

Projets du parcours Artem 2A et consignes pour le département *Énergie : Production, Transformation*

Version du 5 mai 2015

L'ordre de présentation des sujets n'importe pas. Les sujets ont été présentés aux élèves le 24 novembre. Les choix de sujets ont été finalisés le 26 novembre. À la fin de la section de chaque sujet, sont listés les élèves qui traitent ce sujet. Deux créneaux de projets furent disponibles les 2 et 17 décembre, pour lancer la réflexion sur les sujets. Un rythme de travail plus soutenu, avec, en général, au moins un créneau de projet chaque semaine, a été mis en place à partir de la 2^{ème} semaine de janvier, cf. [l'emploi du temps en section 3 de la page 2A du département, <http://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/2A>](#). Des *soutenances à mi-parcours* ont lieu les 24 et 31 mars. Après une pause (vacances de printemps) entre le 3 et le 19 avril, des créneaux supplémentaires seront disponibles en avril - mai, cf. [la section 3 de la page 2A du département](#).

Le *rapport de projet final* sera envoyé au responsable de département et aux tuteurs au plus tard le **vendredi 5 juin à 14h**, sous forme électronique, au format PDF, par mel. Dans les mêmes délais un exemplaire imprimé de ce rapport sera déposé dans le casier du responsable de département¹. Ce rapport de type *scientifique* fera 20 à 30 pages hors annexes, 30 à 60 pages avec annexes ; il devra comporter au moins une annexe. Il devra comporter une bibliographie référencée dans le corps du texte². Il présentera le sujet du projet, dans son contexte, le travail effectué, enfin, quelques conclusions et perspectives.

Les *soutenances finales* sont programmées mardi 9 et mercredi 10 juin, avec des *soutenances d'élèves en parcours Recherche* (soutenances indiquées ci-dessous avec un **R**). Le programme complet des soutenances est donné, puisqu'on demande à tous les élèves d'assister à toutes les soutenances.

1^{ère} session mardi 9 juin en salle P222 :

Heure	Élèves	Sujet	Tuteur(s) présent(s)
8h30	Gelot & Martinez	4 Modélisation hydrodynamique d'un procédé de filtration	Lemaitre & Nouar
9h15	Pouplin	R Identification des composants d'une flamme par spectrométrie infra-rouge	Collin
10h15	Thoraval	R Simulation de la nage des poissons par méthode Lattice - Boltzmann	Munnier

Fin vers 11h.

2^{ème} session mercredi 10 juin en salle P222 :

Heure	Élèves	Sujet	Tuteur(s) présent(s)
8h30	Ruault & Suillaud	5 Advection chaotique 3D par effets magnétohydrodynamiques	Vinsard
9h15	Wisse & Zhang	1 Potentiels de récupération des chaleurs fatales en sidérurgie	Schick
10h15	Gauer & Zacharie	2 Simulation de la thermoconvection de fluides non newtoniens (NN)	Métivier & Jenny
11h00	Bertrand & Nakmouche	3 Étude par IRM d'écoulements de Taylor-Couette de fluides NN	Jenny

Fin vers 11h45, puis *évaluation pédagogique globale*, cf. ci-dessous.

On vous demandera un exposé oral de 30 minutes, basé sur une *présentation* vidéo PPT ou PDF, présentant de façon *scientifique* le contexte et le sujet du projet, le travail effectué³, enfin, quelques conclusions et perspectives. Vous présenterez bien les aspects « *gestion de projet* » de votre travail, en lien avec les recommandations d'Antoine Dubedout présentées dans l'annexe A. Vous veillerez à partager le temps de parole à égalité entre les élèves d'un groupe - projet. Après votre soutenance vous serez soumis à une séance de questions - réponses de la part de vos tuteur(s) et responsable de département. En fin de 2^{ème} session, mercredi 10 juin de 11h45 à 12h environ, je vous ferai procéder à une *évaluation pédagogique globale* de notre 2^{ème} année. Nous terminerons, de 12h à 12h15 environ, de façon conviviale, avec quelques jus de fruits, etc...

