Batiment à énergie positive

Bac S 2014 Antilles-Guyane rattrapage (ancien programme) · Exercice 2 **10 points** **Durée conseillée 1 h 40**

1.1 Estimer le coût annuel de la consommation électrique en France par habitant.

Données utiles figure 1 du document 1 ; prix du kWh d'électricité en France en 2013 : $0{,}13$ €

Sur la figure 1, le point repéré « France » a pour abscisse environ 140 kWh par habitant et par jour.

Sur une année de 365 jours, au prix de $0{,}13$ € le kilowattheure :

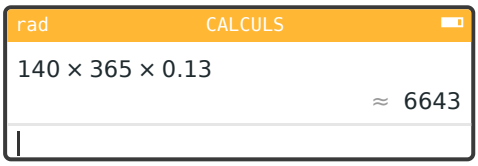
$$\text{coût} = 140 \times 365 \times 0{,}13 = 6{,}6 \times 10^3 \text{ €}$$

Le coût annuel est d'environ $6{,}6 \times 10^3$ € par habitant.

PIÈGE
La figure donne une consommation par jour : sans le facteur 365, on obtient le coût journalier (environ 18 €) et non le coût annuel.

COMPRENDRE
La lecture graphique et le prix du kilowattheure ont deux chiffres significatifs : le résultat aussi. « Estimer » demande un ordre de grandeur ; toute lecture entre 130 et 150 kWh est recevable.

À LA CALCULATRICE



1.2 Interpréter la figure 1 en 10 lignes maximum.

La figure 1 place chaque pays selon sa consommation d'électricité par habitant et par jour (abscisse) et son indice de développement humain (ordonnée).

- Pour les faibles consommations (moins de 50 kWh par habitant et par jour environ), l'IDH croît très vite avec la consommation : il passe de $0{,}4$ (R. D. Congo, Mozambique) à plus de $0{,}8$ (Cuba). Accéder à l'électricité améliore directement la santé, l'éducation et le niveau de vie.
- Au-delà d'une centaine de kWh par habitant et par jour, l'IDH plafonne entre $0{,}9$ et 1 : la France (140), les États-Unis (250) et l'Islande (390) ont des IDH voisins.

L'IDH augmente avec la consommation d'électricité puis sature : au-delà d'environ 100 kWh par habitant et par jour, consommer davantage n'apporte plus de bien-être supplémentaire, ce qui laisse une marge d'économie d'énergie aux pays développés.

MÉTHODE
Interpréter un nuage de points : 1) nommer les deux grandeurs ; 2) décrire l'allure par zones, avec des valeurs lues ; 3) proposer une explication ; 4) conclure en lien avec le thème de l'exercice.

2.1 Quel est le rôle du polystyrène ? Justifier le choix de ce matériau.

Données utiles conductivités thermiques en $\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$: polystyrène $0{,}036$ (document 3) ; plâtre $0{,}325$; béton $1{,}4$; ciment $1{,}1$

Le polystyrène sert d'isolant thermique : il limite le transfert thermique par conduction entre l'intérieur et l'extérieur de la maison.

Sa conductivité thermique, $0{,}036\ \mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$, est environ 10 fois plus faible que celle du plâtre et 30 à 40 fois plus faible que celles du ciment et du béton. Or, d'après le document 2, $R_{th} = \dfrac{e}{\lambda \times S}$: à épaisseur et surface égales, plus λ est petite, plus la résistance thermique est grande.

Le polystyrène est l'isolant du mur : sa très faible conductivité thermique lui donne une grande résistance thermique pour une faible épaisseur.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\dfrac{0.325}{0.036} \approx 9.027778$

$\dfrac{1.4}{0.036} \approx 38.88889$

2.2 Déterminer la résistance thermique équivalente R_{the} pour le pan de mur.

Données utiles $S = 20\ \mathrm{m^2}$; $e_1 = 1{,}3$ cm ; $e_2 = e_4 = 5{,}0$ cm ; $e_3 = 20$ cm ; $e_5 = 1{,}5$ cm ; conductivités de la question 2.1

Les parois sont superposées : les résistances thermiques s'ajoutent (document 2), avec $R_{th} = \dfrac{e}{\lambda \times S}$ et les épaisseurs en mètres.

