

# 1SC2292 - Biofilm : une entrave à la production d'électricité couplée à des risques environnementaux et sanitaires

Responsables : **François PUEL**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

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

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24**

Année académique : **2024-2025**

Niveau avancé : **non**

## Présentation, objectifs généraux du cours :

- L'enseignement « **Biofouling une entrave à la production d'électricité couplée à des risques environnementaux et sanitaires** » est l'un des 4 Enseignements d'Intégration (EI) qui concluent la Séquence Thématique n°2 (ST2) **Bioingénierie : Produire, Protéger, Réparer**. Il relève plus particulièrement des volets **Produire** (énergie) et **Protéger** (écosystème naturel).

### Une problématique relevant de la production d'énergie et de son impact sanitaire et environnemental.

Les centrales nucléaires possèdent trois circuits de refroidissement en série. Le circuit tertiaire est basé sur le prélèvement d'eau dans l'environnement (fleuve ou mer) de la centrale nucléaire et a pour but de retirer une importante quantité de chaleur au circuit secondaire. Pratiquement il s'agit de condenser une vapeur. Cette eau prélevée au milieu naturel y retourne directement. Elle ne doit donc pas être modifiée de manière trop importante du point de vue thermique, physico-chimique et biologique. Par son origine naturelle, cette eau de refroidissement contient des micro-organismes. Ces derniers se développent dans les tubes du condenseur et constituent un biofilm, d'autant plus que la température de quelques dizaines de degrés le favorise. La problématique que rencontre l'exploitant peut se lire sur quatre niveaux:

(i) ce biofilm va limiter la capacité d'échange thermique entre les circuits secondaire et tertiaire, donc la productivité de la centrale (phénomène de biofouling). Il y a donc une limitation opérationnelle. L'exploitant doit utiliser des capacités de refroidissement supplémentaire, ce qui entraîne un surcout financier. Il y a donc un enjeu de production d'énergie couplé à un enjeu financier

(ii) l'eau rejetée dans l'environnement ne doit pas voir sa température s'élever de manière trop importante, sinon c'est dommageable pour les écosystèmes aquatiques au lieu de rejet. Il faut donc prélever le plus d'eau possible, mais cela va à l'encontre des problèmes de débit des cours d'eau, de plus en plus prégnants en raison des périodes de sécheresse intenses et fréquentes. Il y a donc un premier enjeu environnemental (ressource hydrique)

(iii) Un traitement chimique du biofilm est possible pour limiter son développement, mais en retour il y a un rejet chimique dans l'environnement préjudiciable pour les écosystèmes aquatiques. Il y a donc un second enjeu environnemental (pollution chimique)

(iv) Sans traitement chimique, les micro-organismes naturels se développent. Certains d'entre eux sont des pathogènes pour les populations avoisinantes et se retrouvent en plus forte concentration au lieu de rejet. Il y a donc un enjeu sanitaire.

Notons ainsi que les problématiques s'opposent et se complètent : le traitement chimique du biofilm permet de conserver une meilleure capacité d'échange thermique (gain opérationnel et financier), limite la concentration de pathogènes (gain sanitaire), mais pollue une ressource en eau de plus en plus fragile (pertes environnementales).

Le sujet proposé a pour objectif de modéliser la perte d'efficacité d'un échangeur de chaleur du réseau tertiaire, engendrée par ce phénomène de biofouling (encrassement par biofilm, inévitable en raison du prélèvement d'eau en milieu naturel) pour proposer des scénarios d'exploitation et d'investissement selon les situations proposées (capacité de production, caractéristique de l'environnement où le prélèvement aqueux est réalisé, etc.). Ces scénarios devront prendre en compte les contraintes environnementales et sanitaires. Des indicateurs de performance (KPIs) permettront de classer ces scénarios et de quantifier la valeur créée pour le client.