1. Mon casier se trouve au 1^{er} étage du bâtiment A, à droite de l'ascenseur, en face du bureau A127.

2. Voir sur ce sujet les consignes de l'annexe B, déjà données au moment des soutenances à mi-parcours.

3. Sans faire référence aux soutenances à mi-parcours.

1 Étude des potentiels de récupération des chaleurs fatales dans l'industrie sidérurgique

Tuteur :

Vincent Schick, MC UL

03 83 59 57 11

vincent.schick@univ-lorraine.fr

LEMMA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

Dans le cadre de sa stratégie « Recherche, Développement et Innovation » 2014-2020, l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) a défini un programme de recherche « *production durable et énergies renouvelables* ». L'industrie métallurgique et sidérurgique, grande consommatrice d'énergie fossile (principalement le charbon) est particulièrement concerné par ce programme visant à une *meilleure efficacité énergétique*. Dans le cadre de ce programme, le LEMMA, en partenariat avec des entreprises sidérurgiques, cherche des moyens d'utilisation de l'« *énergie thermique perdue* » ou « *chaleur fatale* » au cours des procédés d'élaboration de produits métalliques.

L'objectif de ce projet est d'évaluer le *potentiel d'énergie récupérable et valorisable pour chaque étape d'un procédé sidérurgique*. L'accent sera mis sur l'étude des axes suivant :

- ressource en chaleur fatale : localisation, nature (basse ou haute température, quantité disponible et récupérable...);
- moyen de captage de la ressource : échangeurs à fluide, panneau radiatif...;
- stockage et vectorisation de l'énergie, sous forme chimique, électrique ou thermique;
- valorisation de la ressource, i.e., réutilisation dans une autre étape du procédé.

On s'intéressa plus particulièrement à des systèmes intégrables rapidement aux technologies actuellement utilisées dans l'industrie métallurgique.

Les élèves devront réaliser dans un premier temps une *analyse des différentes étapes d'un procédé sidérurgique*. Cela permettra de chiffrer le *potentiel énergétique récupérable*. Puis ils se livreront à un *état de l'art* et à une *analyse critique*, qualitative et surtout quantitative, par analyse exergétique, calcul de rendement, etc... des techniques de récupération et de stockage des chaleurs fatales pour leur réutilisation dans le procédé. Enfin, ils mèneront une étude de coût, pour évaluer économiquement les techniques de récupération des chaleurs fatales envisagées : dépenses d'exploitation ou d'investissement, retour sur investissement, ...

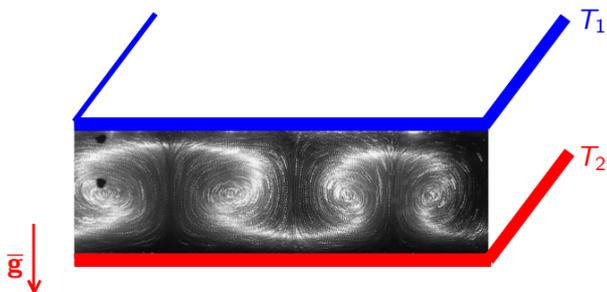
Élèves ayant choisi ce sujet : Nicolas Wisse & Lei Zhang.

2 Étude numérique de la thermoconvection naturelle de fluides non newtoniens

Tuteurs : Christel Métivier, MC UL Mathieu Jenny, MC UL
03 83 59 57 12 03 83 59 57 12
christel.metivier@univ-lorraine.fr mathieu.jenny@univ-lorraine.fr
LEMMA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

L'étude des *instabilités de thermoconvection dans une couche de fluide chauffée par le bas*, configuration dite de « Rayleigh-Bénard » (figure tirée de Stasiek 1997⁴), a été très largement considérée dans le cas de fluides newtoniens. Ceci s'explique par le nombre important d'applications physiques ou industrielles qui mettent en jeu des gradients thermiques dans des couches fluides. Aux grandes échelles, la thermoconvection peut avoir lieu dans l'atmosphère, les océans ou encore le manteau terrestre. À plus petite échelle, la connaissance des régimes thermiques peut avoir un impact sur les procédés industriels et leur optimisation, puisque la convection thermique améliore les transferts thermiques. On peut enfin citer le chauffage de bâtiments comme exemple de système où la thermoconvection naturelle peut jouer un rôle important. Dans tous ces systèmes, l'apparition et l'évolution des instabilités de thermoconvection représente un intérêt majeur.



Souvent, les fluides rencontrés sont *non newtoniens* : ils présentent notamment une viscosité qui dépend des taux de déformation. Malgré leur importance dans divers secteurs industriels (secteurs cosmétique, pétrolier, agro-alimentaire, pharmaceutique...) ou systèmes naturels (manteau terrestre, lave, boue...), ces fluides restent peu étudiés comparativement aux fluides newtoniens, en particulier dans la configuration de Rayleigh-Bénard.

