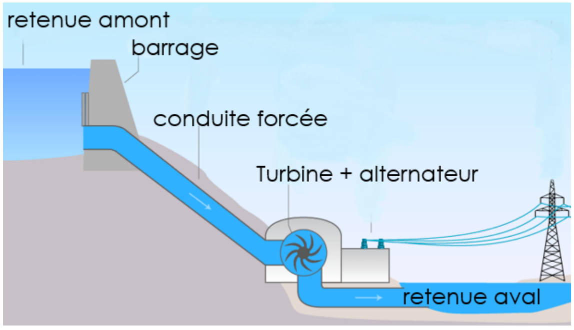
Sorbonne Université Année 2023-2024
Licence de Physique
LU2PY125: UE Climat-Énergie-Société

TD n°7 - Énergies hydraulique et solaire

Durée : 2h

Exercice I Hydroélectricité et stockage de l'énergie

On s'intéresse à l'usine souterraine de la centrale hydroélectrique de Grand'Maison, qui fonctionne à partir d'une retenue d'eau en amont (lac de Grand'Maison) de volume utile 132 millions de m^3 et d'une retenue en aval (lac du Verney) de volume utile 14,3 millions de m^3.



Q.1) L'eau circule de l'amont vers l'aval dans une conduite forcée avec un débit de 140 m^3/s, sur une hauteur de chute de 955 m, ce qui génère une puissance électrique de 1200 MW. En déduire l'efficacité énergétique de la conversion mécanique - électrique.

R.1) (cette centrale possède aussi une usine en surface qui ne fonctionne pas en mode pompage : on ne l'évoque pas ici pour simplifier)

La puissance générée est donnée par (formule vue en cours) :

$$P = D_v \rho g H \epsilon$$

où ϵ est l'efficacité de conversion mécanique - électrique par le système turbine - alternateur. On en déduit $\epsilon = P/(\rho g D_v H) = 92$ %.

Q.2) Cette centrale est aussi une STEP (station de transfert d'énergie par pompage) servant à stocker l'énergie en surplus, générée pendant les heures creuses de consommation, et à la restituer pendant les pics de demande. Supposant que la conversion électrique - mécanique se fait à la même efficacité que celle déterminée précédemment, quelle énergie en surplus peut être récupérée en vidant totalement la retenue en aval ?

R.2) L'énergie potentielle mécanique stockée sera $V \rho g H = 133$ TJ $= 37$ GWh. Il faudra fournir $37/\epsilon =$ 40 GWh d'énergie électrique.

Les STEP sont actuellement le principal (et presque unique) moyen de stockage et de restitution de l'énergie électrique sur le réseau. Elles ont donc a priori un rôle important à jouer pour des pays qui miseraient sur les énergies renouvelables. Parmi les autres technologies qui pourraient monter en puissance : utiliser les batteries des voitures électriques des particuliers comme stockage à condition de s'appuyer sur une gestion fine du réseau ; générer du gaz, de l'hydrogène etc.

Exercice II Énergie solaire : quelques ordres de grandeur

L'objectif de cet exercice est de faire quelques calculs "sur un coin de table". Vous pouvez chercher sur Internet les grandeurs dont vous auriez besoin.

Q.3) La puissance rayonnée par le Soleil est environ 3.8×10^{26} W. Estimer la puissance solaire arrivant en haut de l'atmosphère sur une surface équivalente à la France métropolitaine $\mathcal{P}_F$. La comparer à la consommation électrique moyenne de la France 54 GW.

R.3) La distance Soleil-Terre étant $D \simeq 1.5 \times 10^{11}$ m, le rayonnement arrivant en haut de l'atmosphère est de $1345\ \mathrm{W\,m^{-2}}$ - c'est la quantité E vue dans la partie climat.

La surface de la France métropolitaine est $S \simeq 5.5 \times 10^{11}\ \mathrm{m^2}$ (et $6.7 \times 10^{11}\ \mathrm{m^2}$ en incluant les outre-mers), donc une première estimation de $\mathcal{P}_F$ est $ES = 750$ TW. Une étape suivante serait de tenir compte de la latitude de la France en multipliant par $\cos(46°)$: $\mathcal{P}_F \sim 520$ TW. Pour aller plus loin, il faudrait tenir compte aussi de la variation en fonction de la saison, et bien sûr en fonction de l'heure puisque la valeur que nous avons trouvée est le maximum de la journée.

