



Département des Technologies industrielles (TIN)  
Institut de Génie Thermique (IGT)

# CAS Bois-Énergie

Description des modules – édition automne 2020

## Auteurs

Jean-Baptiste Carré

Julien Ropp

Prof. Roger Röthlisberger

Largement sous-exploité en Suisse et renouvelable, le bois est une ressource locale et durable à même de contribuer significativement à l'approvisionnement énergétique de la Suisse. C'est la seule forme d'énergie renouvelable intrinsèquement stockable.

Du fait de sa structure, il est toutefois un combustible complexe à exploiter énergétiquement de manière efficace, en minimisant l'impact environnemental. Le bois peut être valorisé sous forme d'énergie-chaleur, transformée ou non en énergie électrique mais aussi comme source de substances chimiques pour diverses industries.

Cependant, aujourd'hui, extraire des produits du bois est trop coûteux en comparaison de leur extraction à partir de dérivés du pétrole mais il convient d'en appréhender les possibilités et d'avoir conscience de son potentiel.

Le bois est de plus en plus utilisé en industrie pour la production de chaleur à plus ou moins haute température, laquelle pourra aussi servir à la production d'électricité. Il est ainsi appelé à prendre une place de choix dans les réseaux de chauffage urbains, dont les enjeux écologiques et économiques sont grandissants.

L'exploitation du bois implique un ancrage dans un territoire, des logistiques d'approvisionnement et des installations dont l'efficacité de transformation est à la hauteur de sa valeur en tant que matière et en tant que combustible. Cette exploitation raisonnée et efficace implique des connaissances et des savoir-faire qui sont au cœur de la formation proposée ici.

**HEIG-VD – IGT**  
**CAS Bois-Énergie**  
Avenue des Sports 20  
Case postale 521  
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. : +41 (0) 24 557 73 64  
E-mail : [info@cas-bois-energie.ch](mailto:info@cas-bois-energie.ch)  
Site internet : <http://www.cas-bois-energie.ch>

## Introduction du plan d'étude

Le but de la formation Bois-Énergie est de permettre aux participants d'acquérir le savoir-faire métier lié à la conversion de l'énergie chimique du bois en énergie chaleur, éventuellement convertie ensuite en électricité.

Les enseignements sont divisés en 6 modules correspondant à différentes facettes de la thématique :

- Xylogologie et aspects environnementaux (détails page 2) ;
- Transformations thermochimiques du bois (détails page 3) ;
- Installations techniques (détails page 3) ;
- Conception d'installations (détails page 4) ;
- Exploitation et suivi d'installations (détails page 4) ;
- Aspects économiques (détails page 5) ;

### À qui s'adresse cette formation ?

Cette formation continue postgrade s'adresse à des personnes qui désirent se perfectionner dans le domaine du Bois-Énergie, tels que des exploitants de chaufferie bois, des bureaux d'ingénieurs et techniques, des entreprises générales, des installateurs en chauffage, des collectivités publiques (Cantons, Communes, services industriels, notamment), des distributeurs d'énergie, ou encore des ingénieurs énergie sur sites industriels, des gérances immobilières, ou des membres d'associations actives dans la promotion du bois-énergie.

### Qui enseigne cette formation ?

Une part importante des cours est donnée par des intervenants extérieurs à la haute école spécialisée, afin de permettre aux participants de bénéficier de l'expérience pratique de professionnels du domaine. Les cours les plus pointus ou les plus avancés, notamment ceux traitant de combustion, la dépollution des fumées, ou ceux ouvrant vers la cogénération, sont donnés par la haute école. Cette dernière apporte aussi la matière, les infrastructures et le personnel nécessaire pour les travaux pratiques de laboratoire et l'approche concrète de la matière étudiée.

