

## M1 Énergie - Maîtrise de l'énergie - Génie thermique

### Liste des Unités d'Enseignement (UE)

Semestre1	ECTS	Semestre 2	ECTS
<b>UE 1 : Simulation Numérique 1</b> <b>Simulation Numérique 1</b> (33% CM, 67% TP) 12h CM   24h TP   Coef. 4	4	<b>Simulation Numérique 2</b> <b>Simulation Numérique 2</b> (100% TP) 36h TP   Coef. 3	3
<b>UE 2 : Insertion professionnelle 1</b> <b>Anglais 1</b> (100% TD) 20h TD   Coef. 2 <b>Communication 1</b> (100% TP) 15h TP   Coef. 1 <b>Conduite de projets</b> (100% CM) 12h CM   Coef. 1	4	<b>UE 2 : Insertion professionnelle 2</b> <b>Anglais 2</b> (100% TD) 20h TD   Coef. 2 <b>Communication 2</b> (100% TP) 15h TP   Coef. 1 <b>Industrialisation</b> (100% CM) 10h CM   Coef. 1	4
<b>UE 3 : Projets applicatifs 1</b> <b>Applications 1 : transferts thermiques (Formation Initiale)</b> (100% TP) 32h TP   Coef. 3 <b>Projets industriels 1 (Formation Initiale)</b> (Autonomie)   Coef. 3 <b>Stage d'apprentissage 1 (Alternance)</b> (En entreprise) Coef. 6	6	<b>UE 3 : Projets applicatifs 2</b> <b>Applications 2 : transferts thermiques (Formation Initiale)</b> (100% TP) 32h TP   Coef. 3 <b>Projets industriels 2 (Formation Initiale)</b> (Autonomie)   Coef. 3 <b>Stage d'apprentissage 2 (Alternance)</b> (En entreprise) Coef. 6	6
<b>UE 4 : Conduction et rayonnement</b> <b>Conduction thermique</b> (50% CM, 50% TD) 18h CM   18h TD   Coef. 3 <b>Rayonnement thermique</b> (50% CM, 50% TD) 18h CM   18h TD   Coef. 3	6	<b>UE 4 : Mécanique des fluides avancée</b> <b>Écoulements diphasiques</b> (47% CM, 53% TD) 14h CM   16h TD   Coef. 3 <b>Écoulements turbulents</b> (47% CM, 53% TD) 14h CM   16h TD   Coef. 3	6
<b>UE 5 : Thermique industrielle 1</b> <b>Transferts convectifs et procédés humides</b> (50% CM, 50% TD) 20h CM   20h TD   Coef. 3 <b>Thermique appliquée 1</b> (100% TD) 24h TD   Coef. 3	6	<b>UE 5 : Thermique industrielle 2</b> <b>Échangeurs thermiques</b> (47% CM, 53% TD) 14h CM   16h TD   Coef. 3 <b>Thermique appliquée 2</b> (100% TD) 12h TD   Coef. 1	6

<b>UE 6 : Métrologie et calcul</b> <b>Maquettes numériques</b> (100% TP) 12h TP   Coef. 1 <b>Métrologie</b> (40% CM, 60% TD) 12h CM   18h TD   Coef. 3	<b>4</b>	<b>UE 6 : Régulation et automatique</b> <b>Régulation et automatique</b> (30% CM, 40% TD, 30% TP) 12h CM   16h TD   12h TP   Coef. 3	<b>3</b>
		<b>UE 7 : Techniques professionnelles</b> <b>Écoconception</b> (100% CM) 12h CM   Coef. 1 <b>Qualité, Normes et Environnement</b> (50% CM, 50% TD) 8h CM   8h TD   Coef. 1 <b>Risques industriels</b> (50% CM, 50% TD) 6h CM   6h TD   Coef. 1 <b>Thermique chauffage, ventilation, climatisation</b> (100% CM) 8h CM   Coef. 1	<b>4</b>

**Lieu d'enseignement :** Campus Sciences et Ingénierie, Saint Etienne du Rouvray

**Contact Master 1 Énergie MEGT :** [ufrst-master-me-gt@univ-rouen.fr](mailto:ufrst-master-me-gt@univ-rouen.fr)

**Responsables :** Pascal Boubert

**Scolarité :** [scolarite.sciencesmad@univ-rouen.fr](mailto:scolarite.sciencesmad@univ-rouen.fr) - 02 32 95 50 02

**Centre de formation continue et par alternance :** [ufrst.fc@univ-rouen.fr](mailto:ufrst.fc@univ-rouen.fr) - 02 35 14 65 19

## Description détaillée des contenus

Le M1 Énergie - Maîtrise de l'énergie - Génie thermique est la première année d'un parcours de master réalisable en formation initiale ou en alternance, et dont le but est de former des ingénieurs dans le domaine de l'efficacité énergétique dans les domaines de la production, du transport et de l'utilisation de l'énergie.

