

2EL2020 - Physique de la matière divisée

Responsables : **Hervé DUVAL**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30**

Année académique : **2024-2025**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **oui**

Présentation, objectifs généraux du cours :

"God made solids, but surfaces were the work of the devil" (Wolfgang Pauli)

Plus la matière est divisée (en d'autres termes, plus la taille caractéristique d'un système, solide ou liquide, est petite), plus son comportement est dominé par les forces de surface. Corrélativement, le rôle des forces de volume telle que la gravité par exemple, devient négligeable. L'échelle de taille des systèmes qui nous intéressent ici s'étend typiquement de 10 nm à 1 mm. Les formes de la matière divisée sont multiples : bulles, gouttes, films liquides, colloïdes...

Ces systèmes sont très présents autour de nous. Les applications concernent la biologie (feuilles super-hydrophobes, film liquide à la surface des alvéoles pulmonaires, bulle de cavitation formée par la crevette-pistolet), l'environnement (rôle des gouttes de pluie dans la biosphère, ensablement des estuaires), l'industrie (fabrication d'émulsions pour les industries cosmétique, pharmaceutique ou agro-alimentaire, mousses extinctrices ou isolantes, traitements de surface, lab-on-a-chip) ou la vie quotidienne (larmes du vin, remontée capillaire dans les maisons ou les monuments historiques). Un grand nombre d'innovations industrielles repose sur la mise en œuvre et la maîtrise de ces systèmes. Dans le cadre de ce cours, nous découvrirons les phénomènes liés à la capillarité et au mouillage, la dynamique des interfaces et les instabilités associées. Nous examinerons également le rôle de l'énergie interfaciale lors de l'apparition (germination) d'une nouvelle phase. Enfin, nous aborderons quelques aspects plus spécifiques à l'échelle colloïdale (inférieure au micromètre) : mouvement brownien, forces DLVO.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence) :

SG8

Prérequis :

Sciences des transferts (conseillé)

Plan détaillé du cours (contenu) :

Le cours s'articule en trois volets : 9h de **cours de base et de travaux dirigés associés**, 12h consacrées à des **études de cas**, 9.5h dédiées à la réalisation d'un **miniprojet** et à son rendu.

Concepts de base (3 x (1.5h de cours + 1.5h de TD))

1) Notion de tension de surface

Origine physique

Les points de vue thermodynamique et mécanique

Capillarité : loi de Laplace

Interfaces et conditions aux limites des équations de Navier-Stokes

Minimisation d'aire et surfaces minimales

TD n°1 : Ménisques de liquide, forces capillaires, cheveux mouillés et insectes sur l'eau

2) Mouillage

Surfaces solides idéales : loi de Young-Dupré

Hystérésis d'angle de contact

Influence de la rugosité de surface

Influence des hétérogénéités chimiques

Vers les surfaces superhydrophobes

Dynamique de la ligne triple

TD n°2 : Modélisation des angles de contact d'équilibre sur des surfaces texturées

3) Tensioactifs : équilibre et dynamique

Des molécules amphiphiles

Concentration de surface et équation d'adsorption de Gibbs

Micelles et concentration micellaire critique

Tension de surface dynamique et dynamique des tensioactifs

Rhéologie interfaciale

TD n°3 : Formation et drainage d'un film de savon

Etudes de cas (4 x 3h)

Chaque étude de cas donne l'opportunité de se pencher sur un phénomène particulier, d'intérêt industriel ou pratique, d'appliquer les concepts introduits dans la première partie du cours et de se familiariser avec différentes méthodes de modélisation ou outils mathématiques. Les études de cas ont la forme de « grands TD », réalisés par groupes de 3 à 4 étudiants et encadrés par un enseignant. La durée de 3h par étude laisse le temps à chaque groupe de bien s'approprier le sujet, de construire sa démarche et d'élaborer sa solution, en autonomie, avec l'appui méthodologique de son encadrant. A l'issue des 3h, chaque groupe fournit un compte rendu écrit (manuscrit ou par traitement de texte, au choix) de son travail.

