

# TP Phénomènes de transfert



Composante  
École Nationale  
Supérieure des  
Ingénieurs en  
Arts Chimiques



Volume horaire  
35h

## En bref

> **Code:** LP1A3CC2

> **Ouvert aux étudiants en échange:** Oui

## Présentation

### Objectifs

Cette série de travaux pratiques vise à renforcer la maîtrise des principes fondamentaux des transferts de quantités de mouvement, de chaleur et de matière en permettant aux étudiants de manipuler des petits pilotes. Ces TP offrent une approche expérimentale pour mieux comprendre les mécanismes de transport en s'appuyant sur les connaissances théoriques acquises dans ces domaines.

Les objectifs visés sont :

- Se familiariser avec les principaux concepts de transferts de quantités de mouvement, de chaleur et de matière.
- Appliquer les connaissances théoriques par des expériences pratiques en utilisant des équipements de laboratoire spécifiques.
- Observer, décrire, et analyser les phénomènes pour évaluer les paramètres clés et mieux appréhender les phénomènes de transport.
- Rédaction de compte rendus correspondant à un cahier des charges prédéfini

### Pré-requis obligatoires

Avoir suivi des enseignements similaires à ceux de Phénomènes de Transfert du tronc commun, le cours de SPRM ainsi que les enseignement de génie thermique et de phénomène de transfert II de l'école.

### Syllabus

Cette série de séances de travaux pratiques comprend deux séances de mécanique des fluides, une séance de rhéologie, trois séances dédiées au transfert de matière ainsi que trois séances relatives au transfert de chaleur ainsi qu'une séance de régulation..

## TP mécanique des fluides

Ces TP permettront de couvrir divers aspects de la mécanique des fluides, allant de l'étude de l'écoulement d'air dans un convergent-divergent à l'étude des pertes de charge dans les systèmes de canalisations.

### 1. Écoulement d'air dans un conduit convergent-divergent

#### Objectifs :

- Vérifier l'équation de continuité dans un écoulement d'air à travers un conduit convergent-divergent.
- Déterminer le profil de vitesse et analyser l'effet de la variation de section.
- Mesurer le coefficient de traînée autour d'une sphère et d'une aile profilée.

#### Résultats attendus :

- Profil de vitesse dans un conduit convergent-divergent. Analyse des différences entre partie amont et aval.
- Coefficients de traînée pour les objets étudiés.

### 2. Banc de mécanique des fluides

#### Objectifs :

- Étudier l'influence de la nature des canalisations (rugosité, diamètre) sur les pertes de charge.
- Déterminer le facteur de friction et le taux de rugosité.
- Analyser les pertes de charge dans un diaphragme, un venturi et pour des coudes possédant des angles d'ouverture différents .
- Analyser l'influence des variations de section (convergent-divergent et diaphragme) sur les vitesses et les pertes de charge.
- Étudier l'influence de l'angle d'ouverture de différents coudes sur les pertes de charge dans un circuit de fluide, déterminer la longueur droite équivalente pour chaque configuration de coude.

#### Résultats attendus :

- Courbes pertes de charge vs débit pour différents types de conduites.
- Facteurs de friction et taux de rugosité pour les canalisations étudiées.
- Courbes pertes de charge vs angle d'ouverture.
- Longueurs droites équivalentes pour les différents coudes étudiés.

## TP Rhéologie

Ce TP permet d'appréhender les différents comportements rhéologiques et d'approfondir la compréhension des lois qui régissent les fluides newtoniens et non-newtoniens dans des conditions expérimentales variées.

#### Objectifs :

- Utiliser deux types de rhéomètres (viscosimètre à chute de bille et viscosimètre de Couette) pour caractériser les propriétés rhéologiques d'un fluide newtonien et d'un fluide non-newtonien.
- Déterminer les paramètres rhéologiques tels que la viscosité dynamique pour un fluide newtonien et les indices de comportement et de consistance pour un fluide non-newtonien.
- Étudier l'influence de la température sur les paramètres rhéologiques de ces fluides.