**Pré-requis :** Le Master Énergie - Maîtrise de l'énergie - Génie thermique est accessible aux titulaires :

- D'une licence générale en physique, mécanique-énergétique, physique-chimie ou énergie et matériaux.
- D'une licence professionnelle dans le domaine de l'énergétique et du génie thermique.
- D'un BUT3 Métiers de la Transition et de l'Efficacité Energétiques (MT2E) ou Mesures Physiques (MP)

**Niveau en mathématique requis :** Le travail d'ingénieur suppose une compréhension des phénomènes de transformation, de transfert et de stockage d'énergie et une capacité à modéliser ces phénomènes. Pour cela, l'étudiant.e doit maîtriser les outils du calcul mathématiques tels que les vecteurs, le calcul intégral et différentiel et la géométrie, entre autres. Une connaissance de l'informatique et de la programmation l'aiderait dans l'utilisation d'outils et le traitement des données expérimentales. Un dispositif de remédiation en mathématiques permet aux personnes ayant suivi un cursus technique de se mettre à niveau.

## Semestre 1

### UE 1 : Simulation Numérique 1

#### Simulation Numérique 1

Principes de la Mécanique des fluides numériques (CFD) - Numérisation des équations de Navier-Stokes - Volumes finis - Notion de maillage - Notion de pas de temps - Application à la turbulence et aux écoulements diphasiques.

### UE 2 : Insertion professionnelle 1

#### Anglais 1

Objectif : Maîtriser la communication à l'oral et à l'écrit en compréhension et en expression

Compétences et apprentissages visés : Gestion des informations liées à la culture scientifique et à la culture générale, dans des contextes universitaires et professionnels

- Répondre à des questions à partir d'articles (ou autre support)
- Répondre à des questions à partir de fichiers audios ou vidéos
- Prendre la parole dans différentes situations, seul ou en interaction
- Rédiger dans différents contextes, en temps réel ou non

#### Communication 1

Préparation à la recherche d'emploi/stage/alternance et entraînement à la communication en contexte professionnel. Objectifs : Savoir rédiger un CV et une lettre d'intention. Savoir se présenter à l'oral. Savoir présenter son projet professionnel.

## Conduite de projets

Planification d'un projet - Méthode PERT (Program Evaluation & Review Technique) - Définition d'un projet - Organisation - Répartition des tâches - Analyse des contraintes et des risques - Chronogrammes prévisionnels - Contrôle de réalisation - Gestion des conflits - Outils de gestion de projet - Compte-rendus de réunion.

### UE 3 : Projets applicatifs 1

#### Applications 1 : transferts thermiques (Formation Initiale)

Mise en application sur des bancs expérimentaux des notions étudiées dans les cours de convection, conduction et rayonnement thermiques. Sous forme d'un court projet de quatre heures, il s'agit de mettre en évidence des résultats expérimentaux à l'aide du matériel mis à disposition. Travail en binôme.

#### Projets industriels 1 (Formation Initiale)

Durant trois mini-projets d'une semaine puis dans le cadre d'un projet s'étendant de décembre à mai, il s'agit de mettre en œuvre les notions de conduite de projets sur des sujets concrets fournis par des entreprises. Un bureau d'études composé de deux à quatre étudiant.e.s est chargé de résoudre le problème proposé dans une démarche professionnelle encadrée par un tuteur pédagogique.

#### Stage d'apprentissage 1 (Alternance)

Pendant les périodes fixées par le calendrier d'alternance, les étudiant.e.s suivant la formation avec un contrat d'apprentissage ou de professionnalisation accomplissent les missions déterminées au début du contrat au sein de l'entreprise.

### UE 4 : Conduction et rayonnement

#### Conduction thermique

Mécanismes de la conduction thermique - Notion de flux thermique de conduction - Équation de bilan d'énergie avec échanges conductifs - Loi de Fourier - Conditions aux limites du système conductif - Nombres adimensionnels - Systèmes thermiquement minces - Théorie des ailettes - Conduction en régime stationnaire.

#### Rayonnement thermique

Grandeurs caractéristiques du rayonnement : luminance, exitance et éclairement - Corps noir et loi de Planck - Loi du déplacement de Wien - Exitance d'un corps noir : loi de Stefan - Fraction d'exitance du corps noir - Corps gris et corps gris par morceaux : émissivité et absorptivité, totales et spectrales - Facteurs de forme - Réflectivité et radisoté d'une surface

### UE 5 : Thermique industrielle 1

#### Transferts convectifs et procédés humides

Contexte industriel des écoulements laminaires et des procédés humides - Équations des couches limites en convection forcée - Équations du mouvement, nombre de Reynolds - Équation de l'énergie, nombre de Prandtl, Équation de transfert de matière, nombre de Schmidt - Calcul des corrélations :  $Nu(Re)$  - Écoulements laminaires stationnaires non-établis - Écoulements externes en convection forcée - Écoulements en convection naturelle - Applications : humidificateur à canaux parallèles, conduite de climatisation, aérosols, thermomètre humide, humidificateur à nid d'abeille, refroidissement d'une jarre de terre contenant de l'eau, humidificateur à milieu poreux granulaire, tour de refroidissement, capteur solaire, mur humide séché par le soleil, refroidissement d'une tasse de café.

