

## Offre de stage - Sujet de stage M2/3A

Stage Recherche – Procédés et génie chimique – Mécanique des fluides

**Sujet de stage :** Etude expérimentale des méthodes de caractérisation du mélange au sein d'un réacteur continu ultrasonore.

**Thèmes :** Procédés / Réacteur / Mécanique des fluides / Ultrasons

### Compétences :

Connaissances sur les aspects physico-chimiques du mélange.  
Intérêt pour le travail expérimental et la compréhension des phénomènes physiques.  
Bonne capacité de rédaction.

### Contexte :

L'intensification des procédés consiste à concevoir des procédés plus économiques, plus écologiques et plus compacts tout en visant à en améliorer la productivité et la sécurité, par le développement d'appareillages adaptés. Cette démarche tente ainsi de répondre à des enjeux économiques, sociétaux et environnementaux grâce au développement de procédés éco-efficients. Elle correspond à une activité de recherche et de développement à part entière conduisant entre autres, à la mise au point de dispositifs pour lesquels les phénomènes de transfert thermique et de matière doivent être maîtrisés [1]. A ce titre, l'utilisation d'un échangeur thermique en tant que réacteur, constitue une évolution majeure vers une approche originale et innovante des procédés : **l'échangeur-réacteur** [2]. **L'intensification des transferts thermique et massique** au sein de ce type de procédés innovants fonctionnant en continu s'avère cependant indispensable afin d'intégrer de nouvelles contraintes liées au temps de séjour imposé par la cinétique réactionnelle. Dans ce contexte, la mise en place de techniques d'intensification basées sur l'usage **des ultrasons** a été ciblé.

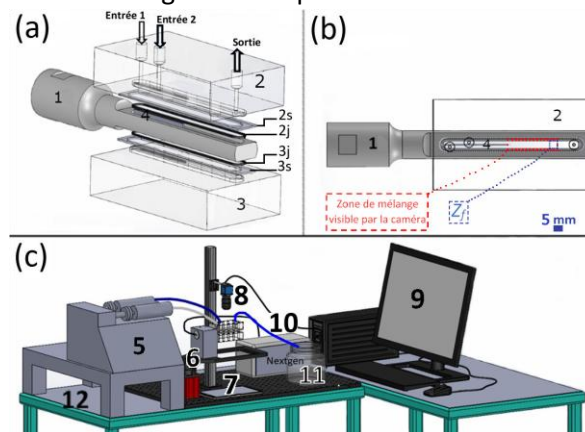
Les travaux consacrés à la compréhension des mécanismes physiques à l'origine de l'intensification du transfert thermique par les ultrasons ont montré que la **cavitation** et les **courants acoustiques** permettent de générer du mélange au sein d'un écoulement laminaire entraînant des niveaux de transfert thermique similaires à ceux d'un écoulement turbulent en conditions silencieuses [3-6]. De plus, ces effets participent à limiter l'encrassement et favorisent le micro-mélange au sein de l'écoulement [7-9] et donc une possible optimisation de la réaction chimique. L'intégration des ultrasons peut alors être envisagée comme une solution prometteuse pour maintenir voire améliorer les performances du procédé. De plus, l'utilisation d'ultrasons comme technique d'activation originale des réactions chimiques est connue et largement documentée bien que rarement dédiée au développement de réacteurs [10-13]. Ces effets, détaillés dans la littérature, portent majoritairement sur des réacteurs fermés et très peu sur les procédés continus [14-17].

L'équipe encadrant ce futur stage travaille depuis de nombreuses années sur les méthodes permettant d'intensifier les phénomènes de mélanges dans les systèmes de type échangeurs thermiques et réacteurs chimiques [5,6,8,9,18,19,20,21]. Ce stage s'inscrit en soutien des travaux de thèse de Romain VANOORENBERGHE qui devrait être soutenue en fin d'année 2026 portant sur l'étude de « l'intensification des phénomènes de transfert via ultrasons dans les milli-réacteurs continus ».

## Objectif du stage :

L'objectif de ce travail est de caractériser **le niveau et la qualité du mélange à l'échelle macroscopique et microscopique au sein d'un échangeur-réacteur ultrasonore continu de taille millimétrique (MERCUS)**. Pour cela, il convient de mettre en place et d'expérimenter différentes méthodes de caractérisation optiques, chimiques et physico-chimiques.

Dans ce cadre, une participation active à la mise en place et à la réalisation expérimentale de plusieurs approches de caractérisation du mélange sera requise. Le banc expérimental présenté en figure 1 a été conçu pour permettre des mesures optiques in situ de la qualité du mélange au sein du MERCUS. Il s'agira d'assurer l'installation des équipements nécessaires à la conduite d'une **campagne expérimentale colorimétrique destinée à quantifier la qualité du mélange sous irradiation ultrasonore à l'échelle macroscopique**. Un programme de traitement d'image, développé préalablement, permet de compiler les données de visualisation et d'en extraire un coefficient de mélange [22]. Des campagnes de mesures devront être réalisées afin d'étudier l'influence de paramètres opératoires tels que la puissance ultrasonore ou le débit d'injection des fluides sur l'intensification du mélange. L'objectif est de vérifier et de reproduire l'ensemble des résultats obtenus antérieurement, une fois la méthodologie et le dispositif définitivement établis.



