

## Projets du parcours Recherche 2A et consignes pour le département *Énergie & Fluides*

Version du 5 juin 2018

Les modalités générales du parcours Recherche de Mines Nancy sont définies sur la fiche

<https://wikidocs.univ-lorraine.fr/display/minesnancyfcm/PARCOURS+RECHERCHE> .

Les élèves sont en projet Recherche environ 24 vendredis, du 29 septembre au 8 juin. À ces créneaux se sont ajoutés à partir de fin novembre une à deux demi-journées par semaine, à savoir, les créneaux de projet du département. Cependant, sur les créneaux du vendredi, les élèves ont du suivre quelques formations. Sur l'emploi du temps, voyez la section 2 de la page 2A du département <http://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/depEF/2A> .

En ce qui concerne É&F, cinq élèves traitent chacun un sujet : ces sujets sont présentés ci-après (ordre indifférent).

Comme *rendu final* de projet, on souhaite autant que possible un *article*, rédigé par l'élève sous la direction des tuteurs, soumis à une revue ou à un congrès, au format « article » : au moins 4 pages, pas de « résumé » ou « résumé étendu ». Si un tel article est disponible, veuillez le transmettre à E. Plaut et aux tuteurs, au plus tard le **mercredi 6 juin à 12h**, sous forme électronique, au format PDF, par mel. Si jamais un tel article n'était pas disponible, on demande un *rapport*, comme celui demandé pour les élèves en binôme en parcours Artem, cf. <http://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/depEF/2A/ProjetsME2-1718.pdf>, avec les mêmes consignes ; ce rapport sera transmis à E. Plaut et aux tuteurs au plus tard le **mercredi 6 juin à 12h**.

Des *soutenances flash* ont eu lieu le **31 mai**, sous la direction d'Antoine Henrot.

Voici le programme des *soutenances finales en département*, qui auront toutes lieu en **salle P318** :

### 1<sup>ère</sup> session lundi 11 juin matin :

Heure	Élève	Sujet	Tuteurs présents
9h00	Capp	<b>1</b> Métrologie thermique de dépôts microstructurés anisotropes	Schick
9h45	Behnke, Fotré, Gosselin	<b>A</b> Métrologie thermique de matériaux isolants à haute température	Jannot
10h50	Baumann, Yaakoubd	<b>A</b> Améliorer le modèle $k - \epsilon$	Plaut

### 2<sup>ème</sup> session lundi 11 juin après-midi :

Heure	Élèves	Sujet	Tuteurs présents
15h15	Anhichem	<b>4</b> Étude de la fragmentation et du mélange turbulent dans un jet liquide - liquide	Rimbert
16h00	Vervynck	<b>3</b> Étude de l'apparition des rouleaux de Taylor-Couette en fluide thixotrope	Jenny
16h45	Favre	<b>5</b> Étude par CFD d'un réacteur-échangeur construit par fabrication additive	Hreiz, Portha

### 3<sup>ème</sup> session mardi 12 juin :

Heure	Élèves	Sujet	Tuteurs présents
13h30	Bidel, Rey	<b>A</b> Analyse des structures en thermoconvection de Bénard Marangoni	Nouar, Varé
14h20	Bucquet, Hernandez, Regnier	<b>A</b> Courants de gravité avec suspensions de particules	Dossmann
15h25	Thénaux-Vignon	<b>2</b> Étude fréquentielle de supercapacités - vers un couplage avec une PAC	Mainka, Lottin

*Vers 16h20, évaluation pédagogique globale de la 2A, puis jus de fruits - Fin vers 17h*

Ci-dessus le programme complet des soutenances est donné, puisqu'on demande à tous les élèves d'assister à toutes les soutenances <sup>1</sup>.

Vous préparerez un exposé oral de 25 minutes, basé sur une *présentation* vidéo PPT ou PDF, présentant de façon *scientifique* le contexte et le sujet du projet, le travail effectué, enfin, quelques conclusions et perspectives. Vous évoquerez la valorisation faite de votre projet : article ou rapport. Après votre soutenance vous serez soumis à une séance de questions - réponses de la part d'E. Plaut et de vos tuteurs.

