



HAL
open science

Une Nouvelle Pédagogie pour des Travaux Pratiques en Mécanique des Fluides

Jérôme Boudet, Isabelle Trébinjac, André Vouillarmet, Dominique Echampard

► **To cite this version:**

Jérôme Boudet, Isabelle Trébinjac, André Vouillarmet, Dominique Echampard. Une Nouvelle Pédagogie pour des Travaux Pratiques en Mécanique des Fluides. Journées AUM / AFM 2008, Aug 2008, Mulhouse, France. pp.87. hal-00321135

HAL Id: hal-00321135

<https://hal.science/hal-00321135>

Submitted on 12 Sep 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Une Nouvelle Pédagogie pour des Travaux Pratiques
en Mécanique des Fluides**
New Teaching Methods for Lab Works in Fluid Mechanics

Jérôme Boudet, Isabelle Trébinjac, André Vouillarmet & Dominique Echampard

*Equipe d'Enseignement de Mécanique des Fluides
Département MFAE (Mécanique des Fluides, Acoustique, Energétique)
Ecole Centrale de Lyon
36 avenue Guy de Collongue 69134 Ecully Cedex - France
Tel : 33 (0)4 72 18 61 93 (Secret.: 61 60)
FAX : 33 (0)4 78 64 71 45
andre.vouillarmet@ec-lyon.fr*

Résumé :

L'Equipe d'Enseignement de Mécanique des Fluides de l'Ecole Centrale de Lyon pratique une nouvelle pédagogie pour les Travaux Pratiques dédiés aux élèves de 2^{me} année. Plutôt que de réaliser classiquement une expérience formatée sur une installation dédiée, les étudiants définissent eux-mêmes un thème scientifique et technique qu'ils illustrent grâce à un panel d'installations expérimentales et de simulations numériques.

Lors d'une première séance, les étudiants choisissent leur thème d'étude et définissent des objectifs et des concepts à illustrer, en lien avec les enseignements théoriques dispensés. Ils identifient les installations expérimentales et les simulations utiles.

Lors des deux séances intermédiaires, ils réalisent leurs expériences et des simulations numériques, menées sur les mêmes configurations. Les données traitées sont analysées en cohérence avec les objectifs prédéfinis, et en confrontant les approches numériques et expérimentales.

La dernière séance est consacrée à la restitution. Un rapport écrit et un exposé oral constituent un exercice de synthèse. Par ailleurs, l'exposé oral est un vecteur de transmission des connaissances acquises, à l'adresse des étudiants ayant choisi un autre thème d'étude.

Abstract :

The Fluid Mechanics Teaching Group of Ecole Centrale de Lyon introduced new teaching methods for the lab works of 2nd year students (eq. Master 1). Instead of a classical linear experiment on a dedicated rig, the students choose a scientific and technical theme they illustrate on a panel of rigs and numerical simulations.

During the first session, the students choose a theme and define objectives and concepts to illustrate, in conjunction with the theoretical classes. They also select appropriate experimental rigs and numerical simulations.

During the next two sessions, they have to carry out the experiments and simulations, over the same configurations. Data are analyzed according to the objectives, combining experimental and numerical approaches.

Finally, the work is synthesized through a report and a presentation during the last session. This talk is also a way to present the results to the other groups that studied different themes.

Mots-clefs :

**Pédagogie innovante/ Travaux pratiques/ Objectifs thématiques/ Mécanique des Fluides/
Expérience/ Simulation numérique/ Autonomie/ Restitution écrite et orale
Innovative teaching methods / Lab works / Thematic objectives / Fluid Mechanics /
Experiment / Numerical simulation / Autonomy / Written and oral presentation**

1 Introduction

L'équipe d'enseignement de Mécanique des Fluides de l'Ecole Centrale de Lyon (ECL - Ecole formant des ingénieurs en 3 ans) a mis en place, depuis cinq ans, une nouvelle pédagogie pour les Travaux Pratiques de Mécanique des fluides dédiés aux élèves de 2^{ème} année (équivalence Master 1). Cette deuxième année du cursus se situe entre la formation de base délivrée en 1^{ère} année et les enseignements optionnels de 3^{ème} année. La refonte de cet enseignement est partie d'idées simples et de quelques constatations.

