

Catalogue des projets 3A et consignes pour *Énergie & Fluides*

Version du 8 février 2016

Les projets se réalisent en monômes ou binômes, selon les possibilités offertes, les affinités et intérêts des élèves. Les sujets de projets ont été présentés le 14 septembre, une réunion de choix a eu lieu le 16 septembre. Les créneaux de projets furent typiquement les mardi matin, mercredi après-midi et jeudi matin. De plus, à partir du 27 novembre, les vendredi après-midi sont aussi disponibles, cf. [l'emploi du temps en section 2 de la page 3A du département](#). En cette fin de semestre, les élèves sont à plein temps sur leur projet entre le lundi 1^{er} février après-midi et le jeudi 11 février.

Des soutenances « à mi-parcours » ont eu lieu les 15 et 16 décembre 2015.

Voici le programme des *soutenances finales* :

1^{ère} session jeudi 11 février à 15h30 en salle P222 :

Heure	Élève(s)	Sujet	Tuteur(s)
15h30	Robin	1 Comportement d'un thermocouple au cours d'un procédé de brasage	Schick
16h15	Zhang	3 Écoulements de Taylor-Couette de fluides complexes	Botella, Cheny & Jenny

De 17h à 17h15 environ, remise des notes d'AFM par E. Plaut

2^{ème} session vendredi 12 février à 8h30 en salle P208 :

Heure	Élève(s)	Sujet	Tuteur(s)
8h30	Bertrand & Zacharie	2 Échangeurs de chaleur pour la récupération de chaleurs fatales	Blaise & Feidt
9h30	Chénier & Thoraval	4 Hydrodynamique dans un réacteur aéré par bullage	Hreiz & Potier
10h45	Gauer & Perrin	5 Systèmes géothermiques activés	Sausse

De 12h à 12h30 environ, bilan pédagogique global de la 3A avec E. Plaut

Ces soutenances seront basées sur des présentations vidéo de 25 minutes environ pour un monôme, 40 minutes environ pour un binôme d'un projet standard, 45 minutes environ pour le binôme du projet interdisciplinaire 5. 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.

Le **rapport final** devra être envoyé par mel au format PDF aux tuteurs et au responsable de département avant **mardi 9 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 d'un projet standard ;
30 à 50 pages hors annexes, 50 à 100 pages avec annexes pour le binôme du projet interdisciplinaire 5 (deux rapports distincts seront rendus, respectant chacun ces consignes, mais avec une première partie commune) ;
- au moins une annexe ;
- 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.

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.

L'ordre de présentation des sujets, ci-après, importe peu.

1 Simulation du comportement thermique dynamique d'un thermocouple au sein d'une barre d'aluminium au cours d'un procédé de brasage

Tuteur : Vincent Schick, MC UL
03 83 59 57 11
vincent.schick@univ-lorraine.fr
LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

La société **Fives Cryo**, basée à Golbey, est spécialisée dans la fabrication d'*échangeurs de chaleur* en aluminium à plaques et ondes brasées destinés au traitement des fluides cryogéniques. Ces échangeurs sont des empilements de pièces en aluminium dont la cohésion est assurée par un procédé d'assemblage, dit « *brasage* », exécuté à une température proche de la température de fusion du matériau utilisé. L'ensemble est placé dans un four sous vide à l'intérieur duquel une série de panneaux radiants indépendants les uns des autres assure la chauffe. Lors du brasage, ces ensembles sont équipés de *thermocouples* de manière à renseigner le système de régulation en température du four. De la maîtrise de cette régulation dépendent les propriétés mécaniques finales de ces structures brasées. Cette régulation est fortement conditionnée par la *qualité de l'information thermique* fournie par les thermocouples, qui dans certains cas peuvent engendrer des lacunes de chaleur ou des surchauffes locales menant à une altération de la pièce.