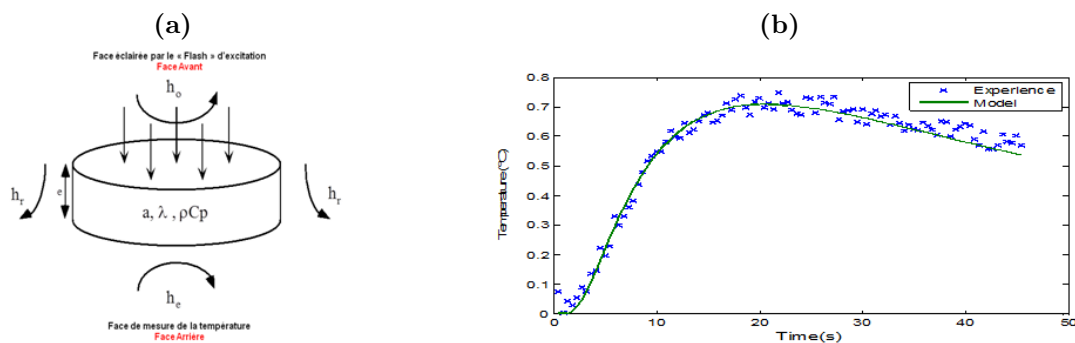
1. Les soutenances d'élèves en parcours Artem sont indiquées avec un **A**.

# 1 Mise au point d'une méthode de mesure des propriétés thermiques de dépôts microstructurés anisotropes

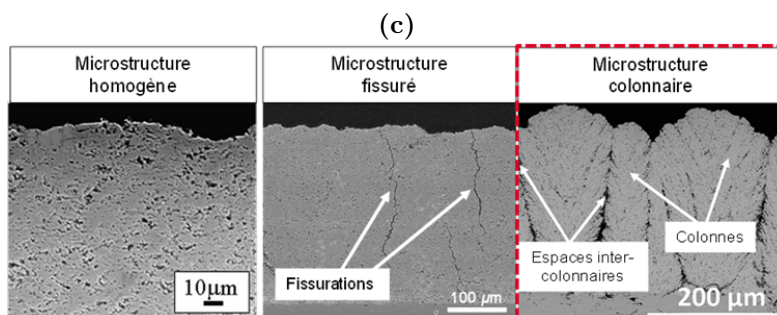
**Tuteur :** Vincent Schick, MC UL  
03 72 74 43 03  
[vincent.schick@univ-lorraine.fr](mailto:vincent.schick@univ-lorraine.fr)  
LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

## Descriptif du sujet :

Le LEMTA s'intéresse à la *mesure de la conductivité thermique de matériaux anisotropes* sous forme de *dépôts minces micrométriques*. Ces propriétés thermiques sont obtenues par calorimétrie pour la capacité thermique et par *méthode flash* pour la *diffusivité thermique*, sur une large gamme de température. Cette méthode impulsionnelle (schéma de principe figure a) consiste à soumettre la face avant d'un échantillon plan à une impulsion de flux de chaleur de courte durée et à observer l'évolution temporelle de la température (thermogramme) en un ou plusieurs points de l'échantillon. L'estimation de la diffusivité thermique est réalisée par méthode inverse à partir du *thermogramme* (figure b). On simule un thermogramme à partir d'un *modèle* (problème direct) des transferts thermiques dans la cellule de mesure. Celui-ci est ensuite ajusté à l'expérience en faisant varier un ou plusieurs paramètres, dont la diffusivité thermique, le paramètre identifié à l'ajustement optimal expérience-modèle sera la valeur estimée de la diffusivité thermique.



Néanmoins, les matériaux étudiés présentent une *forte anisotropie* (figure c), ainsi la conductivité dans le sens de la structure colonnaire peut être différente de celle perpendiculaire à ces colonnes (non mesurable à l'heure actuelle).



L'objectif du projet est l'*implémentation de modèles semi-analytiques* utilisant des transformées intégrales en temps (Laplace) et en espace (Fourier cosinus) pour identifier toutes les composantes de la diffusivité thermique de dépôts barrière thermique. Ces modèles seront ensuite *confrontés à des expériences de méthode flash 3D et de calorimétrie différentielle*.