- Plâtre : $R_1 = \dfrac{1{,}3 \times 10^{-2}}{0{,}325 \times 20} = 2{,}0 \times 10^{-3}\ \mathrm{K \cdot W^{-1}}$
- Polystyrène (deux couches, $e_2 + e_4 = 10$ cm) : $R_2 + R_4 = \dfrac{10 \times 10^{-2}}{0{,}036 \times 20} = 0{,}139\ \mathrm{K \cdot W^{-1}}$
- Béton : $R_3 = \dfrac{20 \times 10^{-2}}{1{,}4 \times 20} = 7{,}1 \times 10^{-3}\ \mathrm{K \cdot W^{-1}}$
- Ciment : $R_5 = \dfrac{1{,}5 \times 10^{-2}}{1{,}1 \times 20} = 6{,}8 \times 10^{-4}\ \mathrm{K \cdot W^{-1}}$

$R_{the} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = 0{,}0020 + 0{,}139 + 0{,}0071 + 0{,}0007 = 0{,}149\ \mathrm{K \cdot W^{-1}}$

$R_{the} = 0{,}15\ \mathrm{K \cdot W^{-1}}$

PIÈGE
Laisser les épaisseurs en centimètres rend le résultat 100 fois trop grand. Ne pas oublier non plus que le polystyrène apparaît deux fois dans le mur.

COMPRENDRE
Les 10 cm de polystyrène représentent 93 % de la résistance totale, alors que les 20 cm de béton n'en apportent que 5 % : c'est l'isolant qui fait l'isolation, pas l'épaisseur du mur.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\dfrac{1.3 \times 10^{-2}}{0.325 \times 20} \approx 0.002$

$\dfrac{10 \times 10^{-2}}{0.036 \times 20} \approx 0.1388889$

$\dfrac{20 \times 10^{-2}}{1.4 \times 20} \approx 0.007142857$

$\dfrac{1.5 \times 10^{-2}}{1.1 \times 20} \approx 6.818182 \times 10^{-4}$

$2 \times 10^{-3} + 0.1388888889 + 7.142857143 \times 10^{-3} + 6.818181818 \times 10^{-4} \approx 0.1487136$

2.3 Entre le polystyrène et la laine de chanvre, quel matériau serait-il préférable d'utiliser ? Argumenter avec un calcul.

Données utiles laine de chanvre : $\lambda = 0{,}039\ \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, bilan carbone faible ; polystyrène : bilan carbone élevé ; $R_{the} = 0{,}149\ \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ (2.2)

Avec 10 cm de laine de chanvre à la place du polystyrène :

$R_{\text{chanvre}} = \dfrac{10 \times 10^{-2}}{0{,}039 \times 20} = 0{,}128\ \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ contre $0{,}139\ \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ pour le polystyrène.

La résistance du mur deviendrait $R'_{the} = 0{,}128 + 0{,}0098 = 0{,}138\ \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, soit une baisse de 7 % seulement : l'isolation est presque aussi bonne.

En revanche, le bilan carbone de la laine de chanvre est faible alors que celui du polystyrène est élevé : sa fabrication émet beaucoup moins de gaz à effet de serre.

La laine de chanvre est préférable : isolation à peine inférieure ($0{,}14$ contre $0{,}15\ \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ pour le mur) et bilan carbone bien meilleur.

MÉTHODE

Pour retrouver la même résistance qu'avec le polystyrène, il suffirait d'une épaisseur de chanvre multipliée par $0{,}039/0{,}036$, soit 10,8 cm au lieu de 10 cm : un argument chiffré de plus.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\dfrac{10 \times 10^{-2}}{0.039 \times 20} \approx 0.1282051$

$0.1282051282 + 2 \times 10^{-3} + 7.142857143 \times 10^{-3} + 6.818181818 \times 10^{-4} \approx 0.1380298$

$\dfrac{0.1487135642 - 0.1380298035}{0.1487135642} \times 100 \approx 7.18412$

$\dfrac{10 \times 0.039}{0.036} \approx 10.83333$

3.1 Exprimer, puis calculer, la variation de l'énergie interne ΔU de l'air contenu dans la maison.

Données utiles $T_1 = 19{,}0\ °\text{C}$; $T_2 = 15{,}6\ °\text{C}$; $c_a = 1000\ \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$; $V = 400\ \text{m}^3$; $\rho = 1{,}3\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Système : l'air intérieur, de masse $m_a = \rho \times V$. Sa température varie sans changement d'état :