Les deux idées principales étaient de redonner l'initiative aux élèves dans le processus d'enseignement et de valoriser l'approche concrète des problèmes. Les enseignements pratiques (TP expérimentaux et numériques) ont toujours été un point fort de notre Ecole, et de nombreuses expériences de pédagogie interactive s'y sont développées depuis une dizaine d'années. Il nous a semblé que mettre ces deux atouts d'avantage en synergie pourrait largement accroître la motivation de nos élèves et, par là même, améliorer l'efficacité de l'apprentissage.

De plus, la constatation était celle d'un parc d'installations conséquent, dont l'exploitation n'était pas optimisée. Une plateforme pédagogique regroupe en effet une vingtaine d'installations expérimentales, auxquelles sont adjoints 12 postes informatiques proposant divers outils de calcul et de traitement de données, des logiciels de simulation des écoulements, ainsi qu'un accès au Serveur Pédagogique de l'ECL et à Internet. L'ensemble de la plateforme est également couvert par le réseau WiFi.

L'équipe pédagogique existante ayant la taille critique pour tenter une expérience pédagogique d'une certaine ampleur (une dizaine d'enseignement permanents et 4 ou 5 jeunes moniteurs ou ATER), nous avons donc décidé de casser la structure traditionnelle des séances de Travaux Pratiques où l'élève réalise une expérience formatée sur une installation dédiée.

Le principe est que, dans une première phase, les élèves définissent eux-mêmes un thème scientifique et technique, qu'ils illustrent ensuite grâce à un panel d'installations expérimentales et de simulations numériques, lors de créneaux programmés. Le livrable est constitué d'une restitution écrite et orale du travail réalisé devant leurs camarades étudiants. Ceci réclame évidemment une structure organisationnelle forte, qui est largement décrite dans la suite.

2 Les objectifs

L'objectif, affiché aux élèves, de cette série de 4 séances de Travaux Pratiques est double :

- mettre en oeuvre de façon concrète les connaissances acquises en première année en enseignement de *Mécanique des fluides (cours et Travaux Pratiques)*, et en deuxième année en cours de *Transferts dans les milieux fluides*
- aborder l'étude d'un phénomène physique ou le fonctionnement d'un dispositif pratique par une approche couplée expérimentale et numérique.

Pour cela, une liste de différents thèmes scientifiques et techniques est proposée aux élèves. Pour chaque thème, il est fourni une définition précise en termes d'objectifs pédagogiques (concepts, liens avec le cours), de contenu et d'illustrations possibles. Les 7 thèmes actuellement proposés sont :

- Transfert de chaleur fluide-solide
- Caractérisation d'un système
- Exploration et caractérisation d'un écoulement
- Mesure de la vitesse d'un fluide
- Mesure du débit
- Pertes de charge
- Similitude et Analyse dimensionnelle

Pour un thème donné, le travail consiste :

- à mettre en place une démarche expérimentale : choix des installations, pertinence de l'instrumentation utilisée, protocole expérimental, analyse critique des résultats obtenus
- à comparer, si besoin est, avec une approche analytique ou numérique
- à faire, par écrit et par oral, un compte-rendu synthétique de l'étude réalisée.

En termes organisationnels, cela implique de la part des élèves, une capacité à planifier une étude avec une forte contrainte de temps, organiser un travail en équipe au sein du groupe, utiliser avec discernement une quantité de ressources mises à disposition et gérer avec les autres groupes des moyens mutualisés.

3 Les moyens

Ils sont constitués des installations expérimentales et des postes de travail informatique, du jeu de fiches descriptives associées, de fiches présentant les thèmes, de ressources scientifiques et techniques diverses, mais aussi de documents de suivi (fiche d'objectifs et feuille de route) et d'évaluation du processus (fiche d'observation).

