

## TIPE

# Les routes à énergie positive : Écoulement et transferts dans un échangeur thermique

Enjeux sociétaux

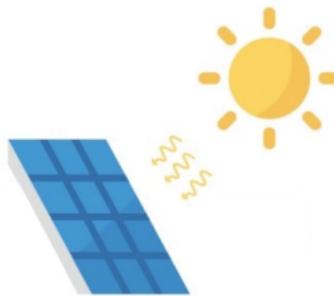
---

**Adrien MOY AUX**

Numéro de candidat : 29464

8 juin 2021

## Présentation du sujet et des enjeux

Transformer l'énergie solaire :FIGURE – Cellules photovoltaïques<sup>1</sup>

rendement :  $8\% \leq \eta \leq 24\%$

---

1. image extraite du site <https://mon-panneau-solaire.info/installation/>



## Présentation du sujet et des enjeux

### La route à énergie positive :



FIGURE – Route PowerRoad

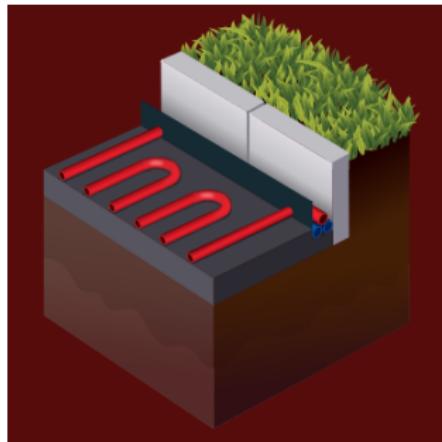


FIGURE – Échangeur <sup>2</sup>

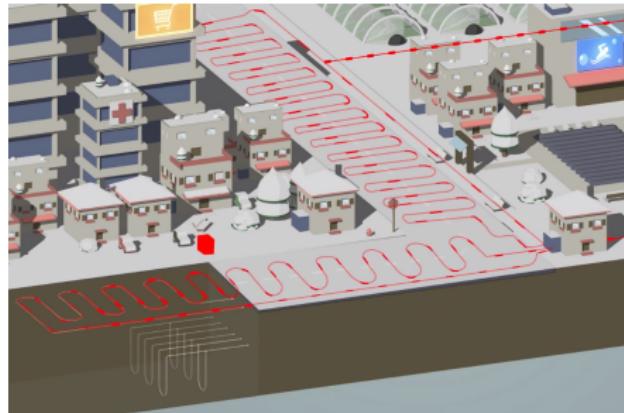
2. images extraites du site [https ://www.power-road.com/](https://www.power-road.com/)



## Présentation du sujet et des enjeux

Les différents modes de fonctionnement :

FIGURE – Mode "estival"

FIGURE – Mode "hivernal" <sup>3</sup>

---

3. images extraites du site [https ://www.power-road.com/](https://www.power-road.com/)



