopérabilité entre logiciels de simulation de procédés. Le standard CAPE-OPEN : de la théorie à la pratique » le 18 septembre 2012 à Lyon conjointement avec le CAPE-OPEN Laboratories Network (CO-LaN) ;
- « Programmation parallélisée » le 10 avril 2013 (demi-journée) à la Maison de la Chimie à Paris ;
- « Réconciliation des données ou comment obtenir des bilans cohérents, détecter des capteurs défaillants et obtenir l'information la plus riche possible à partir de mesures brutes sur une installation industrielle » le 3 juillet 2013 au Cnam à Paris ;
- « Planification d'expériences ou comment concevoir les "bonnes" expériences en relation avec un modèle de procédé en particulier non-linéaire » le 3 juin 2014 au Cnam à Lyon ;
- « L'analyse dimensionnelle : un outil d'ingénierie performant pour modéliser les procédés industriels complexes et maîtriser le changement d'échelle » le 8 mars 2016 au Cnam à Paris ;

- « De l'audit énergétique à l'optimisation de l'efficacité énergétique des sites industriels : Quelles méthodologies ? Quels outils ? » le 9 juin 2016 au Cnam à Paris.

Avec le GT Formation de la SFGP , j'ai organisé deux journées :

- « Formations en génie des procédés : quels modes de formation pour quels contenus ? » le 11 avril 2013 au Cnam à Paris ;
- « Modification des programmes : quel impact sur les formations en génie des procédés du bac au master ? » le 15 octobre 2015 au Cnam à Lyon.

La XV^e journée Cathala-Letort « Le génie des procédés au service de l'usine du futur » a été organisée le 5 novembre 2014 au Cnam à Paris. Une cinquantaine de participants étaient présents, avec une forte représentation industrielle.

Les assises NORD du génie des procédés que j'ai coordonnées pour Ile-de-France – Normandie – Hauts-de-France, se sont déroulées le 4 novembre 2016 au Cnam à Paris et ont réuni une soixantaine de participants : industriels, académiques et quelques institutionnels. Le **résumé** <<http://urlz.fr/5NSZ>> de cette journée est accessible en ligne ; un **spot vidéo** <<https://youtu.be/Mv9J2kZ2fTY>> a également été réalisé.

D.2 Responsabilités scientifiques et financement de la recherche

J'ai listé ci-après les projets financés auxquels j'ai contribué. J'ai également déposé 4 demandes auprès de l'ANR (2 fois porteur et 2 fois responsable pour mon établissement) et diverses autres demandes de financement qui n'ont pas abouti.

projet ANVAR Aide aux jeunes pour l'innovation J 04 11039Q "Mise en place d'un procédé de traitement de l'eau basé sur le couplage de procédés d'ozonation" - 6 000 €

Ce projet s'est déroulé du 01/01/2005 au 31/12/2005. J'ai participé à la rédaction du dossier, j'étais tuteur du jeune chercheur (Olivier CHEDEVILLE) et j'avais la responsabilité financière du projet.

projet interne Cnam Innovation 2007 "Étude comparative de procédés innovants pour l'élimination des stéroïdes présents dans les eaux de surfaces" en collaboration avec le Laboratoire d'Électrochimie et le Laboratoire des Sciences Nucléaires du Cnam ; l'objectif étant de comparer des procédés innovants d'élimination des composés phénoliques présents dans les eaux de surfaces : l'ozonation et l'OVHC, ainsi que la nanofiltration et l'oxydation électrochimique. dotation de 21 000 € sur deux ans pour l'ensemble du projet (9 350 € pour notre équipe)

J'ai participé à la rédaction du dossier, j'étais correspondant principal du projet, j'avais la charge et la responsabilité de la gestion financière.