Il y a donc un facteur environ 10 000 par rapport à notre consommation électrique annuelle.

Q.4) Pour quelles raisons cette valeur $\mathcal{P}_F$ est-elle différente de la puissance accessible depuis le sol en France à tout instant?

R.4) La puissance au sol est plus basse à cause des nuages et de l'absorption dans l'atmosphère.

Q.5) Moyenné sur une durée d'un an, le flux lumineux solaire mesuré au sol, en France métropolitaine, est d'environ 150 W/m^2. Quelle est la puissance solaire totale reçue au sol par la France métropolitaine ? Quel pourcentage de la surface française faudrait-il couvrir de panneaux photovoltaïques pour produire l'intégralité de notre consommation électrique ?

R.5) N.B. 150 W/m^2 est la moyenne annuelle, c'est donc aussi a fortiori une moyenne jour - nuit.

La puissance sommée sur la superficie française est donc 8.2×10^{13} W.

Gros piège : il faut penser à introduire l'efficacité énergétique du panneau, qui a été donnée en cours et est rappelée plus bas. Prenons $\eta = 15\,\%$: il faut alors couvrir une portion 0,4 $\%$ de la superficie française totale. En fait peut-être un peu plus si on tient compte de l'espacement entre les panneaux.

Exercice III Limite de Shockley-Queisser

Les panneaux photovoltaïques du commerce sont très généralement fabriqués à base de silicium. Malgré de nombreux efforts, leur efficacité énergétique est limitée à 15-20 %. Les meilleurs cellules au silicium de laboratoire n'atteignent que $\sim$ 27%. Cette efficacité est bornée par une limite fondamentale, la limite de Shockley-Queisser, que nous allons décrire ici.

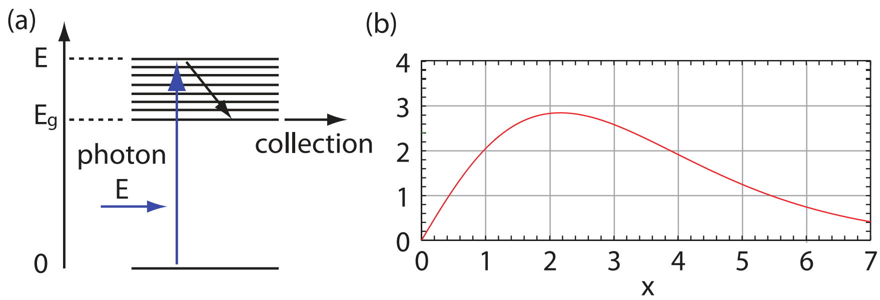


Figure 1: (a) Schéma de l'effet photovoltaïque. (b) Fonction $g(x) = x \int_{\epsilon=x}^{+\infty} f(\epsilon)d\epsilon$.

Le rayonnement solaire incident sera approximé par le spectre du corps noir[1], avec la température du Soleil $T_S = 5778\,\mathrm{K}$ et $k_\mathrm{B} = 1.38 \times 10^{-23}\,\mathrm{J\,K^{-1}}$ la constante de Boltzmann. Pour alléger les formules, nous utiliserons des énergies normalisées $\epsilon = E/(k_\mathrm{B}T_S)$ (sachant que $k_\mathrm{B}T_S \simeq 0.5\,\mathrm{eV}$). Le gap du semiconducteur constituant la cellule photovoltaïque sera noté $\epsilon_g = E_g/(k_\mathrm{B}T_S)$.

Le nombre de photons d'énergie comprise entre ϵ et $\epsilon + \mathrm{d}\epsilon$ arrivant par seconde sur le panneau photovoltaïque dépend de la loi du corps noir, mais aussi de paramètres dépendant de l'environnement du panneau qu'on regroupe dans une constante A:

$$n_T(\epsilon) = \frac{\mathrm{d}^2 N}{\mathrm{d}\epsilon \mathrm{d}t} = A f(\epsilon) \qquad \text{avec} \qquad f(\epsilon) = \frac{\epsilon^2}{e^\epsilon - 1}. \tag{1}$$

Q.6) De quelles propriétés du panneau et de son environnement peut dépendre la constante A? On ne cherchera pas à l'exprimer.