## Module 1 : Xylogologie et aspects environnementaux

### Description du module

Ce module inclut les contenus suivants :

- **Cycle du carbone** (2 périodes d'enseignement) : Introduction au cycle biogéochimique du carbone, rôle des forêts, entretien et gestion des forêts, limites d'exploitations, conditions de préservation de la biodiversité en forêt, plan directeur cantonal, politique de la ressource bois en Suisse et dans les cantons romands ;
- **Bois organisme** (2 périodes d'enseignement) : Photosynthèse, comportement photochimique du bois, croissance de l'arbre, structure du bois, caractéristiques microscopiques/macroscopique, plans ligneux, propriétés physico-mécaniques (coupe, broyage, notamment) ;
- **Origine du bois** (2 périodes d'enseignement) : Le bois énergie en Suisse, en Europe, dans le monde, place du bois dans le mix des énergies renouvelables, ressource en bois énergie par rapport aux autres filières bois, classification botanique et commerciale des bois ;
- **Composition chimique et propriété du bois** (2 périodes d'enseignement) : Constituants chimiques du bois, Différence entre essences, grandeurs physiques liées au bois, interaction eau/bois ;
- **Formes du combustible** (4 périodes d'enseignement) : Certifications et labels de combustibles, mise en forme du combustible sous ces différents formes finales de consommation (bûches de diverses tailles, plaquettes humides ou sèches, granulés de bois) ;
- **Stockage du combustible** (8 périodes d'enseignement) : Chaufferie et dispositifs de stockage, conception, dimensionnement et organisation des différents stockages, exigences Association des Établissements cantonaux d'Assurance Incendie (AEAI), émissions dans les stockages, période pour stocker ;
- **Logistique d'approvisionnement** (8 périodes d'enseignement) : Définition des besoins de l'installation en qualité et quantité, calcul du bassin de fourniture en fonction des coûts de transports, des stockages intermédiaires et des transformations, évaluation de la qualité du bois provenant de ce bassin, confrontation de cette qualité avec les capacités techniques de l'installation et des installations déjà en place utilisant tout ou partie de cette zone d'approvisionnement.

### Compétences visées

À l'issue de ce module, le participant sera capable de :

- Identifier et acquérir les spécificités de la filière bois-énergie par rapport aux autres filières du secteur du bois ;

- Décrire l'intégralité du cycle de vie du bois impliqué dans la filière bois-énergie : de la forêt à l'énergie, puis aux cendres et autres effluents ;
- Expliquer et prendre en compte les impacts environnementaux liés à l'usage du bois comme source d'énergie ;
- Décrire les différentes formes de combustible bois avec leurs avantages et inconvénients ;
- Enumérer les différents stockages possibles et savoir les dimensionner pour les différentes formes de combustible bois ;
- Expliquer la logistique d'approvisionnement du bois-énergie, intégrer les contraintes qui y sont associées et établir les grandes lignes d'une stratégie d'approvisionnement pour un cas concret donné ;
- Nommer les valeurs représentatives des grandeurs physiques principales liées au bois ;
- Décrire la politique fédérale et cantonale de gestion de la ressource bois.

## Module 2 : Transformations thermochimiques du bois

### Description du module

Ce module inclut les contenus suivants :

- **Propriétés physico-chimiques du bois** (2 périodes d'enseignement + 6 périodes de laboratoire) : Humidité, séchage du bois, pouvoirs calorifiques (inférieur et supérieur) et densité énergétique du bois, masses volumiques apparente et absolue, conductivités thermique et électrique, capacité thermique massique à pression constante ;
- **Combustion** (8 périodes d'enseignement + 16 périodes de laboratoire) : Aspects environnementaux liés à la combustion du bois, phases de la combustion, configuration des foyers et chambre de combustion, labels, impact environnemental de la combustion du bois, avec une emphase sur les polluants émis et les réglementations qui y sont liés, calcul de rendement de chaudière, effluents de la combustion et leur quantification, introduction à l'OPair.

