UE Géoressources – Licence 2 – R. Thiéry

Du Soleil aux vecteurs énergétiques

Photosynthèse, rendements agricoles, photovoltaïque, hydrogène et carburants de synthèse

Compétences travaillées

À l'issue du TD, vous devrez être capable de :

— distinguer puissance, énergie, rendement et facteur de charge ;

— établir un bilan énergétique simple depuis le rayonnement solaire jusqu'à une énergie utile ;

— comparer la productivité énergétique d'une culture et d'une installation photovoltaïque ;

— dimensionner une chaîne électrolyse–stockage–pile à combustible ;

— utiliser une équation chimique simple pour quantifier la production d'un carburant de synthèse ;

— comparer plusieurs chaînes énergétiques en tenant compte des pertes successives.

Données et conventions

Les valeurs numériques ci-dessous sont volontairement simplifiées pour le TD. Elles servent à établir des ordres de grandeur et ne constituent pas des performances industrielles de référence.

— Surface d'un hectare : 1 ha = 10 000 m^2.

— Irradiation solaire annuelle reçue sur un plan horizontal : $E_{\odot} = 1\,200\,\mathrm{kWh/m^2/year}$.

— Puissance solaire de référence pour le calcul d'une puissance crête : $G = 1\,000\,\mathrm{W/m^2}$.

— Biomasse sèche : pouvoir calorifique inférieur $PCI_b = 4{,}5\,\mathrm{kW\,h/kg}$.

— Grain récolté : contenu énergétique moyen $e_g = 4{,}0\,\mathrm{kW\,h/kg}$.

— Hydrogène : $PCI_{H_2} = 33{,}3\,\mathrm{kW\,h/kg}$.

— Méthane : $PCI_{CH_4} = 13{,}9\,\mathrm{kW\,h/kg}$.

— Masses molaires : $M(H_2) = 2\,\mathrm{g/mol}$, $M(CO_2) = 44\,\mathrm{g/mol}$, $M(CH_4) = 16\,\mathrm{g/mol}$, $M(H_2O) = 18\,\mathrm{g/mol}$.

— Une année comporte 8760 heures.

A. Notions de base et captage naturel de l'énergie solaire

1. QCM de mise en route. Pour chaque proposition, indiquez si elle est vraie ou fausse et justifiez en une phrase.

a) Le watt est une unité d'énergie.

b) Une installation de 1 kW fonctionnant pendant 3 h produit 3 kW h.

c) Un rendement peut être supérieur à 100 % si l'installation fonctionne longtemps.

d) Le facteur de charge compare l'énergie réellement produite à celle qui aurait été produite à puissance nominale pendant toute la période.

e) La biomasse et l'énergie photovoltaïque ont, à l'origine, une source énergétique commune : le rayonnement solaire.

f) L'hydrogène est une source primaire d'énergie disponible naturellement en grande quantité sous forme H_2 à la surface de la Terre.

2. Photosynthèse et stockage chimique. La réaction globale simplifiée de la photosynthèse peut s'écrire :

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O + \text{énergie lumineuse} \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2.$$

a) Identifiez la forme d'énergie reçue par la plante et la forme sous laquelle une partie de cette énergie est stockée.

b) Expliquez pourquoi la photosynthèse peut être considérée comme un mécanisme naturel de conversion et de stockage de l'énergie solaire.

c) Indiquez deux étapes ou processus pouvant dissiper une partie de l'énergie avant qu'elle ne soit disponible pour l'être humain.

3. Rendement énergétique d'une culture. Une culture produit en moyenne 12 t de matière sèche par hectare et par an.

a) Calculez l'énergie solaire annuelle reçue par un hectare.

b) Calculez l'énergie chimique contenue dans la biomasse récoltée.

c) En déduire le rendement apparent de conversion du rayonnement solaire en énergie chimique de la biomasse.

d) Une centrale biomasse transforme cette énergie chimique en électricité avec un rendement de 30 %. Quelle quantité d'électricité peut-on produire par hectare et par an ?

4. Rendement agricole utile. Sur le même hectare, on récolte 7 t de grain par an.

a) Calculez l'énergie chimique contenue dans le grain récolté.

b) Calculez le rendement solaire → énergie alimentaire récoltée.

c) Expliquez pourquoi ce rendement est inférieur au rendement calculé sur l'ensemble de la biomasse sèche.

