

Méthodologie d'étude des performances exergétiques d'un réseau anergie - Application au réseau d'Estavayer-le-lac (Suisse)

**Yolaine ADIHOU^{1,2}, Malick KANE^{1*}, Simon RIME^{1,3}, Julien RAMOUSSE²,
Bernard SOUYRI²**

¹ Laboratoire Thermique et Energétique, HEIA-FR Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg, HES-SO Haute école spécialisée de Suisse occidentale, Boulevard de Pérolles 80, 1705 Fribourg (Suisse).

² Laboratoire d'Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE), Université Savoie Mont-Blanc, CNRS UMR5271, Savoie-Technolac 73376 Le Bourget du Lac (France).

³ Groupe E SA, Route de Morat 135, 1763 Granges-Paccot (Suisse).

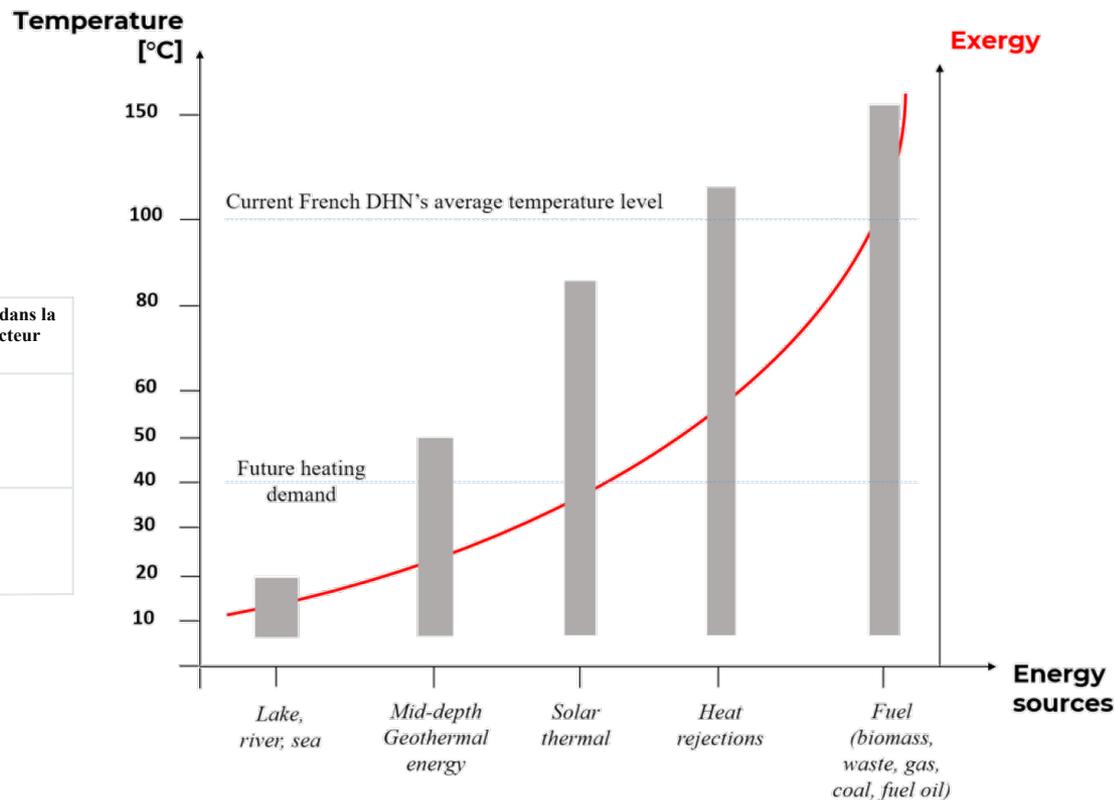
Introduction

Les réseaux thermiques basse température

“Fundamental idea of thermal networks”