### Compétences visées

A l'issue de ce module, le participant sera capable de :

- Manipuler et utiliser les différentes grandeurs physiques utiles dans le domaine du bois-énergie et y faire appel dans les contextes appropriés ;
- Nommer les phénomènes à l'œuvre lors de la combustion du bois ;
- Décrire les différentes phases de la combustion et leurs singularités ;
- Expliquer les différentes voies de transformation thermochimiques du bois et réaliser des calculs simples les concernant.

## Module 3 : Installations techniques

### Description du module

Ce module inclut les contenus suivants :

- **Chaudières et accumulateurs de chaleur** (4 périodes d'enseignement) : Types de chaudières, couplage de plusieurs chaudières, introduction à la maintenance des chaudières, dimensionnement de chaudières et d'accumulateurs ;
- **Cogénération** (2 périodes d'enseignement) : Cycle à air chaud (Brayton), cycle turbine (Rankine) et cycle de Rankine organique (ORC), cycle Stirling, gazéification et moteur à gaz ;
- **Procédés de transformation thermochimique** (4 périodes d'enseignement + 4 périodes de laboratoire) : Combustion, pyrolyses lente ou rapide, gazéification, liquéfaction directe, carbonisation, fermentation alcoolique de bois ;
- **Cheminées** (2 périodes d'enseignement) : Dimensionnement d'une cheminée, ventilation de tirage ;
- **Post-traitement des effluents** (2 périodes d'enseignement + 6 périodes de laboratoire) : OPair et réglementations cantonales, particules fines, imbrûlés gazeux, DeNOx.

### Compétences visées

A l'issue de ce module, le participant sera capable de :

- Décrire les différentes technologies et configuration de chaudière et d'accumulateur de chaleur ;
- Dimensionnement de manière préliminaire une chaudière et un accumulateur de chaleur pour une application donnée ;
- Expliquer les technologies de cogénération disponibles, leurs avantages et inconvénients et leurs principes de fonctionnement ;
- Enumérer les différents procédés de transformation thermochimique du bois et en décrire le fonctionnement, les conditions de fonctionnement et les produits ;

- Réaliser le dimensionnement préliminaire d'un conduit de cheminée ;
- Enumérer les différentes technologies de post-traitement des effluents et en décrire les limites, les conditions de fonctionnement et leurs applications ;
- Adapter une installation existante à de nouvelles technologies ;
- Appliquer les exigences de l'OPair et celles complémentaires spécifiques à certains cantons.

## Module 4 : Conception d'installations

### Description du module

Ce module inclut les contenus suivants :

- **QM Chauffages au bois® de base** (8 périodes d'enseignement) : Le QM Chauffages au bois® est un système de gestion de qualité pour grandes installations à bois pour la production et distribution de chaleur ambiante, chaleur pour eau sanitaire et chaleur processus. Ce cours en donne les éléments de base.
- **Dimensionnement et configuration d'installations** (8 périodes d'enseignement) : Dimensionnement et configuration d'installation conformes aux réglementations et aux bonnes pratiques ;
- **Études de cas** (16 périodes) : Une étude de cas de dimensionnement et de configuration est traitée dans le détail par l'intervenant et des cas apportés par les participants sont étudiés en classe sous la forme d'ateliers. Les personnes sans sujet spécifique se joignent à un cas apporté par les autres.

### Compétences visées

A l'issue de ce module, le participant sera capable de :

- Appliquer les bases du QM Chauffages au bois® ;
- Réaliser le dimensionnement préliminaire et choisir la configuration d'une chaufferie bois ;
- Concevoir et dimensionner les installations les plus courantes.