### Résultats attendus :

- Comparer les variations de viscosité des fluides newtoniens et non-newtoniens en fonction de la température.
- Analyser l'impact de la température sur les paramètres rhéologiques des fluides non-newtoniens.
- Discuter des limites et de la précision des deux types de viscosimètres utilisés.
- Transfert de chaleur

Étude du transfert de chaleur avec changement de phase

Cette séance de TP permet d'illustrer les mécanismes de transfert de chaleur essentiels pour l'ingénierie thermique et les systèmes de gestion thermique et de visualiser les différents régimes d'ébullition. Ce TP vise notamment à comprendre les mécanismes de transfert de chaleur associés à un changement de phase : l'ébullition et la condensation et à analyser les différentes phases du processus d'ébullition. Les étudiants utiliseront le **diagramme de Nukiyama** pour étudier l'ébullition nucléée et à film et ils exploreront la relation entre le flux de chaleur et la différence de températures entre l'élément chauffant et le fluide chauffé dans différentes conditions thermiques.

### Contenu du TP :

- Visualisation et mise en évidence des différents modes de transfert de la chaleur (convection naturelle, forcée, ébullitions nucléée et à film).
- Utilisation du diagramme de **Nukiyama** illustrant la relation entre le flux de chaleur et la différence de températures.

### Compétences développées :

- Manipulation de bancs d'essai pour mesurer les flux thermiques et les températures lors d'un changement de phase.
- Analyse des résultats expérimentaux et identification des différents régimes d'ébullition à partir des courbes obtenues.
- Interprétation des phénomènes physiques associés à l'ébullition et à la condensation en relation avec la sécurité et les applications industrielles (refroidissement de réacteurs, échangeurs de chaleur, etc.).
- Modélisation du transfert de chaleur lors d'un changement de phase et application du diagramme de **Nukiyama** dans des situations pratiques.

Étude du transfert de chaleur dans un échangeur à courants croisés

Ce TP a pour objectif de familiariser les étudiants avec le fonctionnement des **échangeurs de chaleur à courants croisés**, d'étudier l'influence du débit d'air et de la position d'un tube dans un faisceau de tubes sur l'efficacité de l'échange thermique et d'introduire l'analyse dimensionnelle des mécanismes de transfert de chaleur et d'écoulement.

### Contenu du TP

- Influence du débit d'air traversant l'échangeur sur les valeurs du coefficient d'échange thermique par convection.
- Introduction aux nombres adimensionnels importants dans le transfert de chaleur : **nombre de Reynolds (Re)**, **nombre de Nusselt (Nu)**, et **nombre de Prandtl (Pr)**.
- Étude de l'influence de la position du tube dans le faisceau (entrée, milieu, arrière, haut et bas) sur le transfert de chaleur.
- Impact de la turbulence de l'écoulement de l'air autour des tubes sur le coefficient de transfert thermique.

### Compétences développées

- Manipulation d'échangeurs à courant croisé et utilisation d'appareils de mesure (débitmètres, thermocouples, capteurs de pression).

- Calcul des coefficients de transfert thermique et analyse des performances d'un échangeur en fonction de la disposition des tubes et du débit d'air.
- Compréhension de l'analyse adimensionnelle et utilisation des corrélations adimensionnelles pour modéliser les transferts de chaleur dans des systèmes complexes.
- Capacité à interpréter l'impact de la turbulence, des régimes d'écoulement et de la géométrie sur l'efficacité thermique des échangeurs
- Étude du transfert de chaleur dans un échangeur coaxial eau-eau

Ce TP a pour but d'étudier le fonctionnement et les performances d'un échangeur de chaleur **coaxial à contre-courant**. Les étudiants analyseront l'influence du débit et de la température du fluide chaud sur le transfert thermique et utiliseront une approche adimensionnelle (nombre de Nusselt, Reynolds, et Prandtl) pour interpréter les résultats et modéliser le phénomène de transfert de chaleur.