# Comment étudier un échangeur thermique et rendre compte de la pertinence des routes à énergie positive ?



## Objectifs du projet

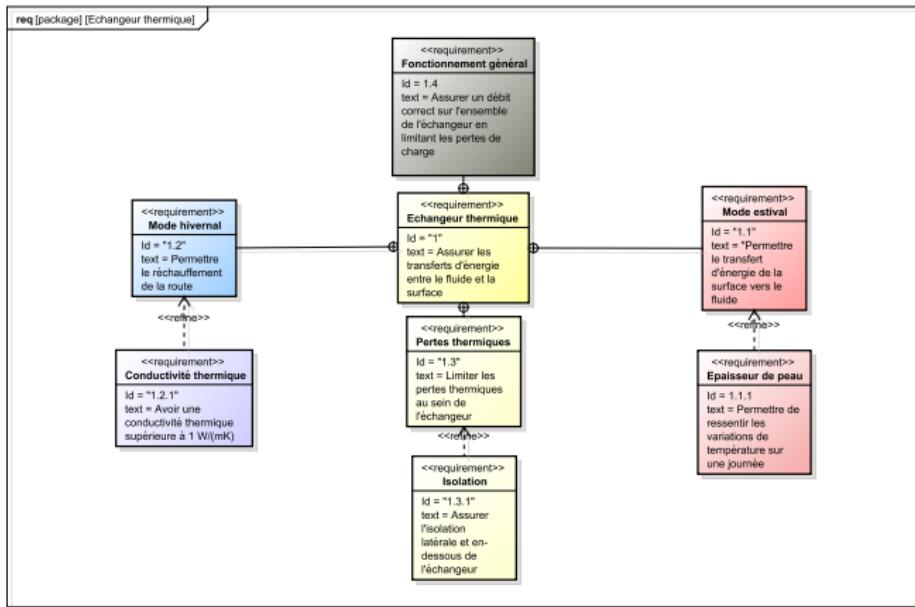


FIGURE – Diagramme des exigences

## 1 Modélisation de l'échangeur :

- La maquette
- Détermination des pertes thermiques
- Conclusion partielle

## 2 Étude du mode hivernal :

- Détermination du coefficient d'échange
- Comparaison avec le modèle thermodynamique et la réalité
- Conclusion partielle

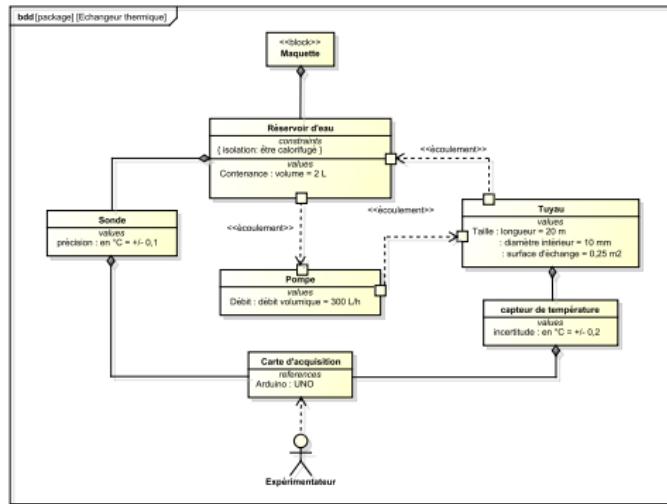
## 3 Étude du mode estival :

- Expériences
- Modèle de l'onde thermique
- Conclusion partielle

## L'échangeur



**FIGURE – Maquette de l'échangeur**



**FIGURE – Diagramme BBD de l'échangeur**

## Détermination des pertes thermiques

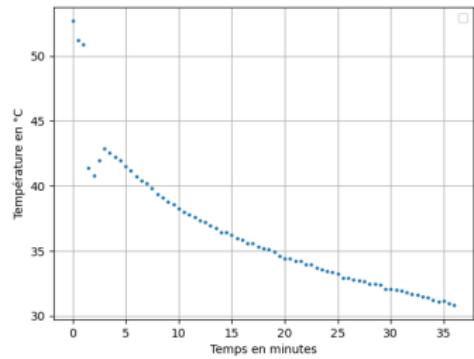


FIGURE – Expérience 1

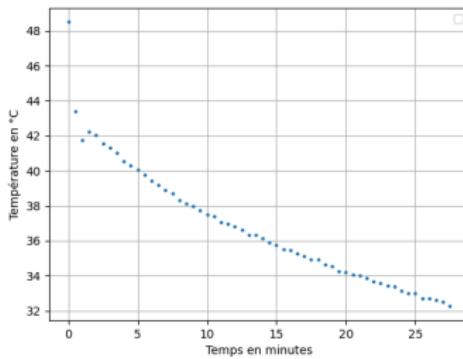


FIGURE – Expérience 2

Loi de Newton :  $\frac{dT}{dt} = -r \times (T - T_{env})$ ,  $r = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

