

Catalogue des projets 3A et consignes pour le département *Énergie : Production, Transformation*

Version du 4 février 2015

Les projets se réalisent en monômes ou binômes, selon les possibilités offertes, les affinités et intérêts des élèves. Les sujets ont été présentés le 15 septembre 2014. Une réunion de choix des projets a eu lieu le 17 septembre, cf. les noms des élèves à la fin des sections de chaque projet. Les projets ont démarré aussitôt. Les créneaux de projet sont en général les mercredi après-midi, jeudi matin et vendredi après-midi, voir la section 2 Emploi du temps de la page 3A du dép^t <http://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/3A>.

Des soutenances à mi-parcours ont eu lieu les 19 et 20 novembre.

Les **soutenances finales** auront lieu en salle P222 suivant ce programme :

Session de jeudi 5 février

Heure	Élève	Sujet	Tuteur
18h00	Wang	4 Instabilité de TC d'un fluide non newtonien	Jenny

Sessions de vendredi 6 février

Heure	Élève(s)	Sujet	Tuteur(s)
8h30	Cai & El Belhadji	5 Hydrodynamique d'un réacteur électrochimique	Fünfschilling, Hreiz & Lapicque
9h30	Pottelette & Vaillant	6 Simulation numérique d'un méthaniseur	Hreiz, Olmos & Adouani
10h45	Barreau & Rodrigues	2 Cycle Organique de Rankine	Blaise & Feidt
11h45	Gisselbrecht	3 Modèle $K - \epsilon$ en tuyau	Plaut

Pause entre 12h25 et 13h45

13h45	Hong & Tyson	1 Transferts chaleur-masse en métrologie thermique d'objet humide	Jannot & Moyne
-------	--------------	---	----------------

Debriefing global sur le S9 entre 14h45 et 15h

Elle seront basées sur des présentations vidéo de 25 minutes environ pour un monôme, 40 minutes environ pour un binôme. Chaque présentation visera à exposer **de façon scientifique** le sujet et le contexte du projet, ainsi que le travail réalisé. Elle sera suivie d'une séance de commentaires et questions par un jury. Tous les élèves assisteront à toutes les soutenances.

Pour les rendus finaux, il faut viser, en concertation entre élèves et tuteurs, un rapport et/ou les plans vidéos des soutenances et/ou l'oral des soutenances **en anglais** ; au moins l'une de ces 3 possibilités devra se réaliser.

Le **rapport final** devra être envoyé par mel au format PDF aux tuteurs et au responsable de département avant **mercredi 4 février 9h délai de rigueur**. Dans le **même délai**, un exemplaire imprimé de ce rapport devra être déposé dans le casier du responsable de département (bâtiment A, en face du bureau A127). Ce rapport consistera en une **présentation de type scientifique** de l'objet du projet et du travail réalisé, respectant le cahier des charges suivant :

- longueur 20 à 40 pages hors annexes, 30 à 80 pages avec annexes pour un monôme ;
25 à 45 pages hors annexes, 40 à 90 pages avec annexes pour un binôme ;
- inclusion d'un résumé d'une demie page à une page ;
- inclusion d'une bibliographie référencée dans le corps du texte, étoffée par rapport à celle de ce catalogue.

1 Modélisation des transferts couplés chaleur-masse lors de la mesure de la conductivité thermique d'un isolant humide par méthode transitoire

Tuteurs :

