



**COmité de DEveloppement du  
GEnie des Procédés en Rhône-Alpes Auvergne**  
Siège : Institut Pascal, Axe Gepeb Batiment Polytech  
2 avenue Blaise Pascal, 63170 Aubière  
Tél : 33 (0)4 73 40 53 18  
Fax : 33 (0)4 73 40 18 29  
E-mail : [asso.codegepra@sigma-clermont.fr](mailto:asso.codegepra@sigma-clermont.fr)

Association régie par la loi de 1901



## **Avant-Propos / Remerciements**

Chers adhérents, chers participants.

En cette année 2020 un peu particulière, notre journée scientifique se tiendra sous la forme d'un webinaire organisé par le site clermontois représenté par l'Institut Pascal (IP) et plus particulièrement son axe Génie des Procédés Energétique et Biosystèmes (GePEB).

Les deux conférences plénières aborderont des thèmes de recherche en lien avec les activités de l'IP comme les « Procédés de méthanisation et de méthanation » animé par Pierre FONTANILLE (UCA Institut Pascal, BIO-VALO) et les « Procédés de valorisation de la biomasse par M. Richard VIVIER (MFP Michelin).

Le prix de thèse 2020 (pour une thèse soutenue en 2019) sera remis à Behnam KHADEM pour son travail portant sur la « conception, extrapolation et optimisation des procédés d'émulsion double », travail réalisé au LAGEPP de l'Université Claude Bernard Lyon 1.

Cette année, le programme est quelque peu chamboulé par rapport aux éditions précédentes, nous avons maintenu des sessions de "short communications" orales présentant les travaux des doctorants et post doctorants dans toutes les thématiques d'application du Génie des Procédés, mais malheureusement sans les posters autour desquels d'intenses échanges scientifiques s'engagent habituellement.

L'assemblée générale de l'association clôturera cette journée qui malgré le distanciel compte, une soixantaine d'inscrits et une vingtaine de communications. Il faut aussi souligner la participation pour la première fois de collègues de la région PACA donnant ainsi pleinement sens au nom de la journée scientifique CODEGEPRA-SFGP Sud-Est. Bienvenus à eux !

Je tiens donc à vous remercier chers participants pour vous être mobilisés pour cette journée, malgré des agendas chargés et chamboulés, mais aussi les conférenciers du jour pour leurs contributions à cette journée.

Cet avant-propos ne saurait être complet en terme de remerciements si nous n'avions pas une petite pensée pour notre ancien président, Marc Arousseau, qui après plus d'une dizaine d'années passées à être la cheville ouvrière de l'association, a décidé de laisser la main, appelé par d'autres fonctions. Si nous sommes tous réunis aujourd'hui, le mérite lui en revient. Merci à toi, Marc.

**Fabrice GROS**  
**Président du CODEGEPRA**

## Table des matières

<b>Avant-Propos / Remerciements .....</b>	<b>1</b>
<b>Programme .....</b>	<b>3</b>
<b>Conférences plénières.....</b>	<b>4</b>
Procédés de méthanisation et de méthanation.....	4
Procédés de valorisation de la biomasse .....	5
<b>Prix de thèse CODEGEPRA 2020 .....</b>	<b>6</b>
Design, scale-up and optimization of double emulsion processes.....	6
<b>Communications des non permanents .....</b>	<b>7</b>
P1 - Identification of the molecular reactivity descriptors for vacuum gas oil hydrodenitrogenation .....	8
P2 - Cartographie de l'activité sonochimique en milieu hétérogène .....	9
P3 - Plant-wide measuring of sulfur flow in water resource recovery facility .....	10
P4 - Caractérisation des flux secondaires en stations d'épuration pour l'implémentation de procédés de récupération de l'azote et du phosphore.....	11
P5 - Synthèse contrôlée d'alumine poreuse : modélisation de la porosité en fonction des paramètres physico-chimiques d'agglomération.....	12
P6 - Effet du malaxage sur la tendreté de pièces de viande bovine de tendreté initiale intermédiaire.....	13
P7 - Multiphase flow in the <i>Rock&amp;Roll</i> Ring-Flowloop .....	14
P8 - Biométhanation du syngas – Mise en œuvre à l'échelle pilote .....	15
P9 - Modélisation avancée des phénomènes de transport dans les milieux poreux granulaires .....	16
P10 - Hydrogénation catalytique du xylose en xylitol en réacteur continu .....	17
P11 - Récupération des acides carboxyliques de la liqueur noire : étude de l'estérification de l'acide glycolique .....	18
P12 - Effet de la nature du tensioactif sur le procédé de foisonnement : analyse par la déformation et la rupture de bulles isolées .....	19
P13 - Phase equilibrium of CP-CO <sub>2</sub> hydrate in the presence of salts: Experimental measurements and modeling. ....	20
P15 - Développement d'un modèle numérique pour la gazéification de combustibles alternatifs hétérogènes .....	22
P16 - Analyse locale des créations d'entropie dans un échangeur de chaleur .....	23
P17 - Gestion des polluants et sels en gazéification en eau supercritique .....	24
P18 - Influence de l'Application de l'Extraction Sous Pression Réduite sur l'Humidité du Sol.....	25

## Programme

**9h15** : Accueil/connexion

**9h30** : 1<sup>ère</sup> conférence plénière animée par Pierre Fontanille (Institut Pascal, Bio-Valo) sur ***les procédés de méthanisation et de méthanation***.

**10h00** : 2<sup>ème</sup> conférence plénière assurée par Richard Vivier de la Manufacture Française des Pneumatiques Michelin portant sur les ***procédés de valorisation de la biomasse***.

**10h30 - 10h45** : Pause

**10h45** : Communications orales des non permanents

**12h00** : Fin de la première demi-journée

**12h00 – 13h30** : Pause repas

**13h30** : Remise du prix de thèse 2020 à Behnam Khadem du LAGEPP pour son travail intitulé « ***Design, scale-up and optimization of double emulsion processes*** ».

**14h00** : Communications orales des non permanents

**15h30** : Pause

**15h45** : Communications orales des non permanents suivies de l'AG du CODEGEPRA

## Conférences plénières

### Procédés de méthanisation et de méthanation

FONTANILLE Pierre<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Institut Pascal, Axe GePEB, UMR 6602 UCA/CNRS/SIGMA Clermont, Campus Universitaire des Cézeaux - 2, avenue Blaise-Pascal, TSA 60206 - CS 60026 - 63178 Aubière Cedex

<sup>b</sup>BIO-VALO, Domaine de Lалуas, 63200 Riom

La France importe actuellement 99% de son gaz naturel qui représente pourtant 20% du mix énergétique français. Outre le fait d'être dépendant de pays tiers pour une énergie fossile, le gaz naturel est l'une des sources d'énergie les plus émettrices de gaz à effet de serre (après le pétrole et le charbon). Dans le but d'atteindre les objectifs français fixés par la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) et la stratégie nationale bas carbone (SNBC) qui fixent un objectif de 10% de gaz renouvelable en 2030 et la neutralité carbone en 2050, il est urgent de développer le gaz vert (bas carbone) et plus précisément le biométhane.

Un scénario a été établi par l'ADEME en 2018 pour atteindre une substitution totale de la demande de gaz naturel par du biométhane. La réussite de ce scénario dépend néanmoins du niveau de développement de 3 filières vertes qui vont nécessiter des investissements importants pour pouvoir être déployées largement au sein du réseau national français.

Outre la pyrogazéification qui représenterait dans ce scénario 40% du gisement de gaz renouvelable à l'horizon 2050, la méthanisation et le power-to-méthane ont une capacité de développement très importante à l'échelle nationale et internationale. Cette conférence introductive vise à faire un état des connaissances actuelles de ces deux procédés dont l'un est industrialisé mais qui doit être optimisé afin de diminuer les coûts de production et l'autre qui est en pleine émergence et très attendu par la filière du biogaz.

## Procédés de valorisation de la biomasse

VIVIER Richard

MFP Michelin, 23 place des Carmes Dechaux, 63000 Clermont Ferrand

Michelin développe une stratégie durable qui s'inscrit dans le contexte mondial de la croissance des besoins de mobilité pour offrir à chacun une meilleure façon d'avancer. Cette stratégie est ancrée sur notre raison d'être : une entreprise au service des populations avec l'impact sociétal le meilleur possible, tout en assurant des performances élevées.

Une approche "économie circulaire" est déployée depuis la conception jusqu'à la réalisation de l'offre, c'est-à-dire créer de la valeur tout en respectant les règles du développement durable, en prenant en compte l'impact de nos matières premières et de nos sites sur les écosystèmes, en s'engageant pour une exploitation responsable du caoutchouc naturel, avec des actions pour réduire l'empreinte environnementale tout au long du cycle de vie de nos produits... Notre démarche peut ainsi être résumée par la formule 4 R : réduire, recycler, renouveler, réutiliser.

L'objectif est ainsi de porter la part des matériaux biosourcés à 50% et des matériaux provenant de recyclages à 30% d'ici 2050 dans tous nos produits.

Parmi les actions, la valorisation de biomasse qui ne sera pas en concurrence avec l'alimentation est étudiée. Deux projets en particulier seront cités pour donner un exemple de la co conception où le génie des procédés intervient fortement :

- Bioimpulse dont l'action consiste à remplacer les colles formophénoliques par des colles biosourcées non SVHC (Substance of Very High Concern),
- Biobutterfly qui doit augmenter la part de matières premières biosourcées dans les élastomères synthétiques.

Le premier exemple abordera la mise en place d'un partenariat pour la production de résines adhésives à l'échelle industrielle en partant d'un procédé biotechnologique pour l'obtention d'un nouveau monomère et pouvant servir les marchés des renforts mais aussi du bois.

Le second exemple développera un exemple d'utilisation du génie des procédés pour la spécification d'un butadiène obtenu à partir de fermentation de biomasses, puis la conversion d'alcool en butadiène dans un procédé développé par IFPEN, combinaison apportant de nouvelles impuretés dont il faut évaluer l'impact sur le procédé de fabrication des élastomères synthétiques Michelin.

## Prix de thèse CODEGEPRA 2020

### Design, scale-up and optimization of double emulsion processes

KHADEM Behnam

Docteur de l'Université Claude Bernard Lyon 1

R&D Manager (Predictive Analytics & IoT), Henkel Beauty Care, HENKEL, Düsseldorf, Germany

De nos jours, les émulsions doubles se trouvent dans de nombreuses applications dans différents domaines, tels que le domaine alimentaire, les produits cosmétiques, les produits chimiques ou biochimiques. Dans les produits alimentaires par exemple, les émulsions doubles peuvent permettre d'encapsuler des arômes ou de réduire la teneur en matières grasses. Dans ces systèmes, la qualité du produit est déterminée par l'efficacité de l'encapsulation et la distribution de la taille des gouttes internes et externes, qui peuvent affecter la stabilité physique pendant le stockage. L'objectif de ce travail est de réaliser une étude théorique et expérimentale approfondie des phénomènes intervenant à la fois lors de la préparation et du stockage des émulsions doubles. Dans un premier temps, nous avons étudié les paramètres affectant l'étape de préparation des émulsions doubles et nous avons proposé des modèles pour les décrire. Trois procédés ont été considérés pour l'émulsification des émulsions doubles, l'ultra-sonication, l'Ultra-Turrax et un réacteur agité. Le modèle est basé sur un modèle de bilan de population des gouttelettes externes, incluant les phénomènes de rupture et de coalescence, associé à un modèle de relargage des gouttes internes. Le relargage des gouttes internes est supposé être régi par la rupture des gouttes externes. Pour être applicables aux différents procédés, les modèles de rupture ont été adaptés aux différentes échelles de turbulence, de dissipation pour ultra-sonication et inertielle pour Ultra-Turrax. La deuxième contribution de ce travail concerne l'étude des phénomènes ayant lieu lors du stockage des émulsions doubles, notamment le gonflement et le relargage des gouttes. Dans ce cas, deux modèles de bilan de population des gouttelettes internes et externes ont été développés, comprenant les phénomènes de gonflement des gouttelettes internes, et donc externes, ainsi que le relargage des gouttelettes internes par diffusion et par coalescence avec la phase continue externe. Le modèle de gonflement prend en compte la pression de Laplace qui contrebalance le gradient de pression osmotique et arrête le gonflement. Dans les différentes étapes de préparation ou de stockage, les modèles développés permettent de prédire les distributions de la taille des gouttelettes et le taux de libération.