L'ensemble des documents est disponible, à la fois en consultation papier (classeurs disponibles sur site), et en version électronique (site intranet <https://pedagogie.ec-lyon.fr/>).

3.1 Les moyens expérimentaux et numériques



FIG. 1: Quelques-uns des bancs expérimentaux à disposition (de gauche à droite et de haut en bas : conduite à huile, pompe centrifuge, turbine Pelton, banc aéraulique avec diffuseur, grille d'aubes, soufflerie supersonique).

Pour illustrer leur thème, les élèves disposent de 18 installations expérimentales (quelques-unes étant présentées sur la Fig. 1). La liste en est donnée ci-dessous (certains postes sont multiples) :

- Anémométrie LDA (Laser Doppler Anemometry)
- Banc d'essai de convection libre
- Banc hydraulique
- Conduite à air, conduite à eau (2 postes), conduite à huile

- Conduite chauffée (convection forcée)
- Diffuseur (2 postes)
- Grille d'aubes (2 postes)
- Jets circulaires / Jet plan (4 postes)
- Pompe centrifuge
- Soufflerie supersonique
- Turbine Pelton

Ces installations sont utilisées par les élèves, partiellement ou dans leur intégralité, pendant des durées variant de une à quatre heures, pour étudier un système complexe, ou mettre en évidence un phénomène physique particulier, ou pour qualifier une métrologie particulière.

12 postes informatiques sont également à disposition, connectés au réseau. Ces postes proposent divers outils de calcul et de traitement de données (Matlab, Excel), des logiciels de simulation des écoulements (FLUENT®, avec le mailleur GAMBIT), ainsi qu'un accès au Serveur Pédagogique de l'ECL.

3.2 Les fiches techniques

Certains postes étant dédoublés, les installations sont décrites dans 14 fiches techniques toutes réalisées sur le même modèle, à savoir trois pages contenant une présentation générale, les caractéristiques du banc et de l'instrumentation dédiée, les expériences réalisables sur cette installation et quelques résultats obtenus.

Elles sont indispensables aux élèves pour identifier les installations pouvant servir de support à l'illustration de leur thème.

Une notice technique décrit également le fonctionnement du logiciel FLUENT® et de son mailleur GAMBIT.

3.3 Les ressources scientifiques et techniques

En dehors de leur cours, et de tout document qu'il leur semblera utile de consulter, les élèves disposent de 17 ressources pédagogiques au contenu plus ciblé. Ces documents de taille variable (entre une page et une quinzaine de pages) peuvent :

- rappeler des bases théoriques : nombres sans dimension usuels, pertes de charge en conduite, échange de chaleur par rayonnement
- traiter de configurations d'écoulement spécifiques : structure du jet libre, longueur d'établissement en conduite, bilan de quantité de mouvement en grille d'aubes
- lister des caractéristiques physiques : constantes physiques de l'air et des métaux
- analyser le fonctionnement de systèmes complexes : pompe centrifuge, turbine Pelton
- porter sur une métrologie particulière : anémométrie à fil chaud, anémométrie LDA, mesure de pression, mesure de très faible pression (jauges de Pirani, de MacLeod), capteurs de température, mesure de débit d'eau, mesure de débit par diaphragme et tube de Venturi

Cette énumération n'est ni exhaustive, ni définitive.

4 Le déroulement de la séquence de travail

Les élèves viennent, groupés par 24, pour 4 séances consécutives. Le séquencage de ces séances est la suivante :

- une première séance de 2 heures (dite de "Choix et mise en place"), consacrée à la mise en place des groupes, au choix des thèmes et à la définition des objectifs et des travaux à réaliser
- les deux séances suivantes de 4 heures (dites de "Réalisation"), dédiées aux travaux pratiques proprement dits (expérimentaux et numériques)

- une dernière séance de 2 heures (dite de "Restitution"), consacrée à la restitution de chaque groupe à l'ensemble des autres groupes (présentations orales avec rapport écrit)
- un travail personnel en autonomie est réclamé aux élèves entre la 3^{ème} séance et cette dernière séance, afin de procéder à l'analyse et à la synthèse des résultats, puis de préparer la séance de restitution.

