

ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

EXAMEN FINAL

22 juin 2026

Consignes

- Durée de l'examen : 3 heures.
- Répondez à chaque question sur des feuilles séparées et indiquez votre nom sur chaque feuille.
- Les réponses doivent être rédigées dans un style scientifique clair et structuré. Les hypothèses utilisées doivent être explicitement mentionnées. Un raisonnement ne mentionnant pas clairement ses hypothèses pourra être pénalisé.
- Soyez concis, précis et structuré afin d'éviter toute pénalisation inutile.
- Les réponses aux différentes sous-questions doivent être clairement identifiées.
- Vous pouvez uniquement utiliser du papier, du matériel pour écrire et une calculatrice.
- Les téléphones portables doivent rester éteints et hors de portée pendant toute la durée de l'examen.

Bon examen !

Question 1 (/12) (A. /3, B. /2, C. /2, D. /2, E. /3)

Dans un contexte de forte baisse des coûts des technologies renouvelables, il devient envisageable de produire de l'électricité à grande échelle dans des régions éloignées disposant de ressources abondantes, puis de transporter cette énergie vers les centres de consommation en Europe.

Vous êtes chargé d'évaluer la pertinence d'un tel projet pour la Belgique. Vous étudiez le cas d'un parc éolien onshore situé au sud-est du Groenland, équipé d'un système de batteries.

A. Établissez l'expression mathématique de la puissance produite par unité de surface (W/m^2) d'un parc éolien ayant les caractéristiques suivantes :

- (i) une vitesse du vent v ;
- (ii) des éoliennes de diamètre d ;
- (iii) des éoliennes placées sur un quadrillage de pas égal à $5d$;
- (iv) un coefficient de puissance C_p .

B. Expliquez la différence entre le coefficient de puissance C_p et le facteur de charge d'un parc éolien.

C. En utilisant l'expression obtenue en A, estimez la superficie que devrait couvrir un tel parc éolien au sud-est du Groenland pour produire, en ordre de grandeur, une quantité annuelle d'électricité équivalente à la consommation électrique annuelle de la Belgique, estimée à 85 TWh/an.

Dans cette question, on suppose que l'expression obtenue en A permet d'estimer directement la puissance moyenne produite par unité de surface du parc.

Considérez que :

- (i) la vitesse moyenne représentative du vent est $v = 12 \text{ m/s}$;
- (ii) la densité de l'air est $\rho = 1.3 \text{ kg/m}^3$;
- (iii) le coefficient de puissance est $C_p = 0.4$;

D. Proposez deux solutions pour transporter en Belgique l'énergie produite au sud du Groenland.

E. Discutez si la production d'énergie dans une région éloignée comme le Groenland vous semble constituer une solution pertinente pour alimenter la Belgique. Veillez à bien argumentez votre réponse.

Question 2 (/12) (A. /3, B. /6, C. /3)

Lors de la leçon sur les challenges des réseaux de distribution, les principales transformations du système électrique en Belgique ainsi que les défis qu'elles engendrent pour les réseaux de distribution ont été présentés.

A. Identifier trois évolutions majeures du système énergétique belge de ces dix dernières années.

B. Citer et expliquer quatre problèmes concrets que ces évolutions posent aux réseaux de distribution.

C. Proposer deux solutions envisagées pour y répondre.

Question 3 (/8) (A. /4, B. /2, C. /2)

On considère un véhicule se déplaçant à vitesse constante v sur une route rectiligne et de pente nulle, entre deux arrêts espacés d'une distance d . On néglige la résistance au roulement.

A. Développez le modèle proposé dans le cours pour exprimer l'énergie consommée par le véhicule sur la distance d , en tenant compte des pertes liées à l'accélération et au frottement de l'air.

B. Déterminez la distance critique d^* en dessous de laquelle l'énergie perdue lors du freinage devient supérieure à l'énergie perdue à cause du frottement de l'air.

C. Sur base de votre résultat, expliquez ce qui devrait être fait en fonction de la valeur de d pour minimiser la consommation d'énergie.

Question 4 (/9) (A. /3, B. /2, C. /2, D. /2)

On considère une centrale nucléaire de type PWR (“Pressurised Water Reactor”) dont le fonctionnement est illustré à la Figure 1.

- A. Expliquez le rôle des trois circuits d’eau dans une centrale PWR.
- B. Pourquoi l’eau du circuit primaire est-elle maintenue à haute pression ?
- C. Expliquez pourquoi une grande partie de l’énergie (environ 60%) est dissipée sous forme de chaleur dans une centrale PWR.
- D. Expliquez pourquoi le déploiement des SMR (“Small Modular Reactors”) peut permettre une meilleure valorisation de la chaleur produite par les centrales nucléaires.