## **Communications des non permanents**



## P1 - Identification of the molecular reactivity descriptors for vacuum gas oil hydrodenitrogenation

MIKHAYLOVA Polina<sup>a</sup>, BERLIOZ-BARBIER Alexandra<sup>a</sup>, MERDRIGNAC Isabelle<sup>a</sup>, NEMRI Marouan<sup>b</sup>, PEREIRA DE OLIVEIRA Luis<sup>a,\*</sup>, PIRNGRUBER Gerhard<sup>a</sup>

<sup>a</sup>IFP Energies Nouvelles, Rond-Point de l'Échangeur de Solaize, Solaize 69360, France

<sup>b</sup>TRTG - TOTAL Research & Technology Gonfreville, Carrefour n° 4 - BP 27, Harfleur 76700, France

Vacuum gas oils (VGO) represent a valuable source for high-quality refining products. This feedstock creates challenges for the refinery, particularly for catalytic processes due to the high content of undesirable poisons for catalysts as heteroatom-containing compounds. In order to decrease the content of these compounds and prepare VGO for further conversion processes, such as hydrocracking or fluid catalytic cracking, the feedstock shall be hydrotreated. The understanding of the nitrogen-containing species reactivity is crucial to optimize the hydrotreatment process of VGO since they have a significant inhibiting effect on the removability of other heteroatom-containing species (Rabarihoela-Rakotovo et al. 2004).

Usually, the kinetic model of VGO hydrotreatment is based on the macroscopic properties of the feed (i.e., density, nitrogen content). The complexity of the VGO molecular composition makes a prediction based on macroscopic properties feed-dependent. The work's main objective is to identify nitrogen-containing molecules that can be used as reactivity descriptors in the kinetic model. In order to achieve this, VGOs from various refining processes were hydrotreated over a sulfided NiMo/alumina catalyst at different operating conditions, covering a wide range of temperature and residence time typical for hydrotreatment to collect hydrotreated effluents at a broad range of hydrodenitrogenation conversion from 30 to 99 %. The detailed characterization of nitrogen-containing compounds in the feeds and corresponding effluents is very challenging due to the complex hydrocarbon matrix. The use of ultrahigh-resolution Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry (FT-ICR MS) combined with the electrospray ionization (ESI) source represents an appropriate analytical method to get a molecular description of feeds and hydrotreated products. One of the advantages of ESI is selective ionization of basic nitrogen species (i.e., quinoline) and neutral nitrogen species (i.e., carbazole), which are known to have different reactivity and are distinguished in kinetic modelling (Charon-Revellin et al. 2011). FT-ICR MS analysis provides essential information on the aromaticity and alkylation degree of these nitrogen compounds. It allows to evaluate the changes in the molecular composition comparing data for VGOs and their corresponding effluents at different hydrodenitrogenation degrees with the use of chemometric or visualization tools as, for example, Kendrick plots (Figure 1).

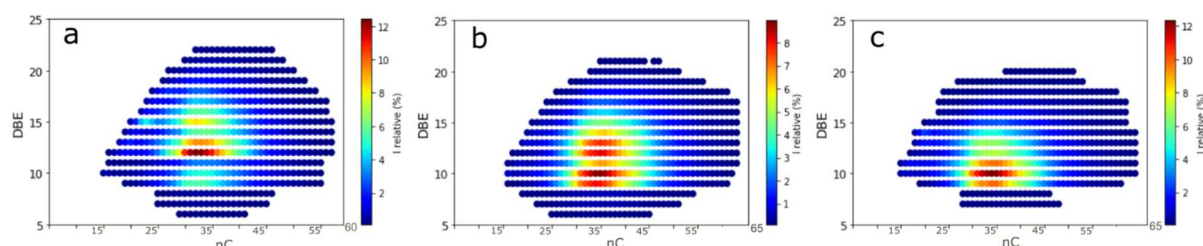


Figure 1.  $N_1$  class Kendrick plots (double bond equivalent (DBE) – number of carbon atoms) based on the results of ESI(-) FT-ICR MS of the VGO (a) and corresponding hydrotreated effluents (b, c)

### References

- Charon-Revellin, N., H. Dulot, C. López-García and J. Jose, 2011, Kinetic modeling of vacuum gas oil hydrotreatment using a molecular reconstruction approach, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, 66, 479-490.
- Rabarihoela-Rakotovo, V., S. Brunet, G. Berhault, G. Perot and F. Diehl, 2004, Effect of acridine and of octahydroacridine on the HDS of 4,6-dimethyldibenzothiophene catalyzed by sulfided NiMoP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Applied Catalysis A: Gen.*, 267, 17-25.

\*Auteur à qui la correspondance devra être adressée : luis.pereira-oliveira@ifp.fr

## P2 - Cartographie de l'activité sonochimique en milieu hétérogène

BARCHOUCI A.<sup>a,\*</sup>, BOISSEAU S.<sup>b</sup>, GONDREXON N.<sup>a</sup>, BAUP S.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LRP, 38000 Grenoble, France

<sup>b</sup>Univ. Grenoble Alpes, CNRS, CERMAV, 38000 Grenoble, France

Lorsqu'un milieu liquide est irradié par des ultrasons de puissance, il est le siège de phénomènes physico-chimiques susceptibles de modifier et/ou améliorer les éventuelles processus chimiques qui ont lieu (Pollet et Ashokkumar). Ces effets sont à l'origine la sonochimie, qui depuis ses débuts, n'a cessé d'attiser l'intérêt des scientifiques. Elle a été employée afin de lever certains verrous rencontrés, en particulier, en milieu hétérogène. A titre d'exemple, l'emploi des ultrasons induit une augmentation du rendement de l'extraction des principes actifs qui peut se faire à température ambiante avec moins de solvants toxiques (Vilkhu et al., Chemat et al.). Lors de la synthèse des nanoparticules, ces ondes acoustiques sont aussi responsables d'un meilleur contrôle de la taille et la surface des solides formés (Xu et al.).

Il est néanmoins légitime de s'interroger sur l'impact d'un tel milieu hétérogène (simulé par l'ajout de billes de verre) sur l'activité ultrasonore. Une première série d'expériences a démontré l'existence d'une relation entre l'activité sonochimique quantifiée par iodométrie et la surface développée par les solides divisés (Fig.1, courbe verte), ensuite corroborée par 2 autres méthodes : méthode de Fricke (Fig.1 courbe rouge) et acide téréphtalique (Fig. 1, courbe bleue) (Barchouchi et al.). Au-delà d'un seuil de surface développée, l'activité sonochimique chute brutalement.

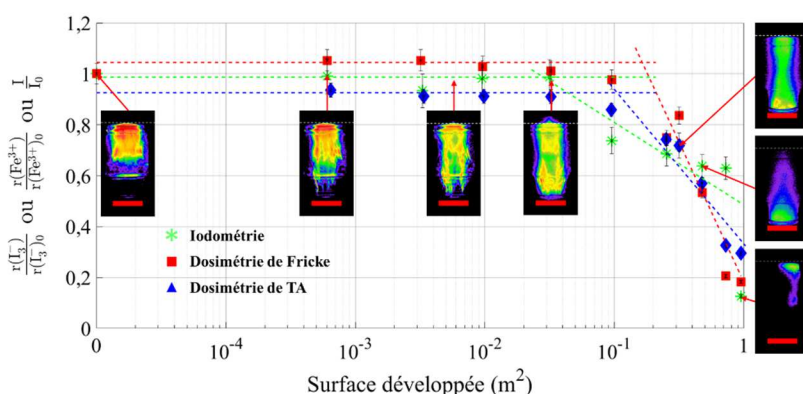


Figure 1. Influence des billes de verre de 8-12  $\mu\text{m}$  sur l'activité sonochimique à 575 kHz

En complément, l'influence des billes de verre sur la distribution de l'activité sonochimique par sonochimiluminescence a été étudiée. Les résultats issus de cette cartographie (Fig. 1) ont révélé une modification de la répartition spatiale de l'activité en fonction de la surface développée par les particules. A faible surface développée, on assiste à une homogénéisation de la distribution de l'activité ultrasonore sur l'ensemble du réacteur, qui disparaît au-delà du seuil de surface critique mentionné lors de l'étude de l'activité sonochimique.

### Références

- B.G. Pollet, M. Ashokkumar, Introduction to ultrasound, sonochemistry and sonoelectrochemistry, 2019. <https://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=5888518> (accessed November 29, 2019).
- K. Vilkhu, R. Mawson, L. Simons, D. Bates, Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry — A review, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 9 (2008) 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.04.014>.
- F. Chemat, N. Rombaut, A.-G. Sicaire, A. Meullemiestre, A.-S. Fabiano-Tixier, M. Abert-Vian, Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review, *Ultrason. Sonochem.* 34 (2017) 540–560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>.
- H. Xu, B.W. Zeiger, K.S. Suslick, Sonochemical synthesis of nanomaterials, *Chem Soc Rev.* 42 (2013) 2555–2567. <https://doi.org/10.1039/C2CS35282F>.
- A. Barchouchi, S. Boisseau, N. Gondrexon, S. Baup, Sonochemical activity in ultrasonic reactors under heterogeneous conditions, *Ultrasonic Sonochemistry*, 2020, accepté.

\*Auteur à qui la correspondance devra être adressée : ayoub.barchouchi@univ-grenoble-alpes.fr

### P3 - Plant-wide measuring of sulfur flow in water resource recovery facility

FOROUZANMEHR Farhang<sup>a,b,c,\*</sup>, LE Hong<sup>a</sup>, SOLON Kimberly<sup>a</sup>, MAISONNAVE Virginie<sup>b</sup>, DANIEL Olivier<sup>b</sup>, BUFFIERE Pierre<sup>c</sup>, GILLOT Sylvie<sup>d</sup>, VOLCKE Eveline<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Department of Green Chemistry and Technology, Ghent University, Coupure Links 653, Ghent 9000

<sup>b</sup>Veolia Recherche & Innovation, F-78600 Maisons-Laffitte, France

<sup>c</sup>Laboratoire DEEP Université de Lyon, rue de la Physique, F-69621 Villeurbanne Cedex, France

<sup>d</sup>INRAE, UR REVERSAAL, 5 rue de la Doua, CS 70077, F-69626, Villeurbanne Cedex, France

Even though sulfur compounds and their transformations may strongly affect wastewater treatment processes, their importance in water resource recovery facilities (WRRF) operation remains quite unexplored. In this study, total sulfur mass flows in a WRRF were quantified for the first time on a plant-wide level for all water and sludge streams. The gaseous emission of sulfur as hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) was also included, thus enabling a comprehensive evaluation of sulfur flows. A dedicated measurement campaign was designed allowing the identification of these key variables while optimizing the measurement cost and accuracy. The measured data were subject to data reconciliation and gross error detection.