## Détermination des pertes thermiques

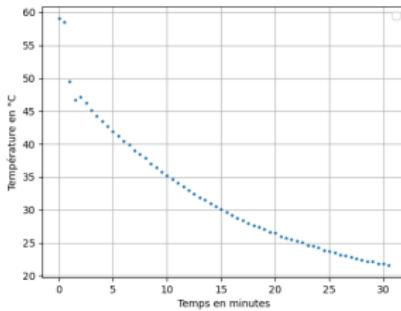


FIGURE – Expérience 3

$$r = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

La puissance des pertes :

$$P_{pertes} = -m \cdot c_p \cdot r \cdot (T - T_{env})$$

Introduction

○○○  
○  
○  
○

Modélisation de l'échangeur

○  
○○  
●

Le mode hivernal

○○○  
○○  
○

Le mode estival

○○○  
○

Conclusion

○○

Conclusion partielle

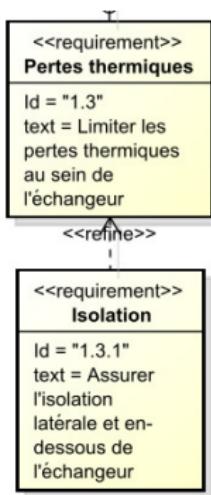


FIGURE – Exigence 1.3

L'exigence 1.3.1 est respectée



## Détermination du coefficient d'échange

Coefficient d'échange et flux thermique transféré :

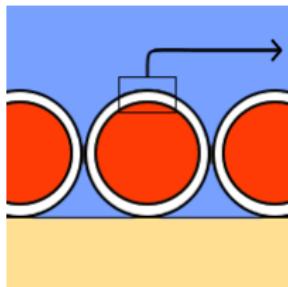


FIGURE – Vue de côté

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f}}$$

Hypothèses :

- Encrassement négligeable

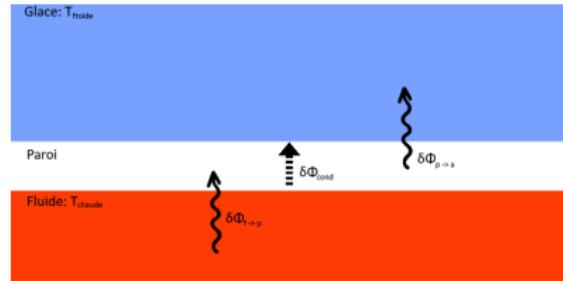


FIGURE – Les différents échanges

$$\Phi_{éch} = k.S.(T_c - T_f)$$

- Surface d'échange uniforme

Détermination du coefficient d'échange

## Nombre de Prandtl

$$Pr = \frac{\eta(T) \cdot c_p}{\lambda} \sim 3,4$$

Interprétation : Le profil des vitesses a peu d'effet sur le profil des températures.

## Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\mu \cdot L_c \cdot U}{\eta} = \frac{\mu \cdot L_c}{\eta} \frac{D_v}{\pi \cdot (\frac{L_c}{2})^2} \sim 22916$$

Interprétation :  $Re > 2000 \Rightarrow$  Écoulement turbulent

## Détermination du coefficient d'échange

## Nombre de Nusselt

$$Nu = \frac{k \cdot L_c}{\lambda}$$

$$\Rightarrow k = \frac{\lambda \cdot Nu}{L_c}$$

Relation de COLBURN :

$$Nu = 0,023 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{0,8}$$

$$\Rightarrow Nu \sim 106$$

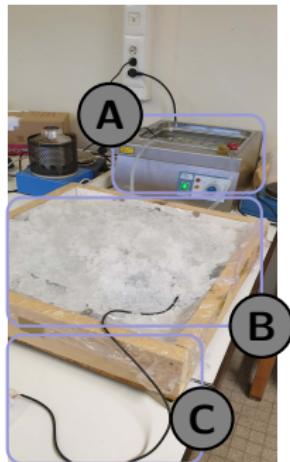
$$\Rightarrow k \simeq 6360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Cadre de validité de la relation :