Yves Jannot, IR CNRS

Christian Moyne, DR CNRS

03 83 59 56 27

03 83 59 56 13

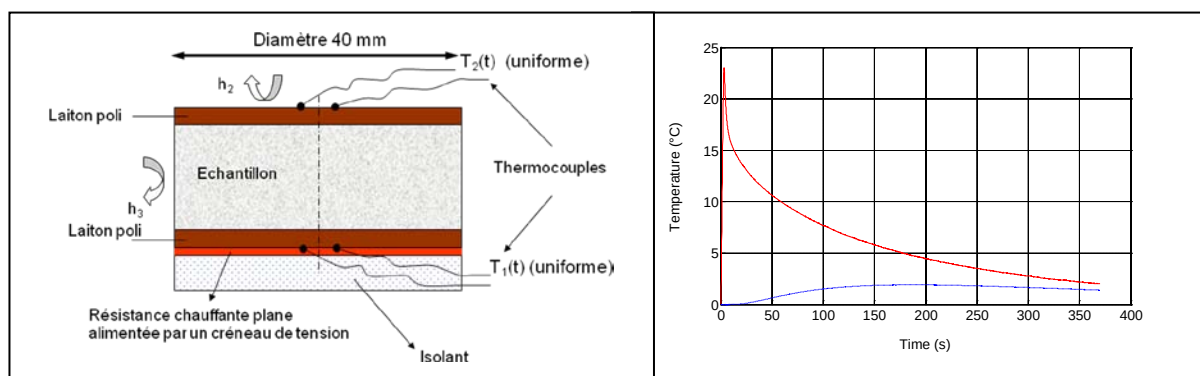
yves.jannot@univ-lorraine.fr

christian.moyne@univ-lorraine.fr

LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

Les objectifs fixés par le Grenelle de l'environnement, en particulier la division par 5 d'ici 2050 de la production des GES en France, passent par une **réduction importante de l'énergie consommée pour le chauffage des bâtiments**. Le moyen d'économiser l'énergie le plus efficace reste l'**isolation thermique**. Compte tenu de l'enjeu économique important, une recherche active est menée actuellement par les **producteurs d'isolants** pour mettre au point des produits plus performants, c'est-à-dire de **conductivité thermique plus faible**. Dans ce cadre, la **société Saint-Gobain Recherche** (SGR) étudie les propriétés thermiques de matériaux de différentes compositions à base de **silice pyrogénée nanoporeuse** comme candidats isolants. La conductivité thermique de ces matériaux est mesurée par la **méthode transitoire du Tricouche** mise au point par le LEMTA qui présente l'avantage de ne nécessiter qu'un seul échantillon qui plus est de petites dimensions. La figure ci-dessous en représente le principe :



On applique un flux de chaleur sur la plaque inférieure et on enregistre l'évolution des températures T_1 et T_2 sur les deux plaques. Une modélisation des transferts thermiques 3D permet d'obtenir une expression de la fonction de transfert thermique F entre les deux plaques qui dépend en particulier de la conductivité thermique λ de l'échantillon. La température T_2 de la plaque non chauffée peut se calculer par :

$$T_{2\text{mod}}(t) = T_{1\text{exp}}(t) \star F(t, \lambda, a, h)$$

où l'étoile désigne le produit de convolution. L'estimation des paramètres inconnus dont λ s'effectue par minimisation des écarts entre les courbes expérimentales et modélisées de la température $T_2(t)$. Dans le cas d'un **échantillon hydrophile**, celui de la silice pyrogénée mais aussi de tous les isolants biosourcés (fibres de bois, liège, chanvre, ouate de cellulose), le chauffage de la plaque inférieure provoque un **transfert de chaleur** mais également un **transfert de masse couplé** qui modifie l'évolution du champ de température. Le traitement des champs expérimentaux par un modèle purement thermique devient donc inadapté et il faut mettre en place un **modèle de transferts couplés chaleur-masse**.

Le travail à réaliser, qui entre dans le cadre d'un contrat de recherche confié par SGR au LEMTA, sera donc le suivant :

- Réaliser une **étude bibliographique** sur les modèles de transferts couplés chaleur-masse dans les isolants thermiques.

- Choisir un *modèle* adapté et réaliser un *programme* permettant la *simulation numérique directe* en 1D de l'évolution des champs de température et de teneur en eau lors d'une expérience Tricouche.
- Réaliser un *programme d'inversion* permettant d'estimer la conductivité thermique à partir de courbes expérimentales réalisées sur un échantillon humide (courbes fournies).

Référence :

JANNOT, Y., DEGIOVANNI, A., PAYET, G. 2009 Thermal conductivity measurement of insulating materials with a three layers device. *Int. J. Heat Mass Transfer* **52**, 1105-1111.

Élèves ayant choisi ce sujet : Yuxing Hong & Guillaume Tyson.