## Modélisation de l'échangeur de chaleur

- L'enseignement porte sur la limitation de l'échange thermique en raison de la croissance biologique du biofilm. La démarche proposée est en trois temps (i) Formulation du problème, se traduisant par l'écriture du modèle décrivant les phénomènes mis en jeu, en n'oubliant pas de bien définir le système considéré, les conditions initiales et limites (ii) Réalisation de la simulation par codage et sa validation. En général un cas de référence (« Toy problem»), assez simple, est utilisé pour valider le code de simulation, les résultats calculés devant correspondre aux résultats déjà établis pour cette configuration. Cette étape permet d'avoir les ordres de grandeur des phénomènes (dérive de température, épaisseur de biofilm) et de faire une étude de sensibilité de chacun des paramètres, afin de déterminer lesquels sont critiques pour la représentation des phénomènes mis en jeu (iii) Application de la modélisation au cas d'étude industriel. En combinant les résultats de la simulation avec d'autres données techniques et économiques, il est alors possible de dimensionner des appareils, de proposer des stratégies de fonctionnement selon la localisation de la centrale en bord de mer et de fleuve tout en considérant des critères de rejets sanitaires et environnementaux.

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

ST2

## Prérequis :

- Aucun

## Plan détaillé du cours (contenu) :

- • **Jour 1** : Contexte de la production d'électricité et de son incidence environnementale et sanitaire ; Remplir la fiche objectif (quel est le fond du problème) ; lecture de la bibliographie fournie sur le sujet de l'échange thermique et de la croissance de biofilm ; écriture du modèle d'efficacité énergétique (deux slides à rendre en fin de journée).
- • **Jour 2** : Réalisation de la simulation. Programmation de la croissance du biofilm en supposant un profil de température dans le fluide interne au tube) ; Programmation du profil de température pour une épaisseur de biofilm ; Programmation conjointe du profil de température et de la croissance du biofilm. Pour la fin de la matinée produire un programme qui permet de générer les profils de T et d'épaisseur de biofilm. Validation de la simulation en considérant une étude de référence. Etude de sensibilité des paramètres ; discussion des résultats. Rédaction d'une note écrite de 2,5 pages tout au plus (1ère partie de la note technique finale)
- **Jour 3 matin** : Déplacement au centre de recherche EDF à Chatou (78). Visite des dispositifs expérimentaux d'étude de biofouling ; Discussion des résultats déjà obtenus ; Présentation de la méthodologie de calcul des coûts d'investissement (CAPEX) et d'exploitation (OPEX)

- **Jour 3 après midi & Jour 4 matin**: Simulation des deux études de cas proposées par EDF en intégrant les aspects de coûts. Etablissement de différents scénarii d'investissement et de conduite de production.
- **Jour 5 matin : Finalisation de la note écrite, préparation de deux oraux pour le chef de projet et pour le jury des experts**
- **Jour 5 après midi** : deux oraux avec le chef de projet et les experts / discussions / auto-évaluation.

## Déroulement, organisation du cours :

- « Biofouling une entrave à la production d'électricité couplée à un risque environnemental » est une activité pédagogique de type **Problem solving**. Elle permet de se confronter au caractère multiphysique (échange de chaleur ; biologie) d'un problème industriel, en mettant en œuvre les concepts introduits dans les cours de base de la **ST2 Bioingénierie** et dans les cours communs de mathématiques et d'informatique. Enfin l'élève est dans la posture d'un jeune ingénieur qui doit réaliser une note technique de simulation et présenter ses travaux à des experts techniques et à un chef de projet dans le cadre d'un investissement industriel.

L'enseignement est programmé sur une semaine "bloquée" (5 jours consécutifs). Il commence par une demi-journée de lancement de projet (lundi matin) avec le client. Pendant la semaine, les étudiants travaillent par groupes de 4 à 6 élèves, encadrés par une équipe d'enseignants-chercheurs du laboratoire LGPM. Les élèves visitent chez le client un laboratoire de recherche et développement dédié à cette problématique, pour se rendre compte des moyens à mettre en œuvre pour obtenir des données fiables et ainsi valider les simulations réalisées.

Des points d'avancement seront réalisés quotidiennement : mise en commun des informations, apport méthodologique, compléments de cours. La semaine se termine par une séance de restitution le vendredi après-midi en présence d'expert et d'un chef de projet du client EDF.