**Pré-requis :** approche analytique de la méthode Flash (TD Transferts Thermiques), utilisation de Matlab.

**Élève ayant choisi ce sujet :** Maxime Capp.

## 2 Modélisation et caractérisation de supercapacités dans le domaine fréquentiel - vers un couplage avec une pile à combustible

**Tuteurs :** Julia Mainka, MC UL                      Olivier Lottin, PR UL  
03 72 74 43 20                                      03 72 74 42 42  
[julia.mainka@univ-lorraine.fr](mailto:julia.mainka@univ-lorraine.fr)                      [olivier.lottin@univ-lorraine.fr](mailto:olivier.lottin@univ-lorraine.fr)  
LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

### Descriptif du sujet :

Ce travail se situe dans le cadre du développement de la *filière hydrogène* et de l'utilisation des *piles à combustible* (PAC), qui sont probablement amenées à jouer un rôle important dans la *transition énergétique*. Une *supercapacité* (ou supercondensateur SC) est un type de condensateur possédant une *forte densité de puissance*. De ce fait, associé à une PAC, il permet de pallier les déficits d'alimentation en air et hydrogène pendant des changements de régime, ce qui reste un point limitant pour la performance des PAC. Une partie des recherches de l'équipe « pile à combustible » du LEMTA est consacrée à l'étude de l'hybridation d'une PAC à une supercapacité, ce qui fait objet du projet ANR/ASTRID SUPERCAPAC. Les objectifs de SUPERCAPAC étant essentiellement de nature expérimentale, ce *travail de modélisation* vise à compléter les données obtenues afin de mieux les interpréter. Il s'agit d'améliorer la *modélisation des propriétés électriques des SC*, qui sont généralement représentées par des circuits électriques équivalents comportant une ou plusieurs branches d'une résistance en série avec une capacité.

Une SC consiste en *deux électrodes poreuses* (souvent faites de carbone) imprégnées d'un électrolyte (aqueux ou organique), qui sont séparées par un *électrolyte* isolant pour les électrons et conducteur pour les ions. Contrairement aux condensateurs classiques, où le *stockage des charges* se fait sur des électrodes planes associées à un diélectrique, dans un supercondensateur les charges sont stockées à l'interface carbone/électrolyte sous forme de double-couche électrique (electrical double layer EDL). Grâce à la structure poreuse de l'électrode, la capacité de stockage est plus élevée que dans un condensateur plan. En revanche, le stockage de charges dans le volume de l'électrode induit des phénomènes de redistribution qui impactent la dynamique de charge/décharge des SC.

Les deux modèles les plus simples (modèles à une et deux branches) qui sont habituellement utilisés pour la caractérisation de SC dans le *domaine temporel* ne sont plus appropriés pour la modélisation des SC dans le *domaine fréquentiel*. Par conséquent, pour la *caractérisation des SC par spectroscopie d'impédance*, on a habituellement recours au *modèle de l'électrode poreuse, 'transmission line model'* (TLM). Ce modèle est généralement utilisé pour une estimation graphique des paramètres caractéristiques à partir des spectres d'impédance dans le plan de Nyquist. Cependant, les valeurs estimées peuvent différer sensiblement de celles déterminées dans le domaine temporel.

Il s'agira dans un premier temps de faire une *analyse de sensibilité du modèle TLM* afin de déterminer des éventuelles *corrélations* entre les paramètres et de valider la *méthode d'identification* de ceux-ci. Ensuite, les *paramètres du modèle TLM* seront estimés pour un ensemble de *spectres d'impédance expérimentaux*, obtenus dans des conditions variables.

Dans un deuxième temps, le *caractère volumique de l'électrode* et la *redistribution des charges* pourront être pris en compte dans un modèle de type TLM à deux branches. On pourra également transposer le modèle TLM dans le *domaine temporel* afin de comparer ses résultats à ceux obtenus avec des circuits équivalents plus simples. Enfin, la *modélisation de l'impédance d'un ensemble PAC-SC* pourra être envisagée.

### Référence :

LASSÈGUES, J. C. 2001 Supercondensateurs. *Techniques de l'ingénieur D3334 V1*.