The large majority of sulfur mass flow in the influent (> 95%) left the plant through the treated effluent. The sulfur in dewatered sludge accounted for  $3.3 \pm 0.9 \%$ , while gaseous emissions amounted to  $0.7 \pm 0.1\%$ . The primary and secondary sludge flows had about equal total sulfur flow contributions, namely  $3.7 \pm 0.9\%$  and  $4.5 \pm 1.1\%$  of the total sulfur flow in the influent wastewater, respectively. Total sulfur in the primary (gravity) thickener was mostly directed towards the thickened sludge, whereas for secondary sludge most of the total sulfur ended up in the filtrate of the dynamic thickener (rotary drum). This difference was attributed to the different thickening processes as well as the lower oxidation-reduction states of primary versus secondary sludge. Sludge treatment through two-stage anaerobic digestions and dewatering with intermediate thermal hydrolysis resulted in a 36% reduction of the total sulfur flow. Most (gaseous) H<sub>2</sub>S emissions, namely 42.0% of total H<sub>2</sub>S emissions, were produced in the second-stage anaerobic digester, ending up in the biogas. H<sub>2</sub>S was also produced in the first stage digesters (35.7%), the primary thickener (13.5%) and the primary settler (4.9%). The precision of gaseous H<sub>2</sub>S loads could barely be improved through data reconciliation, indicating that that direct measurement of off-gas streams is necessary for achieving reliable data.

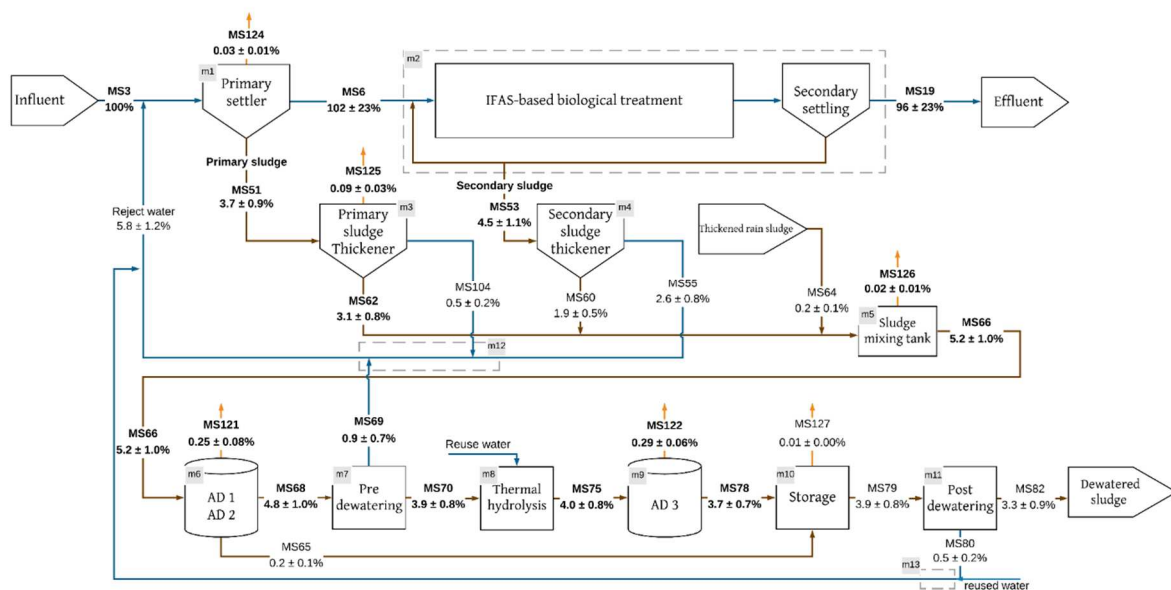


Figure 1. Total sulfur mass flows in the water resource recovery under study

\* Auteur à qui la correspondance devra être adressée : Farhang.forouzanmehr@insa-lyon.fr

## P4 - Caractérisation des flux secondaires en stations d'épuration pour l'implémentation de procédés de récupération de l'azote et du phosphore

DEVOS Perrine<sup>a\*</sup>, FILALI Ahlem<sup>b</sup>, GILLOT Sylvie<sup>a</sup>

<sup>a</sup>INRAE, UR REVERSAAL, F-69625, Villeurbanne Cedex, France

<sup>b</sup>Université Paris-Saclay, INRAE, UR PROSE, F-92761, Antony Cedex, France

Dans un contexte d'évolution de la STEP (Station d'épuration) vers la StaRRE (Station de Récupération des Ressources de l'Eau), la question du traitement et de la valorisation des flux secondaires en stations d'épuration est cruciale. Ces flux, provenant de l'étape d'épaississement ou de déshydratation des boues d'épuration (Figure 1), peuvent contenir des quantités importantes d'azote et de phosphore. Il convient de valoriser ou de traiter ces flux pour d'une part ne pas détériorer les performances des installations de traitement des eaux résiduaires, et d'autre part maximiser les ressources des eaux résiduaires. Les solutions de traitement/valorisation des nutriments développées ces dernières années incluent des procédés physico-chimiques, électrochimiques et biologiques (Eskicioglu et al., 2018). Pour dimensionner et optimiser ces technologies, il est primordial de bien connaître les caractéristiques des flux secondaires. Or, les données disponibles, lorsqu'elles existent, concernent les paramètres de pollution classiques mais très rarement les concentrations des différents ions pourtant essentielles au calcul des équilibres physicochimiques (Lizarralde et al., 2015). Par conséquent, ce manque d'information est limitant pour identifier les opportunités de récupération des nutriments à la fois sur la quantité mais également sur la qualité des produits de récupération.

Pour acquérir de nouvelles connaissances sur la composition ionique des flux secondaires, une compilation de données issues de la littérature complétées par des campagnes de mesure à échelle réelle ont été réalisées sur une station d'épuration de la région Auvergne-Rhône-Alpes. L'analyse des ions ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) a été réalisée sur les flux secondaires provenant de l'épaississement des boues primaires et des boues biologiques ainsi que sur les centrats de déshydratation des boues digérées. Les résultats sur la variabilité des paramètres physico-chimiques des flux secondaires seront également présentés. Ces travaux constituent une première étape importante afin d'étudier différentes stratégies de récupération de l'azote et du phosphore dans les stations d'épuration traitant des eaux résiduaires urbaines.

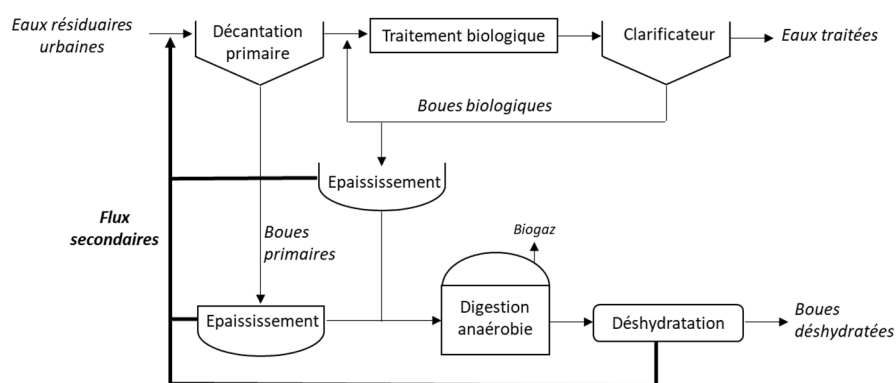


Figure 1. Schéma d'une station d'épuration conventionnelle

### Références

- Eskicioglu, C., Galvagno, G., Cimon, C., 2018. Approaches and processes for ammonia removal from side-streams of municipal effluent treatment plants. *Bioresour. Technol.* 268, 797–810.
- Lizarralde, I., Fernández-Arévalo, T., Brouckaert, C., Vanrolleghem, P., Ikumi, D.S., Ekama, G.A., Ayasa, E., Grau, P., 2015. A new general methodology for incorporating physico-chemical transformations into multi-phase wastewater treatment process models. *Water Res.* 74, 239–256.

\*Auteur à qui la correspondance devra être adressée : perrine.devos@inrae.fr

## P5 - Synthèse contrôlée d'alumine poreuse : modélisation de la porosité en fonction des paramètres physico-chimiques d'agglomération

FERRI Giulia<sup>a</sup>, HUMBERT Severine<sup>a</sup>, DIGNE Mathieu<sup>a</sup>, MOREAUD Maxime<sup>a</sup> et SCHWEITZER Jean-Marc<sup>a</sup>

<sup>a</sup>IFP Energies Nouvelles, Rond-Point de l'échangeur de Solaize, Solaize 69360

Un support aluminique de catalyseur est constitué de cristallites élémentaires (plaquettes nanométriques) formées lors d'un procédé de précipitation. Ces cristallites s'agrègent pour former des agrégats de quelques dizaines de nanomètres. Ces agrégats peuvent ensuite s'agglomérer pour former des agglomérats de quelques centaines de nanomètres. La manière dont ces différents objets sont assemblés au cours du processus de synthèse détermine les propriétés texturales du solide final (taille, tortuosité et connexion des pores). Afin d'obtenir une texture poreuse définie, il est important de contrôler cette synthèse qui requiert la compréhension des effets de chaque paramètre physico-chimique sur la structure du solide. Notre approche, à la fois théorique et expérimentale, vise à élargir la connaissance des mécanismes physico-chimiques fondamentaux impliqués dans la formation du solide (Yang et al.) lors de l'agglomération en conditions de mouvement Brownien. Des suspensions de boehmite ont ainsi été caractérisées par Dynamic Light Scattering (DLS), Small Angle X-Ray Scattering (SAXS) et Scanning Transmission Electron Microscopy (STEM) dans différentes conditions de pH, de force ionique et de concentration. L'interprétation des données expérimentales à l'aide d'un modèle Brownian Dynamics (Langevin) et d'un modèle de bilan de population (Smoluchowski) permet d'estimer la distribution de taille et la dimension fractale des objets formés. Ces deux paramètres structuraux sont alors utilisés pour paramétrer un nouveau modèle morphologique aléatoire à compacité variable (Ferri et al.). Ce dernier modèle peut construire des grands volumes de structure solide multi-échelles et constitue un point d'appui pour la comparaison des images STEM. Il peut également être utilisé pour simuler la réponse aux analyses SAXS et de physisorption d'azote (Wang et al.). Un tel modèle permet d'analyser la sensibilité du réseau solide aux variations des paramètres physico-chimiques du processus d'agglomération et donc d'estimer les conditions opératoires optimales afin de concevoir un réseau poreux avec des propriétés poreuses souhaitées.

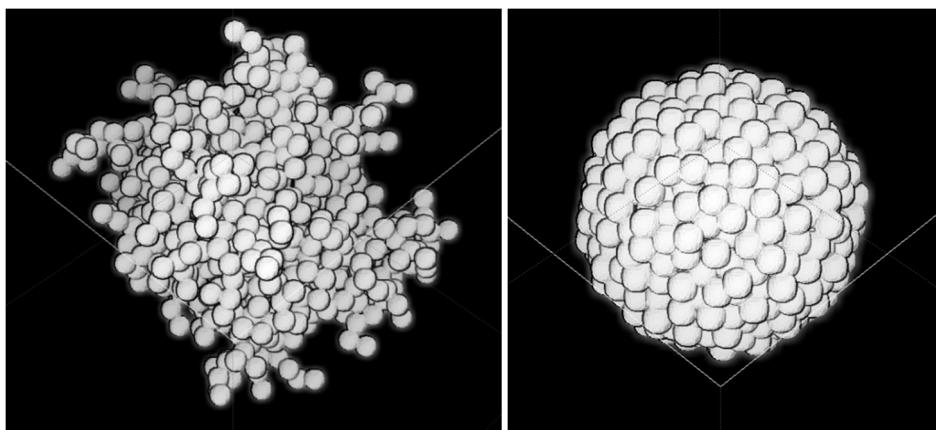


Figure 1. Deux exemples d'agglomérats réalisés avec le modèle morphologique de l'agrégation. A gauche, réalisation de faible compacité, à droite, réalisation à compacité élevée.

### Références

Yang, Y.; Xu, Y.; Han, B.; Xu, B.; Liu, X.; Yan, Z.. Journal of Colloid and Interface Science 2016, 469, 1–7.

Langevin, P. Comptes rendus de l'Académie des Sciences 1908, 146.

Smoluchowski, M. V. Physik 1916, 17, 557–585.