On propose de mener, en lien avec des expérimentations existant au LEMMA, une *étude numérique* (Simulations Numériques Directes) à l'aide d'un code éléments finis Freefem++ (Hecht 2012) en cours de développement. Il s'agira d'adapter le code numérique aux conditions expérimentales (géométrie, conditions limites...) et de le valider dans le cas d'un fluide newtonien. La prise en compte d'un modèle non newtonien adapté aux fluides utilisés dans les expériences, de type « *rhéofluidifiant* » (viscosité diminuant lorsque les taux de déformation augmentent) sera ensuite réalisée. Idéalement, on pourra aboutir à des comparaisons détaillées entre le modèle numérique et les expériences.

Références :

- HECHT, F. 2012 New development in Freefem++. *J. Numer. Math.* **20**, 251-265.
STASIEK, J. 1997 Thermochromic liquid crystals and true colour image processing in heat transfer and fluid-flow research. *Heat and Mass Transfer* **33**, 27-39.

Élèves ayant choisi ce sujet : Jean-Eudes Gauer & Célien Zacharie.

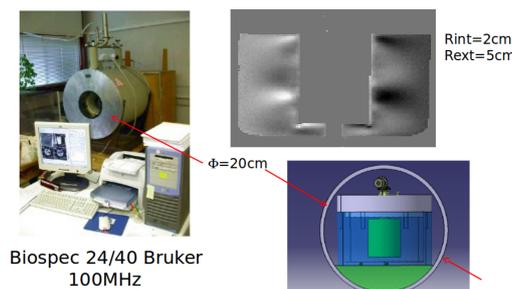
4. Photographie de cellules de convection dans du glycérol contenant une suspension de micro-gouttelles de cristaux liquides thermochromes, ce qui permet d'observer par réflexion sélective de la lumière une isotherme. D'autre part, la photographie a été obtenue grâce à des flashes successifs, ce qui permet de visualiser le champ de vitesse de l'écoulement à partir des positions successives des micro-gouttelles.

3 Étude par IRM d'écoulements de Taylor-Couette d'un fluide complexe

Tuteurs : Mathieu Jenny, MC UL Salaheddine Skali-Lami, MC UL
03 83 59 57 12 03 83 59 56 25
mathieu.jenny@univ-lorraine.fr salaheddine.skali-lami@univ-lorraine.fr
LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

L'étude portera sur des *écoulements de fluides complexes entre deux cylindres coaxiaux*, un cylindre intérieur tournant et un cylindre extérieur fixe, écoulements souvent dits de « Taylor-Couette ». Cette géométrie est fréquemment 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, ou encore pour l'extraction de radioéléments par dissolution et mélange. En pratique, le caractère instationnaire et complexe de l'écoulement améliore l'opération de transfert dans ces procédés. En régime instationnaire, le *couplage entre microstructure et écoulement* est une problématique importante dans la description rhéologique des fluides complexes dont la dynamique à l'échelle microscopique évolue suivant le temps caractéristique de l'écoulement (exemples : écoulements de micelles géantes, d'émulsions). 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), qui suggère une modification de la nature de l'écoulement sous l'effet de la structuration microscopique du fluide. Afin de mieux comprendre les mécanismes physiques en jeu, une caractérisation précise de l'écoulement est nécessaire. Pour cela le LEMTA dispose de moyens expérimentaux avancés comme l'*Imagerie par Résonance Magnétique nucléaire* (IRM), cf. ci-contre :



Un travail préliminaire réalisé lors d'un projet (Hong et al. 2014) a permis de mettre en évidence l'apparition des rouleaux convectifs dans un dispositif vertical et confiné suivant l'axe pour des raisons d'encombrement (dispositif présenté dans la partie droite de la figure, qui montre aussi un champ de vitesse obtenu avec une solution de 0,2% de Xanthane). Afin de résoudre le problème du confinement axial, la fabrication d'un dispositif horizontal est en cours au LEMTA. Cela permettra d'avoir un rapport entre la longueur axiale et la taille de l'entrefer beaucoup plus grand qu'avec le dispositif vertical, tout en respectant les contraintes de dimension permettant son introduction dans l'IRM. La réduction du confinement axial devrait permettre d'observer l'apparition de rouleaux « périodiques », au centre du système, non perturbés par des effets de bord. Des *mesures expérimentales* seront effectuées sur ce nouveau dispositif. Parallèlement à ce travail, des *simulations numériques* pourront être effectuées à l'aide d'un code disponible au LEMTA⁵. La comparaison avec les expériences permettra de juger de la capacité prédictive du modèle rhéologique implémenté dans le code numérique.