**Élève ayant choisi ce sujet :** Suzon Thénaux-Vignon.

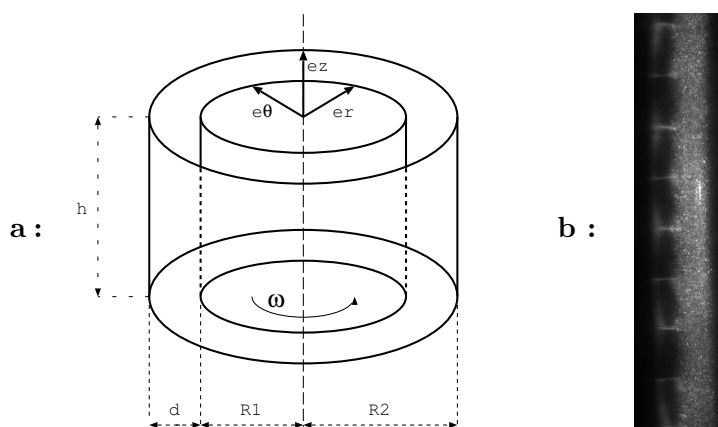
### 3 Étude paramétrique de l'apparition des rouleaux de Taylor dans un écoulement de Couette cylindrique de fluides thixotropes

Tuteur : Mathieu Jenny, MC UL  
03 83 59 57 12  
[mathieu.jenny@univ-lorraine.fr](mailto:mathieu.jenny@univ-lorraine.fr)  
LEMMA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

#### Descriptif du sujet :

Les *fluides non newtoniens* se rencontrent fréquemment dans l'industrie, dans l'alimentation, en géoscience et plus simplement dans la vie quotidienne. Ces fluides suivent une loi de comportement où la contrainte dépend non linéairement du taux de déformation, contrairement aux fluides newtoniens. Ceci est dû au couplage entre l'*organisation de la structure interne du fluide* à l'échelle microscopique et l'écoulement. Lorsque le temps de réorganisation interne sous la contrainte de l'écoulement est du même ordre de grandeur que l'échelle de temps qui caractérise l'écoulement, on dit que le fluide est *thixotrope*. Cette propriété peut être mise en évidence par l'évolution temporelle des caractéristiques rhéologiques du fluide, comme par exemple sa viscosité apparente. Afin de décrire la dynamique interne des fluides thixotropes, certains *modèles* utilisent un *paramètre de structure*, champ scalaire dont l'évolution rend compte de l'état de structuration interne du fluide. Ce type d'approche continue est suffisamment efficace pour décrire des écoulements complexes. Ainsi, ces modèles permettent d'envisager de calculer des écoulements tels que ceux rencontrés dans des situations concrètes (procédés industriel, avalanche, ...). Malheureusement, leur validité n'est pas, à ce jour, encore bien établie.

Afin de s'attaquer à cette problématique, Anaïs Paulin a développé un code de calcul avec Freefem++ dans une configuration d'écoulement de référence 2D pendant l'année universitaire 2016-2017. Il s'agit de l'écoulement entre deux cylindres coaxiaux, le cylindre intérieur tournant (figure 1a). Cette configuration d'écoulement est très largement étudiée depuis les travaux en fluides newtoniens de Taylor, qui a mis en évidence l'*apparition de rouleaux* (ou « vortex ») lorsque la vitesse de rotation du cylindre intérieur augmente. Ce type d'écoulement cisailé est aussi bien adapté à l'étude du comportement des fluides non newtoniens. En outre, cette géométrie est utilisée dans les procédés industriels 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. La *transition vers la turbulence* conduit à des écoulements instationnaires et complexes, ce qui améliore l'opération de transfert dans ces procédés. Cependant, les régimes de transition vers la turbulence en fluides complexes sont moins bien connus que ceux en fluides newtoniens.



**Fig. 1** – **a** : Configuration de Taylor-Couette. **b** : Visualisation expérimentale par kalliroscope de rouleaux de Taylor localisés (à gauche, près du cylindre intérieur) dans une solution de laponite à 2,7% (résultats de Samer Fares, étudiant ENSEM encadré en stage 2A en 2017 au Lemta par M. Jenny).