BQR pour financer la machine frigorifique pour le pilote de cristallisation (travail expérimental de Baptiste MULOT pendant sa thèse au laboratoire) - 8 000 €

J'ai participé à la rédaction du dossier.

projet ANVAR Aide aux jeunes pour l'innovation J 07 06050Q "Oxydation par Voie Humide Catalytique d'effluents aqueux contenant des micropolluants : qualification de l'installation pilote" - 6 000 €

Ce projet s'est déroulé du 01/07/2007 au 30/06/2008. J'ai participé à la rédaction du dossier, j'étais tuteur des jeunes chercheurs (Bouchra BEJJANY et Alexis El KHOURY) et j'avais la responsabilité financière du projet.

contrats avec Areva NC pour l'étude sur les fours tournants dans le cadre de la thèse de Phahath THAMAVONG + un avenant d'un an après sa soutenance - 285 500 € sur quatre ans

J'étais responsable scientifique et financier des deux contrats. Le reliquat de ces contrats a permis de financer les 18 premiers mois de la thèse d'Alex BONGO.

D.3 Responsabilités administratives et mandats

D.3.1 Direction d'un département d'enseignement

J'étais la directrice -élue- du département "Chimie, Alimentation, Santé, Environnement, Risque" (Caser) du Cnam **pendant deux ans et demi** (du 1er octobre 2013 au 7 mars 2016) : ce département d'enseignement interdisciplinaire rassemblait environ **80 personnels** (une quarantaine d'enseignants-chercheurs et près d'une quarantaine de personnels Biatss), plus de **150 vacataires**, environ **60 titres et certificats** et **130 unités d'enseignement** hors temps de travail, **8 équipes pédagogiques** (dont une localisée à Cherbourg).

J'avais la responsabilité de chef de service pour les près de 80 personnels affectés au département. Je supervisais le montage et la réalisation budgétaires, la réalisation des opérations de ressources humaines, les campagnes d'emploi, la négociation et la gestion des enveloppes d'heures d'enseignement, avec le soutien d'une responsable administrative et financière. J'ai rédigé les deux bilans d'activité correspondants aux deux années civiles où j'étais en fonction. J'ai coordonné la rédaction du Document unique d'évaluation des risques, avec les assistants de prévention et pour la première fois la prise en compte des risques psychosociaux. Au cours de mes deux ans et demi de mandat, j'ai présidé 27 conseils de département et 4 assemblées générales. J'ai beaucoup œuvré, en lien avec les directeurs de Centres Cnam en Région et les animateurs des équipes du département, pour le redéploiement de l'offre du département dans ces centres en s'appuyant sur la formation à distance. J'ai supervisé la campagne de renouvellement d'habilitation des 5 titres d'ingénieur du département. J'ai mis en place des groupes de travail thématiques (budget, offre de formation, communication, diffusion de la culture scientifique, formation continue, règlement intérieur) et j'ai élaboré un tableau de bord pour le suivi de l'ensemble des activités pédagogiques du département.

D.3.2 Mandats électifs

J'étais membre élu du **Conseil de Perfectionnement** du Cnam de 2005 à 2009 (instance tenant lieu de conseil scientifique et des formations). Je suis membre élu du **Conseil Scientifique** du Cnam depuis deux mandatures (2010-2014 et 2014-2018) ; j'en ai été la secrétaire d'octobre 2011 à mai 2014.

Je suis membre élu du **Conseil d'Administration** du Cnam pour la mandature 2014-2018.

Je suis membre du **Conseil du laboratoire** depuis 2015.

J'ai également été membre élu du **Conseil de l'École Siti** du Cnam et du **Conseil du Département Caser** du Cnam de 2010 à 2016.