**Figure 1 : Schéma de principe du dispositif banc expérimental.** Vue éclatée du montage du milli-réacteur continu ultrasonore (les trous des vis de fixation sur les couvercles ont volontairement été cachés pour une meilleure lisibilité) (a). Vue du dessus du canal ultrasonore (b). Les différents éléments du banc d'essai (c). 1 : sonotrode, 2 : couvercle supérieur, 2j : joint supérieur, 2s : silicone supérieur, 3 : couvercle inférieur, 3j : joint inférieur, 3s : silicone inférieur, 4 : plaque de séparation, 5 : pousse seringue, 6 : support ajustable du réacteur, 7 : table lumineuse, 8 : caméra + objectif, 9 : ordinateur de bureau, 10 : générateur de fonction SINAPTEC FRANCE, 11 : bocal, 12 : table optique.

**La distribution des temps de séjour (DTS) constitue par ailleurs une méthode incontournable pour l'évaluation des performances d'un réacteur chimique.** La caractérisation du MERCUS nécessitera donc la conduite d'une campagne expérimentale de mesure de la DTS, en conditions silencieuses puis sous irradiation ultrasonore. Le banc expérimental, permettant l'implémentation de mesures optiques et colorimétriques, autorise la réalisation de la DTS par injection d'un échelon de colorant, suivie d'un traitement optique basé sur l'intensité lumineuse [23]. Une série de mesures devra être menée afin d'étudier l'influence de paramètres opératoires tels que la puissance ultrasonore ou le débit d'injection sur les temps de séjour au sein du réacteur. Il conviendra également de développer une partie du code sous Matlab de post-traitement destinée à analyser les images et à produire des données brutes compatibles avec le logiciel DTS Pro, en vue de la modélisation du réacteur.

Enfin, **l'intensification du mélange sous irradiation ultrasonore devra être caractérisée à l'échelle microscopique par voie chimique.** La réaction de Villiermaux-Dushman, réaction compétitive développée pour décrire la qualité d'un mélange à l'échelle microscopique [24], constitue pour cela une méthode de référence, dont l'efficacité a déjà été démontrée dans des études de caractérisation de réacteurs ultrasonores [25]. Il conviendra donc de prendre en main cette réaction, d'en maîtriser les réactifs, les cinétiques associées et la métrologie nécessaire à l'évaluation de la qualité du mélange à l'échelle microscopique. Cette méthode devra ensuite être implémentée sur le dispositif expérimental afin de conduire une campagne de mesures destinée à analyser l'impact des paramètres opératoires sur l'intensification du mélange microscopique au sein du réacteur. Cette campagne viendra compléter la caractérisation globale du MERCUS.

**Gratification :** Indemnité de stage légale (environ 550 euros net par mois).

**Lieu du stage :**

Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriel (LEGI)  
1209-1211 rue de la piscine - Domaine Universitaire  
38400 Saint-Martin-d'Hères

**Durée :** 5 à 6 mois

**Date de début du stage :** début 2026

**Contacts :**

Romain Vanoorenberghe : [romain.vanoorenberghe@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:romain.vanoorenberghe@univ-grenoble-alpes.fr)

Odin Bulliard-Sauret : [odin.bulliard-sauret@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:odin.bulliard-sauret@univ-grenoble-alpes.fr)

Sébastien Ferrouillat : [sebastien.ferrouillat@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:sebastien.ferrouillat@univ-grenoble-alpes.fr)

Nicolas Gondrexon : [nicolas.gondrexon@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:nicolas.gondrexon@univ-grenoble-alpes.fr)