Ferri, G.; Humbert, S.; Digne, M.; Schweitzer, J.-M.; Moreaud M.. Journal IAS, Manuscript en préparation.

Wang, H.; Jeulin, D.; Willot, F.; Sorbier, L.; Moreaud, M. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2018, 553, 378–396.

## P6 - Effet du malaxage sur la tendreté de pièces de viande bovine de tendreté initiale intermédiaire

N'GATTA Konan. C. A.<sup>a,b</sup>, FAVIER Raphael<sup>a</sup>, KONDJOYAN Alain<sup>a</sup>, VENIEN Annie<sup>a</sup>, GRUFFAT Dominique<sup>b</sup>, MIRADE Pierre-Sylvain<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>INRAE, UR 0370, Qualité des Produits Animaux (QuaPA)

<sup>b</sup>INRAE, UMRH 1213, Unité Mixte de recherche sur les Herbivores (UMRH)

L'un des nombreux défis auxquels est confrontée l'industrie de la viande est de fournir aux consommateurs des produits carnés de haute qualité. En ce qui concerne la viande bovine, la tendreté demeure le critère de qualité le plus important et conditionne la satisfaction des consommateurs. Deux procédés de transformation sont essentiellement utilisés en industrie pour attendrir mécaniquement la viande, l'attendrissage à la lame (appelé aussi sabrage) et le malaxage. Au cours du malaxage, les morceaux de viande subissent des déformations mécaniques qui déstructurent les fibres musculaires et la trame conjonctive, ce qui conduit à une amélioration de la tendreté de la viande (Pietrasik and Shand, 2004). L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet du temps de malaxage sur la réduction de la dureté de morceaux de viande bovine de tendreté initiale intermédiaire. Quinze muscles *Semiteminosus* (ST), provenant de vaches charolaises, préalablement maturés sous vide à 4°C pendant 21 jours, ont été découpés afin d'obtenir des morceaux de viande de 6,5 cm de diamètre et de 20 cm de longueur. Les différents traitements, NT (Non Traité), T1 (3 heures, 2500 cycles de compression), T2 (7h, 6000), T3 (11h, 9500) et T4 (16h, 13000), ont été appliqués (3 répétitions/traitement) en utilisant un simulateur de malaxage développé au laboratoire (Daudin et al. 2016). La mesure mécanique des forces de compression a permis d'évaluer la dureté des morceaux de viande. En complément, le niveau de dégradation des fibres musculaires a été évalué, à l'échelle microscopique, à partir de l'analyse de colorations à l'Hématoxyline Eosine Safran (HES) de coupes d'échantillons prélevées à différentes profondeurs dans les morceaux de viande. L'augmentation du temps de malaxage a conduit à une réduction de la dureté de la viande crue, se traduisant par une diminution ( $P < 0,001$ ) de plus de 60 % de la dureté initiale des fibres musculaires, dès le traitement T2 (Figure 1A), et une réduction ( $P < 0,001$ ) de 40 % de la dureté initiale de la trame conjonctive, à partir de T3 (Figure 1B). Au niveau microstructural, l'augmentation des temps de malaxage a favorisé la réduction des espaces extracellulaires et l'apparition de zones où la distinction des fibres musculaires était quasi impossible. De plus, la dégradation des fibres musculaires était plus marquée au centre qu'en périphérie des morceaux de viande. Ces résultats montrent que l'augmentation du temps de malaxage conduit à une amélioration de la tendreté de morceaux viande crus, issus de muscles ayant une tendreté initiale intermédiaire. Le malaxage pourrait donc être utilisé afin de mieux valoriser ce type de morceaux de viande, en améliorant leur tendreté. Des études complémentaires sont nécessaires pour investiguer dans quelle mesure l'effet bénéfique du malaxage sur la tendreté des morceaux viande perdure après l'étape de cuisson.

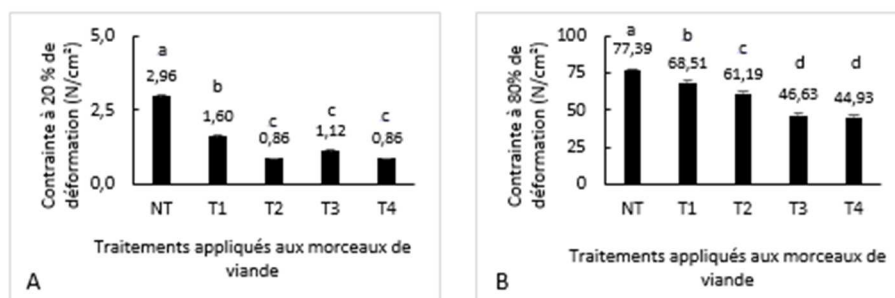


Figure 1 : Contraintes à 20 et 80% de déformation de morceaux de viande crue provenant de muscles *Semiteminosus* de vaches charolaises non traités (NT) ou ayant subi différents traitements mécaniques (T1 à T4).

### Références :

- Daudin, J.-D., Sharedeh, D., Favier, R., Portanguen, S., Auberger, J.-M., Kondjoyan, A., 2016. Journal of Food Engineering 170, 83–91.
- Pietrasik, Z., Shand, P.J., 2004. Meat Science 66, 871–879.

\* Auteur à qui la correspondance devra être adressée MIRADE Pierre-Sylvain (Directeur de Recherche, QuaPA, INRAE) : pierre-sylvain.mirade@inrae.fr



## P7 - Multiphase flow in the *Rock&Roll* Ring-Flowloop

NAUKANOVA Madina<sup>a</sup>, DOUZET Jérôme<sup>a</sup>, HERRI Jean-Michel<sup>a</sup>, CAMEIRAO Ana<sup>a</sup> et LAVALLE Gianluca <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Centre SPIN, Ecole des Mines de Saint-Etienne

158 Cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne, France

Problems of multiphase flow are the concern of many scientists from different spheres. In Oil&Gas industry, the issue of transportability of the multiphase flow system within offshore pipelines is one of key problems. Presence of hydrocarbon gases and connate water or intentionally injected water in the collectors, accompanied by harsh pressure and temperature conditions brings to the formation of crystalline ice like particles called hydrates. Hydrates tend to agglomerate, stick and finally plug the pipelines. So far the traditional solutions for this problem involved usage of different types of hydrate inhibitors in order to prevent hydrate formation, whereas the alternative solution lies in accepting the risk of hydrate formation and studying the ways to manage it. Hydrate formation evaluation and control strategies require solid understanding of the coupling between hydrodynamics and thermodynamics of the multiphase flow and kinetics of the hydrate formation. In particular, the interplay between multiphase flow morphology and hydrate formation is of great interest. In order to better understand the processes and consequently to produce an adequate model, reliable experimental studies are required. The aim of this work is to conduct an experimental study on gas-liquid flow patterns in an in-house made Ring flowloop called *Rock&Roll*. The *Rock&Roll* flowloop is a unique apparatus the pipe is installed on a disk that is sequentially inclined by an axis in 4 positions (Figure 1a), to induce the motion of the fluid, inside the ring-tube, similarly to a rocking cell. Two parameters drive the torus: the inclination angle and the rotation speed. The absence of pump enables undisturbed flow, while the endless test section affords flow to become fully developed. The first experimental investigations enabled to establish the experimental protocol and study the air-water two-phase flow patterns (Figure 1b) in the torus by varying liquid loading, diameter of the tube and rotation speed of the torus. On the base of qualitative observations, a flow regime map was produced.

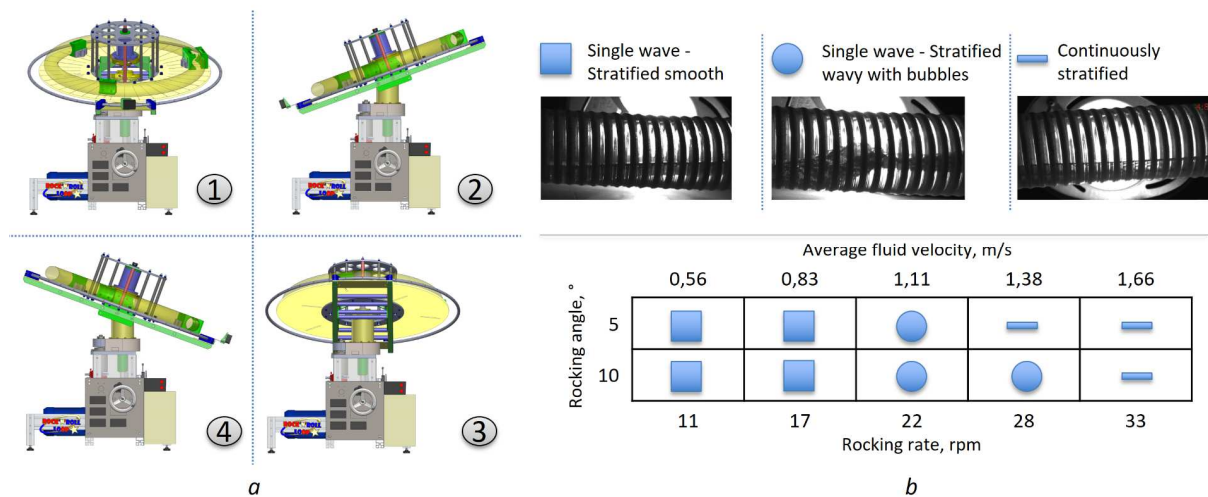


Figure 1. (a) 3D model of *Rock&Roll* Loop inclined in 4 positions and (b) Observed air-water two-phase flow patterns

### References

Herri, J-M., Sum, A.K., Cameirao, A., Bouillot, B. Modeling non-Equilibrium Crystallization of Gas Hydrates under Stratified Flow Conditions. 9th International Conference on Gas Hydrates - ICGH9, Center for Hydrate Research; Colorado School of Mines, Jun 2017, Denver, United States.

## P8 - Biométhanation du syngas – Mise en œuvre à l'échelle pilote

FIGUERAS Julie<sup>a††</sup>, BENBELKACEM Hassen<sup>a</sup>, DUMAS Claire<sup>b</sup>, et BUFFIERE Pierre<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Univ Lyon, INSA Lyon, DEEP (Déchets Eaux Environnement Pollutions), EA 7429,  
69621 Villeurbanne cedex, France

<sup>b</sup>TBI, Université de Toulouse, CNRS, INRA, INSA, 31077 Toulouse CEDEX 04, France

Dans une logique d'économie circulaire, la gazéification permet de convertir des déchets organiques hétérogènes en énergie sous la forme de syngas (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> en majeurs). Transformer ensuite le syngas en méthane permet d'améliorer le pouvoir calorifique du gaz et d'utiliser les infrastructures déjà existantes de transport et stockage du gaz naturel. La biométhanation, moins chère et plus facile à mettre en œuvre que la méthanation catalytique, est une solution intéressante faisant l'objet de plus en plus de recherche (Grimalt-Alemany et al., 2020; Li et al., 2020). Cependant, aucune étude n'a encore expérimenté à notre connaissance la biométhanation du syngas en continu et sous pression (Grimalt-Alemany et al., 2018).

Dans le cadre de ce travail, un pilote de 12L à 4 bars fonctionnant en continu a été mis en œuvre afin de traiter un mélange type syngas (40% CO, 40% H<sub>2</sub>, 20% CO<sub>2</sub>). Le transfert gaz-liquide, enjeu limitant de la biométhanation, est assuré par agitation et a été caractérisé en eau claire. Après une période d'adaptation et d'ajustement des nutriments nécessaires au bon fonctionnement des micro-organismes, une conversion stable et performante de 99% de l'H<sub>2</sub> et de 97% du CO a été atteinte (Fig. 1). Le gaz ainsi obtenu est proche des proportions stœchiométriques correspondant à 33% de CH<sub>4</sub> et 66% de CO<sub>2</sub> (Eq. 1 et 2). L'arrêt de la méthanogenèse (Eq. 2) par déficience en nutriments (jour 45) laisse apparaître la réaction intermédiaire de conversion du CO en H<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> (Eq. 1).