2 Cycle Organique de Rankine : potentiel industriel - modélisation thermodynamique d'une machine réelle

Tuteurs : Mathilde Blaise, doctorante ADEME - UL

03 83 59 55 92

mathilde.blaise@univ-lorraine.fr

Michel Feidt, PR émérite UL

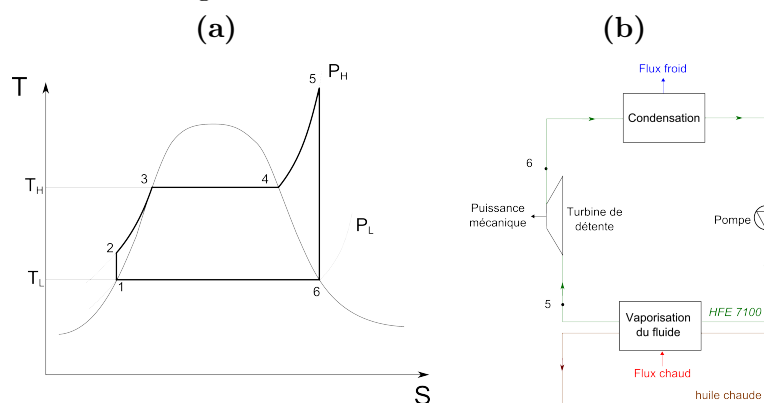
03 83 59 57 34

michel.feidt@univ-lorraine.fr

LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

Le *cycle de Rankine* est le cycle thermodynamique qui se rapproche le plus du cycle de Carnot. Le cycle, parcouru dans le sens moteur, est composé des quatre transformations suivantes, visibles sur le diagramme entropique de la figure a : 1-2 : compression adiabatique et réversible (isentropique) ; 2-5 : vaporisation isobare et irréversible (ici en 3 phases : 2-3 chauffe, 3-4 évaporation et 4-5 surchauffe) ; 5-6 : détente adiabatique et réversible (isentropique) ; 6-1 : liquéfaction isobare et irréversible. Le schéma du moteur correspondant est donné en figure b.



L'utilisation d'un fluide *organique* permet une température d'ébullition plus basse et ainsi, l'exploitation d'une source de chaleur à faible potentiel thermique. On obtient alors un *Cycle Organique de Rankine*, ORC en anglais. Ces systèmes ORC sont des solutions d'actualité en termes de récupération de chaleur dite « fatale », « normalement » rejetée dans l'environnement (fumées, etc...). Leur développement est donc un enjeu d'*efficacité énergétique*, mais, également, un enjeu économique. Les industriels, directement concernés par ses deux aspects, se posent la question des potentiels des différentes solutions proposées.

Une première partie du travail, de nature plutôt bibliographique, consistera donc en l'*étude du potentiel industriel d'un convertisseur thermomécanique fonctionnant selon le cycle de Rankine avec un fluide organique* : domaine d'application (gamme de puissance, type de source de chaleur, régime de fonctionnement, etc...), avantages et inconvénients (contraintes liées aux fluides, investissement, besoins en eau de refroidissement, etc...).

Ensuite, on s'attachera à développer un *modèle thermodynamique d'une machine réelle* en possession d'*EDF*. La démarche consiste en la décomposition du système en composants (Feidt 1996). L'écriture des bilans matière, énergie, entropie, etc... entre chaque entrée et sortie de composants permet une analyse énergétique et entropique du système (Lallemant 2005). Des résultats expérimentaux viendront alimenter et valider l'analyse.

Finalement, une *étude des différentes configurations du système pris dans son environnement* sera menée, afin d'envisager les possibilités de récupération interne ou externe et les cogénérations envisageables : climatisation, chauffage, etc...

Références :

FEIDT, M. 1996 Thermodynamique et optimisation énergétique des systèmes et procédés. *TEC et DOC 2ème édition Paris, France*.

LALLEMAND, A. 2005 Thermodynamique appliquée - Bilans entropiques et exergetiques. *Techniques de l'ingénieur*.

Élèves ayant choisi ce sujet : Jérémy Barreau & Marie Rodrigues.