L'objectif du projet est d'*évaluer l'erreur de mesure de température liée à l'instrumentation* de la charge du four par des thermocouples (cf. Garnier et al. 2015). Une étude préalable a été réalisée pour modéliser le comportement du thermocouple en régime permanent par Célien Zacharie (élève du département EPT de Mines Nancy, en stage 2A cet été 2015). Pour parfaire cette étude, un *travail de modélisation des phénomènes thermiques transitoires* doit encore être réalisé. Cette étude peut se décomposer en trois parties :

- Modélisation des transferts thermiques en régime transitoire dans l'environnement du thermocouple : définition de la géométrie, homogénéisation du domaine étudié, définition des conditions limites...
- Implémentation du modèle sous le code éléments finis FLEXPDE 6.
- Validation de la modélisation numérique à partir des données expérimentales recueillies lors d'un test de brasage sur le site Fives-Cryo de Golbey.

Ce projet serait l'occasion de pratiquer des modélisations thermiques avancées dans le cadre d'un contexte industriel très porteur.

Référence :

GARNIER, B., LANZETTA, F. & GOMES, S. 2015 Measurement in heat transfer : principles, implementation and pitfalls. *Eurotherm Seminar 104 : METTI 6 Advanced School*.

Élève ayant choisi ce sujet : Adèle-Lou Robin.

2 Analyse énergétique et entropique des échangeurs de chaleur pour la récupération de chaleurs fatales

Tuteurs : Mathilde Blaise, doctorante ADEME - UL Michel Feidt, PR émérite UL
03 83 59 55 54 03 83 59 57 34
mathilde.blaise@univ-lorraine.fr michel.feidt@univ-lorraine.fr
LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

La récupération et la valorisation de la *chaleur fatale issue de l'industrie* constituent un *potentiel d'économie d'énergie* à exploiter. Lors du fonctionnement d'un procédé de production ou de transformation, l'énergie thermique produite grâce à l'énergie apportée n'est pas utilisée en totalité. Une partie de la chaleur est inévitablement rejetée, comme cela est décrit dans le rapport de l'ADEME cité ci-dessous. La récupération de cette chaleur conduit à deux axes de valorisation thermique complémentaires :

- une valorisation en interne, pour répondre à des besoins de chaleur propres à l'entreprise ;
- une valorisation en externe, pour répondre à des besoins de chaleur d'autres entreprises, ou plus largement, d'un territoire, via un réseau de chaleur.

Au-delà d'une valorisation thermique, la chaleur récupérée peut aussi être transformée en électricité, également pour un usage interne ou externe.

Une majorité des rejets thermiques valorisables l'est sous forme de *fumées*. Une des difficultés pour récupérer cette chaleur est le coût élevé et l'efficacité faible des *échangeurs de chaleur*. Ainsi, l'étude des échangeurs de chaleur est un enjeu.

On propose dans ce projet de développer une *modélisation thermodynamique des différents types d'échangeurs de chaleur permettant la récupération de la chaleur de fumées industrielles*. Cette modélisation prendra en compte les *pertes de charge* et la *création d'entropie de transfert thermique* par la méthode de l'*analyse entropique* (Feidt 1996). Les différents types d'échangeurs seront comparés selon différents critères : efficacité de transfert, coût des pompes de circulation, surface d'échange, etc... certains critères restant à définir.

Pour cette étude on se basera sur la littérature, qui propose des « corrélations » utiles au dimensionnement (Bontemps 2014, Feidt 1996, Minvielle 2014), et on développera les modèles sous Matlab (ou Mathematica).

Ce projet serait l'occasion de pratiquer des modélisations thermodynamiques et énergétiques avancées, dans un contexte porteur.

Références :

- ADEME 2015 *La chaleur fatale industrielle*. www.ademe.fr/chaleur-fatale-industrielle .
- BONTEMPS, A. 2014 Échangeur de chaleur : Dimensionnement thermique. *Techniques de l'ingénieur BE9517*.
- FEIDT, M. 1996 Thermodynamique et optimisation énergétique des systèmes et procédés. *TEC et DOC 2ème édition Paris, France*.
- MINVIELLE, Z. 2014 Échangeur de chaleur : Description. *Techniques de l'ingénieur BE9516*.