Lors de la première séance, les élèves se répartissent en 6 groupes de 4 élèves. Chaque groupe doit alors choisir un thème différent à traiter.

Un thème se doit d'être illustré par au moins 2 travaux, et au plus 4 travaux (expérimentaux et/ou numérique). Deux travaux minimum, afin d'assurer un travail de synthèse expérimental. Quatre travaux maximum, afin de ne pas trop complexifier l'organisation pratique et risquer une dilution du message (cela doit rester des manipulations de travaux pratiques).

4.1 La séance de choix et de mise en place

Cette première séance est réalisée avec un effectif de 24 élèves. D'une durée de 2 heures, elle constitue la phase de réflexion, d'organisation et de choix. Dans cet esprit, une grande liberté est donnée aux élèves, les enseignants n'étant théoriquement présents que pour présenter le travail à réaliser, donner des compléments d'information, et éventuellement, recadrer ou procéder à des arbitrages. Cependant, cette séance nécessite la plus grande vigilance de la part des enseignants, du fait de l'impact sur la suite du déroulement du processus qui peut s'avérer décisif. Cette séance se déroule en trois phases.

- Accueil des élèves par les enseignants.

L'enseignant présente aux élèves l'organisation complète de la séquence, les libertés mais aussi les contraintes qui en découlent, les documents mis à disposition, le travail demandé, les modalités du contrôle des connaissances, la liste des thèmes proposés.

- Première phase de consultation, de réflexion et de décision des élèves.

Après consultation des fiches de thèmes et après concertation, les élèves doivent définir la composition de chaque groupe (6 groupes de 4 élèves), désigner les responsables (chargés du dialogue entre groupes et des éventuels arbitrages) et choisir les thèmes.

Les enseignants valident la composition de ces groupes : ils s'assurent notamment que les étudiants ayant suivi des cursus différents – universités françaises ou étrangères – sont harmonieusement répartis dans les groupes afin de profiter de cette pluralité des connaissances, voir des cultures.

Ils procèdent aussi aux arbitrages éventuels en cas de conflit entre groupes pour le choix des thèmes : l'autorégulation fonctionnant à merveille, cela conserve un caractère exceptionnel.

- Deuxième phase de consultation, de réflexion et de décision des élèves.

Après consultation des fiches techniques des installations et des ressources pédagogiques, chaque groupe se définit les objectifs d'étude pour son thème, choisit les installations pour l'illustrer, puis se répartit le travail à l'intérieur du groupe.

Cela se concrétise par la réalisation de deux documents (à valider par les enseignants) : la fiche d'objectifs qui servira de fil rouge aux élèves, mais aussi aux enseignants tout au long de la séquence, et la feuille de route qui gère l'occupation des installations.

4.2 Les séances de réalisation

Ces 2 séances de 4 heures se déroulent sur la plate-forme pédagogique du Département, constituée des installations expérimentales et d'une salle informatique. La gestion de ces deux créneaux est largement laissée à l'appréciation des élèves. Cependant :

- les manipulations expérimentales doivent se dérouler impérativement dans les créneaux horaires pré-établis dans la feuille de route. Les créneaux où les installations sont libres, peuvent cependant être utilisés à leur convenance par une partie des élèves d'un groupe (pour des compléments d'information, des recentrages du thème...)

- les études numériques peuvent, elles, se dérouler en parallèle avec les études expérimentales : cela ressort d'une gestion interne au groupe.