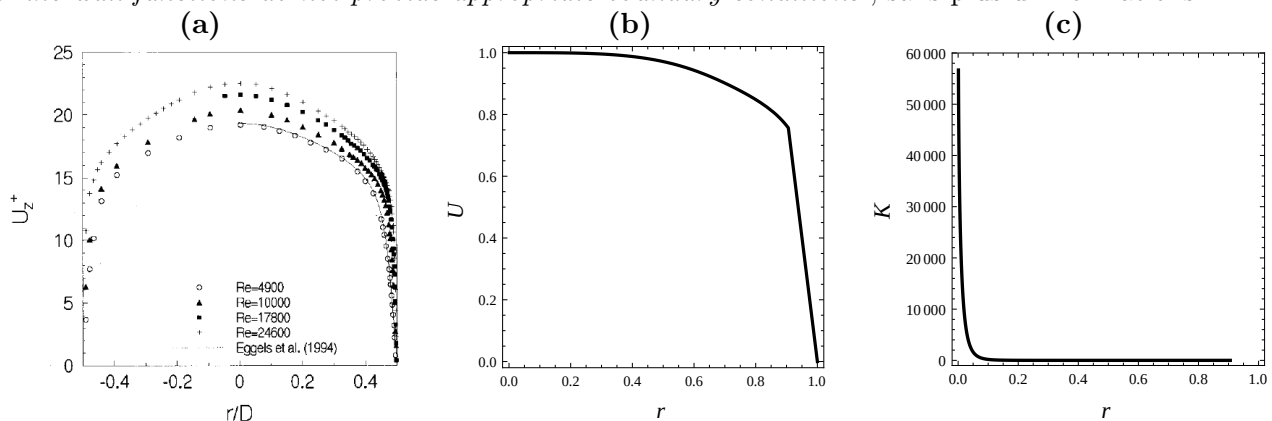
3 Problématique des conditions de paroi dans le modèle de turbulence $K - \epsilon$: cas d'écoulements en tuyau

Tuteur :

Emmanuel Plaut, PR UL - ENSMN
Lemta site ENSEM, à Vandœuvre-lès-Nancy
03 83 59 57 45 - emmanuel.plaut@univ-lorraine.fr

Descriptif du sujet :

Le **modèle $K - \epsilon$** est très utilisé en ingénierie pour la **simulation d'écoulements turbulents** dans des systèmes industriels. Cependant, la **modélisation de parois** pose problème, puisqu'au voisinage de celles-ci la turbulence disparaît : le modèle n'est donc plus valable stricto sensu. Dans Launder & Spalding (1974) il est proposé, selon les cas, d'utiliser soit des « **lois de parois** »¹, soit, un **modèle « augmenté »** où des termes de forme complexe sont rajoutés dans les équations de K et ϵ . Plusieurs de ces modèles augmentés, fortement non linéaires, existent, ils ne sont pas toujours très bien décrits, et le choix entre ces modèles est peu argumenté. Par exemple, en **écoulements en tuyau**, géométrie rencontrée dans de nombreux systèmes, faisant encore l'objet de recherches fondamentales (cf. la figure a²), Launder & Spalding écrivent que '*the wall functions do not provide appropriate boundary conditions*', sans plus d'informations...



À ma connaissance, dans la littérature, l'application au tuyau du modèle $K - \epsilon$ standard (non « augmenté ») avec lois de paroi n'a pas été présentée clairement. C'est pourquoi j'ai construit le problème 6.2 de Plaut (2014). Les résultats pour $Re = 5600$ sont donnés sur les figures b, c. Autant le profil b de vitesse axiale moyenne présente des tendances encourageantes, autant le profil c d'énergie cinétique turbulente montre une singularité non physique sur l'axe. De fait deux conditions limites ont été écrites pour K près de la paroi, pour des raisons de simplicité, alors qu'une seule est pertinente, celle de la loi de paroi. On propose ici d'**améliorer ce modèle** en utilisant des conditions de régularité au centre du tuyau. Le problème aux limites ainsi obtenu nécessitera sans doute, pour être résolu numériquement, l'usage de méthodes de tir ; on pourrait aussi aller vers des méthodes plus puissantes comme les méthodes spectrales. Une étude systématique sera menée, en comparant aux résultats d'expériences et de modèles plus sophistiqués. On pourra aussi explorer d'autres pistes en étudiant d'**autres variantes du modèle $K - \epsilon$** . Ce projet serait l'occasion de pratiquer la modélisation de la turbulence et le calcul numérique.

Références :

- ADDAR, N. 2014 $K - \epsilon$ models of turbulent pipe flows. *Master 2 Project - Mines Nancy*.
- LAUNDER, B.E. & SPALDING, D.B. 1974 The numerical computation of turbulent flows. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* **3**, 269-289.
- PLAUT, E. 2014 [Mécanique des fluides](#). Cours Mines Nancy 2A.
- DEN TOONDER, J.M.J. & NIEUWSTADT, F.T.M. 1997 Reynolds number effects in a turbulent pipe flow for low to moderate Re . *Phys. Fluids* **9**, 3398-3409.

