



Annexe : programme détaillé UE Ecologie énergétique hydrologie générales (Université de Bordeaux)

Université de Bordeaux, Eléments d'enseignements « transitions énergétiques et environnementales »

Resp : Jean-François Bonnet, Université de Bordeaux (jean-francois.bonnet@u-bordeaux.fr)

En sciences de l'ingénieur à U. Bordeaux, 3 crédits d'enseignement en Master sur les notions d'écologie et d'environnement en lien avec les questions eau, énergie, climat, biomasses et 3 crédits « énergies renouvelables ». Les contenus et supports pourraient intéresser en dehors des sciences ou sciences de l'ingénieur. Ces enseignements ont déjà été donnés aussi en formation professionnelle et peuvent convenir pour des actions formation continue / formation d'enseignants, si les aspects originaux qui s'y trouvent ont de l'intérêt dans ces contextes.

Ici sont regroupés quelques éléments descriptifs d'enseignements dispensés à l'université de Bordeaux et en école d'ingénieurs, construits et enrichis depuis une vingtaine d'années. Présenté par chapitres ou blocs, ces enseignements concernent plutôt les publics Master, mais sont adaptables au niveau licence (L2 ou L3). Convient à des étudiants de formation scientifique, ou d'autres formations avec quelques adaptations. L'ensemble est modifiable et adaptable selon formats et publics. Les enseignements concernant les aspects « métier » de la mise en œuvre des transitions (efficacité énergétique, diagnostic énergétique, bâtiment durable, métiers des énergies renouvelables, etc. ne sont pas décrits ici, mais peuvent l'être facilement sur demande.

A - Ecologie, énergétique et hydrologie générales

A l'échelle globale : bases de connaissances et de réflexions

Chap – Populations - consommations

Objectif : manier les ordres de grandeur de la population mondiale ; être capable d'expliquer les notions de dynamique des populations et la transition démographique ; être capable de calculer différents indicateurs démographiques et de les interpréter simplement : espérance de vie en régime permanent, densité de population, etc. Paliers d'évolution des effectifs depuis les premiers chasseurs-cueilleurs. Groupes humains et leurs évolutions jusqu'aux mégapoles. Urbanisation et notion d'empreinte écologique des villes.

Exercices :



- calculer l'espérance de vie des populations préhistoriques et modernes
- calculer la densité de population mondiale selon différentes hypothèses et rechercher des repères pour l'interprétation ; aborder la notion de capacité démographique et son élasticité

TD sur ordi :

Exploiter des séries de données chronologiques pour étudier les évolutions des effectifs des populations (monde, continents, pays sélectionnés ou au choix) et les consommations de base : eau, énergie, alimentation

Chap – eau : ressources et usages (au niveau global)

Grand cycle de l'eau. Notion de lame d'eau évaporée, précipitée et écoulee.

Usages de l'eau : notions de prélèvement et de consommation nette.

Notions de pollution et de consommation de qualité de l'eau, traitement et réutilisations

Exercices :

- calculer les ordres de grandeur du bilan du cycle de l'eau global et mettre en évidence l'écoulement continental
- ressources en eau : faire le lien entre l'écoulement continental et les ressources accessibles (environ 30 %) ; calculer les taux de prélèvements actuels
- discussion : interpréter la notion de taux de prélèvement en cherchant à comprendre le fonctionnement des écoulements concernés ; mettre en évidence la nécessité de décrire les hydrosystèmes à leur échelle et dans leur contexte pour interpréter les taux de prélèvement

Chap – état thermique du système « surface terrestre et atmosphère »

Calculer l'état thermique du système « surface terrestre et atmosphère » sans effet de serre en établissant le bilan radiatif à partir des dimensions, de l'albedo de la terre et de la constante solaire.

Mettre en évidence l'effet de serre naturel (+33°C) et les gaz à effet de serre (GES) impliqués : H₂O, CO₂, CH₄, N₂O, ...