Références :

- HONG Y., TYSON G. & VAILLANT J.B. 2014 Étude d'écoulements de Couette cylindriques de fluides complexes. *Rapport de projet 2A Mines Nancy*.
- 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.

Élèves ayant choisi ce sujet : Étienne Bertrand & Djamel Nakmouche.

5. Plusieurs codes différents seront disponibles, un choix sera effectué avec les tuteurs.

4 Modélisation hydrodynamique d'un procédé de filtration rotative

Tuteurs : Cécile Lemaitre, MC UL
03 83 17 50 83

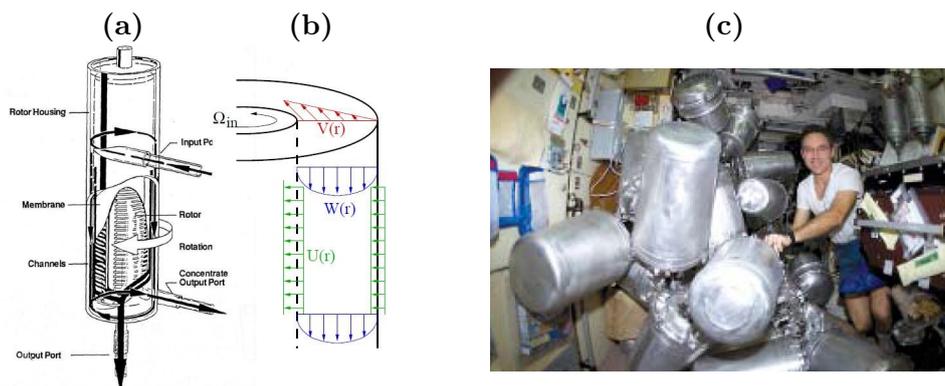
cecile.lemaitre@ensic.inpl-nancy.fr
LRGP, ENSIC, Nancy

Chérif Nouar, DR CNRS

cherif.nouar@univ-lorraine.fr
LEMMA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

Les *procédés de filtration* visent à séparer, concentrer ou clarifier des suspensions en les faisant s'écouler à travers ou près d'une membrane poreuse ou « filtre ». On distingue la filtration frontale, qui consiste à faire passer le fluide à filtrer perpendiculairement à la surface du filtre, de la filtration tangentielle, où le fluide s'écoule de façon essentiellement tangentielle à la surface du filtre. Un procédé de ce type, assez efficace, est le *procédé de filtration rotative*, inventé dans les années 1970, mais qui a fait l'objet d'études récentes basées sur des *méthodes théoriques d'analyse de stabilité* (Martinand et al. 2009, Martinand & Serre 2013). Ce système est constitué de deux cylindres coaxiaux, un cylindre extérieur fixe et un cylindre intérieur poreux en rotation (figure a). Une suspension de particules à filtrer est injectée en haut du dispositif et ressort par le bas. Le long de l'écoulement axial, une partie du liquide est évacuée radialement au travers de la paroi poreuse et la concentration en particules augmente. Ce système appelé aussi « *filtre rotatif* » est déjà utilisé pour la séparation de la crème du lait, dans des procédés de fermentation, la séparation du pétrole, la séparation de suspensions biologiques, la séparation du plasma sanguin et même le traitement des eaux usées dans la station spatiale internationale (figure c, sur laquelle on voit plusieurs filtres rotatifs, cf. aussi Lee & Lueptow 2001).



L'objet de ce projet est la mise en place d'une *modélisation hydrodynamique de l'écoulement* dans un filtre rotatif, combinaison d'un écoulement azimuthal de Taylor-Couette, d'un écoulement axial de Poiseuille et d'un écoulement radial (figure b). Il faudra mener une *analyse linéaire de stabilité* de cet écoulement, afin de prédire l'apparition de recirculations s'apparentant à des rouleaux de Taylor modifiés. Ces recirculations retardent le colmatage de la paroi filtrante en éloignant les particules qui s'y trouvent collées. Il est donc important de comprendre et contrôler leur apparition. Dans un premier temps, le fluide considéré sera newtonien, i.e., il s'agira de retrouver les résultats de Martinand et al. L'analyse aboutira à des équations différentielles ordinaires résolues par une méthode numérique spectrale, qui peut se programmer assez facilement sur Matlab ou Mathematica. Si le temps le permet, on prendra ensuite en compte le *caractère non newtonien* d'une suspension, qui présente en général des effets de *rhéofluidification* (diminution de la viscosité lorsque les taux de déformation augmentent).