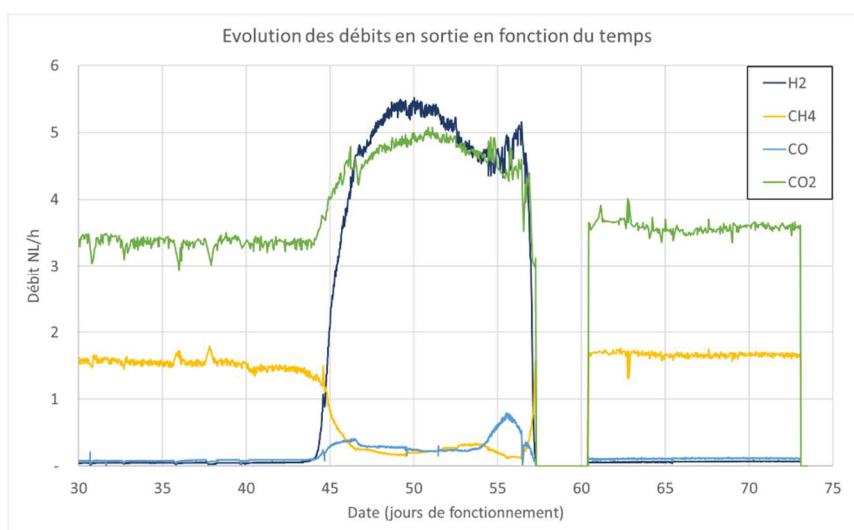


Figure 1. Evolution des débits en sortie du réacteur de biométhanation.

### Références

- Grimalt-Alemany, A., Skiadas, I.V., and Gavala, H.N. (2018). Syngas biomethanation: state-of-the-art review and perspectives. *Biofuels Bioprod. Biorefining* 12, 139–158.
- Grimalt-Alemany, A., Asimakopoulos, K., Skiadas, I.V., and Gavala, H.N. (2020). Modeling of syngas biomethanation and catabolic route control in mesophilic and thermophilic mixed microbial consortia. *Appl. Energy* 262, 114502.
- Li, C., Zhu, X., and Angelidaki, I. (2020). Carbon monoxide conversion and syngas biomethanation mediated by different microbial consortia. *Bioresour. Technol.* 314, 123739.

<sup>†</sup> Auteur à qui la correspondance devra être adressée : Julie.figueras@insa-lyon.fr



## P9 - Modélisation avancée des phénomènes de transport dans les milieux poreux granulaires

DJIBO SOUMANA Aboubacar<sup>a‡</sup>, MASCHKE Bernhard<sup>a\*</sup>, ZANOTA Marie-Line<sup>b\*</sup> et Pitault Isabelle<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>LAGEPP UMR 5007, 43 boulevard du 11 novembre 1918, F-69100 Villeurbanne, France

<sup>b</sup>LGPC UMR 5285, 43 boulevard du 11 novembre 1918, F-69100 Villeurbanne, France.

Les modèles utilisés pour simuler le transport dans les lits fixes granulaires sont en général de deux types. Les premiers sont des modèles de type procédés qui consistent à faire des bilans de matière, d'énergie et de quantité de mouvement sur le système solide-fluide. Ce sont soit des modèles dits pseudo-homogènes qui représentent le système solide-fluide comme un continuum avec des paramètres tenant compte des deux phases, soit des modèles dits hétérogènes qui décrivent séparément les deux phases avec des paramètres pour chaque phase. Les seconds sont de type Mécanique des Fluides Numérique qui résolvent les équations de Navier-Stokes (bilan de quantité de mouvement), de l'énergie, de continuité de la matière et de bilan des espèces sur chaque cellule du maillage du milieu poreux granulaire. Ce dernier est soit considéré comme homogène et maillé uniformément avec un resserrage, c'est-à-dire des mailles plus fines, au niveau de la paroi externe du réacteur, soit considéré comme hétérogène avec deux phases distinctes le solide et le fluide. Dans ce dernier cas, les surfaces des particules sont également considérées comme des parois lors de maillage ; cela exige un maillage très fin et donc nécessite beaucoup de ressources et de temps de calcul.

Les modèles de type procédés donnent des résultats acceptables si le diamètre du réacteur ( $D$ ) est grand devant la taille des particules ( $d$ ) ( $D/d > 15$ ) (Schweich, 2001) et si les modèles et les corrélations choisies sont adaptées au problème étudié. Mais lorsque le rapport  $D/d < 15$ , ces modèles n'arrivent pas à simuler avec précision les phénomènes de transport dans les réacteurs. Quant aux modèles de type Mécanique des Fluides Numérique, ils peuvent être précis mais nécessitent de moyen de calcul et de temps très importants.

Ma thèse propose un nouveau type de modèle qui serait un compromis entre la précision et les ressources de calcul nécessaires à la simulation. Il s'agit d'un modèle de type CPH (Cell Port-Hamiltonien model), déjà utilisé pour les mousses métalliques (voir Louati et al., 2020), qui considère la structure de l'empilement de particules et le réseau de pores respectivement comme deux graphes associés au solide et au fluide, qui sont reliés par un troisième graphe de couplage solide-fluide. Ces graphes peuvent être obtenus par traitement d'images tomographiques de l'empilement de particules en utilisant un logiciel dédié comme par exemple iMorph. L'écriture et la résolution des équations de bilans se servent du formalisme des systèmes Hamiltoniens à ports. La figure ci-dessous montre une vue de profil (a) et une vue de haut (b) de la structure d'empilement de billes qui a été obtenue par tomographie et qui est utilisée pour les travaux de thèses.

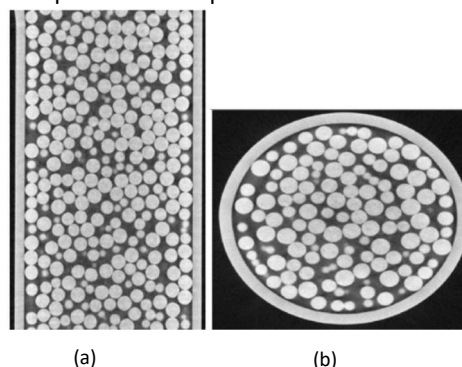


Figure 1 : Reconstruction d'images tomographiques d'un empilement de billes sphériques en utilisant iMorph : (a) vue de profil et (b) vue de haut

### Références

Schweich, Daniel. Génie de la réaction chimique. Chap10. Ed. Tec. & doc., 2001.

Louati, Haithem, et al. *Advanced Engineering Materials* 22.5 (2020): 1901468. DOI: 10.1002/adem.201901468

<sup>‡</sup> Auteur/s correspondants : aboubacar.djibo-soumana@univ-lyon1.fr, isabelle.pitault@univ-lyon1.fr, mlz@lgpc.cpe.fr et bernhard.maschke@univ-lyon1.fr

## P10 - Hydrogénation catalytique du xylose en xylitol en réacteur continu

FREITAS Victoria<sup>a§</sup>, VILCOQ Léa<sup>a</sup>, PHILIPPE Régis<sup>a</sup> et FONGARLAND Pascal<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire de Génie des Procédés Catalytiques (LGPC) – UMR 5285 CNRS/CPE Lyon/Université Claude Bernard – Université de Lyon, 43 Boulevard du 11 novembre 1918 BP82077 69616 VILLEURBANNE, France.

La biomasse a gagné en visibilité les dernières années en raison de la production des biocarburants, mais ses applications vont bien au-delà. En effet, plus de 200 composés chimiques à valeur ajoutée peuvent dériver de la biomasse lignocellulosique [Isikgor, 2015]. Cette dernière est majoritairement composée de cellulose (40-50%), d'hémicellulose (20-40%) et de lignine (20-30%) [Kobayashi, 2012]. Les hémicelluloses demeurent peu exploitées à ce jour et peuvent être utilisées pour synthétiser d'autres molécules à valeur ajoutée, comme les polyols par exemple. Ces derniers sont majoritairement utilisés pour substituer les sucres dans certains aliments grâce à leur faible effet sur l'indice glycémique du sang [Delgado Arcaño, 2020]. La synthèse des polyols à partir d'hémicelluloses se déroule en 3 étapes : Leur hydrolyse en sucres, la séparation de ces derniers puis leur hydrogénation en polyols. Ce travail s'inscrit dans ce contexte de valorisation potentielle des hémicelluloses et vise un possible couplage des 3 étapes de synthèse en une seule opération continue intensifiée couplant 2 réactions et 1 séparation. L'étape d'hydrogénation de sucres a été étudiée pour la synthèse du xylitol à partir du xylose catalysée par du ruthénium supporté sur TiO<sub>2</sub> rutile et TiO<sub>2</sub> P25 (notés TiO<sub>2</sub>-R et TiO<sub>2</sub> P25, respectivement). Les 2 catalyseurs ont été préparés par l'imprégnation des supports à partir d'une solution de RuCl<sub>3</sub>.xH<sub>2</sub>O en éthanol suffisante pour obtenir une charge de 1% en masse de Ru. Ensuite, les supports imprégnés ont été séchés à 120°C, puis calcinés à 250 °C sous azote et enfin réduits à 350 °C sous H<sub>2</sub>. A la fin, les catalyseurs ont été broyés et tamisés afin d'obtenir des fractions de différentes granulométries. Pour les tests catalytiques (Tableau 1), un milli-réacteur à lit fixe rempli d'un gramme de catalyseur a été alimenté par un débit d'hydrogène et d'une solution de xylose à 50g/L dans l'eau sous une température de 120°C et une pression de 40 bar. Différents débits de gaz et de liquide ont été testés. La désactivation a, quant à elle, été évaluée sur un test long de 9h aux débits suivants : Q<sub>G</sub>=3,4 NL/h et Q<sub>L</sub>= 0,25 mL/min.

Tableau 1. Comparatif entre les résultats de sélectivité et TOF de chaque catalyseur testé.

Catalyseur	Surface BET (m <sup>2</sup> /g)	Conversion (%)	Sélectivité (%)	TOF (mol xylitol . mol Ru <sup>-1</sup> . s <sup>-1</sup> )
0,69% Ru/TiO <sub>2</sub> -R <sup>a</sup>	2	45,5	95	0,226
0,91% Ru/TiO <sub>2</sub> P25 <sup>a</sup>	45	49,1	92	0,282

<sup>a</sup> Conditions expérimentales : 3,6 NL/h d'H<sub>2</sub> et 1,1 mL/min de liquide pour 0,69% Ru/TiO<sub>2</sub>-R et 0,6 mL/min de liquide pour 0,91% Ru/TiO<sub>2</sub> P25.

Les deux catalyseurs sont très sélectifs vers la production de xylitol, ils présentent des sélectivités quasi équivalentes dans les conditions étudiées. En revanche, la conversion de l'hydrogénation catalysée par 1% Ru/TiO<sub>2</sub> P25 a présenté un TOF moyen à 49% de conversion plus élevé à celle catalysée par 1% Ru/TiO<sub>2</sub>-R. Ce comportement pourrait être lié aux différentes surfaces spécifiques présentées par les deux catalyseurs. La petite surface spécifique du 0,69% Ru/TiO<sub>2</sub>-R peut rendre plus difficile l'accès des molécules des réactifs aux sites catalytiques, ce qui peut diminuer la conversion de la réaction. Par ailleurs, le TiO<sub>2</sub>-R est composé majoritairement de phase rutile, tandis que le TiO<sub>2</sub> P25 présente 70% de phase anatase. Le mélange important entre les deux phases du TiO<sub>2</sub> P25 peut avoir un effet dans les interactions du ruthénium avec le support catalytique. Ce qui pourrait aussi expliquer le comportement observé. La désactivation du catalyseur 1% Ru/TiO<sub>2</sub>-R a été vérifiée et il n'a pas présenté de désactivation pendant les 9h de réaction dans les conditions étudiées, ce qui correspond à un TON de 490 mol<sub>xylose</sub>.mol<sub>Ru</sub><sup>-1</sup>, très encourageant pour un procédé catalytique continu.