## Contenu du TP

- Présentation du principe de l'échangeur coaxial à contre-courant pour lequel deux fluides circulent en sens opposé dans des conduits concentriques (fluide chaud dans la partie centrale et fluide froid dans la partie périphérique).
- Discussion des avantages de l'écoulement à contre-courant pour maximiser le transfert thermique.
- Étude de l'impact du débit volumique du fluide chaud sur le transfert de chaleur.
- Relation entre le **nombre de Nusselt et le nombre de Reynolds**
- Étude de l'impact de la température moyenne du fluide chaud sur le transfert de chaleur
- Relation entre le **nombre de Nusselt et le nombre de Prandtl**

## Compétences développées

- Manipulation d'un échangeur coaxial à contre-courant et utilisation d'instruments de mesure (thermocouples, débitmètres).
- Calcul du **flux thermique** échangé et détermination des **coefficients de transfert thermique** en fonction des conditions opératoires.
- Compréhension et application des corrélations adimensionnelles (nombre de Nusselt, Reynolds et Prandtl) pour modéliser le transfert thermique.
- Analyse des effets des paramètres expérimentaux (débit, température) sur les performances thermiques de l'échangeur.
- Transfert de matière

### Détermination du Coefficient de Diffusion en Phase Gazeuse

Ce TP permet de comprendre le mécanisme de diffusion en phase gazeuse et d'illustrer l'influence de la température sur ce processus en offrant une application concrète de la cinétique des gaz.

### Objectifs :

- Déterminer le coefficient de diffusion de l'hélium dans l'azote à l'aide de la méthode du temps d'arrêt.
- Étudier l'influence de la température sur le coefficient de diffusion.

### Résultats attendus :

- Coefficient de diffusion de l'hélium dans l'azote pour différentes températures.
- Vérification de l'ordre de grandeur attendu et comparaison avec les valeurs calculées à partir des relations vues dans le cours de SPRM.
- Étudier les implications pratiques du coefficient de diffusion déterminé dans les procédés industriels ou naturels.
- Étude du transfert de matière entre de l'eau et de l'air dans une colonne à disques mouillés.

L'objectif de ce TP est d'étudier l'influence de l'écoulement du fluide sur l'efficacité du transfert de matière lors du processus d'humidification de l'air dans une colonne à disques mouillés. Les étudiants utiliseront l'approche HUT/NUT (Hauteur d'Unité de Transfert / Nombre d'Unité de Transfert) pour analyser les résultats et pour dimensionner une colonne pour une humidité de sortie fixée. Utilisation d'une cellule psychrométrique et du diagramme de l'air humide.

#### Contenu du TP :

- Présentation du principe d'une colonne à disques mouillés pour laquelle l'air entre en contact avec une surface mouillée pour s'humidifier.
- Rappel des bases théoriques du transfert de matière incluant les notions de gradient de concentration et d'enthalpie du système air-eau.
- Définition des notions du concept de **Hauteur d'Unité de Transfert (HUT)**, **Nombre d'Unité de Transfert (NUT)**, efficacité de transfert, de coefficient global de transfert de matière et de l'impact des conditions d'écoulement sur ces paramètres.
- présentation de l'utilisation d'une cellule psychrométrique et de son utilisation avec le diagramme de l'air humide.
- Mesure de l'humidité de l'air en sortie de la colonne pour différents débits et vitesses d'écoulement.
- Effet du débit d'air et du débit d'eau sur l'efficacité de l'humidification.
- Utilisation des résultats expérimentaux et des corrélations HUT/NUT pour dimensionner une colonne à disques mouillés. Calcul de la hauteur de la colonne pour atteindre une humidité en sortie souhaitée.

#### Compétences développées :

- Manipulation de colonnes à disques mouillés et compréhension des mécanismes d'humidification de l'air.
- Calcul des **coefficients de transfert de matière** et interprétation de l'efficacité de transfert en fonction des conditions opératoires.
- Application des concepts HUT et NUT pour l'analyse et le dimensionnement d'une colonne de transfert de matière.
- Compréhension de l'influence des conditions d'écoulement (débits, vitesse de rotation des disques) sur l'efficacité du processus.
- Étude du transfert de matière liquide/solide par méthode électrochimique
- Ce TP vise à étudier le transfert de matière à une interfaces liquide/liquide liquide/solide à l'aide d'une méthode électrochimique. Les étudiants examineront le comportement du système en régime permanent et transitoire pour déterminer le **coefficient de transfert de matière**, le **coefficient de diffusion**, ainsi que l'**épaisseur de la couche limite**. La détermination des conditions opératoires sera réalisée via le tracé des courbes intensité-potentiel.
- **Contenu du TP :**