5) Montée capillaire et imbibition

De l'ascension de la sève brute dans les arbres à la fabrication de matériaux composites

Hauteur d'équilibre dans un tube vertical

Dynamique de l'imprégnation : régime inertiel et régimes visqueux

Montée dans un coin

6) Drainage et dépôt de films liquides sur une plaque plane verticale

Des traitements anti-corrosion aux couches anti-reflet des verres à lunette

Drainage d'un film de liquide

Enduction par trempage

Analyse en loi d'échelle

Théorie de Landau-Levich-Derjaguin : ménisque dynamique et raccordement asymptotique

7) Etalement de gouttes

Revêtements, impression à jet d'encre et enquêtes criminelles

Angle de contact dynamique et vitesse de la ligne triple

Cas du mouillage parfait : loi de Tanner

Influence de la vitesse d'impact sur le diamètre d'étalement maximal

Les différents régimes d'impact

8) Mesure de tension de surface

Cette étude de cas comporte une partie expérimentale. Elle est réalisée dans les salles de travaux pratiques du Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux (bâtiment EIFFEL, Univers Vivant). Deux techniques de mesure de tension de surfaces sont mises en oeuvre, analysées et modélisées: La méthode de la goutte pesée (ou stalagmométrie)
La méthode de la goutte pendante

Miniprojet (7.5h + 2h)

Le mini-projet est l'occasion d'étudier plus en détails un phénomène physique, un système ou un objet relevant de la physique de la matière divisée. Il permet non seulement d'appliquer et d'approfondir les différents concepts abordés en cours mais aussi d'explorer d'autres pans de la physique de la matière divisée. Le miniprojet est réalisé par groupes de 3 à 4 étudiants. A titre d'exemple, voici une liste non exhaustive de thèmes choisis par différents groupes les années précédentes : Ascension de la sève dans les arbres, Physique des pièges utilisés par les plantes carnivores, Marangony bursting, Détergence et rolling-up, Caléfaction, Analyse de l'impact de gouttes en science forensique, Gerris artificiel ... Partant du thème retenu, le travail consiste à :

- dégager une problématique,
- réaliser et présenter des expériences de « coin de table » permettant d'illustrer le thème et/ou la problématique choisie
- identifier les mécanismes physiques mis en jeu
- au choix : conception d'une expérience, campagne d'essais, analyse des résultats expérimentaux et proposition d'un modèle simple permettant de rendre compte de ces résultats OU développement d'un modèle plus complexe, implémentation informatique, étude paramétrique et analyse/discussion des résultats obtenus

Les livrables sont :

- Un fichier ppt qui rend compte du travail effectué (le support de la présentation orale + annexes détaillant les expériences, les calculs, la liste des références bibliographiques)
- Un exposé oral de 20 min avec une démonstration du code ou un film de la manip en fonctionnement, suivi de 10 min de questions (durée ajustée en fonction du nombre de groupes)

Déroulement, organisation du cours :

Le cours s'articule en trois volets (voir Contenu pour de détails sur chacun des volets): 9h de cours de base et de travaux dirigés associés, 12h consacrées à des études de cas (incluant 3h de travaux pratiques), 9.5h dédiées à la réalisation d'un miniprojet et à son rendu.

Organisation de l'évaluation :

Contrôle continu (note sur 6, basée sur les rendus à l'issue de chaque étude de cas) + Miniprojet (note sur 14, Fichier ppt + soutenance orale + réponses aux questions)

Moyens :

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Hervé Duval, Marie-Laurence Giorgi, Irma Liascukiene, Jacopo Seiwert
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 35
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : ImageJ (logiciel libre), python avec les modules scipy, matplotlib et numpy (logiciel libre)
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : aucune

Acquis d'apprentissage visés dans le cours :

A l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables de :

- Lister et expliquer les mécanismes et phénomènes physiques intervenant dans les systèmes dispersés les plus courants, dans l'industrie ou la vie quotidienne;
- Définir et calculer les longueurs, temps et vitesses caractéristiques associés ;
- Interpréter le comportement dynamique d'un système dispersé ;
- Construire un modèle capturant l'essentiel de la physique de ce système et permettant de décrire son évolution ;
- Proposer un dispositif/protocole expérimental permettant de valider ce modèle.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

:

C1.1 : Examine problems in their entirety and beyond their immediate parameters. Identify, formulate and analyse the scientific, economic and human dimensions of a problem.

C1.2 : Develop and use appropriate models, choosing the correct modelling scale and simplifying assumptions when addressing a problem.

C1.3 : Solve problems using approximation, simulation and experimentation.

C2.1: Thoroughly master a domain or discipline based on the fundamental sciences or the engineering sciences.

Bibliographie :

- Matériel de cours fourni : copie des slides, énoncés des problèmes, corrigés
- Quelques références bibliographiques :
 - P.G. de Gennes, F. Brochard-Wyart and D. Quéré, Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves, Springer, New York, 2004.
 - J. Israelachvili, Intermolecular and surface forces, Academic Press, Elsevier, 3rd edition, 2011.
 - E. Guyon, J.P. Hulin, L. Petit, Hydrodynamique physique, EDP Sciences, 3ème édition, 2012.