## Organisation de l'évaluation :

- L'évaluation prendra en compte : l'assiduité individuelle, l'implication du groupe, la pertinence du modèle, son implémentation numérique, la qualité de la programmation (code), les présentations orales et les discussions (questions/réponses), le rapport technique de synthèse.

## Moyens :

- Equipe enseignante : F. Puel (PR, CS, Département MEP, LGPM), V. Pozzobon (IR, CS, Chaire industrielle de Biotechnologie CEBS, LGPM), T. Neveux (Ingénieur Recherche et Développement, EDF Chatou), P. Herbelin (Microbiologiste, chef de projet EDF Chatou)
- Taille de l'effectif : 24 à 28
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Synder-Python (logiciel libre)

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours :

- A l'issue du cours, les étudiants seront capables de :
  1. Estimer les différentes échelles de temps et d'espace mises en jeu dans un procédé
  2. Choisir l'échelle la plus pertinente pour résoudre le problème posé ;
  3. Distinguer et conserver les phénomènes prépondérants ;
  4. Réduire de façon pertinente les dimensions et la complexité d'un problème
  5. Établir un modèle multiphysique en agrégeant des connaissances provenant de champs disciplinaires différents (biologie, science des transferts, analyse technico économique)
  6. Implémenter numériquement un modèle mathématique ;

7. Avoir un regard critique sur un modèle et ses limitations.
8. Présente de façon structurée et argumentée une démarche de modélisation.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

:

- **C1.1:** To Analyse: Analyse the scientific aspects of the overall behaviour of a system of limited scope (e.g. an isolated part of a complex system), including identifying the factors that influence its behaviour.

**C1.2:** To Model: Correctly use a model presented in class, under its conditions of validity (model describing a phenomenon, without couplings).

**C1.3:** To Solve: Compare the results of a simulation with experimental measurements, taking into account measurement errors and uncertainties, on the basis of knowledge of orders of magnitude.

**C1.4:** To Design : Interpret a set of specifications supplied by the customer with a view to designing a system.

**C4.1:** To Identify and to reformulate: Interact with the customer to set the framework and (re)formulate his/her needs by identifying with him/her the expected value. Distinguish between the symptom and the real issue to be addressed. Create value for the customer by asking questions.

**C4.2:** To Propose one or more solutions: Define and present one or more solutions that meet the (re)formulated need by qualifying and quantifying the value created.

**C7.1:** To Convince with arguments: Build a rigorous, clear, relevant and convincing argument based on the objective and the characteristics of the person you are talking to. Anticipate and assess objections and opposing arguments.

**C7.2:** To persuade: Identify and use the most appropriate media, channels, tools, techniques and approaches to promote your communication project.

**C8.1:** To Build the team: Create the team -Introduce yourself and get to know others -Listen actively to your team-mates -Participate and influence within the team -Question and take ownership of the common objective.

**C8.4:** To Work in project mode: Use classic project development and management methods (milestones, deliverables, planning, resources, organization, risks, costs, results) and implement them throughout a simple project, making the necessary adjustments.

## Bibliographie :

Diapositives des différentes présentations, photocopié de cours en Transfert Thermique, articles scientifiques seront fournis lors du cours

- Présentation du client : fichier « 20191203 EI02 Présentation Biofouling EDF»
- Extrait du Cours de Transfert Thermique sur les échangeurs : « Cours TT-chapitre 5-Echangeurs »
- Techniques de l'ingénieur P. Lemoine, Refroidissement des eaux Techniques de l'Ingénieur, b2480, 1986
- Article Melo et al. 1997 « Biofouling in water system” Experimental Thermal and Fluid Science 1997; 14:375-381
- Article Nebot et al. 2007 “Model for fouling deposition on power plant steam condensers cooled with seawater: Effect of water velocity and tube material” International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 3351-3358
- Article Huang et al. 2011 “Effect of temperature on microbial growth rate-Mathematical analysis : The Arrhenius and Eyring-Polanyi Connections”
- Document EDF “Centrales Nucléaires et Environnement : prélèvements d'eau et rejets » EDP Sciences. Edition 2020

- Un premier jeu de données (Figure 1, Nebot et al. 1997) en fichier .txt et Excel