Élève ayant choisi ce sujet : Matthieu Gisselbrecht.

1. Typiquement, celles qui ont été établies dans le problème 6.1 de Plaut (2014).
2. Figure tirée de Toonder & Nieuwstadt (1997) : vitesse axiale moyenne adimensionnée par la vitesse de frottement, pour différents nombres de Reynolds Re .

4 Instabilité de l'écoulement d'un fluide thixotrope rhéofluidifiant entre deux cylindres coaxiaux

Tuteur :

Mathieu Jenny, MC UL - ENSMN

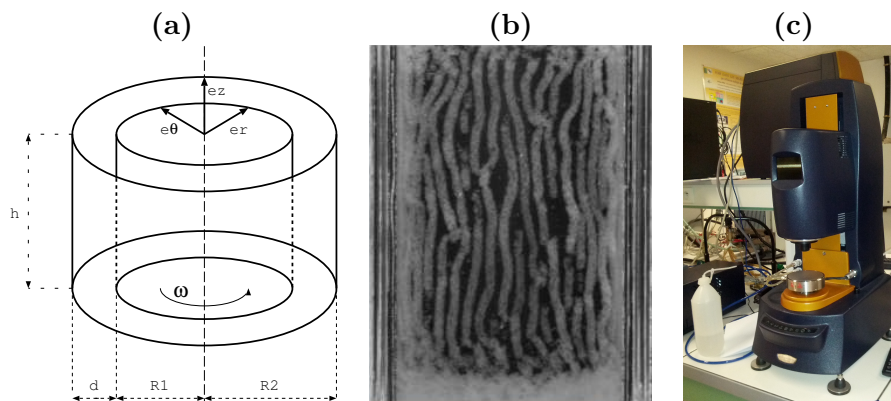
Lemta site ENSEM, à Vandœuvre-lès-Nancy

03 83 59 57 12 - mathieu.jenny@univ-lorraine.fr

Descriptif du sujet :

Les *écoulements entre deux cylindres coaxiaux*, dits, aussi, de *Taylor-Couette* (figure a), sont adaptés à l'étude du comportement des *fluides non newtoniens*. De tels fluides comme des solutions de polymères, des suspensions, etc... se rencontrent fréquemment dans l'industrie. En outre, cette géométrie est aussi rencontrée dans l'industrie comme réacteur pour la polymérisation, pour l'optimisation de mélange de fluides complexes en vue de transfert de masse et de chaleur, et même pour l'extraction de radioéléments par dissolution et mélange. En pratique, le caractère instationnaire et complexe de l'écoulement, une fois les premières instabilités passées, améliore les transferts dans ces procédés.

En régime instationnaire, le *couplage entre microstructure et écoulement* est une problématique importante dans la description rhéologique des fluides complexes. Souvent, pour des écoulements de micelles géantes, d'émulsions, de nano-fibres (figure b tirée d'une présentation de Haavisto et al. en 2012 au 4^{ème} Workshop ERCOFTAC SIG43 : structuration d'une solution de 0,4% de nano-fibres de cellulose), la dynamique à l'échelle microscopique évolue suivant le temps caractéristique de l'écoulement. Dans ce cas, la viscosité apparente du fluide dépend de son histoire, diminuant progressivement sous cisaillement. On parle alors de *fluide thixotrope rhéofluidifiant*. Une corrélation entre l'anisotropie à l'échelle microscopique et l'apparition des rouleaux convectifs de Taylor a été récemment mise en évidence (Philippe et al. 2012), ce qui suggère une modification de la nature de l'écoulement sous l'effet de la structuration microscopique du fluide.



Afin d'étudier en quoi le couplage avec la microstructure interne du fluide modifie l'écoulement, on étudiera la *première instabilité de l'écoulement purement azimutal de Couette*, bien connue pour un fluide newtonien (Taylor 1923). Les équations de l'analyse linéaire de stabilité seront écrites en utilisant le modèle de Houska (1981). Elles seront résolues numériquement, par méthode spectrale, avec un code Matlab. En outre, quelques mesures expérimentales seront effectuées sur un rhéomètre au LEMTA (figure c) pour caractériser des fluides thixotropes et faire ainsi le lien avec les paramètres du modèle de Houska.

Ce projet serait l'occasion d'aborder une problématique pointue en mécanique et physique des fluides non newtoniens, tout en travaillant sur les instabilités et leur modélisation fine.