### Références

- Isikgor, F.H. et C. Remzi Becer, Polym. Chem., 2015, 6, 4497-4559.  
 Kobayashi, H., H. Ohta et A. Fukuoka, Catal. Sci. Technol., 2012, 2, 869-883.  
 Delgado Arcaño, Y., O.D. Valmaña Garcia, D. Mandelli, W.A. Carvalho et L.A. Magalhães Pontes, Catal.Today, 2020, 344, 2-14.

<sup>§</sup> Auteur à qui la correspondance devra être adressée : vfr@lgpc.cpe.fr

## P11 - Récupération des acides carboxyliques de la liqueur noire : étude de l'estérification de l'acide glycolique

REYES Laura<sup>a\*\*</sup>, NIKITINE Clémence<sup>a</sup>, VILCOCQ Léa<sup>a</sup> et FONGARLAND Pascal<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Univ Lyon, CNRS, Université Claude-Bernard Lyon 1, CPE-Lyon, LGPC, F-69616, VILLEURBANNE, France.

Les acides carboxyliques représentent l'une des matières premières les plus importantes pour la production des produits chimiques comme les aromatiques et les polymères. Néanmoins, leur production repose en grande partie sur des dérivés ou des procédés pétrochimiques. Pour assurer leur production durable à long terme, il est nécessaire d'exploiter des matières premières renouvelables. Une potentielle voie alternative est la récupération des acides carboxyliques présents dans la liqueur noire. [Hellstén, 2013][Kumar, 2016][Pola, 2019] Ces composés sont formés en tant que sous-produits dans l'obtention de pâte issue du procédé Kraft, dans lequel ils sont valorisés en énergie au cours du cycle de recyclage chimique. Cependant, un surplus d'énergie est généralement dégagé en raison des grandes quantités de liqueur produites par la cuisson du bois. [Vakkilainen, 2016] Différentes technologies ont été considérées à l'échelle laboratoire visant la récupération des acides aliphatiques à partir de la liqueur noire. [Reyes, 2020] La distillation sous vide et la distillation réactive se présentent comme les procédés les plus prometteurs pour satisfaire le concept de bioraffinerie forestière intégrée. [Kumar, 2015][Alén, 1980]

Cependant, cela représente un procédé de séparation complexe qui n'a jamais été testé au-delà de l'échelle laboratoire sur des mélanges tel que la liqueur noire. Avant de développer le procédé de distillation réactive sur un mélange réel, l'estérification de l'acide glycolique a été considérée comme une réaction modèle. Dans l'étude préliminaire, les conditions opératoires telles que la température, l'influence du rapport acide/alcool et la présence d'eau dans le milieu ont été étudiées.

De plus, différents catalyseurs solides acides ont été testés pour cette réaction : zéolithes, résines et oxydes. Malgré des caractéristiques morphologiques et des propriétés chimiques différentes ils se sont montrés efficaces dans la réaction d'estérification (figure 1). Les résultats des tests catalytiques suggèrent que la quantité de sites actifs représente le paramètre le plus important dans l'activité catalytique, suivie par la taille des pores, facteur limitant lors de la diffusion des molécules de réactif vers les sites actifs du catalyseur.

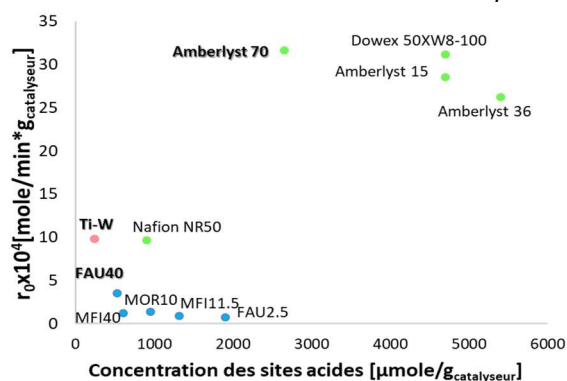


Figure 1. Influence de la quantité de sites acides du catalyseur sur la vitesse de réaction initiale. Conditions : 70 °C, rapport molaire alcool / acide 4: 1.

### Références

- Alén, R., Industrial Biorefineries and White Biotechnology. 2015. / Pap. ja Puu, 1980, 62, 328–330.  
 Hellstén, S., Lahti, J., Heinonen, J., Kallioinen, M., Mänttari, M., & Sainio, T., Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91(12), 2765–2774. / Kumar, H., Novel Concepts on the Recovery of By-products from Alkaline Pulping, 2016, University of Jyväskylä. / Kumar, H., & Alén, R., Separation and Purification Technology, 2015, 142, 293–298.  
 Pola, L., Collado, S., Oulego, P., & Díaz, M., Bioresource Technology, 2019, 284, 105–114. / Reyes, L., Nikitine, C., Vilcocq L., & Fongarland, P., Green Chem., 2020, Accepted Manuscript / Sjöström, E., Wood chemistry : Wood-Based Chemicals and Pulping By-Products, Wood Chemistry, 1993.  
 Vakkilainen, E. K., & Tran, H., The kraft chemical recovery process, 2016, 1–8.

\*\* Auteur à qui la correspondance devra être adressée : Reyes Laura: lrv@lgpc.cpe.fr

## P12 - Effet de la nature du tensioactif sur le procédé de foisonnement : analyse par la déformation et la rupture de bulles isolées

SANOGO Boubakar<sup>a,††</sup>, MARCATI Alain<sup>a</sup> et VIAL Christophe<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, F-63000, Clermont-Ferrand, France

Les mousses sont produites en incorporant une phase gaz dans une phase dite *continue* qui peut être liquide ou semi-solide. Les caractéristiques macroscopiques de la mousse produite dépendent de la technologie mise en œuvre ainsi que des propriétés physico-chimiques des phases en présence. Pour former et stabiliser les mousses, l'ajout de molécules tensioactives s'avère indispensable. Ces dernières peuvent se fixer à l'interface gaz/liquide et modifier profondément les mécanismes de déformation et de rupture des bulles. L'objectif de ce travail est d'identifier l'impact des substances tensioactives sur la rupture et la déformation des bulles et leur conséquence sur la réussite de l'opération de foisonnement.

Pour ce faire, un travail préliminaire à l'échelle pilote a été mené afin d'étudier les aptitudes au foisonnement d'un isolat de Protéines Sériques (PS) et de Caséinates de Sodium (CS) et d'un surfactant de faible poids moléculaire, le tween 20 (TW). Une solution newtonienne modèle de glucose (1,1 Pa.s) contenant 2% (m/m) de tensioactif a servi de phase *continue* pour un essai de foisonnement dans un équipement décrit par Souidi et al., 2012. Les résultats du foisonnement à même temps de séjour (*figure 1*) indiquent que seules les PS permettent d'obtenir une mousse avec une incorporation totale de gaz quelle que soit la vitesse d'agitation. Les CS n'incorporent que 50 à 60% de gaz alors que le TW est négativement sensible à la vitesse d'agitation. Ceci peut s'expliquer par une compétition entre coalescence et rupture ce qui n'est pas le cas pour les solutions protéiques. Pour en apprendre plus sur les mécanismes de déformation et de rupture, une étude a été réalisée à l'échelle de la bulle avec les mêmes solutions en cisaillement simple (*figure 2*). Les bulles générées avec les solutions de PS et CS se rompent par extrémité au voisinage d'un nombre *Capillaire critique* ( $Ca_c$ ) respectivement de l'ordre 0,5 et 2. Ces résultats indiqueraient que la rupture des bulles avec les CS nécessite un gradient de vitesse un peu plus important qu'avec les PS. Quant au TW, aucune rupture n'est observée jusqu'à des valeurs de  $Ca$  de 5 indiquant que cette molécule est peu sujette au cisaillement, élément de design des foisonneurs. Cette analyse locale aux interfaces des trois tensioactifs étudiés confirme les différences observées à l'échelle pilote. Une analyse plus approfondie des phénomènes aux interfaces gaz/liquide s'avère nécessaire afin de mieux comprendre les comportements observés et ainsi concevoir des équipements adaptés à la formation de mousse.

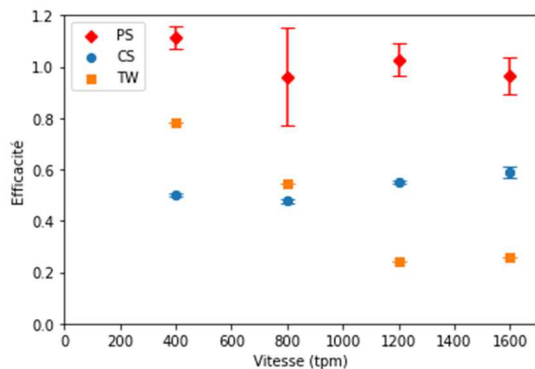


Figure 1. Influence de la nature de la molécule tensioactive sur Eff.

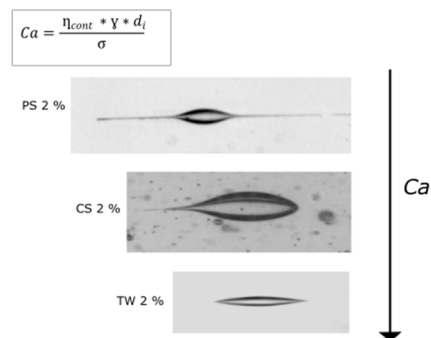


Figure 2. Analyse qualitative de la déformation/rupture des bulles générées avec le PS, le CS, et le TW.

### Références

Souidi, K., Mardaru, A., Roudet, M., Marcati, A., Della Valle, D., and Djelveh, G., 2012, Effect of impellers configuration on the gas dispersion in high-viscosity fluid using narrow annular gap unit. Part 1: Experimental approach. *Chemical engineering science*, 74:287-295.

†† Auteur à qui la correspondance devra être adressée : boubakar.sanogo@uca.fr

## P13 - Phase equilibrium of CP-CO<sub>2</sub> hydrate in the presence of salts: Experimental measurements and modeling.

SERIKKALI Angsar<sup>a</sup>, NGO Van Hieu<sup>a</sup>, BOUILLLOT Baptiste<sup>a</sup>, HERRI Jean-Michel<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Centre SPIN, Ecole des Mines de Saint-Etienne

158 Cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne, France

The shortage of fresh water is one of the grand challenges that humans are facing. That requires the advent of seawater desalination and water treatment technology. As a promising novel method, the hydrate-based desalination has been developed and achieved considerable milestones in the past few years. However, the experimental data are still limited in the open literature. Therefore, in this study, thermodynamic equilibrium data of mixed CO<sub>2</sub>-Cyclopentane (CP) hydrates in the presence of salts were investigated. In particular, MgCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub>, which are dominant cations in water caused hard water. Experiments have been conducted in two batch reactors with the same characteristics in a pressure range of 8-20 bars, specially developed to study the phase equilibria and kinetics of gas hydrates. The inhibition (Figure 1) of salt on the formation of the clathrate hydrate was exposed. Additionally, with the increase of initial salt concentration leads to the increase of hydrate inhibition of salts. The equilibrium points could be also investigated by the P-T evolution of CP-CO<sub>2</sub> binary clathrate hydrate. Finally, the van der Waals and Platteeuw model was applied to describe equilibrium conditions. By using an optimal set of Kihara parameters from previous work, the experimental data were reproduced. It is shown that the modeling method agrees tolerably with measured data with regards to the Absolute Average Deviation (AAD) less than 0.5 K. The correlation method also was used to compare the efficiency of modeling method using Kihara parameters. That gives the more accuracy of modeling method at smaller concentration ( $\leq 10\text{wt}\%$ ).