## Module 5 : Exploitation et suivi d'installations

### Description du module

Ce module inclut les contenus suivants :

- **Visites** (8 périodes) : Visite de deux sites modèles - un site industriel en production 24/7 et un site de chauffage à distance (CAD) ;
- **Gestion des cendres** (2 périodes d'enseignement) : Gestion, réglementation et valorisation des cendres, introduction à l'Ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux (ORRChim) et à l'Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED) ;
- **Contrôle et validation des installations** (4 périodes d'enseignement) : Organismes en charge de faire respecter les ordonnances, procédures de contrôle, réception d'une installation ;
- **Entretien des installations** (4 périodes d'enseignement) : Choix des périodes d'entretien, durée des interventions, spécificité des installations bois pour l'entretien ;
- **Suivi des performances des installations** (4 périodes d'enseignement) : Mesure de puissance, appareillage de contrôle, contrôle des émissions, indicateurs de suivi de performance, suivi de la variabilité du combustible, contrôles en ligne.

### Compétences visées

A l'issue de ce module, le participant sera capable de :

- Appliquer la réglementation concernant la gestion des cendres ;
- Définir les points de contrôle et de validation d'une installation de bois-énergie ;
- Définir un plan de maintenance et d'entretien ;
- Décrire les indicateurs de suivi des performances des installations et expliquer comment les obtenir.

## Module 6 : Aspects économiques

### Description du module

Ce module inclut les contenus suivants :

- **Introduction à RETScreen** (4 périodes d'enseignement) : RETScreen est un système logiciel de gestion d'énergies propres pour l'analyse de faisabilité de projets d'efficacité énergétique, d'énergies renouvelables et de cogénération ainsi que pour l'analyse de la performance énergétique en continu. Le cours introduit le logiciel et son usage aux participants.
- **Durée de vie des installations** (2 périodes d'enseignement) : Durée de vie représentatives de composants des installations bois-énergie typiques et thématique de leur remplacement, lien avec les aspects de maintenance et de potentielles augmentations de capacité ;
- **Prix du bois & prévision du coût de l'énergie** (2 périodes d'enseignement) : Évolution du prix du bois sur une base historique, comparaison aux autres sources d'énergies, prévision du prix du combustible sur la durée de vie du projet ;
- **Détermination des coûts d'infrastructure** (8 périodes d'enseignement) : Sur la base de cas dimensionnés lors du module 5, évaluation des coûts poste par poste, sur la durée de vie totale du projet, exemple d'un cas concret, plan d'action bois de la confédération.
- **Étude de cas participants** (8 périodes) : Les participants proposent un sujet de leur choix, suivi par l'intervenant qui guide sa résolution. Les personnes sans sujet spécifique se joignent à un cas apporté par les autres.

### Compétences visées

A l'issue de ce module, le participant sera capable de :

- Utiliser les fonctions de base de RETScreen ;
- Enumérer les durées de vie standard des installations au bois et de leurs différents composants ;
- Indiquer les prix typiques du bois et ses ordres de grandeur et évaluer le prix de l'énergie sur la durée de vie des installations ;
- Déterminer les coûts d'infrastructure et évaluer le coût d'un projet bois-énergie.

## Contenu et formes d'enseignement dans les modules

L'enseignement est basé sur des cours magistraux et des travaux de laboratoire. Les cours magistraux sont dispensés en classe ou en amphithéâtre au moyen de diaporama contenant les points essentiels des cours. Les participants au cours sont encouragés à prendre des notes et ont accès aux miniatures des diapositives, disposées sur documents PDF au format A4. Ces documents peuvent être imprimés par le participant avant le cours pour prendre directement ses notes sur le support (impression à la charge de l'étudiant ; seuls les fichiers sont fournis). Le contenu des cours est développé en partenariat avec les chargés de cours intervenant sur la matière enseignée et est fourni sous une forme unifiée. Les travaux de laboratoire sont développés par l'Institut de Génie Thermique et placent les participants dans des situations pratiques lors desquels ils doivent mettre en application les connaissances étudiées durant les cours afin de leur adjoindre compétence et savoir-faire. Ils sont conçus pour permettre aux participants de construire au mieux les savoirs acquis en cours en les utilisant dans le contexte approprié.