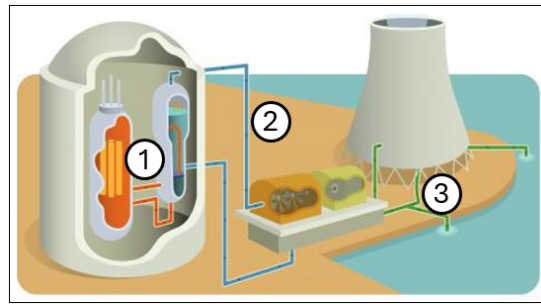


FIGURE 1 – Les trois circuits d’eau d’une centrale PWR

Question 5 (/16) (A. /2, B. /6, C. /2, D. /3, E. /3)

L'Union européenne (UE) vise un système énergétique 100% renouvelable. Dans ce cadre, elle envisage d'investir massivement dans des centrales photovoltaïques situées dans des régions à fort ensoleillement, comme l'Estrémadure en Espagne.

L'électricité produite pourrait être utilisée à la fois pour couvrir la consommation d'électricité et pour produire des carburants de synthèse (e-fuels), notamment du e-kérosène destiné à la décarbonation du secteur de l'aviation.

A. Expliquez le principe physique permettant aux panneaux photovoltaïques de produire de l'électricité.

B. L'électricité produite par les énergies renouvelables fluctue fortement à différentes échelles de temps (journalière, saisonnière), tandis que la demande varie également.

Présentez quatre stratégies permettant d'assurer l'équilibre entre production et consommation dans un système électrique fortement basé sur les énergies renouvelables intermittentes.

C. Expliquez ce qu'est un kérosène de synthèse et décrivez les principales étapes de sa production à partir d'électricité renouvelable.

D. Estimez la surface de panneaux photovoltaïques nécessaire pour produire suffisamment de kérosène de synthèse afin de couvrir la consommation annuelle de carburants aviation de l'UE.

Considérez que :

- (i) l'irradiation solaire moyenne est de 200 W/m^2 ;
- (ii) le rendement des panneaux photovoltaïques est de 25 % ;
- (iii) le rendement global de conversion électricité \rightarrow kérosène de synthèse est de 50 % ;
- (iv) la densité énergétique du kérosène est de 10.3 kWh/L ;
- (v) la consommation annuelle de carburants aviation dans l'UE est de 60 milliards de litres ;
- (vi) toute la surface considérée est entièrement couverte de panneaux photovoltaïques.

E. Discutez si la production de kérosène de synthèse constitue une solution pertinente pour décarboner le secteur de l'aviation.

Comparez cette option avec des alternatives vues au cours en incluant les avantages et limites de ces solutions pour décarboner l'aviation.

Question 6 (/6) (A. /2, B. /1, C. /1, D. /2)

Considérez un bâtiment chauffé situé en Belgique. Les pertes de puissance thermique d'un bâtiment proviennent principalement de deux mécanismes : la conduction et la ventilation. Elles peuvent être modélisées par les relations suivantes :

Pertes par conduction :

$$P_{cond} = AU\Delta T$$

Pertes par ventilation :

$$P_{vent} = \frac{1}{3}NV\Delta T$$

où :

- A est la surface d'échange thermique ;
- U est le coefficient de transmittance thermique ;
- N est le taux de renouvellement d'air ;
- V est le volume intérieur du bâtiment ;
- $\Delta T = T_{int} - T_{ext}$ est la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur.

On considère un bâtiment caractérisé par :

- (i) une surface d'échange thermique A de 400 m^2 ;
- (ii) un volume intérieur V de 250 m^3 ;
- (iii) un coefficient de transmittance thermique ("thermal transmittance") moyen U de $0,4 \text{ W/m}^2/\text{K}$;
- (iv) un taux de renouvellement d'air N de $0,6$;
- (v) une température intérieure moyenne T_{int} de 20°C ;
- (vi) une température extérieure moyenne T_{ext} de 5°C .

A. Expliquez la différence entre pertes par conduction et pertes par ventilation.

B. Calculez la puissance thermique perdue par conduction.

C. Calculez la puissance thermique perdue par ventilation.

D. Si on ajoute une couche d'isolant thermique sur les murs du bâtiment, la valeur de U va-t-elle augmenter ou diminuer ? Justifiez votre réponse.