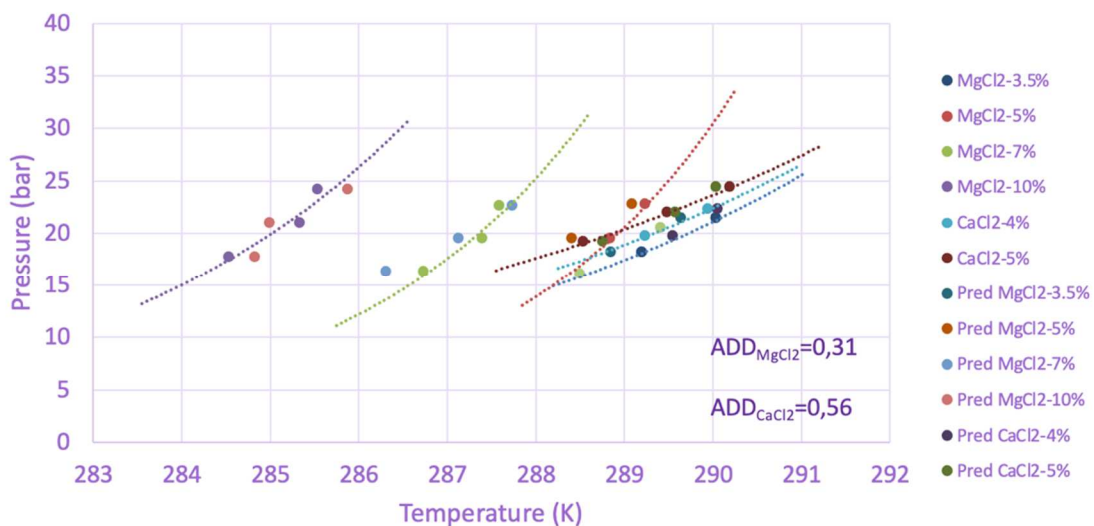


Figure 1. Comparison of the experimental data and modeling results

### References

Ngô-Van H., Bouilllot, B., Herri, J-M. Phase equilibrium of cyclopentane hydrate in the presence of CO<sub>2</sub> and salts: Experimental determinations and computational method.

## P14 - Modelling intragranular transport: Implementing virtual versions of three characterization techniques to generate digital representations of $\gamma$ -alumina supports.

Gabriel LEDEZMA<sup>a,b</sup>, Jan VERSTRAETE<sup>a</sup>, Loic SORBIER<sup>a</sup>,

Damien LEINEKUGEL-LE COCQ<sup>a</sup>, Elsa JOLIMATRE<sup>a</sup>, Christian JALLUT<sup>b</sup>

<sup>a</sup> IFP Energies nouvelles, Rond-point de l'échangeur de Solaize, BP 3, 69360 Solaize, France

<sup>b</sup> Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, LAGEPP UMR 5007

43 boulevard du 11 novembre 1918, Villeurbanne, F-69100, France

Understanding how transport phenomena and chemical reactions within porous catalysts are affected by the texture of the support opens the door to optimizing the catalyst performance. Explicitly accounting for the phenomena occurring at the pore scale can thus lead to novel and more rigorous heterogeneous models for chemical reactor design (Euzen P., Raybaud P. et al., 2002; Ye et al., 2017). In this work, computational tools were developed to refine the digital representation of a  $\gamma$ -alumina pore network (Ferreira et al., 2017; Ferreira, 2018) in order to match its actual textural properties and topology.

Each tool simulates an experimental characterization technique: nitrogen porosimetry, mercury porosimetry, and Nuclear Magnetic Resonance cryo-porometry. The digital characterization curves of the pore network model generated by the computational versions of three different characterization techniques can now be compared to the experimental curves obtained from the characterization of an actual sample. Finally, a digital twin of the  $\gamma$ -alumina sample will be created by using an optimization loop that manipulates the input parameters used for the pore network generation until the computational and experimental curves match. The textural properties of the digital pore network can be calculated both geometrically and by processing the results of the simulated characterization techniques. Compared to the direct calculation of the textural properties by simply counting the number of pores, the simulation of the entire characterization profiles provides a better interpretation of the experimental results by analysing the validity of the assumptions made by theoretical and/or empirical models used for the calculation of the material's textural properties from the experimental data.

The pore network generation tool is based on a  $O(\log(n))$  algorithm that allows to create a network with  $6 \cdot 10^6$  pores in only 46 seconds on a Dell desktop computer with a 3.5 GHz Intel Xeon E5 CPU and 16GB of RAM. For the characterization techniques, the use of a dynamic priority list (Masson and Pride, 2014) to handle the exploration of the network is valid for all techniques, as the phase change and/or percolation phenomena occurring in every technique are constrained by the topology of the network. The algorithms are capable of reproducing typical hysteresis behaviour observed in the experimental results for alumina catalyst supports. By versioning the Invasion Percolation algorithm to our needs and handling the priority list using diverse versions of binary heaps, we were able to maintain a good time performance for the different algorithms created for each characterization. The execution time for the characterization techniques corresponds to an  $O(n \log(n))$  behaviour and takes about 25 seconds for  $8 \cdot 10^6$  pores.

### Références

- Coasne, B., 2016. Multiscale adsorption and transport in hierarchical porous materials. *New J.Chem.* 40 (5), 4078–4094.
- Euzen P., Raybaud P. et al., 2002. *Handbook of Porous Solids: Alumina.*
- Ferreira, 2018. *Modélisation du transport intragranulaire dans un réacteur catalytique, France.*
- Ferreira, S., Verstraete, J.J., Jolimaitre et al., 2017. Random porous network generation and 1D mass transfer simulation for gamma-alumina supports. *Computer Aided Chemical Engineering* 40, 91–96.
- Masson, Y., Pride, S.R., 2014. A Fast Algorithm for Invasion Percolation. *Transp Porous Med* 102 (2), 301–312.
- Ye, G., Sun, Y., Zhou, X. et al. M.-O., 2017. Method for generating pore networks in porous particles of arbitrary shape, and its application to catalytic hydrogenation of benzene. *Chemical Engineering Journal* 329, 56–65.

## **P15 - Développement d'un modèle numérique pour la gazéification de combustibles alternatifs hétérogènes**

RUIZ Janett<sup>a, b, ††</sup>, DUCOM Gaëlle<sup>b</sup>, CLAUSSE Marc<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Univ Lyon, CNRS, INSA-Lyon, Université Lyon 1, CETHIL, UMR5008

<sup>b</sup> Univ Lyon, INSA-Lyon, DEEP, EA7429

20 avenue Albert Einstein, F-69621 Villeurbanne, France

La gazéification est une voie prometteuse pour la valorisation énergétique de déchets solides. Ce procédé de transformation thermochimique permet de convertir le combustible solide en un gaz à fort potentiel énergétique que l'on appelle syngaz. Parmi les technologies de gazéification disponibles, les gazéificateurs à lit fixe sont les plus adaptés pour les installations de production de syngaz de faible puissance du fait de leur simplicité et de leur faible coût.

Cependant, ce type de réacteur, malgré un taux de conversion élevé, souffre de divers désavantages. Principalement, l'obtention d'une conversion homogène dans le lit statique est difficile. De plus, plusieurs phénomènes mécaniques (passages préférentiels, voûtage, tassement du lit) peuvent apparaître lors de la conversion thermochimique, affectant l'efficacité du procédé. En effet, pendant que la conversion progresse, la morphologie du lit est modifiée et peut être soumise à des transformations inégales. L'hétérogénéité de la charge entrante (taille, forme, propriétés thermochimiques) peut aussi contribuer aux perturbations mécaniques.

En conséquence, l'objectif final de ce travail est d'estimer l'impact des passages préférentiels pouvant apparaître pendant la gazéification des déchets hétérogènes sur la performance du réacteur. Pour ce faire, une première étape consiste à développer un modèle numérique dynamique d'un gazéificateur à lit fixe prenant en compte l'écoulement gazeux, les réactions chimiques et le transfert de matière et de chaleur. Ce modèle est présenté dans ce résumé.

Le modèle 2D dynamique, développé sur COMSOL Multiphysics®, inclut les étapes séquentielles de transformation du combustible : séchage, pyrolyse, oxydation et réduction. La hauteur et la température des différentes zones réactives ne sont pas fixées, afin que leurs caractéristiques puissent changer au cours du fonctionnement du gazéificateur. Afin d'étudier l'évolution mécanique du lit, la taille des particules diminue en conséquence des réactions chimiques hétérogènes.

Le modèle est en cours de validation à partir de données expérimentales de la littérature (Barrio, 2002). La validation du modèle est réalisée à partir de paramètres caractéristiques de la gazéification à l'état stationnaire (composition du syngaz, profil de température) ainsi que du comportement dynamique du réacteur. Le modèle simule la gazéification depuis le démarrage du réacteur, permettant l'étude de l'établissement et l'avancement du front de réaction.

La validation de la modélisation dynamique du réacteur représente une étape importante pour l'objectif final de ces travaux, faisant du modèle un outil fiable pour l'étude des perturbations lors du changement des conditions opératoires ou des caractéristiques de la charge (densité des particules, débit d'agent oxydant, etc.) sur la performance du réacteur.

### **Références**

Barrio M. Experimental investigation of small-scale gasification of woody biomass. PhD thesis, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway; 2002.

---

<sup>††</sup> Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : janett-bianca.ruiz-sanchez@insa-lyon.fr

## P16 - Analyse locale des créations d'entropie dans un échangeur de chaleur

MAHAMOUDOU Arnat<sup>a§§</sup>, LE PIERRÈS Nolwenn<sup>a</sup> et RAMOUSSE Julien<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire LOCIE, CNRS UMR5271 – Université Savoie Mont-Blanc, 73370 Le Bourget-du-Lac, France

L'étude de l'amélioration des échangeurs de chaleur et de masse à l'échelle locale reste très complexe du fait du couplage fort entre transferts thermique et massique. Aujourd'hui, la Thermodynamique des Processus Irréversibles est de plus en plus appliquée aux systèmes afin d'identifier, localiser et quantifier l'origine des créations d'entropie. Cette approche vise à identifier les leviers à l'échelle locale dans le but d'améliorer les performances globales des systèmes. De ce fait, un travail préliminaire sur les échangeurs de chaleur a été effectué pour s'approprier la démarche avant d'intégrer le changement de phase, le couplage avec les transferts massiques et les fluides composés de plusieurs constituants. Dans ce travail, les phénomènes thermique et hydrodynamique présents dans un échangeur de chaleur en contre-courant ont été étudiés dans l'objectif de déterminer les profils de température et de vitesse à l'échelle locale. Les résultats d'un modèle analytique et d'un modèle numérique ont été confrontés. La thermodynamique des Processus Irréversibles a été ensuite appliquée au composant afin de localiser et de quantifier les créations d'entropie d'origine thermique et visqueuse, à l'échelle locale. Une validation par intégration des créations d'entropie de l'échelle locale à l'échelle globale a été réalisée. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 1 pour les paramètres de fonctionnement mentionnés dans la table 1. Les créations d'entropie d'origine visqueuse sont négligeables face à celles d'origine thermique (de l'ordre de  $10^{-6}$  W/(K.m<sup>3</sup>)).

