



1.1 EXERCICES DE TECHNIQUE D'ESTIMATION EN ENERGIE

Exercice 1.1.g Estimation ferme :

Des propriétaires d'une ferme laitière vous contactent pour déterminer s'il est possible, pour réfrigérer le lait produit localement, de remplacer des refroidisseurs classiques par une banque de glace produite avec des collecteurs PV. Les données dont vous disposez sont les suivantes :

- Chaque traite produit 2400L ;
- Il y a deux traites par jour ;
- Il faut rafraichir le lait à 4°C en environ 1 heure et le maintenir à cette température jusqu'à la prochaine traite ;
- Après la seconde traite, le réservoir est nettoyé et le cycle recommence le lendemain.

Les données de consommation sont les suivantes :

BESOIN ENERGETIQUE

Source	Consommation (kWh/an)
Eclairage	800
Tank + machine frigo	12 600
Pompe à lait	300
Chauffe eau	9 600
Pompe à vide	5 500
Nettoyage (sol et paroi)	600
Puits	1 100
Autres	1 000
Total	31 500

L'idée originale est de:

- Produire de la glace dès qu'il fait soleil;
- Remplacer le stockage de batteries électriques (coûteuses) par un réservoir de glace (bon marché);
- Remplacer un fluide réfrigérant potentiellement nocif pour l'atmosphère par un fluide naturel (eau);
- Retirer la pompe à chaleur requise par les machines frigorifiques et utiliser le transfert naturel (de la glace vers le lait) avec des échangeurs.

Dans l'exercice, des résolutions aux questions sont proposées, mais celles-ci ne sont pas uniques. L'important est d'arriver le plus proche de la réalité possible (une relation exacte à 20% ou 30% est souvent ce que recherche un ingénieur dans ses estimations) avec logique et réflexion, davantage qu'avec des calculs sophistiqués.

Question 1 : Faites une estimation de la consommation énergétique par traite avec une approche de la consommation du système de refroidissement. (En kWh/traites)

Question 2 : Faites une estimation de la consommation énergétique par traite avec une approche du refroidissement de la masse de lait. (En kWh/traites)

Question 3 : Faites une estimation de la puissance moyenne exploitable pour refroidir le lait avec un réservoir de rayon de 1m. (En kW)

Question 4 : Faites une estimation du débit d'eau froide nécessaire pour refroidir le lait dans l'intervalle de temps souhaité. (En kWh/traites)

Question 5 : Faites une estimation de la quantité de glace nécessaire pour une autonomie de quatre jours en considérant 360 MJ/traites. (En kg)

Question 6 : Faites une estimation de la taille du système PV pour quatre jours d'autonomie. (En kWc)



RÉPONSES

Question 1 : Faites une estimation de la consommation énergétique par traite avec une approche de la consommation du système de refroidissement. (En kWh/traite)

- Consommation des refroidisseurs: 12 600 kWh/an ($\approx 12\,600$)
- COP du système de refroidissement actuel: 3 (valeur plausible)
- Quantité d'énergie extraite: 37 800 kWh/an ($3 \times 12\,600 \approx 40\,000$)
- Nombre de jours de fonctionnement: 365 jours (≈ 400);
- Consommation quotidienne: ($40\,000 \text{ kWh}/400 \text{ j} = 100 \text{ kWh/j}$);
- Consommation des refroidisseurs par traite $\approx 50 \text{ kWh/traite}$ (il y a deux traites)
 - Un peu plus en fait....

Les vaches produisent chaque jour de l'année deux traites de 2 400 L.

Question 2 : Faites une estimation de la consommation énergétique par traite avec une approche du refroidissement de la masse de lait. (En kWh/traite)

- La masse de lait: 2 400L/traite ($\approx 3\,000 \text{ kg/traite}$)
- La chaleur spécifique: $4\,200 \text{ J/kgK}$ ($\approx 4000 = 4 \text{ kJ/kgK}$);
- La différence de température: $37^\circ\text{C} - 4^\circ\text{C} \approx 30 \text{ K}$;
- L'énergie requise au refroidissement: $3\,000 \text{ kg/traite} \times 4 \text{ kJ/kgK} \times 30 \text{ K} \times 1 \text{ MJ}/1000 \text{ kJ} = 360 \text{ MJ/traite}$
- L'énergie requise au refroidissement: $360 \text{ MJ} \times 1 \text{ h}/3600 \text{ s} = 100 \text{ kWh/traite}$

Votre client ne peut pas refroidir en une heure (voir données et specs); ou bien sa consommation est trop basse, ou bien il ne tire pas 2400L par traite. Mais, les chiffres sont tout de même de même ordre de grandeur. Ouf.