Le rôle des enseignants se situe à deux niveaux. D'abord, bien sûr, intervenir en tant que ressource tout au long de ces séances, que ce soit sur les aspects pratiques ou théoriques. Mais aussi être le garant de la continuité et de la cohérence de l'ensemble de la séquence, ce qui consiste à :

- effectuer un point d'étape à la fin de la première séance afin de vérifier si les objectifs ont été atteints, et éventuellement les retoucher sur la fiche d'objectifs

- réaliser un débriefing avec les élèves à la fin de la seconde séance, afin de valider leur données, les préparer au travail d'analyse et de synthèse qu'ils vont réaliser en autonomie et, enfin, bien leur préciser, sur le fond et sur la forme, ce que l'on attend d'eux à la séance de restitution.

Une illustration des résultats obtenus dans une configuration d'écoulement supersonique en tuyère est présentée sur la Fig. 2. Les mesures (tube de Pitot et prises de pression pariétales) permettent de déterminer le nombre de Mach selon une hypothèse d'écoulement isentropique 1D. A côté, un modèle analytique 1D donne l'évolution du Mach à partir de la variation de section géométrique. Enfin, un calcul RANS FLUENT® 2D est aussi exploité. On notera tout d'abord les différents niveaux de description, avec notamment la prise en compte des couches limites et des effets 2D dans FLUENT®. Les résultats doivent aussi être analysés en fonction des hypothèses associées à chaque approche. On remarque ainsi que la prise en compte des effets 2D et visqueux n'a que peu d'influence dans le contexte de cette étude.

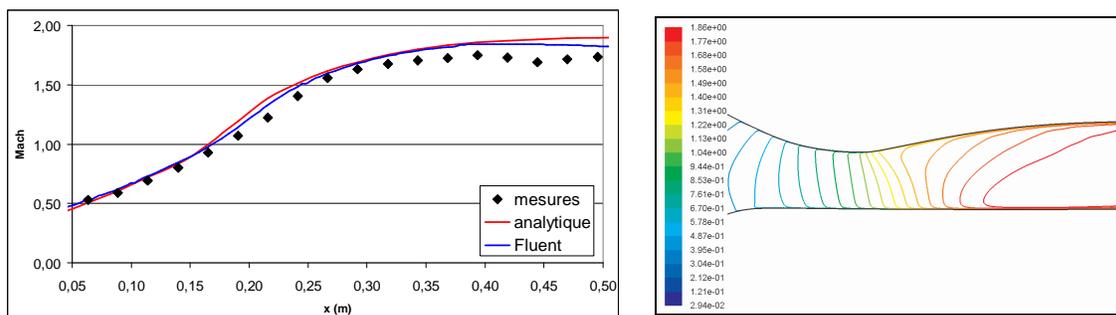


FIG. 2: *Gauche*: évolution axiale du nombre de Mach, *Droite*: lignes de niveaux de Mach calculées dans la tuyère 2D par FLUENT®.

4.3 La séance de restitution. Les livrables

L'objectif premier de cette dernière séance est la mise en commun des travaux réalisés par les 6 groupes d'élèves. Elle participe aussi au contrôle des connaissances. D'une durée de 2 heures, elle est réalisée avec un effectif de 24 élèves. Chaque groupe arrive en séance avec un

document écrit de synthèse, et se présente avec des supports pour une présentation orale. Ce document et cette présentation constituent les deux livrables.

En ce qui concerne le document écrit, d'une dizaine de pages, il doit mettre en lumière de façon synthétique les principaux concepts ou applications. L'élève est guidé dans cet exercice, qui reste difficile, par un cahier des charges relativement précis, qui peut se décliner ainsi : présentation du thème, description des expériences choisies pour l'illustrer (installation, instrumentation, conditions de fonctionnement...), présentation de la procédure expérimentale, du choix des points de mesure, présentation et analyse des résultats obtenus (estimation des incertitudes, interprétation physique...), comparaisons avec des prévisions analytiques, des simulations numériques, synthèse.

En ce qui concerne la présentation orale, sa durée globale est fixée à 20 minutes par groupe, dont 10 minutes de pure présentation et 10 minutes de questions émanant des (cinq) autres groupes et des enseignants. Le groupe d'élève doit veiller à la forme de sa présentation qui, s'adressant à d'autres élèves, doit être pédagogique, mais aussi au respect du timing qui est une contrainte forte. Il doit également apporter des réponses pertinentes et convaincantes aux questions de ses camarades.