- $0.7 < Pr < 100$
- $10^4 < Re < 1,2 \cdot 10^5$
- $\frac{L}{D} > 60$

Comparaison avec le modèle thermodynamique et la réalité

## Modèle thermodynamique :



$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{éch} = \frac{m_{glace}.(L_{fus} + C_{p,eau}.\Delta T) - P_{air}.\Delta T}{\Delta T} \\ k = \frac{\Phi_{éch}}{(T_{air} - T_{glace}) \cdot \pi \cdot R^2} \\ \lambda = \frac{e_{glace} \cdot \Phi_{éch}}{(T_{fluide} - T_{glace}) \cdot \pi \cdot R^2} \end{array} \right.$$

$$k = 68,6 \pm 6,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}, \quad 95\%$$

$$\lambda = 1,12 \pm 0,13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \quad 95\%$$

**FIGURE – Dispositif expérimental –**

Bain-marie (A) – Glace (B) – Sonde (C).



Comparaison avec le modèle thermodynamique et la réalité

## Explications des écarts :

- incertitudes sur les calculs thermodynamiques et sur les nombres adimensionnés
- Calcul des pertes de charges :

$$\left\{ \begin{array}{l} pd_{C_R}^Z = \frac{\xi \cdot \rho \cdot U^2 \cdot l}{2 \cdot D \cdot \rho \cdot g}, \quad \xi \simeq 0.029 \\ pd_{C_S}^Z = \frac{U^2}{2 \cdot g} \left[ \underbrace{\frac{1}{2} \left( 1 - \left( \frac{D_R}{D_T} \right)^2 \right) \times 3}_{\text{rétrécissement}} + \underbrace{\left( 1 - \left( \frac{D_R}{D_T} \right)^2 \right)^2 \times 3}_{\text{agrandissement}} + \underbrace{1}_{\text{réservoir}} \right. \right. \\ \left. \left. + \left( 0,131 + 1,847 \cdot \left( \frac{D_T}{2 \cdot r_1} \right)^{3,5} \right) \frac{\theta_1}{90} + \left( 0,131 + 1,847 \cdot \left( \frac{D_T}{2 \cdot r_2} \right)^{3,5} \right) \frac{\theta_2}{90} \right] \right. \end{array} \right.$$

*coudes de sortie d'eau*

$$\Rightarrow \Delta \mathcal{C}_H^Z = pd_{C_R}^Z + pd_{C_S}^Z = 3,90 \pm 0,0625 \text{ m , 95%}$$