Références :

PHILIPPE A.M., BARAVIAN C., JENNY M., MENEAU F. & MICHOT L.J. 2012 Taylor-Couette instability in anisotropic clay suspensions measured using small-angle X-ray scattering. *Phys. Rev. Lett.* **108**, 254501.

HOUSKA, M. 1981 Engineering aspects of the rheology of thixotropic liquids. *PhD thesis*, Czech Technical University, Prague.

TAYLOR, G. I. 1923 Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. *Phil. Trans. Roy. Soc. London A*, 289-343.

Élève ayant choisi ce sujet : Zhe Gabriel Wang.

5 Étude de l'hydrodynamique de suspensions concentrées dans un réacteur électrochimique de production de fer

Tuteurs :

Denis Fünfschilling, CR CNRS
03 83 17 53 46

denis.funfschilling@univ-lorraine.fr

Rainier Hreiz, IR
06 58 85 10 28

rainier.hreiz@univ-lorraine.fr

François Lapicque, DR CNRS

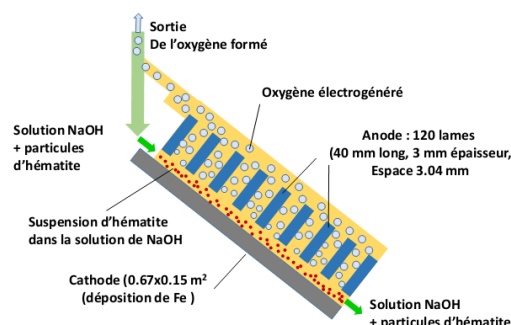
francois.lapicque@univ-lorraine.fr

LRGP, site ENSIC, Nancy

Descriptif du sujet :

À l'état naturel, le fer se présente sous forme de minerais, roches contenant du fer, généralement sous forme d'oxydes. Pour en extraire le métal, les minerais sont réduits avec du charbon ou de la coke dans un fourneau. Cependant, d'une part ce procédé est très énergivore, d'autre part il entraîne d'importantes émissions de CO_2 . Dans le contexte de l'optimisation énergétique et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, le projet ANR Ascop, en collaboration avec **ArcelorMittal**, vise à développer un **nouveau procédé de production de fer par électrolyse**. Ce procédé qui utiliserait l'électricité comme source d'énergie serait moins polluant et énergivore que le procédé sidérurgique classique.

Le LRGP participe au développement d'un **réacteur électrochimique** comprenant deux parties, présenté sur cette figure (Abdelouahed 2013) :



La partie inférieure au voisinage de la cathode, dite « cathodique », contient le fluide électrolyte, de la soude concentrée, qui transporte une **suspension concentrée de particules d'hématites** (minerai de fer). Les particules d'hématite heurtant la cathode sont réduites en métal. La partie supérieure au voisinage de l'anode, dite « anodique », contient des bulles d'oxygène produites à l'anode.

On veut **caractériser l'hydrodynamique** de la cellule pilote du LRGP, en vue d'optimiser son design et de mettre au point, à terme, de meilleures méthodes de dimensionnement. Pour cela on se focalisera sur la partie cathodique, en développant

- **l'approche expérimentale** : mesures de champ de vitesse caractérisation de la sédimentation des particules d'hématite et de leurs interactions avec la cathode ;
- **l'approche de la simulation numérique**, en utilisant le **logiciel de calcul par volumes finis** ANSYS Fluent.

Des expériences préliminaires dans la cellule pilote ont déjà montré une sédimentation rapide des particules d'hématite, ainsi que la croissance d'une zone supérieure sans particules.

Ce projet sera surtout l'occasion de s'initier à la **mécanique des écoulements diphasiques**.

Référence :

ABDELOUAHED, L. 2013 Gestion optimale du gaz électrogénéré dans un réacteur d'électroréduction de minerai de fer. *Thèse de doctorat de l'Université de Lorraine*.

Élèves ayant choisi ce sujet : Hanghang Cai & Abdelmoghith El Belhadji.