Recycle heat losses as useful heat

| | Part d'ENR&R dans les réseaux thermiques | Part des réseaux thermiques dans la fourniture de chauffage (secteur résidentiel) |
|---|--|---|
|  | 57% | 5% 2018 |
|  | 86% | 4% 2017 |

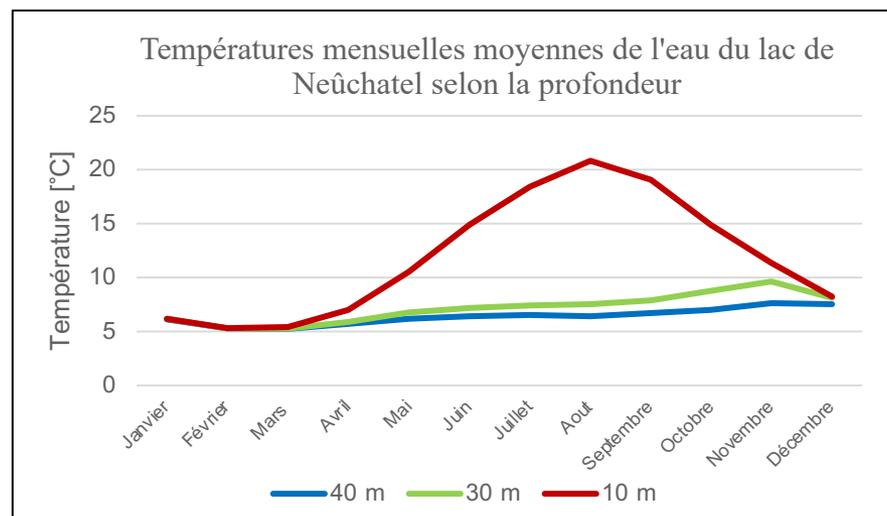
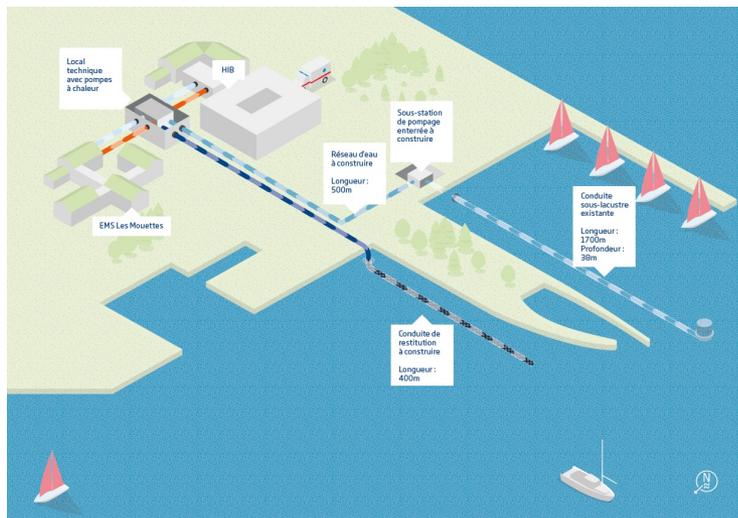


Sources: *Energy Balances for OECD and Non-OECD Countries*, IEA, 2009
District Heating and Cooling, Sven Frederiksen and Sven Werner, 2013

Les réseaux de chaleur et de froid : Résultats de l'enquête annuelle Edition 2020. Fedene., SNCU Syndicat National du Chauffage et de la climatisation Urbaine, 2020

Introduction

Réseau anergie d'Estavayer-le-lac



| Conduites | Diamètre externe/ interne | Longueur | Température environnante | Matériaux | Epaisseur | Rugosité | Conductivité thermique |
|-----------|------------------------------|----------|-----------------------------|-----------|-----------|----------|---------------------------|
| | mm | m | - | - | mm | mm | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| C0 | 400/393,7 | 1727 | Eau du lac | Acier | 6,35 | 0,045 | 63 |
| C1 | 400/352,6 | 7 | Sol sec | PE | 23,7 | 0,007 | 0,33 |
| C2 | 250/220,4 | 111 | Sol sec | PE | 14,8 | 0,007 | 0,33 |
| C3 | 160/140,0 | 25 | Sol sec | PE | 9,5 | 0,007 | 0,33 |
| C4 | 250/220,4 | 334 | Sol sec | PE | 14,8 | 0,007 | 0,33 |

