UE Géoressources – Licence 2

Du Soleil aux vecteurs énergétiques

Corrigé – Photosynthèse, photovoltaïque, hydrogène et carburants de synthèse

Point de vigilance

Les valeurs utilisées dans ce TD sont des données pédagogiques simplifiées. L'objectif est de comparer des ordres de grandeur et de comprendre l'accumulation des pertes le long d'une chaîne énergétique. Dans un cas réel, il faudrait préciser le site, la technologie, le climat, le facteur de performance, les auxiliaires, le stockage, le transport et le profil temporel de production et de demande.

1. QCM de mise en route

Éléments de correction

a) **Faux.** Le watt est une unité de puissance. L'énergie s'exprime par exemple en joules ou en kilowattheures.

b) **Vrai.** $E = P\,t = 1\,\text{kW} \times 3\,\text{h} = 3\,\text{kW h}$.

c) **Faux.** Pour une conversion énergétique, le rendement $\eta = E_{utile}/E_{entree}$ est inférieur ou égal à 1.

d) **Vrai.** Sur une année, $f_c = E_{reelle}/(P_n \times 8760\ \text{h})$.

e) **Vrai.** Dans les deux cas, l'énergie initiale provient du rayonnement solaire : captage biologique pour la biomasse, captage technologique pour le photovoltaïque.

f) **Faux.** L'hydrogène moléculaire H_2 est surtout un **vecteur énergétique** : il faut généralement le produire à partir d'eau, d'hydrocarbures ou d'autres composés hydrogénés.

2. Photosynthèse et stockage chimique

Éléments de correction

a) La plante reçoit une **énergie électromagnétique** sous forme de photons. Une partie est convertie en **énergie chimique** stockée dans les liaisons des molécules organiques.

b) La photosynthèse prélève du CO_2 et de l'eau et utilise l'énergie lumineuse pour former de la matière organique plus riche en énergie chimique. Cette matière peut être conservée pendant un certain temps : il s'agit donc à la fois d'une conversion et d'un stockage.

c) Les pertes ou consommations d'énergie sont nombreuses : rayonnement non absorbé, longueurs d'onde non utilisables, respiration de la plante, entretien des tissus, pertes lors de la récolte, du séchage, du transport ou de la transformation.

3. Rendement énergétique d'une culture

Éléments de correction

La surface vaut :

$$A = 1 \text{ ha} = 10\,000 \text{ m}^2.$$

a) Énergie solaire annuelle reçue

$$E_{sol} = A\,E_{\odot} = 10\,000 \times 1200 = 12\,000\,000 \text{ kWh/an} = 12 \text{ GWh/year}.$$

b) Énergie de la biomasse

$$m_b = 12 \text{ t} = 12\,000 \text{ kg},$$

$$E_b = m_b\,PCI_b = 12\,000 \times 4.5 = 54\,000 \text{ kWh} = 54 \text{ MW h}.$$

c) Rendement apparent soleil → biomasse

$$\eta_b = \frac{54\,000}{12\,000\,000} = 4.5 \times 10^{-3} = \boxed{0.45\,\%}.$$

d) Production électrique après combustion

$$E_{elec} = 0.30 \times 54 = \boxed{16{,}2 \text{ MWh/year}}.$$

Le rendement global soleil → électricité vaut alors environ $0.45\,\% \times 30\,\% = 0.135\,\%$.

4. Rendement agricole utile

Éléments de correction

a) Énergie du grain récolté

$$m_g = 7000 \text{ kg}, \qquad E_g = 7000 \times 4.0 = 28\,000 \text{ kWh} = \boxed{28 \text{ MW h}}.$$

b) Rendement solaire → énergie alimentaire récoltée

$$\eta_g = \frac{28\,000}{12\,000\,000} = 2.33 \times 10^{-3} \simeq \boxed{0.23\,\%}.$$

c) Interprétation

Le grain n'est qu'une partie de la biomasse produite. Une fraction de l'énergie chimique est contenue dans les tiges, feuilles, racines et résidus. De plus, la plante consomme une partie des produits de la photosynthèse par respiration. Le rendement agricole utile dépend donc à la fois du rendement photosynthétique et de la fraction de biomasse réellement récoltée pour l'usage considéré.

5. Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

Éléments de correction

Données : $A = 200\,\text{m}^2$, $\eta_{PV} = 0.22$, $PR = 0.80$.

a) Puissance crête

$$P_c = G\,A\,\eta_{PV} = 1000 \times 200 \times 0.22 = 44\,000\ \text{W} = \boxed{44\,\text{kW}}.$$

b) Production annuelle

$$E_{PV} = E_{\odot}\,A\,\eta_{PV}\,PR = 1200 \times 200 \times 0.22 \times 0.80.$$

$$E_{PV} = 42\,240\ \text{kWh/an} \simeq \boxed{42{,}2\,\text{MWh/year}}.$$

c) Heures équivalentes à pleine puissance

$$t_{eq} = \frac{E_{PV}}{P_c} = \frac{42\,240}{44} = \boxed{960\ \text{h/an}}.$$

d) Facteur de charge

$$f_c = \frac{960}{8760} = 0.1096 \simeq \boxed{11.0\,\%}.$$

6. Biomasse ou photovoltaïque : même surface

Éléments de correction

Un hectare représente 50 fois la surface de $200\,\text{m}^2$. La production photovoltaïque annuelle est donc :

$$E_{PV,ha} = 50 \times 42.24 = \boxed{2{,}112\,\text{GWh/year}}.$$

La production électrique issue de la biomasse était de 16,2 MWh/year. Le rapport vaut :

$$\frac{2112}{16.2} \simeq \boxed{130}.$$

Dans ce scénario simplifié, un hectare photovoltaïque produit donc environ 130 fois plus d'électricité qu'un hectare de culture utilisé pour produire de l'électricité par combustion de la biomasse.
Cette comparaison ne suffit pas pour décider d'un usage du sol. Il faut notamment considérer :

— la fonction alimentaire de l'agriculture ;

— la qualité agronomique des sols et les conflits d'usage ;

— la possibilité d'agrivoltaïsme ou d'installation sur des surfaces déjà artificialisées ;

— la saisonnalité, l'intermittence et les besoins de stockage ;

— les matériaux nécessaires aux équipements ;

— la biodiversité, le paysage, l'eau et les autres services écosystémiques ;

— la possibilité de valoriser des déchets ou résidus biomasse plutôt que des cultures dédiées.

7. Production d'hydrogène par électrolyse

Éléments de correction

a) Énergie électrique consommée

$$E_{el} = P\,t = 100 \times 8 = \boxed{800\,\text{kW h}}.$$

b) Énergie chimique de l'hydrogène

$$E_{H_2} = \eta_{el} E_{el} = 0.70 \times 800 = \boxed{560\,\text{kW h}}.$$

c) Masse d'hydrogène

$$m_{H_2} = \frac{560}{33.3} \simeq \boxed{16{,}8\,\text{kg}}.$$

d) Masse minimale d'eau

D'après $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$, 36 g d'eau donnent 4 g d'hydrogène, soit :

$$\frac{m_{H_2O}}{m_{H_2}} = \frac{36}{4} = 9.$$

Ainsi :

$$m_{H_2O} = 9 \times 16.8 \simeq \boxed{151\,\text{kg}}.$$

Il s'agit de la consommation stoechiométrique minimale ; une installation réelle demande davantage d'eau en tenant compte de la purification et des auxiliaires.

8. Restitution par pile à combustible

Éléments de correction

a) Énergie électrique restituée

$$E_{ret} = \eta_{PAC} E_{H_2} = 0.55 \times 560 = \boxed{308\,\text{kW h}}.$$

b) Rendement aller-retour

$$\eta_{AR} = \frac{308}{800} = 0.385 = \boxed{38.5\,\%}.$$

On retrouve directement :

$$\eta_{AR} = 0.70 \times 0.55 = 38.5\,\%.$$

c) Comparaison avec une batterie

La batterie restitue environ 90 % de l'électricité, contre 38.5 % dans la chaîne hydrogène simplifiée. Elle est donc nettement plus efficace pour un stockage de courte durée lorsque l'électricité peut être stockée directement.

L'hydrogène peut cependant présenter un intérêt lorsque l'on recherche un stockage de grande capacité ou de longue durée, un combustible transportable, une alimentation de procédés industriels, ou un intermédiaire pour produire de l'ammoniac, du méthane ou des carburants de synthèse. Le rendement n'est donc qu'un critère parmi d'autres.