$\Delta U = m_a \times c_a \times (T_2 - T_1) = \rho \times V \times c_a \times (T_2 - T_1)$

$\Delta U = 1{,}3 \times 400 \times 1000 \times (15{,}6 - 19{,}0) = -1{,}8 \times 10^6\ \text{J}$

$\Delta U = -1{,}8 \times 10^6\ \text{J}$

PIÈGE

Écrire $T_1 - T_2$ donne un résultat positif : la variation est toujours « état final moins état initial ». Inutile de convertir en kelvins, un écart de température a la même valeur en °C et en K.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$1.3 \times 400 \times 1000 \times (15.6 - 19.0) \approx -1768000$

3.2 Interpréter le signe du résultat obtenu à la question précédente.

$\Delta U < 0$: l'énergie interne de l'air a diminué. Le chauffage étant coupé, l'air intérieur, plus chaud que l'extérieur, a cédé de l'énergie par transfert thermique à travers les parois de la maison.

Le signe négatif traduit une perte d'énergie : l'air de la maison a cédé $1{,}8 \times 10^6$ J au milieu extérieur en une heure.

3.3 Déterminer la puissance thermique P_{th} nécessaire au maintien d'une température constante de 19,0 °C à l'intérieur de la maison.

Données utiles $\Delta U = -1{,}768 \times 10^6$ J (3.1) ; $\Delta t = 1{,}00$ h $= 3600$ s

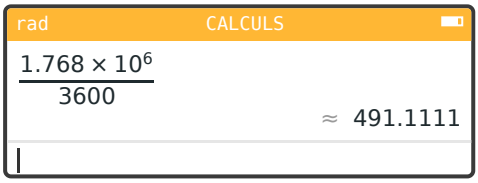
Pour que la température reste constante, le chauffage doit apporter chaque seconde l'énergie que l'air perd, soit $|\Delta U|$ pendant la durée Δt :

$$P_{th} = \frac{|\Delta U|}{\Delta t} = \frac{1{,}768 \times 10^6}{3600} = 4{,}9 \times 10^2 \text{ W}$$

$P_{th} = 4{,}9 \times 10^2$ W, soit environ 0,49 kW.

PIÈGE
La durée doit être en secondes pour obtenir des watts. Reprendre la valeur non arrondie de ΔU : avec $1{,}8 \times 10^6$ J, on trouverait $5{,}0 \times 10^2$ W.

À LA CALCULATRICE



3.4 La puissance thermique réellement nécessaire est $P'_{th} = 4{,}0$ kW. Quelle peut être la raison de l'écart avec la valeur trouvée à la question précédente ?

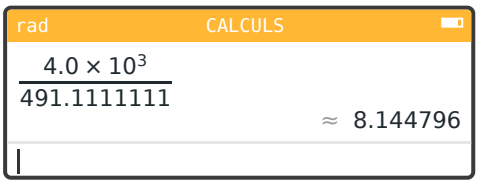
Données utiles $P_{th} = 4{,}9 \times 10^2$ W (3.3)

La puissance réelle est environ 8 fois plus grande que celle calculée. Le calcul précédent ne tient compte que de l'air. Or, pendant l'heure sans chauffage, les murs, les sols et le mobilier, à 19,0 °C eux aussi, ont cédé de l'énergie à l'air intérieur et ont ralenti son refroidissement : la maison a perdu bien plus d'énergie que l'air seul.

L'expérience sous-estime les pertes, car elle néglige l'énergie cédée par les murs et les objets de la maison ; il faut y ajouter le renouvellement de l'air et les jours où l'extérieur est plus froid.

COMPRENDRE
C'est l'inertie thermique de la piste 2 du document 4 : les matériaux lourds emmagasinent beaucoup d'énergie et amortissent les variations de température de l'air.

À LA CALCULATRICE



3.5 Qu'entend-on par « sens naturel » pour un transfert thermique ? Qu'en est-il pour la pompe à chaleur ? Compléter le schéma du bilan énergétique avec W, Q_C, Q_F et les sources.