5 Le contrôle des connaissances

Le contrôle des connaissances inclut évidemment, à parts égales, la qualité des deux livrables précédents. Mais deux autres éléments interviennent également.

Le premier concerne l'implication et la réactivité des élèves au cours des séances de réalisation. Dans la mesure où un groupe peut avoir affaire à plusieurs enseignants au cours de ces séances (jusqu'à 6 différents – 2 séances à 3 enseignants), cette évaluation nécessite une organisation sans faille et l'existence d'une réelle équipe pédagogique (débriefing à la fin de chaque séance, remplissage d'une fiche d'observation...)

Le second élément concerne les absences en séance. L'organisation et l'esprit qui préludent à la séquence de 12 heures de travail induisent de fortes contraintes à la fois pour les enseignants et les élèves. Dans ce contexte, les absences ne sont pas récupérables et ne sont acceptées qu'en cas de force majeure. Dans le cas contraire elles sont pénalisées au prorata, mais force est de constater que ces cas restent à la marge.

6 Conclusions et perspectives

Après 5 ans de fonctionnement, il est possible de faire un bilan de cette méthode, d'autant que la procédure d'évaluation systématique des enseignements à l'ECL nous donne des informations factuelles sur la perception qu'en ont les élèves. Les retours sont globalement très positifs, les élèves louant l'apprentissage par la pratique, la diversité des thèmes et moyens proposés, le travail en groupe et l'autonomie. Mais le mot qui revient le plus souvent dans les commentaires est « liberté » : liberté dans le choix, liberté dans la conduite et liberté d'action par rapport à l'enseignant. Les étudiants se sentant réellement acteurs de leur formation, celle-ci devient de ce fait beaucoup plus efficace.

Le système peut cependant être enrichi de part son caractère ouvert : des thèmes nouveaux peuvent émerger, de nouvelles installations peuvent enrichir le parc (un banc d'essai de turboréacteur à caractère pédagogique est en cours d'installation, l'intégration de manipulations existantes dans le domaine de l'énergétique est projetée).

Le système peut aussi être amélioré. Il est d'ores et déjà décidé de laisser la phase de dépouillement des résultats se réaliser en autonomie et, en contre partie, de mieux encadrer les phases d'analyse et de synthèse afin de mieux valoriser le travail réalisé. Afin de lever l'ambiguïté ressentie par les élèves lors de la présentation orale, résultant de son double objectif

(restitution du travail s'adressant aux autres élèves, et contrôle des connaissances s'adressant aux enseignants), ces deux aspects seront également découplés.

La réforme des enseignements de tronc commun (1^{ère} et 2^{ème} années), qui sera effective à la rentrée 2009 et dont un des objectifs est de renforcer la composante de l'apprentissage en autonomie, nous donne l'opportunité de mettre rapidement en place ces évolutions.

Du point de vue des enseignants, cette pratique est certes exigeante. Il est nécessaire de s'assurer en séance de la complémentarité de leurs compétences, mais aussi des niveaux de leur expérience, quel que soit le contexte à chaque fois différent. Il s'agit également d'assumer le suivi dans le temps d'un groupe d'élève par de nombreux intervenants différents. Mais cette pratique est aussi particulièrement motivante. Les questions soulevées par les élèves, sans cesse différentes, contribuent à enrichir nos propres approches et à élargir le spectre des compétences de nos jeunes collègues. De plus, la relation étudiants-enseignants a été grandement améliorée et la cohésion de l'équipe enseignante en est sortie renforcée.

Nous ne saurions conclure sans avoir une pensée émue pour notre collègue Frédéric Plaza, artisan majeur et enthousiaste de cette réforme, qui nous a quittés prématurément il y a quelques semaines.

Remerciements

Les auteurs remercient Fluent France pour la mise à disposition du code de simulation FLUENT® associé au mailleur GAMBIT.