Dans ce projet, on poursuivra le travail de Paulin en menant une *étude paramétrique de l'apparition des rouleaux de Taylor par simulations numériques directes non linéaires*. Plusieurs modèles rhéologiques pourront être testés. En régime linéaire, les résultats pourront être comparés avec ceux obtenus par analyse linéaire de stabilité par Jenny (2017). Cette dernière étude suggère que le comportement des fluides thixotropes est similaire à celui des fluides simplement rhéofluidifiants. Des études en régime non linéaire seront donc menées, pour tenter de mettre en évidence des effets spécifiquement thixotropes. On essaiera aussi d'effectuer des comparaisons avec des études expérimentales, telle celle présentée sur la figure 1b.

### Références :

- HECHT, F. 2012 New development in Freefem++. *J. Numer. Math.* **20**, 251-265.
- JENNY, M., DE RICHTER, S. K., LOUVET, N., SKALI-LAMI, S., & DOSSMANN, Y. 2017 Taylor-Couette instability in thixotropic yield stress fluids. *Phys. Rev. Fluids* **2**, 023302.
- PAULIN, A. 2017 Étude numérique d'écoulements de Taylor-Couette de fluides thixotropes. *Rapport de projet 2A Mines Nancy département Énergie & Fluides*.
- TAYLOR, G. I. 1923 Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*

**Élève ayant choisi ce sujet :** Arthur Vervynck.

## 4 Étude de la fragmentation et du mélange turbulent dans un jet diphasique liquide - liquide

**Tuteur :** Nicolas Rimbart, MC UL  
03 83 59 57 36  
[nicolas.rimbart@univ-lorraine.fr](mailto:nicolas.rimbart@univ-lorraine.fr)  
LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

### Descriptif du sujet :

L'étude de la *fragmentation d'un jet* et de son *mélange turbulent* avec son environnement est un sujet de physique fondamentale qui possède de nombreuses applications pratiques : *injection de carburant dans les moteurs, procédés unitaires* en génie chimique, *échangeurs à contact direct...* Cette problématique est souvent en lien avec des *phénomènes de transfert* et des *changements d'état*. L'application principale visée ici relève de la *sécurité nucléaire*. Dans le cas d'un accident nucléaire grave le cœur du réacteur peut fondre et atteindre approximativement 3000 °C pour former le « corium ». Celui-ci va traverser l'enceinte primaire et se retrouvera, en fonction de la situation accidentelle et de la gestion de crise concernée, en contact avec le caloporteur (de l'eau pour les REP), dans le circuit primaire et éventuellement à l'extérieur. Cela génère en général une fragmentation du corium et évaporation du caloporteur qui peut devenir explosive. C'est l'un des risques nucléaires majeurs : l'*explosion de vapeur*, fortement suspectée dans le cas de Tchernobyl. On recense également des cas en métallurgie, vulcanologie et dans le transport de combustible liquéfié.

Nous avons créé au Lemta un *système modèle expérimental*, plus simple car n'impliquant pas d'évaporation du milieu environnant : l'*installation JaLaD*. Elle doit permettre l'injection de 25 litres de métal de Wood (de densité 10 et de température de fusion 72 °C) dans 2 m<sup>3</sup> d'eau maintenue à une température de 70 °C. Le jet correspondant va se fragmenter puis se solidifier, donc créer un lit de débris. Cette installation devrait être opérationnelle courant octobre ; sa conception et sa mise en service font partie du travail de thèse de Miloud Hadj-Achour.

L'élève devra aider à la *mise au point de l'installation JaLaD* et des différents techniques expérimentales envisagées :

- *caméra rapide et ombroscopie*,
- *analyse granulométrique par tamisage des débris solidifiés*,
- *analyse granulométrique par Anémométrie Phase Doppler* (en fonction de sa disponibilité),
- *Dual PIV* (à sa réception courant novembre).

L'objectif scientifique est d'effectuer des *bilans de masse, quantité de mouvement et énergie* pendant le *processus de fragmentation*. Ainsi l'analyse granulométrique permet de mesurer la quantité (et donc l'énergie) de surface créée pendant la fragmentation. La Dual PIV devrait permettre de mesurer l'entraînement du jet sur le milieu environnant en champ proche et en champ lointain. Elle devrait également permettre de mesurer les efforts qui s'exercent sur le liquide pendant la fragmentation ainsi que les échelles caractéristiques de la turbulence. Il s'agira de voir si des modèles qui corrélaient la taille des fragments produits à la taille des structures turbulentes sont pertinents ou non. Enfin, d'un point de vue plus proche des applications, en variant la température du bain, on peut jouer sur la vitesse de solidification du jet et sur le procédé de *fabrication du lit de débris*. L'étude des propriétés du lit de débris, forme, dispersion, granulométrie, compacité, propriété de milieu poreux, est intéressante pour les applications de sécurité nucléaire qui cherchent à évaluer ses possibilités de refroidissement.