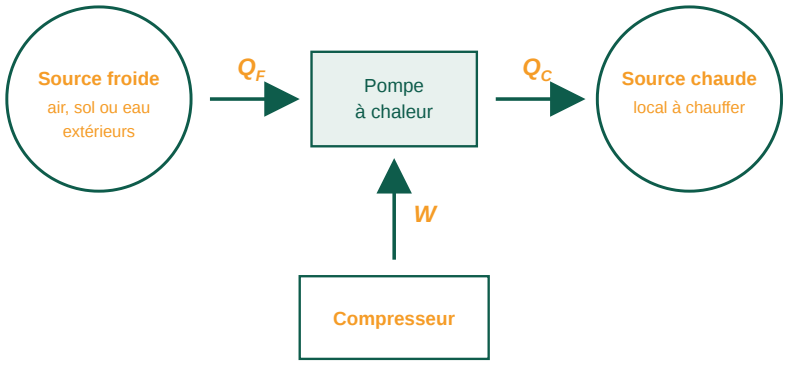
Sens naturel : un transfert thermique se fait spontanément du corps le plus chaud vers le corps le plus froid.

La pompe à chaleur réalise le transfert inverse : son fluide prélève l'énergie Q_F à la source froide (air, sol ou eau extérieurs) et cède l'énergie Q_C à la source chaude (le local). Ce transfert n'est pas spontané : il exige le travail électrique W reçu par le compresseur.

Sur le schéma : cercle de gauche = source froide, cercle de droite = source chaude, rectangle du bas = compresseur ; les flèches portent Q_F, Q_C et W.

Sens naturel : du chaud vers le froid. La pompe à chaleur transfère l'énergie du froid vers le chaud grâce au travail W (schéma complété ci-contre).

PIÈGE
Inverser les sources : la source chaude est le local à chauffer, même s'il n'est qu'à 19 °C ; la source froide est l'extérieur, où l'énergie est prélevée.



3.5 · Bilan énergétique de la pompe à chaleur (schéma du sujet complété)

3.6.1 Justifier l'expression $\text{COP} = \dfrac{Q_C}{W}$.

Un coefficient de performance compare l'énergie utile à l'énergie dépensée, c'est-à-dire payée.

- Énergie utile : Q_C, cédée par le fluide au local, puisque le but est de chauffer.
- Énergie dépensée : le travail électrique W reçu par le compresseur. L'énergie Q_F prélevée à l'extérieur est gratuite.

$$\text{COP} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie dépensée}} = \frac{Q_C}{W}$$

COMPRENDRE
Sur un cycle, le fluide revient à son état initial : $Q_C = W + Q_F$ en valeurs absolues. Donc $Q_C > W$ et le COP dépasse 1, ce qui fait l'intérêt de la pompe à chaleur.

3.6.2 Déterminer l'énergie Q_C échangée par le fluide caloporteur avec l'habitat pendant 24 heures de fonctionnement ininterrompu.

Données utiles $P'_{th} = 4{,}0$ kW ; $\Delta t' = 24$ h

$Q_C = P'_{th} \times \Delta t'$ avec $\Delta t' = 24 \times 3600 = 86\,400$ s

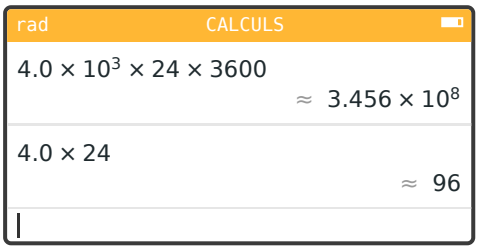
$Q_C = 4{,}0 \times 10^3 \times 86\,400 = 3{,}5 \times 10^8$ J

En kilowattheures : $Q_C = 4{,}0\ \text{kW} \times 24\ \text{h} = 96\ \text{kWh}$.

$Q_C = 3{,}5 \times 10^8$ J (soit 96 kWh)

MÉTHODE
Deux jeux d'unités cohérents pour $E = P \times \Delta t$: watts et secondes donnent des joules ; kilowatts et heures donnent des kilowattheures, directement utilisables pour un coût.