R.6) Cette constante détermine si la cellule photovoltaïque reçoit plus ou moins de puissance, elle dépend donc de la couverture nuageuse, de l'orientation de la cellule et de la position du Soleil (donc du jour et de l'heure ainsi que de la saison et de la latitude), et de la surface de la cellule.

On ne fait pas non plus mention dans ce problème de la réflexion de la lumière à la surface du panneau solaire mais ce facteur peut aussi contribuer à A. La surface du silicium est rendue rugueuse par attaque chimique afin de faciliter la pénétration de la lumière.

Q.7) Exprimer sous forme d'une intégrale sur ϵ la puissance lumineuse totale $\mathcal{P}_i$ incidente sur la cellule.

R.7)

$$\mathcal{P}_i = \int_{\epsilon=0}^{+\infty} A\, f(\epsilon)\, \epsilon\, d\epsilon$$

Dans le meilleur des cas, (1) la cellule photovoltaïque absorbera 100 % des photons incidents d'énergie $\epsilon \geq \epsilon_g$ et (2) chaque photon absorbé génèrera la circulation d'un électron d'énergie ϵ_g.

R.7) C'est-à-dire que (1) la couche absorbante est suffisamment épaisse et que (2) l'on néglige les pertes électriques dans la cellule.

Q.8) Exprimer sous forme d'une intégrale la puissance électrique $\mathcal{P}$ récupérée dans le meilleur des cas.

R.8)

$$\mathcal{P} = \int_{\epsilon=\epsilon_g}^{+\infty} A f(\epsilon)\, \epsilon_g\, d\epsilon$$

Q.9) En déduire, dans le meilleur des cas, l'efficacité énergétique $\eta = \mathcal{P}/\mathcal{P}_i$, exprimée en fonction de $\epsilon_g/(k_\mathrm{B}T_S)$. Sachant que $\int_{\epsilon=0}^{+\infty} f(\epsilon)\, \epsilon\, d\epsilon \simeq 6,5$ et à l'aide de la figure 1(b), déterminer pour quel gap ϵ_g cette efficacité est maximale et sa valeur.

R.9)

$$\eta = \frac{\epsilon_g \int_{\epsilon=\epsilon_g}^{+\infty} f(\epsilon)\, \mathrm{d}\epsilon}{\int_{\epsilon=0}^{+\infty} f(\epsilon)\, \epsilon \mathrm{d}\epsilon} = \frac{g(\epsilon_g)}{6.5}$$

On lit sur la figure que $g(x)$ est maximale pour $x = 2.2$, l'efficacité énergétique est donc maximale pour $\epsilon_g = 2.2$, ce qui correspond à $E_g = 1.1\,\mathrm{eV}$.

Alors, $g(x) = 2.8$ et donc $\eta = 44\,\%$

[1] Cette formule, issue de la théorie thermodynamique de Planck, décrit assez bien le rayonnement du Soleil mais ne prend pas en compte l'absorption de certaines fréquences par l'atmosphère.

Q.10) Les cellules actuellement utilisées sont presque toutes à base de silicium, de gap $1.1\,\mathrm{eV}$: quel est d'après notre calcul le rendement ultime de ces cellules? Comparer ce rendement aux valeurs effectivement atteintes.

R.10) Dans notre calcul simplifié, le silicium est à l'optimum (correspond à $\epsilon_g = 2.2$) et donc on a un rendement ultime de 44 $\%$.

Remarque: en fait le calcul de Shockley et Queisser inclut aussi d'autres facteurs électriques un peu moins importants, et le spectre du corps noir peut aussi être remplacé par le spectre réel (mesuré) du Soleil, ce qui aboutit à: η_{SQ} = 33,7 $\%$ pour $E_{g,SQ}$ = $1.34\,\mathrm{eV}$.