Observer l'effet de serre additionnel (Jouzel Lorius 1987, Mauna Loa). Repérer les émissions anthropiques de GES impliquées



Cycle du carbone pré-industriel et actuel : évolutions, compartiments concernés, stockage naturel, limites du stockage naturel, bilan net pour l'atmosphère. Rôle et importance des différents compartiments dans le cycle biogéochimique du carbone.

Composantes du bilan radiatif et énergétique : répartition selon les compartiments atmosphère, océan. Mise en évidence des effets inertiels (retardés)

Exercice ou TD sur ordi : à partir des séries données IPCC / OWID sur la chaleur stockée dans les différentes couches océaniques, calculer l'échauffement moyen des différentes couches d'eau depuis l'ère pré-industrielle. Mettre en évidence la capacité de stockage océanique différé. Montrer que cette grande capacité de stockage n'empêche pas l'échauffement de l'air atmosphérique observé depuis l'ère préindustrielle (+1,1°C en moyenne, +1,7°C dans l'hémisphère Nord).

Chap – Biomasses, cycle du carbone, énergie alimentaire, rendements de transformation

Occupation des sols à l'échelle globale : forêts, prairies, cultures, terres peu productives en biomasse.

Fonctionnement énergétique des écosystèmes. Bases de la production végétale (photosynthèse). Réseaux trophiques. Rendements trophiques. Liens avec les grands cycles biogéochimiques (azote, phosphore, ...).

Cycle du carbone continental et par grands compartiments : couverts forestiers, prairies, cultures. Fonctionnement du stock de carbone forestier. Mise en évidence des stocks les plus importants. Notion de changement d'usage des sols.

Alimentation, ressources et besoins :

- disponibilité énergétique alimentaire moyenne (DEA) selon la FAO : monde, pays développés, pays en développement. Evolutions depuis 1961. Part des produits animaux et végétaux. Surfaces impliquées (cultures, prairies, pêcheries océaniques) et leur contribution dans la ration calorique mondiale.
- Besoins alimentaires, métabolisme de base, besoins d'entretien, de croissance et d'activité. Part des différents organes dans le métabolisme de base : cerveau cœur foie, ...
- Phénomènes de régulation thermique de l'organisme et besoins énergétiques. Différents calculs sur le métabolisme énergétique et la puissance mécanique (musculaire)

Alimentation : énergie solaire et surfaces mises en jeu



Cascade de rendements dans la conversion de l'énergie solaire « du soleil à l'assiette » et production primaire requise (PPR) par les consommations

- Cultures : produits végétaux
- Pâturages : production animale des ruminants : métabolisme d'entretien et de croissance, bilan des besoins alimentaires des cheptels d'élevage mondiaux
- Océans : production végétale et animale par niveau trophique. Production primaire requise par les pêcheries.
- Bilan des productions primaires
- Dilemme de l'élevage : monogastriques (volailles, porcins) alimentés en céréales (concurrence vivrière, agriculture intensive) vs ruminants (bovins, ovins, caprins) au pâturage (émissions méthane)

Usages non alimentaires de la biomasse

- Energie : biomasse traditionnelle, biomasse moderne
- Construction
- Matériaux, matière première, chimie verte

Chap - bases de fonctionnement des hydrosystèmes – hydrologie générale

Notion de bassin versant (BV). BV de surface, BV hydrogéologique. Tracé des lignes d'écoulement en fonction des isopièzes. Ecoulement de base d'un cours d'eau. Ecoulement de surface, hypodermique, souterrain. Bilan hydrologique annuel d'un bassin versant. Rôle d'une nappe d'accompagnement de cours d'eau. Notion de battement de nappe (saisonnier).

Fonctionnement aux temps courts : événements pluviaux. Infiltration, ruissellement, percolation. Débit et cumul en fonction du temps sur un événement. Fonction de réponse du BV. Notion de fonction élémentaire (simplification). Paramètres influents sur un BV : pente, occupation des sols, réseau de drainage, topologie du cours d'eau, temps caractéristiques. Déplacement d'une onde de crue lors d'un événement pluvial.