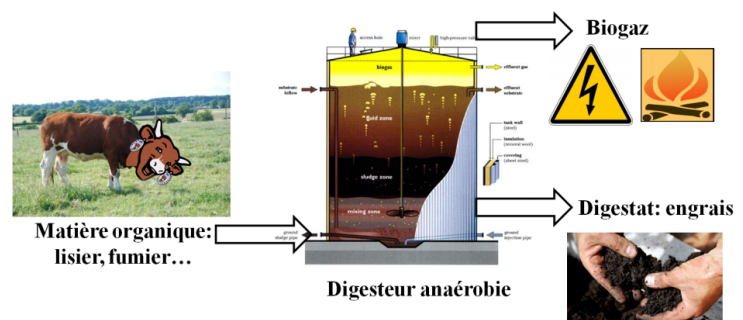
6 Simulation numérique d'un digesteur anaérobie - méthaniseur

Tuteurs :

Rainier Hreiz, IR 06 58 85 10 28 rainier.hreiz@univ-lorraine.fr	Éric Olmos, MC UL 03 83 59 57 54 eric.olmos@univ-lorraine.fr	Nouceiba Adouani, MC UL 03 83 17 51 74 nouceiba.adouani@univ-lorraine.fr
LRGP, site ENSIC, Nancy		

Descriptif du sujet :

Étant putrescibles et pouvant entraîner le développement d'organismes pathogènes, les déchets de la chaîne agroalimentaire ont été longtemps considérés comme des résidus néfastes qu'il convient d'éliminer. Cependant, du fait des préoccupations croissantes aux sujets du réchauffement climatique et de l'épuisement des combustibles fossiles, la tendance s'inverse, et ces déchets sont aujourd'hui perçus comme une matière première à valoriser à travers différents scénarios énergétiques. Parmi les procédés envisageables, on s'intéresse à la **méthanisation dans un digesteur anaérobie** pour la **production de biogaz**, source d'**énergie renouvelable** :



Le digesteur est un **bioréacteur** dans lequel une microflore diversifiée dégrade et consomme la matière organique en absence d'oxygène (d'où l'adjectif anaérobie). Il est communément muni d'un **système de chauffage**, généralement un échangeur de chaleur en serpentin, afin d'y maintenir une température convenable à la prolifération et au métabolisme bactériens. Le mélange est brassé grâce à un **agitateur mécanique** en vue d'homogénéiser le milieu. Les réactions biochimiques complexes produisent du biogaz d'une part, composé essentiellement de méthane (40-80%) et de dioxyde de carbone, et le digestat d'autre part, résidu solide ou parfois liquide, valorisé comme fertilisant après traitement si nécessaire.

Aujourd'hui, un nombre important et croissant d'études scientifiques est dédié à la compréhension et la modélisation des réactions biochimiques impliquées dans le procédé de méthanisation³. Toutefois, pour des fins de simplicité, les travaux de la littérature ont jusqu'à présent négligé tous les **aspects hydrodynamiques** et approximé le digesteur comme étant un réacteur idéal, parfaitement mélangé : gradients spatiaux de concentration et de température nuls. Cependant, cette hypothèse est loin d'être vérifiée dans le cas des méthaniseurs industriels dont la capacité dépasse souvent 100 m³ : de ce fait, les résultats numériques sont sans doute altérés car les cinétiques réactionnelles ainsi que l'activité bactérienne sont extrêmement sensibles aux valeurs locales de concentration et de température.

Ce projet vise à **caractériser numériquement l'hydrodynamique** dans un digesteur anaérobie en ayant recours au logiciel ANSYS Fluent. Les réactions biochimiques seraient également prises en compte dans des études ultérieures, ce qui permettra de développer un outil fiable pour dimensionner ces bioréacteurs. Ce projet comprend plusieurs tâches successives dont la réalisation ou non dépendra de l'avancement des élèves ainsi que des éventuels problèmes que l'on pourrait rencontrer : (1) Dessin Assisté par Ordinateur du digesteur. (2) Maillage, le plus adéquat possible, du domaine numérique ; pour décrire l'agitateur, on utilisera un modèle moyen implanté dans Fluent. (3) Simulation monophasique de l'hydrodynamique dans le cas d'un liquide newtonien, en supposant le milieu isotherme. Caractérisation de l'efficacité du mélange dans le réacteur. (4) Tenir compte d'effets non newtoniens (rhéologie) ou anisothermes.

Élèves ayant choisi ce sujet : Clément Pottelette & Jean-Baptiste Vaillant.

3. Des expérimentations sont menées à l'UL, cf. <http://ensaia.univ-lorraine.fr/content/plateforme-de-methanisation> .