9. Réaction de Sabatier et méthane de synthèse

Éléments de correction

Réaction :

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

a) Quantité de matière de H_2

$$n(H_2) = \frac{10\,000 \text{ g}}{2 \text{ g mol}^{-1}} = \boxed{5000 \text{ mol}}.$$

b) Masse de CO_2 consommée

Quatre moles de H_2 consomment une mole de CO_2 :

$$n(CO_2) = \frac{5000}{4} = 1250 \text{ mol}.$$

$$m(CO_2) = 1250 \times 44 = 55\,000 \text{ g} = \boxed{55 \text{ kg}}.$$

c) Masse de méthane produite

$$n(CH_4) = 1250 \text{ mol},$$

$$m(CH_4) = 1250 \times 16 = 20\,000 \text{ g} = \boxed{20 \text{ kg}}.$$

d) Masse d'eau formée

Deux moles d'eau sont formées par mole de méthane :

$$n(H_2O) = 2500 \text{ mol},$$

$$m(H_2O) = 2500 \times 18 = 45\,000 \text{ g} = \boxed{45 \text{ kg}}.$$

e) Comparaison des énergies chimiques

$$E_{CH_4} = 20 \times 13.9 = \boxed{278 \text{ kW h}}.$$

L'énergie chimique initiale de 10 kg d'hydrogène vaut :

$$E_{H_2} = 10 \times 33.3 = \boxed{333 \text{ kW h}}.$$

Le rapport est :

$$\frac{278}{333} \simeq \boxed{83.5\,\%}.$$

La différence n'est pas une disparition mystérieuse d'énergie : la réaction de méthanation est exothermique et une partie de l'énergie est libérée sous forme de chaleur. Dans une installation réelle, d'autres pertes s'ajoutent encore.

10. Comparaison de trois chaînes de mobilité

Éléments de correction

On part de 100 kW h d'électricité.
Batterie + moteur électrique

$$E_{mec} = 100 \times 0.90 \times 0.90 = \boxed{81\,\text{kW h}}.$$

Rendement global : 81 %.
Hydrogène + pile à combustible + moteur

$$E_{mec} = 100 \times 0.70 \times 0.55 \times 0.90 = \boxed{34{,}7\,\text{kW h}}.$$

Rendement global : 34.7 %.
E-méthane + moteur thermique

$$E_{mec} = 100 \times 0.70 \times 0.80 \times 0.40 = \boxed{22{,}4\,\text{kW h}}.$$

Rendement global : 22.4 %.
Le classement est donc :

$$\boxed{\text{batterie} > \text{hydrogène} > \text{e-méthane}}$$

si le seul critère retenu est la quantité d'énergie mécanique obtenue à partir d'une même quantité d'électricité initiale.
Un rendement faible n'exclut cependant pas un usage. Les carburants moléculaires sont faciles à stocker sur de longues durées, peuvent être transportés, et peuvent utiliser dans certains cas des infrastructures ou des moteurs existants. Ils peuvent aussi être nécessaires lorsque l'électrification directe est difficile. La bonne question n'est donc pas seulement « quel rendement ? », mais aussi « pour quel usage, quelle durée de stockage, quelle puissance et quelles contraintes ? ».

Point de vigilance

Les rendements de chaînes se **multiplient**. Une chaîne comportant plusieurs conversions successives peut donc perdre rapidement une grande fraction de l'énergie initiale, même si chaque étape prise séparément semble relativement performante.

11. Exemple de conclusion de synthèse

Éléments de correction

Les énergies renouvelables doivent être analysées comme des chaînes de conversion. La biomasse et le photovoltaïque utilisent tous deux le flux solaire, mais avec des rendements et des densités de puissance très différents. Le photovoltaïque convertit directement une fraction du rayonnement en électricité, tandis que la biomasse passe par la photosynthèse, puis éventuellement par une conversion thermique. L'électricité solaire est en outre intermittente : sa production ne coïncide pas toujours avec la demande, ce qui impose du stockage ou une adaptation des usages. La batterie est très efficace pour stocker directement l'électricité, mais l'hydrogène apporte une possibilité de stockage chimique et peut alimenter une pile à combustible ou servir à fabriquer des carburants de synthèse. Chaque conversion supplémentaire réduit le rendement global, ce qui augmente la quantité d'énergie primaire renouvelable et souvent l'emprise au sol nécessaires pour un même service final. Le choix d'une filière dépend donc du rendement, mais aussi de la durée de stockage, de la transportabilité, des infrastructures disponibles et de l'usage final. Il n'existe pas une technologie universellement meilleure : il faut choisir la chaîne la plus cohérente avec le besoin à satisfaire.