Références :

LEE, S. & LUEPTOW, R. M. 2001 Reverse osmosis filtration for space mission wastewater : membrane properties and operating conditions. *J. Membrane Science* **182**, 77-90.

MARTINAND, D., SERRE, É. & LUEPTOW, R. M. 2009 Absolute and convective instability of cylindrical Couette flow with axial and radial flows. *Phys. Fluids* **21**, 104102.

MARTINAND, D. & SERRE, É. 2013 Transitions sous-critiques dans un écoulement de Taylor-Couette avec flux radial. *CR du 21^{ème} CFM*. <http://hdl.handle.net/2042/52332>.

Élèves ayant choisi ce sujet : Matthieu Gelot & Maéva Martinez.

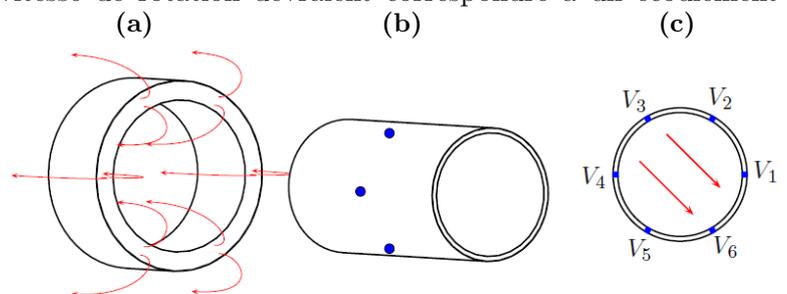
5 Advection chaotique 3D par effets magnétohydrodynamiques

Tuteurs :

Gérard Vinsard & Stéphane Dufour, MC UL ; Esteban Saatdjian, PR UL
Lemta site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy
Tél. : 03 83 59 56 68 - Mel : gerard.vinsard@univ-lorraine.fr

Descriptif du sujet :

Certains procédés médicaux et biologiques demandent d'assurer le *mélange* de composés organiques liquides à une échelle suffisamment petite (\approx mm voire μ m) pour que leurs écoulements soient laminaires, donc peu propices au mélange. L'injection de forces de volume dans ces écoulements permet cependant de les piloter de manière que les trajectoires des particules fluides, solutions de $d\vec{x}/dt = \vec{v}(\vec{x},t)$, soient très compliquées et recouvrent l'ensemble du domaine liquide. Le résultat pratique est que toute partie du liquide est mise à un instant ou un autre en contact avec toute autre partie et donc que des hétérogénéités de composition puissent être atténuées par diffusion moléculaire. On parle alors d'*advection chaotique*. Les composés organiques conduisant faiblement l'électricité, des *forces de Laplace* créées par injection directe de courant électrique via un jeu d'électrodes en présence du champ magnétique d'un aimant permanent peuvent permettre de « *manipuler l'écoulement* » pour une advection chaotique. La faisabilité de telles techniques « *magnétohydrodynamiques* » est déjà démontrée, l'équipe du LEMTA qui s'occupe du développement a déjà obtenu des résultats et deux projets connexes ont déjà été donnés à Mines Nancy. Les études faites jusqu'ici concernaient des écoulements quasi-bidimensionnels (rampants) ; il s'agit de les prolonger dans des *géométries tridimensionnelles*. L'électrolyte sera placé dans un tube horizontal. La force de Laplace sera créée par conjonction du champ magnétique intérieur à un anneau aimanté (lignes de champs rouge sur la figure a) et du courant d'électrodes disposées sur la périphérie du tube (figures b et c, les flèches rouges représentent le courant). La densité de force de Laplace sera donc approximativement uniforme dans une région cylindrique d'épaisseur correspondant à la dimension suivant la hauteur du tube des électrodes ; elle engendrera un système de deux vortex de part et d'autre du support, en « amont » et en « aval ». Une modulation temporelle des valeurs de potentiels d'électrode permettra de mettre en rotation la direction du courant et donc les vortex générés. Il est vraisemblable que certaines valeurs des paramètres d'intensité des potentiels et de vitesse de rotation devraient correspondre à un écoulement d'advection chaotique.