À LA CALCULATRICE



3.6.3 Le coefficient de performance vaut 3,1. En déduire le travail électrique W reçu par le compresseur en une journée.

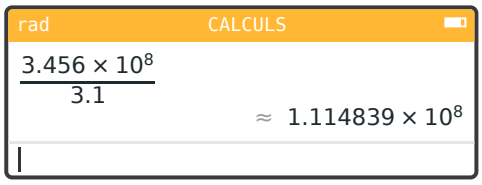
Données utiles $\text{COP} = 3{,}1$; $Q_C = 3{,}456 \times 10^8$ J (3.6.2)

$\text{COP} = \dfrac{Q_C}{W}$ donc $W = \dfrac{Q_C}{\text{COP}}$

$W = \dfrac{3{,}456 \times 10^8}{3{,}1} = 1{,}1 \times 10^8$ J

$W = 1{,}1 \times 10^8$ J

À LA CALCULATRICE



3.6.4 Calculer le coût journalier d'utilisation de cette pompe à chaleur.

Données utiles $W = 1{,}115 \times 10^8$ J (3.6.3) ; prix du kWh : 0,13 € ; $1\ \text{kWh} = 3{,}6 \times 10^6$ J

Conversion : $1\ \text{kWh} = 1000\ \text{W} \times 3600\ \text{s} = 3{,}6 \times 10^6$ J, donc

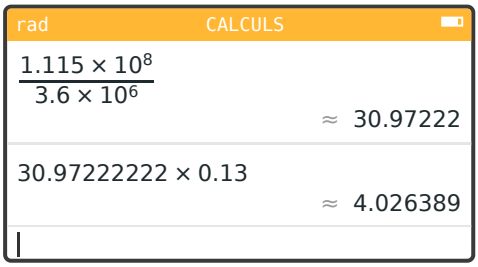
$W = \dfrac{1{,}115 \times 10^8}{3{,}6 \times 10^6} = 31\ \text{kWh}$

coût $= 31 \times 0{,}13 = 4{,}0$ €

La pompe à chaleur coûte environ 4,0 € par jour.

PIÈGE
Seul le travail électrique W est facturé. Calculer le coût à partir de Q_C revient à payer aussi l'énergie prélevée gratuitement à l'extérieur.

À LA CALCULATRICE



3.6.5 Calculer le coût journalier si l'habitation était chauffée par des radiateurs électriques de coefficient de performance égal à 1. Conclure.

Données utiles $Q_C = 96$ kWh (3.6.2) ; prix du kWh : $0{,}13$ € ; coût avec la pompe à chaleur : $4{,}0$ € (3.6.4)

Avec un coefficient de performance de 1, l'énergie électrique consommée est égale à l'énergie thermique fournie : $W' = Q_C = 96$ kWh.

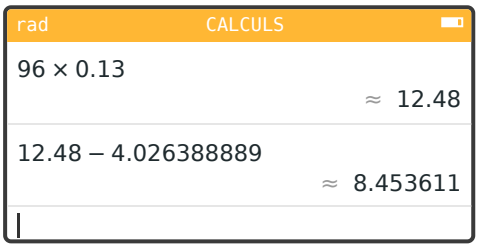
$\text{coût}' = 96 \times 0{,}13 = 12$ €

Les radiateurs coûtent $3{,}1$ fois plus cher que la pompe à chaleur, soit environ 8 € de plus chaque jour.

Radiateurs électriques : environ 12 € par jour contre $4{,}0$ € avec la pompe à chaleur, qui divise la facture de chauffage par $3{,}1$.

COMPRENDRE
Le rapport des coûts est exactement le COP. L'économie n'est pas de l'énergie créée : les deux tiers de l'énergie de chauffage sont prélevés dans l'air, le sol ou l'eau extérieurs.

À LA CALCULATRICE



3.6.6 Proposer une piste supplémentaire pour compenser le coût journalier d'utilisation de la pompe à chaleur.

Le coût vient de l'électricité consommée par le compresseur. La maison peut la produire elle-même avec des panneaux solaires photovoltaïques (piste 3 du document 4), éventuellement associés à des batteries de stockage (piste 5).

Installer des panneaux photovoltaïques pour produire l'électricité qui alimente le compresseur.

COMPRENDRE
On peut aussi réduire le besoin : meilleure isolation (piste 1) pour abaisser P'_{th}, ou domotique (piste 7) pour ne chauffer qu'au bon moment.