D.3.3 Participation à des travaux d'intérêt collectif

J'ai participé au Cnam à de nombreux groupes de travail et comités de pilotage pour différents projets de l'établissement :

- Saghe, Système Automatisé de Gestion des Heures d'Enseignement, en 2012-2014 ;
- Schéma Directeur du Numérique + directoire des Tice, en 2012-2014 ;
- Siscol, système de gestion de scolarité, en 2013 ;
- projet Synergie, d'implantation des laboratoires à St DENIS, en 2005-2006 ;
- prospective métiers 2020, en 2013 ;
- Groupe Fod, formation ouverte et à distance, depuis 2014 ;
- Règlement Intérieur de l'établissement, en 2016 ;
- BDO2, base de l'offre de formation, en 2016-2017 ;
- et j'en oublie probablement quelques-uns...

D.3.4 Participation au recrutement des enseignants-chercheurs

J'étais membre de 3 commissions de spécialistes (Cnam, ENS Cachan et Paris VI) en 62^e section jusqu'en 2008. Depuis 2009, j'ai participé à 11 comités de sélection (Cnam, Ensiacet, Ensic, Insa de Rouen, Lyon 1, Paris XI, UTC). Cela représente au total une vingtaine enseignants-chercheurs recrutés.

Résumé

Des grains, des gouttes et des bulles : quand génie des procédés se conjugue avec hydrodynamique et pédagogie

Les réacteurs polyphasiques sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels (pétrochimie, pharmacie, nucléaire, polymères, mais aussi traitement des eaux. . .). Leur complexité tient au fait que s'y déroulent simultanément des réactions, des écoulements et des transferts de matière et de chaleur. Cette complexité tout à la fois impose la modélisation de l'équipement en vue de son industrialisation ou de son optimisation et rend difficile cette modélisation. Le génie des procédés, science appliquée et intégrative, fournit des outils pour choisir les bonnes échelles d'expérimentation et de modélisation et coupler les approches. Ce mémoire retrace une vingtaine d'années de recherche dans le domaine, en focalisant le propos sur : la construction de pilotes, leur étude hydrodynamique et la modélisation. Au travers de cinq exemples de procédés polyphasiques, essentiellement des réacteurs et en particulier le four tournant, il s'agit de montrer comment les études hydrodynamiques ont permis d'avancer significativement dans la compréhension de ces réacteurs aux échelles macro- comme mésoscopiques. Les résultats expérimentaux ont ensuite été capitalisés par analyse dimensionnelle ou utilisés pour bâtir un modèle phénoménologique, qui s'attache à décrire les aspects hydrodynamiques de manière plus détaillée que de coutume dans ce type d'approche. La pédagogie numérique, dont quelques développements sont exposés dans le dernier chapitre, est proposée comme un domaine de recherche à part entière en génie des procédés.

Mots-clés: procédé polyphasique, four tournant, hydrodynamique, transferts couplés, modélisation, pédagogie numérique

Abstract

Grains, drops and bubbles : when chemical engineering is coupled with hydrodynamics and pedagogy

Multiphase reactors are used in many industrial fields (e.g., the oil and gas industry, the pharmaceutical, nuclear and polymers industries, as well as wastewater treatment...). Their complexity is due to the fact that reactions, fluid and powder flow, and heat and mass transfer take place simultaneously in these reactors. This complexity not only means that modeling of the equipment has to be carried out in order to adapt or optimize it for industrial applications, but at the same time makes such modeling difficult. Chemical engineering, an applied and interdisciplinary science, provides the necessary tools to select the most suitable experimental and modeling scales and to couple different approaches. This dissertation reports on twenty years of research in this area, focusing specifically on the construction, hydrodynamic study and modeling of pilot plants. Five examples of multiphase processes, mainly reactors and in particular rotary kilns, are presented to show how these hydrodynamic studies have led to significant progress in our understanding of these reactors, at the macro- and mesoscopic scales. The experimental results obtained were then exploited via dimensional analysis or used to build a phenomenological model which describes the hydrodynamic features in greater detail than is usual in this type of approach. The final chapter presents some recent developments in digital teaching, which is proposed as a full-fledged research field in itself in chemical engineering.

Keywords: multiphase chemical engineering, rotary kiln, hydrodynamics, coupled transfer, modeling, pedagogy