Régimes hydrologiques des cours d'eau (simples, mixtes) : pluvial, nival, glaciaire, et leurs combinaisons. Débit d'étiage (été, hiver). Influence de l'évapotranspiration sur et du déficit hydrique saisonnier la formation des débits d'étiage. Débits remarquables : module, débits d'étiage, à 5 ans, décennal, centennal, etc.

Exercice / TD / TD sur ordi :

Calculer le bilan hydrique d'un sol moyen pour un climat donné au pas de temps mensuel, en déterminant l'évapotranspiration réelle à partir de règles simples. Observer l'évolution sur



l'année des paramètres influents et des conséquences. En déduire des indicateurs pour la recharge des nappes, et pour la quantité de production végétale. Comparer plusieurs situations : année humide, année sèche, sécheresse d'hiver. Faire varier si possible la réserve du sol pour comparer l'influence d'un sol à faible ou forte capacité de stockage. Variante : choisir une ville et calculer les paramètres météo simplifiés : pluviométrie, ETP Thorntwaite, afin d'établir le bilan hydrique en année moyenne, en année sèche ou en année humide.

B –Energies et énergies renouvelables

Chap – panorama des énergies pour une région, un pays ou un ensemble de pays sélectionné

Présentation rapide du panorama des énergies avec leurs caractéristiques principales

Energies non renouvelables : ressources, consommation, durée de vie apparente, caractéristiques principales, notions de cout et de distribution géographique

Energies renouvelables : gisements, production, rythme de développement, caractéristiques principales, facteurs de charge, notions de cout et de distribution géographique. Electriques : Hydro, éolien, solaire, géothermie haute température, biomasse – biogaz, ... Thermiques : Bois – biomasse, biogaz, géothermie, solaire thermique, ...

Travail encadré - Idéalement l'étude du panorama des énergies demande aux étudiants une recherche de données sur des sites validés, pour une exploitation et une analyse permettant de mieux comprendre les dynamiques, et les spécificités des formes d'énergie étudiées.

Le bilan par pays (pour 3 pays proposés, ou choisis par l'étudiant ou le groupe) permet d'étudier des situations diversifiées : pays développés, pays émergents, pays en développement... dans différentes régions du monde. L'étude des évolutions observées, et des perspectives 2027 / 2030 permet d'aborder les aspects dynamiques et les vitesses d'évolution.

Ressources : fiches pays de l'IRENA ; données énergétiques compilées sur OWID, ...

Ce travail peut également être décliné sur des territoires locaux : communes, EPCI, départements, ... à l'aide des nouvelles plateformes open-data de l'énergie. L'intérêt est de combiner l'approche technique et l'approche cartographique / géographique.

Chap – Aménagements hydroélectriques

Ce chapitre présente un intérêt particulier pour appréhender le niveau d'interaction entre l'aménagement, souvent ancien dans les pays développés, et le milieu naturel : cours d'eau, vie aquatique, etc.



Principes de la production hydroélectrique. Hauteur de chute brute et nette, débit turbiné, Puissance hydraulique brute et nette, pertes de charge, rendements de conversion, coefficient technique.

Différents types d'aménagement : de lac, d'éclusée, au fil de l'eau (selon temps de stockage), aménagement de stockage (STEP). Différents types d'ouvrage. Différents types d'équipements.

Calculs et exercices : facteur de charge, débit et volume turbiné, rapport débits turbinés / débit du cours d'eau.

Projet microhydroélectrique : étapes d'un projet, études préalables, exploitation des chroniques de débit, règles environnementales

Influence sur le milieu : aspects thermiques et qualité de l'eau. Poissons migrateurs, aménagements ichtyocompatibles, passes à poissons, turbines ichtyocompatibles. Effet des éclusées et du marnage. Débits réservés, soutien d'étiage. Bilan gains et couts environnementaux.