Élèves ayant choisi ce sujet : Étienne Bertrand & Célien Zacharie.

3 Étude numérique d'écoulements de fluides complexes entre deux cylindres coaxiaux

Tuteurs : Olivier Botella, MC UL Yoann Cheny, MC UL Mathieu Jenny, MC UL

03 83 59 57 12

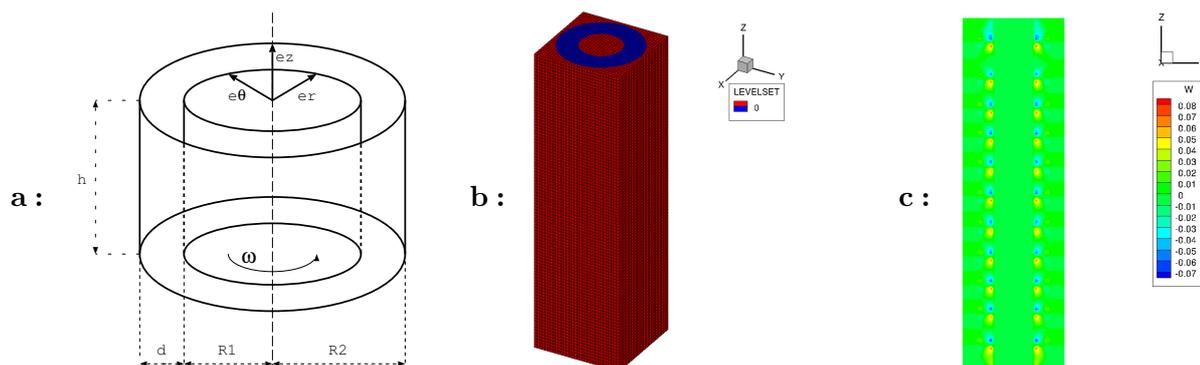
mathieu.jenny@univ-lorraine.fr

LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

Les *écoulements entre deux cylindres coaxiaux*, dits, aussi, de *Taylor-Couette* (figure a), qui peuvent, expérimentalement, être très bien contrôlés, 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. Autant la première instabilité, dans le cas d'un fluide newtonien, est bien connue (Taylor 1923), autant en fluides non newtoniens on dispose de peu de résultats.

Ce type d'écoulement est étudié dans le groupe *Fluides* du Lemta, sur la base d'expériences (Philippe et al. 2012, Bahrani et al. 2015), de méthodes de stabilité (Agbessi et al. 2015), et aussi de *simulations numériques directes*. L'intérêt de telles simulations est de pouvoir prendre en compte des effets fortement non linéaires, des régimes fortement instationnaires voire chaotiques, ainsi que la taille finie du système. Ainsi, le Lemta développe depuis plusieurs années un code de simulation numérique directe dit 'LS-STAG', basé sur une méthode de volumes finis (Cheny & Botella 2010). Ce code a récemment été parallélisé et fonctionne sur le cluster IJL - Lemta Asterix. Dans le cadre du stage 2A de Matthieu Gelot, élève du département EPT de Mines Nancy, effectué entre juin et septembre 2015 au Lemta, une version 3D du code LS-TAG a été validée en configuration de Taylor-Couette pour un *fluide purement visqueux rhéofluidifiant*, au sens où la convergence du code a été prouvée. Un maillage utilisé et une structure calculée sont présentés ci-dessous (figure b : maillage, figure c : champ de vitesse axiale).



Dans la continuité du travail effectué par Matthieu Gelot, on propose dans un premier temps d'*améliorer les outils de post-traitement des données* issues du code LS-STAG à l'aide de logiciels comme Matlab ou Mathematica, afin de tracer par exemple les diagrammes spatio-temporels permettant d'identifier les différents régimes de l'écoulement. Des études paramétriques seront alors menées, sur la base de *nouvelles simulations*, toujours en *fluide purement visqueux rhéofluidifiant*.