Il s'agira d'explorer cette idée, soit en réalisant une *expérience*, soit en mettant au point une *modélisation numérique*, soit en combinant ces deux approches. Dans tous les cas, il sera demandé de saisir le contexte général. L'expérience demandera de réaliser les plans du dispositif (réalisé ensuite par une imprimante 3D), de choisir le fluide et le colorant, de mener les expériences et de les caractériser par vidéo. La modélisation sera faite avec le *logiciel libre d'éléments finis* Freefem++ pour calculer l'écoulement de Stokes 3D ; la densité de force sera estimée analytiquement, pour simplifier les choses. Dans un second temps, on exploitera les champs de vitesse obtenus pour calculer des trajectoires de particules.

Références :

QIN, M. & BAU, H.H. 2012 Magneto-hydrodynamic flow of a binary electrolyte in a concentric annulus. *Phys. Fluids* **24**, 037101 (20 p).

DUFOUR, S., VINSARD, G., MOTA, J. P. & SAATDJIAN, E. 2013 Mixing by chaotic advection in a magneto-hydrodynamic driven flow. *Phys. Fluids* **25**, 102001 (16 p).

Élèves ayant choisi ce sujet : Paul Ruault & Édouard Suillaud.

A Memento gestion de projet

Nous soutenons la démarche d'Antoine Dubedout, responsable de la chaire Ingénierie et Innovation de l'école⁶, qui demande qu'élèves et tuteurs veillent à ce que l'aspect « *gestion de projet* » soit considéré pendant l'année, en particulier les points suivants. Ils devront tous trois être mentionnés (\simeq 1 plan vidéo/point) lors de la soutenance finale. En sus, nous comptons sur les élèves pour mettre en place de bonnes pratiques de conduite de projet, par exemple, les comptes-rendus de réunion systématiques, qui seront faits dans un délai très bref après chaque réunion - projet.

A.1 Connaissance de l'environnement du sujet

Tout le monde reconnaît la nécessité de dresser un tableau de l'état de l'art, et nombre de projets démarrent par une phase de recherche bibliographique.

Cette recherche initiale ne doit pas être limitée aux éléments techniques du projet. L'encadrant doit aussi veiller à ce que les étudiants identifient d'une part les ressources sur lesquelles ils pourraient s'appuyer (que ce soit au sein de l'École, des laboratoires d'appui ou de l'entreprise qui « sponsorise » le projet), d'autre part, au delà de leurs tuteurs, qui tirerait bénéfice de leur projet (les fameux clients cachés) et en augmenterait du même coup la valeur.

A.2 Planification

Le futur ingénieur en charge d'un projet doit être capable d'en effectuer une planification préalable. Une séance de formation à la planification est d'ailleurs prévue en début de 2^{ème} année.

Les points importants que les élèves doivent mettre en œuvre au cours des projets 2A (projet classique de département ou projet de recherche) sont :

- L'identification des difficultés et obstacles prévisibles ; l'organisation du projet (par les étudiants) devra permettre de les éviter ou d'en faciliter le franchissement.
- L'identification des principales décisions à prendre au cours du projet ; leur positionnement dans le temps sera la base de la planification.

Il est donc important que les encadrants incitent les élèves à découvrir et anticiper eux-mêmes ces difficultés, et les poussent à présenter le calendrier de leur projet, non pas en terme de cadencement de tâches, mais de décisions à prendre.

A.3 Valorisation des travaux réalisés

Une tendance naturelle dans un projet est de raisonner en « reste à faire ». Dès lors le projet devient très sensible à tout aléa qui se présenterait.

Il est au contraire demandé aux encadrants, dans le suivi régulier qu'ils font des projets, de pousser les étudiants à réfléchir à ce qu'ils ont déjà réalisé ; quelles connaissances ont été accumulées, qu'apportent-elles au projet ? En quoi permettent-elles d'en limiter les risques et difficultés futures ?

B Consignes pour la bibliographie

Cette bibliographie doit être étoffée par rapport à celle fournie par les tuteurs dans les descriptifs de sujets. Pour la présenter, vous suivrez au moins dans ses grandes lignes la norme ISO 690, décrite sur [le document suivant](#)⁷. Vous pourrez aussi vous inspirer de la façon avec laquelle Emmanuel Plaut présente les bibliographies de ses polycopiés⁸.

6. Site web www.ingenierie-et-innovation.fr.

7. D'Annie Laroche-Joubert ; lien explicite : <http://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/bibliographie.pdf> .

8. Une variante de la norme ISO 690 dans laquelle l'année de publication, considérée d'une grande importance, est placée plus tôt, juste après les noms des auteurs. Notez que l'utilitaire bibtex couplé au traitement de texte scientifique LaTeX peut vous aider, cf. <http://emmanuelplaut.perso.univ-lorraine.fr/latex> .