Question 3 : Faites une estimation de la puissance moyenne exploitable pour refroidir le lait avec un réservoir de rayon de 1m. (En kW)

- La paroi du fond, où on retire la chaleur, est à $\approx 1^\circ\text{C}$ (elle doit être plus basse que la température finale du lait sinon pas de refroidissement);
- La surface est de $\pi \times 1^2 \approx 3 \text{ m}^2$;
- Le coefficient de transfert $\approx 100 \text{ W/m}^2\text{K}$ (car ça brasse, donc 10 trop faible et 1000 il faut un changement de phase, Module 2, Thème 2.4);
- La différence de température $37^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C} \approx 33,333 \text{ K}$, parce que la surface est de 3 m^2)
- La puissance maximale retirée est de $100 \text{ W/m}^2\text{K} \times 3 \text{ m}^2 \times 33,333 \text{ K} = 10 \text{ kW}$
- Cette puissance est le maximum possible; elle diminuera à fur et à mesure que le lait refroidira, $P_{\text{moy}} \approx 5 \text{ kW}$. Ça se comprend, au départ du lait à 37°C se refroidit sur une palque à 1°C . Mais lorsque la différence de température sera de 5°C plutôt que $\approx 30^\circ\text{C}$, le taux de transfert sera 6 x + petit!

Votre client ne peut pas refroidir la traite en une heure avec 5kW de puissance moyenne. Il faut au moins 20 heures pour refroidir 2400L par traite avec de la glace (sans considérer les pertes). Ici, ça ne marche pas!

Question 4 : Faites une estimation du débit d'eau froide nécessaire pour refroidir le lait dans l'intervalle de temps souhaité. (En kWh/traite)

- La paroi du fond où on retire la chaleur est à $\approx 1^\circ\text{C}$, l'eau entre – sous la plaque du fond dans un échangeur de forme qui n'est pas spécifié – à 0°C et ressort à 2°C . Elle ne peut pas ressortir plus chaude que 4°C car elle ne permettait jamais de refroidir le lait à 4°C .
- Pour retirer 100 kWh en une heure, il faut une puissance moyenne de 100 kW ;

- Puisque la température baisse pendant tout le processus, la puissance initiale est supposée à 200kW;
- La différence de température $2^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}$ ($\approx 2^{\circ}\text{C}$)
- Le débit massique minimal requis est alors $200 \text{ kW} / (4[\text{kJ/kg/K}] \times 2[\text{K}]) = 25 \text{ kg/s}$
- 25kg/s c'est aussi 25L/s ou 5Gal/s ou 300 GPM, c'est énorme.

Votre client paiera très cher le pompage de l'eau réfrigérée s'il lui faut fournir 300 GPM d'Eau froide en début de refroidissement.

Question 5 : Faites une estimation de la quantité de glace nécessaire pour une autonomie de quatre jours en considérant 360 MJ/traité. (En kg)

- Il faut retirer 360MJ d'énergie par traité (voir problème 2).
- La chaleur latente de fusion de l'eau est de 334 kJ/kg (≈ 360);
- La quantité de glace requise par traité est alors de 1000kg;
- La quantité de glace pour une autonomie de 4 jours sans soleil (mais sans pertes thermiques du stockage de glace!!!!!!!) est alors de 8 tonnes. C'est un minimum!

8 Tonnes de glace requiert un réservoir de 10m^3 , car la densité est de 0,92, 4 x plus gros que le réservoir de lait.

Question 6 : Faites une estimation de la taille du système PV pour quatre jours d'autonomie. (En kWc)

- Il faut retirer 360MJ ou 100kWh d'énergie par traité
- La quantité d'énergie à produire en une journée pour une autonomie de 4 jours sans soleil est 800kWh pour produire la glace requise;
- Si une journée d'ensoleillement dure 8 heures, il faut une puissance installée de 100kWc lors d'une journée parfaite.

Il est excessivement rare que 100kWc puisse produire 800 kWh en une seule journée, et je vous laisse estimer le coût du système, même sans batterie...

ÉPILOGUE

Cet exemple est tiré d'un projet (Ferme laitière photovoltaïque) qui avait été choisi par une équipe du cours ENR810, Énergies renouvelables. Lors de la rencontre de projet (que l'on devrait tenir avant la semaine 10 dans un cours de 13 semaines et la semaine 4 dans un cours de 6 semaines), Daniel Rousse avait indiqué à l'équipe que malgré la grande originalité de l'idée, elle ne tiendrait pas la route. Les 5 membres de l'équipe avaient pourtant persisté et présenté une série de calculs complexes, des simulations et des raisonnements avec des chiffres exacts mais des prémisses fausses dans le but de démontrer que la chose était possible. Le lieu même d'implantation était une région très peu ensoleillée de la France. Connaissez-vous « Il pleut sur Nantes ? »

C'est mentionné ici pour mettre en évidence que parfois des promoteurs de projets sont tellement convaincus du bien fondé d'une idée, que même si elle viole la première loi de la thermodynamique, ils tentent par tous les moyens de la réaliser.

Ainsi, des sommes considérables sont parfois englouties dans les projets les plus facilement écartables avec une simple analyse d'une demie journée. Il en fut ainsi d'une entreprise québécoise qui voulait commercialiser des hydroliennes à installer dans le courant du St-Laurent. Les gouvernements ont injecté 75M\$CDN en subvention dans une technologie qui ne respectait pas la limite de Betz(Voir Module 12, Énergie éolienne). Si vous préférez, qui produisait davantage d'énergie que celle contenue dans l'eau qui la traversait....