Idéalement, on travaillera ensuite sur le code LS-STAG lui-même, pour modifier la loi de comportement du fluide de façon à prendre en compte des effets instationnaires dits de « *thixotropie* », dus à un *couplage entre microstructure et écoulement*. Ils peuvent être pris en compte par exemple avec le modèle de Houska (1981), qui introduit un paramètre de structure scalaire. Ce paramètre contrôle la viscosité, et évolue selon une équation de réaction - convection. Il s'agira de programmer cette équation puis de valider

le code, en comparant à une étude des écoulements laminaires et de leur stabilité menée récemment au Lemta.

Ce projet serait l'occasion d'aborder la mécanique et physique des fluides non newtoniens, tout en travaillant sur l'utilisation, voire, la modification, d'un code de simulation numérique directe performant.

Références :

AGBESSI, Y., ALIBENYAHIA, B., NOUAR, C., LEMAITRE, C. & CHOPLIN, L. 2015 Linear stability of Taylor-Couette flow of shear-thinning fluids : modal and non-modal approaches. *J. Fluid Mech.* **776**, 354-389.

BAHRANI, S. A., NOUAR, C., NEVEU, A. & BECKER, S. 2015 Transition to chaotic Taylor-Couette flow in shear-thinning fluids. *Com.* **69891** au 22^{ème} Congrès Français de Mécanique.

CHENY, Y. & BOTELLA, O. 2010 The LS-STAG Method : A new Immersed Boundary / Level-Set Method for the Computation of Incompressible Viscous Flows in Complex Moving Geometries with Good Conservation Properties. *J. Comp. Phys.* **229**, 1043-1076.

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.

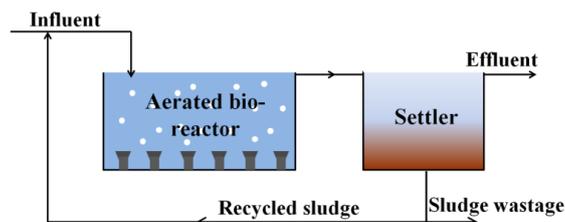
Élève ayant choisi ce sujet : Lei Zhang.

4 Étude numérique de l'hydrodynamique dans un réacteur aéré par bullage

Tuteurs : Rainier Hreiz, MC UL Olivier Potier, MC UL
03 83 17 53 70 03 83 17 50 91
rainier.hreiz@univ-lorraine.fr olivier.potier@univ-lorraine.fr
LRGP, site ENSIC, 1 rue Grandville, Nancy

Descriptif du sujet :

Les « *réacteurs aérés par bullage* » se rencontrent dans différents contextes : procédés métallurgiques, procédés de traitement des eaux usées, etc... Dans ces réacteurs on fait circuler dans le liquide à « traiter » une grande quantité de *bulles de gaz*, qui jouent bien sûr un rôle important pour le procédé. On a donc affaire à des *écoulements diphasiques dispersés* dont la modélisation est difficile... et le contrôle pratique importe. En effet, typiquement, le coût opérationnel du « bullage » est élevé. À titre d'exemple, on peut considérer le procédé de traitement des eaux usées dit « à boues activées », très courant. Comme visible sur la figure ci-dessous (tirée de Hreiz et al. 2015), ce procédé comprend : (1) Un *bioréacteur aérobic* où une microflore bactérienne dégrade la pollution organique contenue dans l'eau usée ; le bullage d'air maintient les microorganismes en suspension et leur fournit l'oxygène nécessaire à leur croissance et respiration. (2) Un décanteur où les boues, principalement composées de floccs bactériens, sont séparées par gravité de l'eau usée traitée. (3) Une ligne de recyclage, renvoyant la majeure partie des boues sédimentées vers le bioréacteur en vue d'y maintenir une concentration bactérienne élevée. (4) Une ligne de purge où les boues en excès sont extraites du système.