#### Thermique appliquée 1

Deux projets à réaliser en groupe de trois au cours du semestre : problème d'éclairage (sujet commun) et application à un problème de conception d'un système thermique (sujets différenciés)

## UE 6 : Métrologie et calcul

### Maquettes numériques

Introduction au Building Information Modeling (BIM) et à l'utilisation du logiciel REVIT - Maquette architecturale - Maquette plomberie-ventilation.

### Métrologie

Systèmes d'unité - Erreurs et incertitudes de mesure - Capteurs en mécanique des fluides et en génie thermique - Notion de chaîne de mesure - Étalonnage et fonction de transfert - Sensibilité, fidélité et justesse d'un capteur - Problèmes de non linéarité, d'hystérésis et de bruit - Résolution, rapidité et temps de réponse - Capteurs de pression, de température et de débit. Application de la méthode 5M.

## Semestre 2

### UE 1 : Simulation Numérique 2

#### Simulation Numérique 2

Résolution de problèmes de mécanique des fluides anisothermes à l'aide du logiciel OpenFoam.

### UE 2 : Insertion professionnelle 2

#### Anglais 2

Objectif : Maîtriser la communication à l'oral et à l'écrit en compréhension et en expression

Compétences et apprentissages visés : Gestion des informations liées à la culture scientifique et à la culture générale, dans des contextes universitaires et professionnels

- Répondre à des questions à partir d'articles (ou autre support)
- Répondre à des questions à partir de fichiers audios ou vidéos
- Prendre la parole dans différentes situations, seul ou en interaction
- Rédiger dans différents contextes, en temps réel ou non

#### Communication 2

Savoir communiquer sur ses compétences à l'aide de la vidéo - Savoir présenter son activité ou son projet professionnel - Savoir présenter son cadre professionnel

#### Industrialisation

Gestion de la production - Phases d'industrialisation d'un produit - Étude de cas - Bureau d'études - Nomenclature d'étude et d'assemblage - Gamme de fabrication - Notion de Takt time - Calcul des coûts - Planification - Calcul des besoins

### UE 3 : Projets applicatifs 2

#### Applications 2 : transferts thermiques (Formation Initiale)

Mise en application sur des bancs expérimentaux des notions étudiées dans les cours d'écoulements diphasiques, d'écoulement turbulents et d'échangeurs thermiques. Sous forme d'un court projet de quatre heures, il s'agit de mettre en évidence des résultats expérimentaux à l'aide du matériel mis à disposition. Travail en binôme.

#### Projets industriels 2 (Formation Initiale)

Suite du projet annuel entamé au premier semestre. Mise en œuvre des notions de conduite de projets sur des sujets concrets fournis par des entreprises. Un bureau d'études composé de deux à quatre étudiant.e.s est chargé de résoudre le problème proposé dans une démarche professionnelle encadrée par un tuteur pédagogique.

#### Stage d'apprentissage 2 (Alternance)

Pendant les périodes fixées par le calendrier d'alternance, les étudiant.e.s suivant la formation avec un contrat d'apprentissage ou de professionnalisation accomplissent les missions déterminées au début du contrat au sein de l'entreprise.

## UE 4 : Mécanique des fluides avancée

### Écoulements diphasiques

Particularités et classification des écoulements contenant des bulles et des gouttes.

Objectifs : Identifier les écoulements diphasiques et les classer en fonction du régime d'écoulement (écoulements verticaux ascendants, écoulements verticaux descendants, écoulements horizontaux). Comprendre les modèles (homogène, à écoulement séparé, à flux de dérive). Apprendre à prendre en compte les phases dans les échanges thermiques notamment en régime d'ébullition. Calculer les équilibres d'une goutte et d'une bulle.