B. Captage technologique : panneaux photovoltaïques

5. Dimensionnement d'une installation photovoltaïque. On équipe une surface de 200 m^2 de modules photovoltaïques de rendement $\eta_{PV} = 22\,\%$. Pour tenir compte des pertes réelles de l'installation, on adopte un coefficient global de performance $PR = 0{,}80$.

a) Calculez la puissance électrique crête de l'installation pour $G = 1\,000\ W/m^2$.

b) Calculez l'énergie électrique annuelle produite à partir de l'irradiation annuelle donnée.

c) Calculez le nombre d'heures équivalentes à pleine puissance.

d) En déduire le facteur de charge annuel.

6. Biomasse ou photovoltaïque : même surface. Supposons, pour un raisonnement d'ordre de grandeur, qu'un hectare entier puisse être consacré soit à la culture précédente, soit à des panneaux photovoltaïques présentant les mêmes caractéristiques que dans la question 5.

a) Calculez la production électrique photovoltaïque annuelle par hectare.

b) Comparez-la à l'électricité obtenue par combustion de la biomasse de la question 3.

c) Donnez au moins trois raisons pour lesquelles cette comparaison énergétique ne suffit pas, à elle seule, à décider de l'usage réel d'un hectare de terrain.

C. Hydrogène : électrolyse, stockage et pile à combustible

7. Production d'hydrogène par électrolyse. Un électrolyseur reçoit une puissance électrique de 100 kW pendant 8 h. Son rendement énergétique, défini sur le PCI de l'hydrogène, est $\eta_{el} = 70\,\%$.

a) Calculez l'énergie électrique consommée.

b) Calculez l'énergie chimique stockée sous forme d'hydrogène.

c) Calculez la masse d'hydrogène produite.

d) À partir de la réaction $2\,H_2O \rightarrow 2\,H_2 + O_2$, calculez la masse minimale d'eau consommée.

8. Restitution par pile à combustible. L'hydrogène produit à la question précédente alimente ensuite une pile à combustible de rendement électrique $\eta_{PAC} = 55\,\%$.

a) Quelle énergie électrique est restituée par la pile ?

b) Quel est le rendement aller-retour électricité $\rightarrow H_2 \rightarrow$ électricité, en négligeant les pertes de compression, de stockage et de transport ?

c) Une batterie présente un rendement aller-retour de 90 %. Comparez les deux solutions et expliquez pourquoi l'hydrogène peut néanmoins rester intéressant dans certains usages.

D. Carburants de synthèse : exemple du méthane de synthèse

9. Réaction de Sabatier. On considère la réaction :

$$CO_2 + 4\,H_2 \longrightarrow CH_4 + 2\,H_2O.$$

On dispose de 10 kg d'hydrogène, le dioxyde de carbone étant disponible en quantité suffisante.

a) Calculez la quantité de matière de H_2 disponible.

b) Déduisez la masse théorique de CO_2 consommée.

c) Calculez la masse théorique de CH_4 produite.

d) Calculez la masse d'eau formée.

e) Calculez l'énergie chimique contenue dans le méthane produit et comparez-la à l'énergie chimique initialement contenue dans l'hydrogène.

10. Comparer trois chaînes de mobilité. On part de 100 kW h d'électricité renouvelable. On compare trois chaînes simplifiées :

Chaîne	Rendements successifs retenus
Batterie + moteur électrique	batterie : 90 % ; moteur : 90 %
Hydrogène + pile à combustible + moteur	électrolyse : 70 % ; pile : 55 % ; moteur : 90 %
E-méthane + moteur thermique	électrolyse : 70 % ; synthèse du méthane : 80 % ; moteur thermique : 40 %

a) Calculez, pour chaque chaîne, l'énergie mécanique finale disponible.

b) Classez les trois chaînes par rendement global.

c) Expliquez pourquoi un rendement plus faible ne signifie pas nécessairement qu'une filière est sans intérêt.

Question de synthèse

Rédigez une conclusion de dix à quinze lignes répondant à la question suivante : *pourquoi les énergies renouvelables imposent-elles de raisonner en chaînes de conversion plutôt qu'en opposant simplement des « bonnes » et des « mauvaises » technologies ?*
Votre réponse devra mobiliser au moins quatre des notions suivantes : flux solaire, rendement, densité de puissance, intermittence, facteur de charge, stockage, hydrogène, carburant de synthèse, usage final, emprise au sol.