L'amélioration des performances des réacteurs à boues activées permettrait une meilleure préservation de l'environnement et de la qualité des eaux, ainsi qu'une réduction des dépenses publiques liées au traitement des eaux usées qui, en France, s'élèvent à plusieurs milliards d'euros annuels.

Ce projet vise à *étudier numériquement l'hydrodynamique dans un bioréacteur aérobic* à l'aide du code commercial ANSYS Fluent. Des simulations CFD seront réalisées pour différentes géométries du réacteur (dimensions et position des aérateurs dans le bassin), débits d'eau usée et débits d'aération. On utilisera un modèle eulérien à deux fluides et un modèle $K - \epsilon$ de la turbulence. Elles permettront de calculer le rendement d'oxygénation, c.à.d. l'efficacité de transfert d'oxygène des bulles vers le milieu de culture. Également, pour chaque configuration considérée, une DTS (distribution de temps de séjour) numérique sera réalisée pour déterminer le temps de séjour moyen dans le réacteur ainsi que l'efficacité de mélange¹. Les résultats des simulations permettront de déduire le design et les paramètres opératoires optimaux d'un bioréacteurs.

Ce projet permettrait de se familiariser avec : (1) Le traitement des eaux usées qui représente un enjeu économique et environnemental important. (2) La CFD devenue incontournable pour l'étude des écoulements complexes. (3) Fluent, le code de CFD le plus employé aujourd'hui dans l'industrie. (4) Les écoulements diphasiques dispersés qui sont rencontrés dans de nombreux systèmes industriels.

Référence :

HREIZ, R., LATIFI, M. A., & ROCHE, N. 2015 Optimal design and operation of activated sludge processes : State-of-the-art. *Chem. Eng. J.* **281**, 900-920.

Élèves ayant choisi ce sujet : Aurélien Chénier & Baptiste Thoraval.

1. La réalisation d'une DTS expérimentale coûte cher du fait de l'utilisation du Lithium comme traceur.

5 Étude de systèmes géothermiques activés

Tutrice : Judith Sausse, PR UL
03 55 66 26 43
judith.sausse@univ-lorraine.fr
Mines Nancy site Artem

Descriptif du sujet :

Ce *projet interdisciplinaire Énergie - Géoingénierie* s'inscrit dans le cadre des *systèmes géothermiques activés* dits aussi *EGS* pour '*Enhanced Geothermal Systems*'. La *Géothermie EGS grande profondeur* fait l'objet depuis une vingtaine d'années d'un programme de recherche européen sur le site d'expérimentation de Soultz-Sous-Forêts en Alsace. Le pilote triplet géothermique construit est constitué de trois forages profonds de 5 000 m de profondeur recoupant les granites du socle. Ces puits GPK2, GPK3, GPK4 sont déviés pour atteindre le réservoir granitique contenant des eaux de formation mobilisables pour créer un échangeur thermique profond à caractéristiques hydrauliques et thermiques bien définies. A terme, ce triplet géothermique devrait permettre une production pérenne de chaleur et d'électricité. Toute une série d'études ont été précédemment réalisées pour déterminer la productivité hydraulique du réservoir créé, évaluer sa productivité thermique à moyen et long terme. Pour cela des essais de circulation de longue durée dans l'échangeur ont été réalisés à pleine puissance et avec une conversion complète de l'énergie produite (électricité et chaleur). Depuis 2009, le site de Soultz est devenu un pilote industriel avec une maîtrise d'ouvrage assurée par un groupement Européen d'Intérêt Economique (GEIE *Exploitation Minière de la Chaleur*) rassemblant les partenaires industriels : Electricité de Strasbourg (ES Géothermie, France), EDF (France), Pfalzwerke AG (Allemagne). A ce GEIE sont associés, par le biais d'un accord de Consortium, huit partenaires scientifiques et techniques, dont le CNRS avec plusieurs équipes dont le laboratoire GEORESSOURCES.