Introduction

○○○  
○  
○  
○

Modélisation de l'échangeur

○  
○○

Le mode hivernal

○○○  
○○  
●

Le mode estival

○○  
○○○  
○

Conclusion

○○

Conclusion partielle

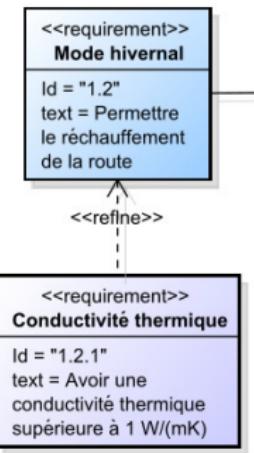


FIGURE – Exigence 1.2

L'exigence 1.2 est donc **respectée**

Introduction

○○○  
○  
○  
○

Modélisation de l'échangeur

○  
○  
○

Le mode hivernal

○○○  
○○  
○

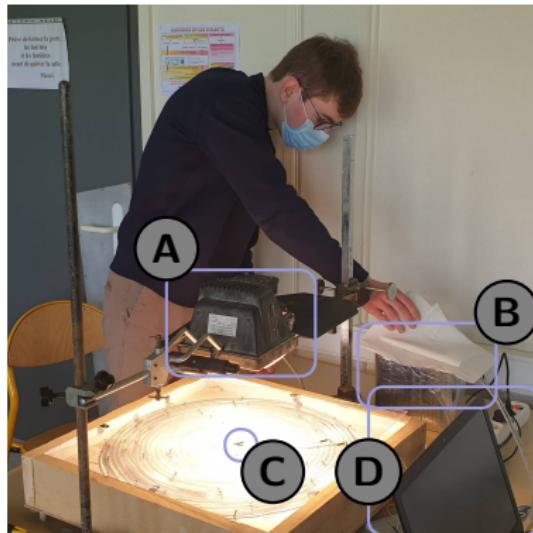
Le mode estival

●○  
○○○  
○

Conclusion

○○

## Expériences



**FIGURE – Dispositif expérimental – Spot (A) – Réservoir d'eau (B) – Capteur de température (C) – Ordinateur (D).**

## Expériences

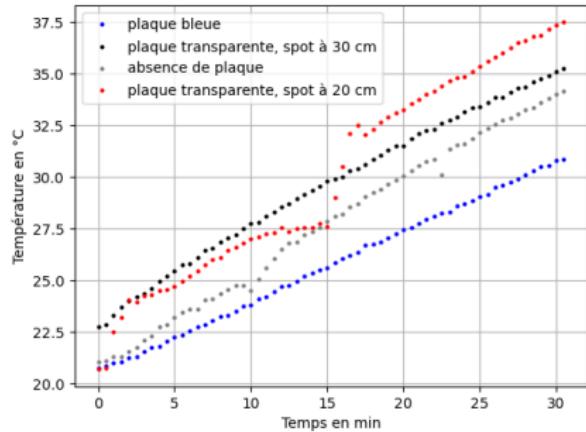


FIGURE – Résultats expérimentaux

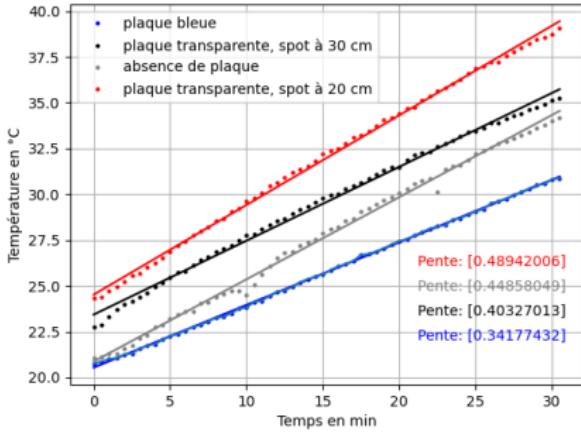
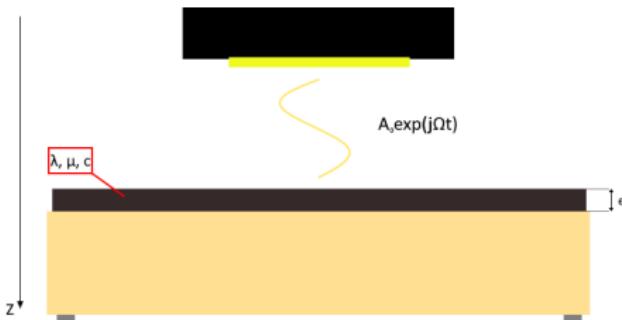


FIGURE – Résultats expérimentaux

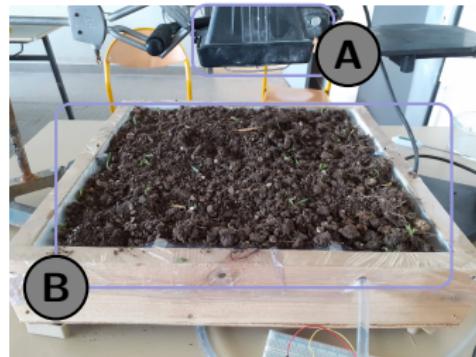
Modèle de l'onde thermiqueDétermination de l'épaisseur de peau :Calculs :**FIGURE – Modèle de l'onde thermique**