**Références bibliographiques :**

- [1] C. Gourdon, Intensification des procédés, Fondamentaux et exemples d'industrialisation, *Techniques de l'Ingénieur J7 002*, 2016.
- [2] Z. Anxionnaz, M. Cabassud, C. Gourdon, P. Tochon. Heat exchanger/reactors (HEX reactors): concepts, technologies: state-of-the-art. *Chemical Engineering and Processing*, 47 (2008), 2029–2050.
- [3] N. Gondrexon, Y. Rousselet, M. Legay, P. Boldo, S. Leperson, A. Bontemps, Intensification of heat transfer process: improvement of a shell-and-tube heat exchanger performances by means of ultrasound, *Chem. Eng. and Processing*, 49 (2010), 936-942.
- [4] N. Gondrexon, L. Cheze, Y. Jin, M. Legay, Q. Tissot, N. Hengl, S. Baup, F. Pignon, P. Boldo, E. Talansier, Intensification of heat and mass transfer by ultrasound; application to heat exchangers and membrane separation processes, *Ultra. Sonochem.*, 25 (2015), 40-50.
- [5] **O. Bulliard-Sauret, S. Ferrouillat**, L. Vignal, A. Momponteil., N. Gondrexon, Heat transfer enhancement using 2 MHz ultrasound, *Ultra. Sonochem.*, 39 (2017), 262-271.
- [6] **O. Bulliard-Sauret**, J. Berindei, **S. Ferrouillat**, L. Vignal, A. Momponteil, **N. Gondrexon**, Heat transfer intensification by low or high frequency ultrasound: Thermal and hydrodynamic phenomenological analysis, *ETFS*, 104 (2019), 258-271.
- [7] H. Monnier, A. M. Wilhelm, H. Delmas, Effects of ultrasound on micromixing in flow cell, *Chem. Eng. Science*, 55 (2000) 4009-4020.
- [8] H. Chaumat, I. Benhamed, N. Hengl, S. Baup, N. Gondrexon, **L. Barthe**, Effet des ultrasons basse fréquence sur l'hydrodynamique d'un réacteur annulaire continu : approche expérimentale en Distribution des Temps de Séjour (DTS), *Récents Progrès en Génie des Procédés*, 110 (2017), ISSN : 1775-335X ; ISBN : 978-2-910239-85-5, Ed. SFGP, Paris, France.
- [9] L. Ahouré, **O. Bulliard-Sauret**, J. Bergraser, M. Gaudeau, C. André, **S.A. Bahrani**, Intensification of mixing in an ultrasonic flow reactor *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Vol, January 2023, 109212, DOI: 10.1016/j.cep.2022.109212.
- [10] C. Petrier, N. Gondrexon et P. Boldo, Ultrasons et sonochimie, *Techniques de l'ingénieur*, Vol. AFP4, Issue AF6310, 2008.
- [11] P.R. Gogate, P. N. Patil, Sonochemical reactors, *Topics in current chemistry*, 374(5), 61, 2016.
- [12] S. Asgharzadehahmadi, A.A. Abdul Raman, R. Parthasarathy, B. Sajjadi, Sonochemical reactors: Review on features, advantages and limitations. *Renewable and sustainable energy reviews*, 63 (2016), 302-314.
- [13] Mason T. J. and Lorimer J. P., Applied sonochemistry - The uses of power ultrasound in chemistry and processing. Weinheim, (Eds) Wiley-VCH, (2002)
- [14] H-S. Zou, J. Chai, A novel ultrasonic reactor for continuous production of biodiesel from waste acid oil, *Korean journal of chemical engineering*, 34(2) (2017), 353-359.
- [15] P.D. Jolhe, B.A. Bhanvase, V.S. Patil et al, Ultrasound assisted synthesis of performic acid in a continuous flow microstructured reactor, *Ultra. Sonochem.*, 39, (2017), 153-159.
- [16] B. Pohl, R. Jasmhidi, G. Brenner, Experimental study of continuous ultrasonic reactors for mixing and precipitation of nanoparticles, *Chemical Engineering Science* 69(1) (2012), 365-372.

- [17] M. Vinatoru, T. Mason, Comments on the use of loop reactors in sonochemical processes, *Ultra. Sonoch*, 39 (2017), 240-242.
- [18] C. Poncet, **S. Ferrouillat**, L. Vignal, A. Momponteil, **O. Bulliard-Sauret**, N. Gondrexon, Enhancement of heat transfer in forced convection by using dual low-high frequency ultrasound, *Ultra. Sonoch*, 71 (2021), 105351.
- [19] **S. Ferrouillat**, P. Tochon, H. Peerhossaini and D. Della Valle., Open loop thermal control of exothermal chemical reactions in multifunctional heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 49, Issues 15-16, (2006), 2479-2490
- [20] **S. Ferrouillat**, P. Tochon & H. Peerhossaini, Micromixing enhancement by turbulence: application to compact heat exchanger-reactors. *Chemical Engineering and Processing*, Volume 45, Issue 8, (2006), 633-640.
- [21] **S. Ferrouillat**, P. Tochon, C. Garnier, & H. Peerhossaini, Intensification of heat-transfer and mixing in heat exchanger-reactors by artificially generated streamwise vortices. *Applied Thermal Engineering*, Volume 26, Issue 16, (2006), 1820-1829.
- [22] L. Ahouré, Intensification des phénomènes de transfert via ultrasons dans les milli-réacteurs continus. Thèse de doctorat, Université de Lille (ComUE), June 2023.
- [23] J. Villermaux, Réacteurs chimique – Principes, *Technique de l'ingénieur* 28-33, 1994
- [24] M.-C. FOURNIER,\* L. FAL, J. VILLERMAUX, A new parallel competing reaction system for assessing micromixing efficiency – experimental approach, *Chemical Engineering Science*, Vol. 51, No. 22, pp. 5053- 5064, 1996
- [25] H. Monnier, A.-M. Wilhelm, H. Delmas, Influence of ultrasound on mixing on the molecular scale for water and viscous liquids, *Ultrason. Sonochem.* 6, (1999) 67–74