- Présentation des mécanismes de transfert de matière dans les systèmes hétérogènes (liquide/solide).
- Rappel des principes théoriques régissant le transfert de matière à l'interface : diffusion, convection et réactions de surface.
- Explication du principe de la méthode électrochimique : relation entre la vitesse de transfert de matière et la densité de courant dans une cellule électrochimique.
- Étude des courbes **intensité-potentiel** pour déterminer les paramètres opératoires du transfert de matière :
  - Analyse de la région de contrôle par diffusion
  - **Étude en régime permanent :**
    - **Influence du débit sur le coefficient de transfert de matière :**

- Mesure du flux de matière transférée en fonction du débit de liquide.
- Détermination du **coefficient global de transfert de matière** en écoulement laminaire.
- Utilisation de la méthode transitoire pour déterminer le **coefficient de diffusion** :
  - Utilisation de la technique de **chronoampérométrie** => Analyse de la réponse électrochimique au cours du temps pour mesurer le coefficient de diffusion du soluté.
  - Calcul du **coefficient de diffusion** à partir des données transitoires et comparaison avec des valeurs issues de la littérature.
- **Détermination de l'épaisseur de la couche limite** :
  - Approche pour évaluer l'**épaisseur de la couche limite** à partir des résultats expérimentaux.
  - Influence des conditions opératoires (débit) sur l'épaisseur de la couche limite.

### Compétences développées :

- Utilisation de **méthodes électrochimiques** pour l'étude du transfert de matière et la compréhension des mécanismes associés.
  - Analyse des **courbes intensité-potentiel** pour déterminer les régimes de transfert et les paramètres clés (coefficient de transfert de matière, coefficient de diffusion).
  - Calcul de l'**épaisseur de la couche limite** et analyse de son évolution en fonction des conditions opératoires.
  - Capacité à interpréter les résultats en régime permanent et transitoire et à les comparer aux modèles théoriques.
- 
- Transfert de chaleur/régulation de température
  - Étude d'un régulateur de température.

Ce TP a pour but d'étudier le fonctionnement des différents types de régulation de température : **Tout ou Rien**, **Proportionnel** et **PID** (Proportionnel-Intégral-Dérivé). Les étudiants analyseront le comportement des systèmes de régulation, comprendront les notions de **décroissement** et apprendront à régler un régulateur PID pour optimiser la stabilité et la performance du système.

### Contenu du TP :

- Présentation des principes de base de la régulation de température et des différentes méthodes de contrôle.
- **Régulation Tout ou Rien** : influence de la perturbation (puissance de refroidissement) sur les valeurs de la température (température moyenne, retard à la chauffe et au refroidissement).
- **Régulation proportionnelle** : introduction au concept de régulation proportionnelle où l'action de commande est proportionnelle à l'erreur. Étude de la réponse du système pour différentes valeurs du gain, Introduction à la notion de décroissement et détermination des paramètres d'un PID par la méthode de **Ziegler-Nichols**.
- **Régulation PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé)** : Étude de la réponse du système complet du PID. Expérimentation avec différents réglages des paramètres pour stabiliser le système et améliorer les performances (réduction du dépassement, stabilisation rapide).

### Compétences développées :

- Manipulation des régulateurs de température Tout ou Rien, Proportionnels et PID.
- Analyse des réponses du système en fonction des différents types de régulation.
- Réglage des paramètres du régulateur PID pour optimiser les performances du système.
- Compréhension des notions de stabilité, de dépassement, de temps de réponse et d'amortissement (décroissement).

- Utilisation des méthodes empiriques (Ziegler-Nichols) pour ajuster les paramètres du PID.

---

## Informations complémentaires

10 séances de 3,5 heures.

Dépôt d'un compte rendu sur le portail Moodle avant 21h30 le jour de réalisation des séances.