$$\delta = \sqrt{\frac{2\lambda}{\mu c \omega}} \text{ en m}$$

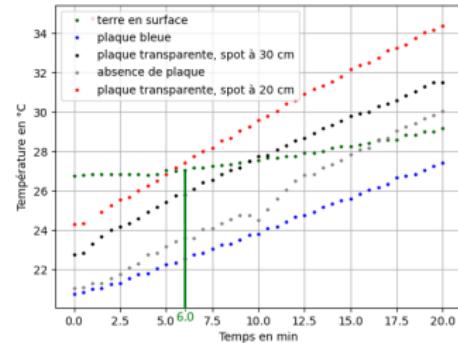
Interprétation :

Au bout d'une distance parcourue dans le bitume de **5  $\delta$** , l'amplitude de l'onde vaut moins de **1%** de sa valeur initiale.

## Modèle de l'onde thermique



**FIGURE – Dispositif expérimental – Spot (A) – Terre (B).**



**FIGURE – Résultats expérimentaux**

Il y a donc existence d'une épaisseur de peau thermique.



## Modèle de l'onde thermique

pour  $e = 1 \text{ cm}$  la température de l'eau reste constante pendant 6 minutes.

Théoriquement :

pour  $T = \frac{2\pi}{\omega} = 360 \text{ s}$ ,  $\delta \approx 9,97 \text{ mm}$

Pour le goudron :

■ Pratiquement :  $e_{goudron} = 5 \text{ cm}$

$$\text{Or } e_{goudron} = e_{terre} \times \frac{\lambda_{goudron}}{\lambda_{terre}} \Rightarrow e_{terre} = 23,5 \text{ cm}$$

■ Théoriquement :  $\delta \geq e_g \Leftrightarrow T \geq \frac{\pi \cdot \mu \cdot c_p \cdot e_g^2}{\lambda_g}$

$$\Leftrightarrow T \geq 46570 \text{ s}$$

$$\Leftrightarrow T \geq 12 \text{ h } 56 \text{ min } 10 \text{ s}$$

■ Inversement :  $T \leq 1 \text{ jour} \Leftrightarrow \delta \leq 6,8 \text{ cm}$



Conclusion partielle

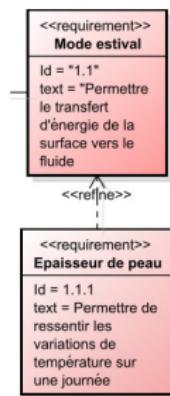


FIGURE – Exigence 1.1

L'exigence 1.1 est donc respectée pour une épaisseur de goudron de 6,8 cm ou moins.

Introduction

○○○  
○  
○  
○

Modélisation de l'échangeur

○  
○  
○

Le mode hivernal

○○○  
○○  
○

Le mode estival

○○  
○○○  
○

Conclusion

●○

Conclusion

Notre maquette :

## Résumé de l'étude de l'échangeur

- pertes maîtrisées
- $\lambda \approx 1,12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- $e_{goudron} \leq 6,8 \text{ cm}$
- $\Delta \mathcal{C}_H^Z \approx 3,90 \text{ m}$

Introduction

○○○  
○  
○  
○

Modélisation de l'échangeur

○  
○  
○

Le mode hivernal

○○○  
○○  
○

Le mode estival

○○  
○○○  
○

Conclusion

●●

Conclusion

Les limites du TIPE :

### Les limites de la maquette

dimensions :

- $L_{réelle} \gg 20 \text{ m} \Rightarrow \Delta\mathcal{C}_H^Z \nearrow$
  - $S_{ech} \nearrow \Rightarrow \Phi_{ech} \nearrow$
- 
- ~~Spot~~; Rayonnement solaire  $\Rightarrow \Phi_{ech} \nearrow$