Caractéristiques des conduites du réseau d'Estavayer-le-Lac

Modélisation

Modélisation thermo-hydraulique

Objectifs:

1. Calibrage du modèle avec les données expérimentales
2. Température d'arrivée au HIB

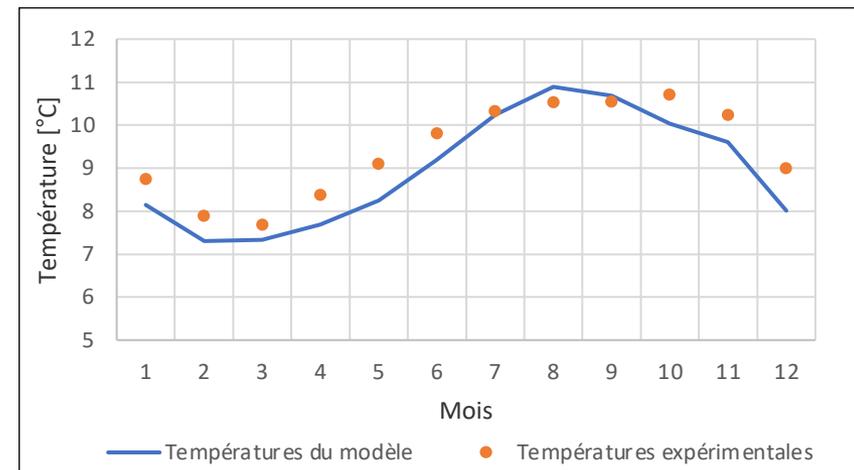
Hypothèses de modélisation:

- Pas de temps mensuel, régime permanent
- Prise en compte de la résistance des conduites
- $\lambda_v = 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$: conduction thermique de la vase
- $H_v = 1,1 \text{ m}$: épaisseur de la vase
- T_a = Température de l'environnement des conduites

$$T_{out} = T_a + (T_{in} - T_a) e^{-\tau} \quad \tau = \frac{U L D_1 \pi}{\dot{M} C_p}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda_c} + \frac{r_1 \ln\left(\frac{4H_v}{D_2}\right)}{\lambda_v}}$$

$$\Delta P_{lin} = \frac{8 \Lambda L \rho \dot{V}^2}{D^5 \pi^2} \quad \Delta P_{sin} = \sum_k \frac{8 \rho \dot{V}^2}{D_k^4 \pi^2} \xi_k$$



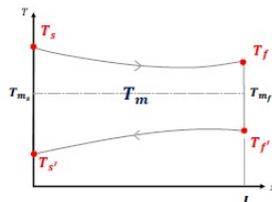
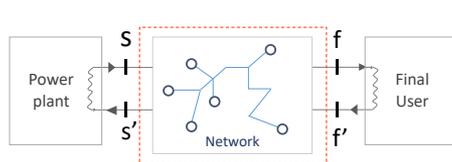
Modélisation

Modélisation exergetique des réseaux thermiques

Objectifs:

- Evaluation des performances globales du réseau
- Formulations explicites des composants du réseau (simplification des analyses exergetiques)

Réseau de distribution



Hypothèses du modèle:

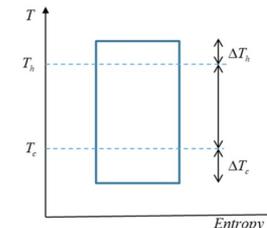
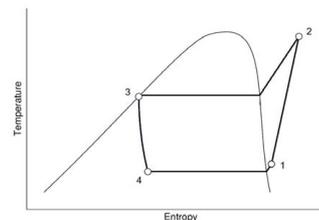
- Prise en compte des pertes de charge
- Fluide caloporteur: Eau

$$T_{m,s} = \frac{T_s + T_{s'}}{2} \approx T_m \quad T_{m,f} = \frac{T_f + T_{f'}}{2} \approx T_m$$

$$\Delta T_{tot} = (T_s - T_{s'}) - (T_f - T_{f'}) \quad \Delta P_{tot} = (P_s - P_{s'}) - (P_{f'} - P_f)$$

$$\dot{L}_{Res} = \underbrace{\dot{M}C_p \left[\Delta T_{tot} - T_a \ln \left(\frac{T_s T_{f'}}{T_f T_{s'}} \right) \right]}_{\text{pertes exergetiques thermiques}} + \underbrace{\dot{M} \bar{v} \Delta P_{tot}}_{\text{pertes exergetiques par dissipation visqueuses}}$$

Pompes à chaleur



Hypothèses du modèle:

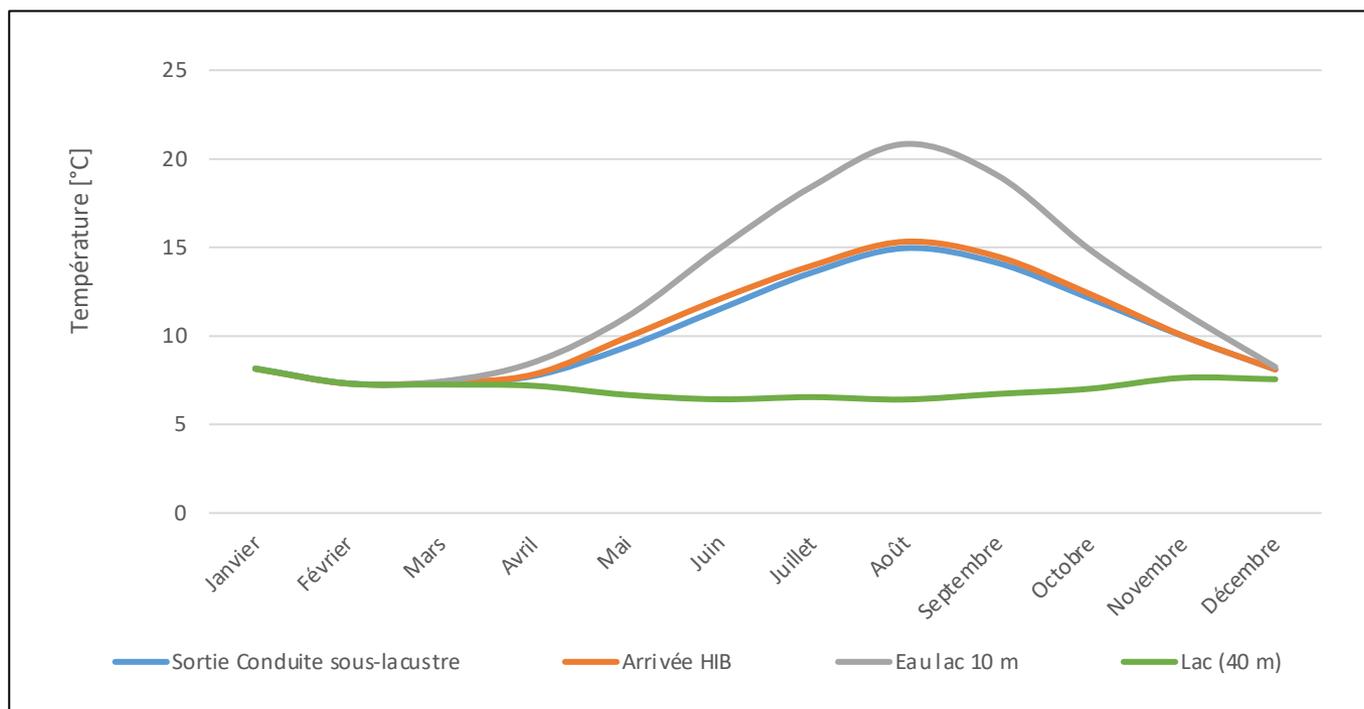
- Pincements évaporateur/condenseur: $\Delta T_f / \Delta T_c$
- Compression adiabatique non réversible (rendement isentropique)
- Détente isenthalpique
- Evaporation à $T_f - \Delta T_f$
- Condensation à $T_c + \Delta T_c$
- Capacité thermique moyenne du fluide à la compression