## Modalités d'évaluation et de validation des modules

Le module est validé via un Questionnaire à Choix Multiples (QCM). Ce QCM couvre aussi bien les travaux de laboratoire que les cours magistraux. Le module est indépendant et demande une réussite d'au moins 60% au QCM pour être validé. Sa validation implique l'octroi des crédits « European Credit Transfer and Accumulation System » (ECTS) aux participants enregistrés pour le CAS. Le travail de certificat ne peut cependant être validé qu'à la condition que tous les modules aient été préalablement validés.

## Auditeurs

Il est possible d'assister à certains cours théoriques en tant qu'auditeur. Cela fait l'objet d'une attestation de suivi du cours. Les études de cas, les travaux de laboratoire, les visites et le travail de certificat ne sont pas accessibles aux auditeurs. Un auditeur ne peut pas se présenter aux examens du CAS et ne peut valider de module ou d'ECTS. Il n'a accès qu'aux supports de cours concernant le ou les cours suivis.

### Liste des cours ouverts aux auditeurs, conditions et horaires s'y rapportant

| Code  | Intitulé   | Date(s)  | Horaire(s)            | Prix CHF TTC |
|-------|--|--|-----------------------|--------------|
| AUD01 | Composition et propriétés du bois & cycle du carbone                           | ven. 21 août 2020                                | 8h-12h00              | 180.-        |
| AUD02 | Bois organisme & origine du bois   | ven. 21 août 2020                                | 13h-16h30             | 180.-        |
| AUD03 | Formes du combustible bois   | sam. 22 août 2020                                | 8h-11h30              | 180.-        |
| AUD04 | Stockage du combustible bois   | ven. 28 août 2020<br>sam. 29 août 2020           | 13h-16h30<br>8h-11h30 | 360.-        |
| AUD05 | Logistique d'approvisionnement du bois combustible                             | ven. 4 septembre 2020<br>sam. 5 septembre 2020   | 8h-11h30<br>8h-11h30  | 360.-        |
| AUD06 | Combustion du bois   | ven. 11 septembre 2020<br>sam. 12 septembre 2020 | 8h-11h30<br>8h-11h30  | 360.-        |
| AUD07 | Chaudières et accumulateurs de chaleur   | sam. 3 octobre 2020                              | 8h-11h30              | 180.-        |
| AUD08 | Procédés de combustion de bois   | ven. 18 septembre 2020                           | 8h-11h30              | 180.-        |
| AUD09 | QM Chauffages au bois® (cours de base)   | ven. 6 novembre 2020                             | 8h-11h30 + 13h-16h30  | (*) 500.-    |
| AUD10 | Introduction à RETScreen   | sam. 7 novembre 2020                             | 8h-11h30              | 180.-        |
| AUD11 | Dimensionnement et configuration d'installations au bois                       | ven. 13 novembre 2020                            | 8h-11h30 + 13h-16h30  | 360.-        |
| AUD12 | Contrôle et validation des installations au bois                               | ven. 27 novembre 2020                            | 8h-11h30              | 180.-        |
| AUD13 | Entretien des installations au bois  | sam. 21 novembre 2020                            | 8h-11h30              | 180.-        |
| AUD14 | Suivi des performances des installations au bois                               | ven. 20 novembre 2020                            | 8h-11h30              | 180.-        |
| AUD15 | Durée de vie des installations, prix du bois et prévision du coût de l'énergie | sam. 5 décembre 2020                             | 8h-11h30              | 180.-        |
| AUD16 | Détermination des coûts d'infrastructure                                       | ven. 11 décembre 2020                            | 8h-11h30 + 13h-16h30  | 360.-        |

(\*) le prix demandé pour le cours QM Chauffages au bois® donne accès au cours et à ses supports. Ce prix n'inclut pas le certificat officiel d'Énergie Bois Suisse pour le suivi du cours. Ce certificat, nécessaire pour suivre ensuite les cours d'approfondissement délivrés par Énergie Bois Suisse, peut être obtenu sur demande des participants au cours auprès d'Énergie Bois Suisse et est facturé 100 CHF TTC.