On désire dans ce projet améliorer notre compréhension des *relations entre migrations de fluides, propriétés pétrophysiques des roches et contraintes tectoniques* à l'échelle régionale mais également à l'échelle des *contraintes mesurées in-situ dans les puits*. Ces relations sont fondamentales pour une bonne caractérisation réservoir. Les porosités et perméabilités des roches ciblées conditionnent les flux enregistrés quel que soit leur typologie : milieux poreux et/ou fracturé. Les contraintes tectoniques orientent de façon anisotrope ces écoulements de fluide dans le réservoir.

Ce projet s'articule en 4 parties.

1 Contraintes régionales - Fossé rhénan cible Soultz (partie commune Gauer - Perrin)

Approche bibliographique permettant de mieux cerner l'état de contraintes régional actuel dans la zone du projet EGS Soultz.

2 Contraintes in situ - Forages GPK2-3-4 (partie commune Gauer - Perrin)

Les contraintes régionales agissant sur la zone réservoir étant définies préalablement, on s'intéressera à leur caractérisation in situ dans les 3 puits principaux du site EGS de Soultz. Les imageries de paroi par ultrasons (UBI *Ultrasonic Borehole Imager*) disponibles à Soultz pour les 3 puits seront à analyser pour détecter les fractures induites et éventuels break-outs qui permettront d'établir une base de données comprenant les profondeurs et orientations des discontinuités observées. Cette base de données sera constituée par un picking et relevé manuel des imageries de paroi sous GMI ImagerTM et ce sur les 3 puits. Cette base de données fera l'objet d'une étude statistique et devra être mise en regard des conclusions obtenues à propos des contraintes à l'échelle régionale.

3 Fracturation et stimulation hydraulique (partie spécifique Perrin)

Sur la base des mesures de fracturation induites réalisées précédemment, les contraintes enregistrées in situ sont définies en regard des contraintes régionales. Quels sont les critères à prendre en compte pour

stimuler hydrauliquement un réservoir fracturé ? Sur la base d'un modèle conceptuel simple : une fracture recoupant un puits à une profondeur donnée dans l'un des puits GPK2, 3 ou 4, développer un modèle hydromécanique permettant de caractériser et paramétrer la stimulation de cette fracture isolée sur une zone de profondeur donnée.

Paramètres : *orientation des forages, orientation des contraintes in situ, influence de la profondeur, orientation des fractures stimulables, ouverture hydraulique de ces fractures, pressions et débits d'injection, régimes de contraintes régionales et in situ en profondeur.*

4 Fracturation et pétrophysique (partie spécifique Gauer)

Une base de données (Sausse et al. 2010) présentant les principales zones de fractures a été constituée pour les 3 puits principaux. Les fractures et failles montrent une signature géophysique spécifique du fait de l'altération des roches encaissantes qu'elles suscitent : zone d'endommagement. Est-il possible de tracer la signature des fractures en fonction de leur réponse géophysique ?

Un puits d'exploration test (EPS1) a été loggé entièrement avec des diagraphies variées et les fractures ont été précisément recensées avec leur caractéristique (Explo_EPS1.xls). Est-il possible d'extraire un signal « fracture » de ces données géophysiques sur ce puits test ?

Si c'est le cas, peut-on transposer cette analyse en utilisant uniquement les données de gamma ray, seuls logs géophysiques disponibles sur les 3 autres puits profonds GPK1, GPK2 et GPK4 (Gamma Ray GPK234.xls), et de fractures UBI (Database UBI ZF.xls) ?

Référence :

SAUSSE, J., DEZAYES CH., DORBATH L., GENTER A. & PLACE J. 2010 3D model of fracture zones at Soultz based on geological data, image logs, induced microseismicity and vertical seismic profiles. *C. R. Géoscience* **342**, 531-545.

Élèves ayant choisi ce sujet : Jean-Eudes Gauer & Vladimir Perrin.