Les chapitres suivants dont le contenu peut être assez technique ne sont pas détaillés ici, mais peuvent l'être facilement sur demande.

Chap – Géothermie (sur nappe, sur sondes) - potentiel et projets

Chap – Eolien – potentiel et projets

Chap – Solaire photovoltaïque – potentiel et projets

Chap – Solaire thermique – potentiel et projets

Chap – Biomasse énergie – bois – potentiel et projets

Chap – biogaz – potentiel et projets

Chap – réseaux de chaleur et intégration des énergies renouvelables – potentiel et projets

Chap – Maîtrise de la demande d'énergie : un autre gisement d'énergie disponible

C – Bilans environnementaux

Ici sont abordées des méthodes classiques ou spécifiquement développées pour adresser différentes questions liées aux bilans environnementaux portant sur quelques catégories d'impact bien identifiées, notamment : énergie, changement climatique, ressources en eau, sols, ressources de biomasse

Chap – eau et énergie : méthodologie de bilans environnementaux adaptés



Méthodologie de base de l'analyse eau – énergie ; traits communs et distincts des usages de l'eau et de l'énergie, cas des gains concurrents, cas des gains concomitants ; questions d'évaluation et d'arbitrage ; influence du contexte dans les clés d'arbitrage sur l'eau et l'énergie

Cas d'étude traités :

Bilan énergie de l'approvisionnement en eau (usages domestiques, usages d'irrigation) ;

Bilan énergie de l'assainissement des eaux résiduaires ; choix des technologies ; influence de la filière boues

Bilan des volumes mis en jeu dans la production hydroélectrique d'un bassin complètement équipé ; bilans environnementaux sur l'eau et le climat

Etude prospective des impacts sur l'eau de la production de bioénergies selon différents volumes de production et choix de filière mise en jeu

Bilan des débits et volumes d'eau pour le refroidissement des centrales thermoélectriques en circuit ouvert ou en circuit évaporatif : définition d'une unité type et bilans sur l'ensemble du territoire

Chap – Outils de l'analyse environnementale

Analyse de cycle de vie : principes ; mise en œuvre ; exemples sélectionnés ; outils et logiciels

Analyse de cycle de vie adaptés aux bâtiments : principes ; mise en œuvre ; exemples sélectionnés ; outils et logiciels

Empreinte eau (water footprint) : principes, empreinte eau verte, bleue, grise, transferts d'eau virtuelle, exemples sélectionnés, aspects méthodologiques, questions spécifiques à l'évapotranspiration des écosystèmes

Bilan GES : principes, BEGES obligatoire des entreprises et établissements, méthodologie, base carbone, exemples sélectionnés

Impact carbone des constructions (Réglementation environnementale des bâtiments 2020 – volet carbone) : principes, aspects techniques, mise en œuvre, études paramétriques

Empreinte environnementale et production primaire requise : principes, utilisation, exemple, points clés de l'analyse

Chap – étude de problèmes et problématiques spécifiques

Les questions générales listées peuvent être abordés sur des exemples, avec différents outils et méthodes après une recherche documentaire suffisamment complète. Ils mettent en évidence l'influence du contexte et de la définition des archétypes dans la production et l'interprétation des résultats de l'analyse environnementale.



Utiliser de l'eau pour économiser de l'énergie : quand est-ce globalement bénéfique, quand est-ce globalement néfaste ?

Bilans GES de l'élevage de monogastriques et de ruminants selon différents modes d'alimentation et de conduite

Analyse du régime alimentaire des pays occidentaux en regard de marges de mitigation par la demande

Usages de la biomasse pour l'énergie : sous quelles formes, et jusqu'à quel seuil, les gains environnementaux globaux sont-ils possibles ?

Produits biosourcés dans l'industrie et la construction : marges d'incorporation, gains carbone, ressources potentielles

Mobilité bas carbone : valeurs seuil dans les choix modaux et incidence sur les évaluations