Table 1. Paramètres utilisés dans les deux modèles pour le cas de l'eau

Longueur de l'échangeur	0,1 m	Débit d'eau chaude	$2,4 \cdot 10^{-3}$ kg/s
Épaisseur eau chaude	0,008 m	Débit d'eau froide	$4,8 \cdot 10^{-3}$ kg/s
Épaisseur eau froid	0,007 m	Conductivité paroi	10 W/(K.m)
Épaisseur de la paroi d'échange	0,002 m	Viscosité	4180 J/(Kg.K)

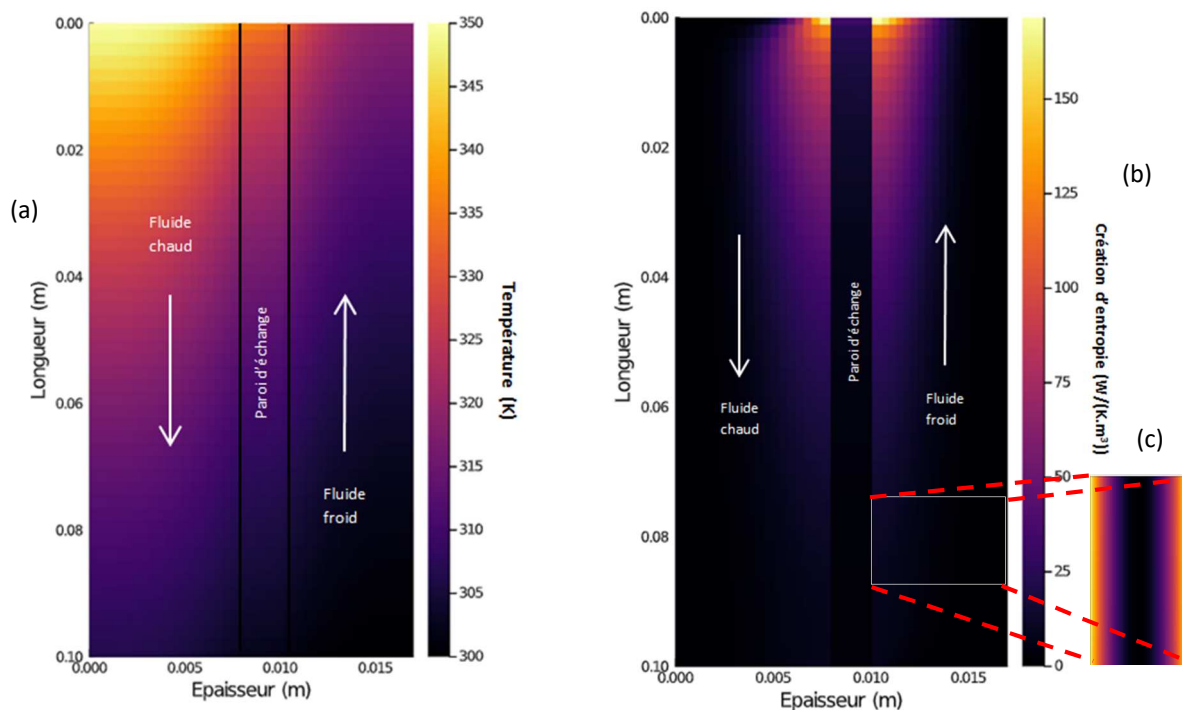


Figure 1. Evolutions locales de la température (a), les créations d'entropie thermique et visqueuse (b) et la création d'entropie d'origine visqueuse (c)

<sup>§§</sup> Auteur à qui la correspondance devra être adressée : arnat.mahamoudou@univ-smb.fr



## P17 - Gestion des polluants et sels en gazéification en eau supercritique

MUHR Hervé<sup>a</sup>, HAARLEMMER Geert<sup>b</sup>, PEYROT Marine<sup>b</sup> et VASTRA-CASTEL Victor<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Université de Lorraine/LRGP, Nancy (France)

<sup>b</sup>CEA/LITEN, Grenoble (France)

La dépendance de nos sociétés aux énergies fossiles, la croissance démographique et les changements climatiques de notre ère invitent à considérer la transition énergétique comme une urgence. La volonté d'accroître la production d'énergie utile et de décarboner cette dernière s'amorce de plus en plus fermement chez de nombreux acteurs de la filière bois. Le déclin de consommation du papier à notre époque incite d'autant plus fortement les industries papetières à réorienter leurs activités vers le domaine de la bioraffinerie.

Dans ce contexte, la production de biocarburants à partir de liqueur noire, effluent des usines de pâte à papier, voit émerger un intérêt grandissant (cf. Figure 1). Parmi les procédés de valorisation de cette ressource en énergie, la gazéification en eau supercritique présente des avantages considérables. En conditions supercritiques (au-delà de 374°C et 221 bars), l'eau devient un solvant apolaire et un réactif, traduisant la mise en place d'un milieu réactionnel homogène, sans limitation de transferts de masse et radicalaire, où les réactions de gazéification vont être fortement favorisées. Ainsi, un tel procédé permet de valoriser une biomasse très humide en gaz de synthèse principalement composé d'hydrogène et de méthane décarbonés.

Si les avantages de ce procédé sont établis, plusieurs barrières restent encore à comprendre et à franchir à l'échelle du laboratoire. Parmi les obstacles actuellement recensés, la gestion des sels inorganiques – responsables d'un encrassement et bouchage prématurés des réacteurs – constitue un enjeu d'une importance capitale sur cette technologie si un développement industriel veut voir le jour.

Les premiers travaux de recherche effectués dans le cadre d'une thèse sur la « Gestion des polluants et sels en gazéification en eau supercritique » invitent à considérer la dépendance à la température, entre autres, du phénomène de précipitation des composés salins inorganiques en milieu hydrothermal, comme le montre la Figure 2.

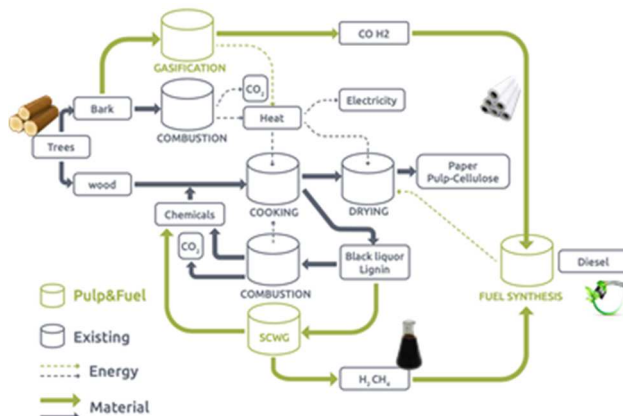


Figure 1. Implémentation de la SCWG sur un processus papeter existant

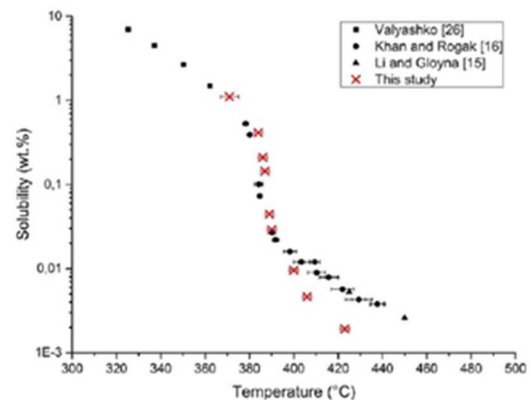


Figure 2. Évolution de la solubilité du carbonate de sodium dans l'eau en fonction de la température

### Références

Lemoine G. Étude expérimentale et numérique d'écoulements réactifs en conditions hydrothermales : mélanges de fluides et précipitation de sels. Université de Lorraine, 2017.

PULP & FUEL n.d. <http://pulpandfuel.eu/> (accessed July 13, 2020).

## P18 - Influence de l'application de l'extraction sous pression réduite sur l'humidité du sol

ESSLIMANI Khaoula<sup>a,b,\*</sup>, KACEM Mariem<sup>a</sup>, BOUDOUCHE Otmane<sup>b</sup>, BENADDA Belkacem<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Univ Lyon, ENISE Saint-Etienne, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes LTDS, France

<sup>b</sup> Équipe Procédés Agro-Industriels & Environnementaux EPAIE, Faculté des Sciences et Technologie, Université Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal Maroc

<sup>c</sup>Laboratoire DEEP : Déchets, Eau, Environnement, Pollution, INSA-Lyon, France

L'objectif de notre projet est d'étudier le comportement de trois phases (gaz, liquide et Phase liquide non aqueuse PLNA) en zone non saturée lors de l'application de l'extraction sous pression réduite (Soil Vapor Extraction SVE) et l'extraction multiphasique (Multiphase Extraction MPE). Différents sols et polluants vont être testés afin de déduire leurs effets sur l'extraction. La première étude présentée ici concerne l'impact de l'application d'une dépression sur l'évolution de l'eau dans le sol. En effet, lorsque la teneur en eau est importante, le sol devient très peu perméable à l'air ce qui influence négativement l'efficacité de l'extraction des polluants. Les premières expériences ont été conduites avec deux sols reconstitués (tableau 1). L'expérience consiste à appliquer une dépression à travers la colonne de 20 cm de hauteur et de suivre en fonction du temps la pression à la sortie de la colonne ainsi que le potentiel d'eau dans cette dernière. En fin d'expérience un bilan de teneur en eau est effectué sur des échantillons de sol à différentes hauteurs dans la colonne.

Tableau 1. Condition expérimentales des extractions appliquées sur colonne de sol

	Perméabilité	Composition	Degré de saturation en eau	Teneur massique en eau	Débit
Sol 1	$10^{-4}$ m/s	100 % Sable	41,6%	15 %	26 L/min
Sol 2	$6 \cdot 10^{-5}$ m/s	95% Sable et 5% Kaolin	40,21%	15 %	26 L/min

Les résultats (figure 1.a.) montrent que le potentiel de l'eau diminue jusqu'à atteindre des valeurs stables ce qui montre la désaturation en eau du milieu. La dépression est instantanément constante pour le sol 1 alors qu'elle nécessite plus de temps dans le cas du sol 2. Cette observation est due aux valeurs de perméabilité des sols. Les résultats obtenus ont montré que dès les premières minutes qui suivent le démarrage de l'extraction, une grande quantité d'eau mobilisable est extraite.

La teneur en eau dans la colonne du sol 1 a été identifiée comme plus importante en allant du bas vers le haut de la colonne (figure 1.b.). L'observation est inversée pour le sol 2. Il est possible que ces comportements soient dus à l'effet de la gravité où l'eau descend facilement dans le sable pour lequel la porosité et la perméabilité sont importantes. Dans le cas du sol 2 avec la présence d'argile, l'échantillon reste plus proche à son état suite à l'application de la SVE soit avec une quantité d'eau plus importante en haut de la colonne à côté du point d'extraction. Ces résultats montrent ainsi l'effet de l'application de la SVE sur le milieu poreux humide qui s'assèche d'une manière différente selon la composition du sol.

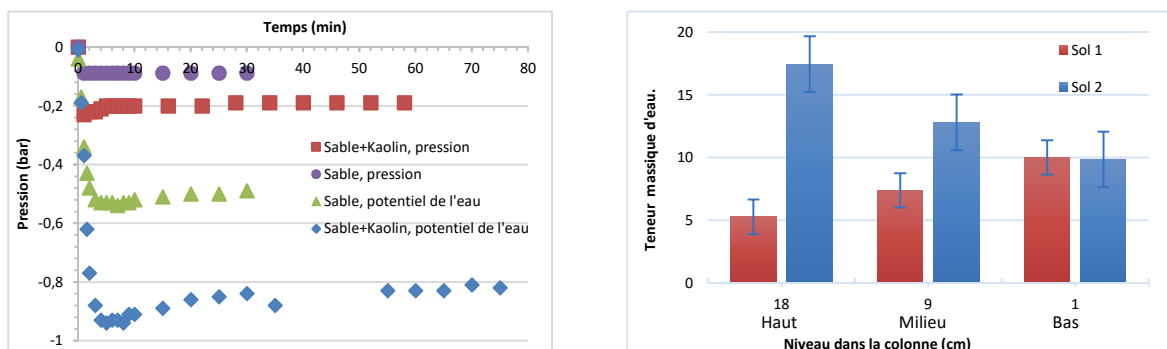


Figure.1. Résultats expérimentaux sur l'hydrodynamique des sols sous extraction en colonne 1D a. Pression à la sortie de la colonne et potentiel de l'eau pendant l'extraction pour les deux sols b. Bilan de masse eau dans la colonne après SVE

\* khaoula.esslimani@enise.fr