**Élève ayant choisi ce sujet :** Mehdi Anhichem.



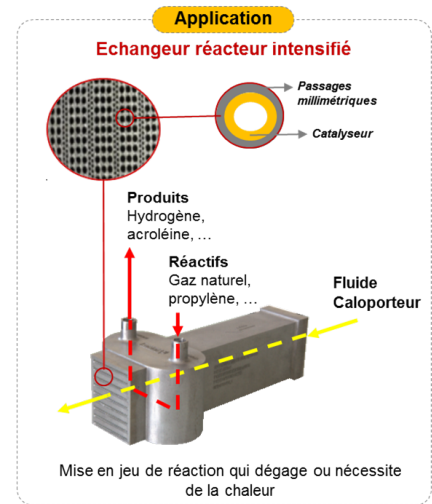
# 5 Étude par mécanique des fluides numérique d'un réacteur-échangeur construit par fabrication additive

Tuteurs : Jean-François Portha, MC UL      Rainier Hreiz, MC UL  
03 72 74 38 78      03 72 74 38 76  
[jean-francois.portha@univ-lorraine.fr](mailto:jean-francois.portha@univ-lorraine.fr)      [rainier.hreiz@univ-lorraine.fr](mailto:rainier.hreiz@univ-lorraine.fr)  
LRGP, site ENSIC, 1 rue Grandville, Nancy

## Descriptif du sujet :

La *fabrication additive*, une technologie en pleine expansion, consiste à construire des pièces par superposition successive de fines couches de matériau. Elle offre de nouvelles opportunités de conception d'équipements puisqu'elle permet de réaliser des pièces de forme difficilement réalisable à l'aide des techniques de fabrication classiques.

Ce projet concerne l'étude de *réacteurs-échangeurs* (figure) réalisés par fabrication additive, ce qui leur confère aussi une tenue mécanique élevée permettant de travailler sous des conditions sévères, grande différence entre les pressions opératoires des deux fluides par exemple. Dans ces équipements, la *réaction chimique* visée et le *transfert thermique* sont réalisés simultanément ce qui permet d'atteindre de meilleurs rendements ainsi qu'un gain de compacité.



Afin d'améliorer le transfert de matière et/ou de chaleur dans les réacteurs-échangeurs, on a généralement recours à des *systèmes multi-canaux* et multi-plaques permettant des surfaces d'échange très importantes. Cependant, cette configuration peut engendrer des *problèmes de mal-distribution*, c'est-à-dire de non-homogénéité de la distribution des fluides entre les différents canaux, qui font chuter les performances globales du réacteur-échangeur en-deçà des objectifs visés.

On veut ici étudier les effets du *design des chambres de distribution et de collecte* d'un réacteur-échangeur à l'aide du logiciel de *mécanique des fluides numérique* (CFD) ANSYS Fluent. Dans un premier temps, seuls les aspects hydrodynamiques seront considérés. Le but est de déterminer la *géométrie* offrant le *meilleur compromis entre pertes de charge et uniformité de la distribution du fluide dans les différents canaux*. Plusieurs configurations de chambre de distributions seront envisagées. Pour chaque design, les dimensions optimales seront déterminées en ayant recours à un *couplage entre un algorithme d'optimisation et le code CFD*. Dans un second temps, il sera possible de tenir compte des effets thermiques sur l'écoulement via une modification du champ de viscosité par exemple. Cette étude permettra de développer des *compétences en optimisation de forme*, qui permet de mieux répondre à des problématiques industrielles récurrentes.

## Référence :

ANXIONNAZ, Z., CABASSUD, M., GOURDON, C. & TOCHON, P. 2008 Heat exchanger/reactors (HEX reactors) : Concepts, technologies : State-of-the-art. *Chem. Eng. & Process. : Process Intensification* **47**, 2029-2050.

Élève ayant choisi ce sujet : Luc Favre.