### Écoulements turbulents

#### I. Bases de la Turbulence

- 1) Transition à la turbulence : Définition de la turbulence - Rappels de mécanique des fluides (équations, déformations fluide) - Description des principaux mécanismes d'instabilité, visualisations (Kelvin-Helmholtz, Couette, Rayleigh-Bénard) - Transition des couches limites - Exemples d'applications
- 2) Description des écoulements turbulents développés : Décomposition de Reynolds et statistiques associées - Corrélations spatiales, temporelles, et échelles associées - Energie cinétique de turbulence et taux de dissipation - Présentation de la théorie de Kolmogorov - Echelles caractéristiques d'un écoulement turbulent - Equations de Reynolds - Equation pour  $k$ , transferts d'énergie
- 3) Modélisation de la turbulence : Problème de fermeture des équations - Modèles à viscosité turbulente - Longueur de mélange - Modèle  $k$ -epsilon - Lois de paroi - Recommandations pratiques pour l'utilisation du modèle  $k$ -epsilon (Fluent) - Présentation des autres modèles de turbulence (contraintes de Reynolds, LES, DNS)

#### II. Description phénoménologique du transport convectif dans quelques écoulements réels : Ecoulement de canal et de conduite circulaire

#### III. Ecoulements turbulents stationnaires en conduites : Ecoulements turbulents fermés (canal, conduites) - Équation différentielle en température - Corrélations courantes : $Nu(Re, Pr)$ - Applications : puits canadien sec/humide ; conduite de climatisation non-isolée.

#### IV. Ecoulements de convection naturelle en régime turbulent : Cas de la plaque plane verticale chauffée, nombre de Grashof - Corrélations Nusselt(Grashof) pour quelques géométries - Convection naturelle thermique et massique - Applications : radiateur plat, vitrage, mur humide chauffé au soleil.

#### V. Métrologie de la Turbulence : Mesures de vitesse : Anémométrie à film/ fil chaud - Anémométrie Doppler Laser - PIV (Particle Image Velocimetry) - Mesures de température en écoulement turbulent : fil froid - Mesures de concentration/humidité en écoulement turbulent : hygromètres, fils chauds.

## UE 5 : Thermique industrielle 2

### Échangeurs thermiques

Transferts thermiques en écoulement. Bilan enthalpique. Couches limites. Similitudes et calculs adimensionnels. Théorème de Vaschy-Buckingham. Échangeurs co-courant et contre-courant. Efficacité d'un échangeur. Méthode du NTU/NUT. Différence de température moyenne logarithmique (LMTD/DTLM).

Évaporateurs et condenseurs. Échangeurs tubulaires, à plaque et à ailettes.

Objectif(s) : Savoir choisir et dimensionner un échangeur thermique.

### Thermique appliquée 2

Deux projets à réaliser en groupe de trois au cours du semestre : réalisation d'une feuille de calcul (tableur) pour la résolution d'un problème de mécanique des fluides/ génie thermique (sujets différenciés) et jeu de rôles "Bureau d'études : répondre à l'appel à projet d'un client potentiel" (sujet commun).

## UE 6 : Régulation et automatique

### Régulation et automatique

L'étude de l'automatique proprement dite à savoir les systèmes bouclés est abordée par des mises en équation, la stabilité, les performances et la correction PID.

Objectif(s) : L'enseignement d'automatique et régulation a pour objectif de faire acquérir les outils d'analyse temporels et fréquentiels à l'étude d'un système. Étude systématique des systèmes d'ordre 1 et 2 et supérieur. Identification paramétrique. Stabilité des systèmes, marges de phases et marge de gain. Correction PID et optimisation en fonction d'un cahier des charges. Modéliser un système en boucle ouverte et en boucle fermé. Réaliser de l'identification paramétrique. Calculer des fonctions de transfert, Notion en représentation d'état. Étudier la stabilité d'un système. Extraire les performances et corriger un système suivant un cahier des charges.

## UE 7 : Techniques professionnelles

### Écoconception

Fonction du système - Description des scénarios - Production et unité fonctionnelle - Arbre des processus - Analyse de cycle de vie (ACV) - Bilan carbone - Bases de données - Inventaire des constituants. Objectif : Réaliser une ACV dans le domaine de la construction d'un bâtiment en s'appuyant sur les bases de données existantes.

### Qualité, Normes et Environnement

Historique et définition de la qualité - Normes ISO 9001 : Système de management de la Qualité - Notion de processus - Indicateurs - Méthodes de résolution de problèmes - « 5S » - « Lean » - « SPC » ou « MSP » : Maîtrise Statistique du Processus - AMDEC - Notion d'audit - Normes et réglementations - Le marquage « CE » - La directive ATEX - REACH : Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals - Norme ISO 14001 : Système de Management de l'Environnement - Notion d'aspects et d'impacts environnementaux - Différentes certifications de management - Norme ISO 50001

### Risques industriels

Sensibilisation aux réglementations et aux procédures de prévention et d'intervention.

Objectifs : Connaissance du référentiel MASE, du règlement REACH, de la directive SEVESO. Plan particulier d'intervention. Cas des risques nucléaires. Transport de matières dangereuses. Plan ORSEC. Plans de Prévention des Risques Technologiques.

### Thermique chauffage, ventilation, climatisation

Sensibilisation et connaissance des matériels utilisés dans le domaine CVC.