$$COP_{real} = \eta(T_c, T_f) \cdot COP_{max} \quad \dot{L}_{PAC} = [1 - \eta(T_c, T_f)] \dot{e}_k$$

$$\eta(T_c, T_f) = 1 - \frac{T_a}{T_c} \left[1 - \eta_{ks} \cdot \Delta s / c_p \cdot \frac{\frac{T_c}{T_f} - 1}{\frac{T_c + \Delta T_c}{T_f - \Delta T_f} - 1} \right]$$

Résultats et analyses

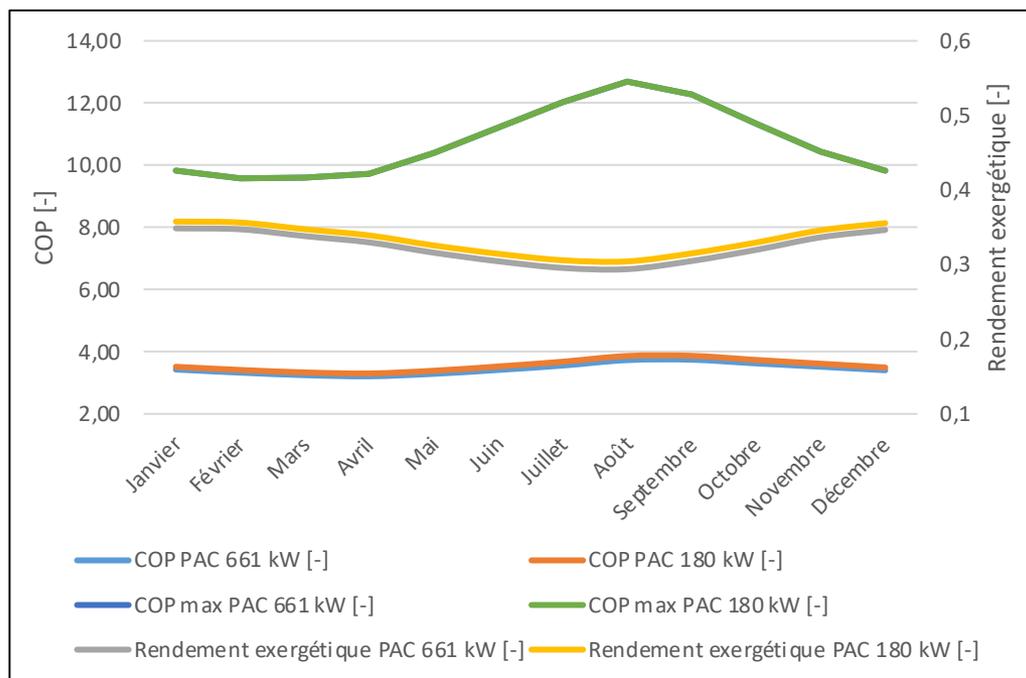
Distribution de température



1. La température de sortie de la conduite sous-lacustre se rapproche de la température du lac à 10 m de profondeur
Conductivité élevée de l'acier non isolé ($63 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
2. Comportement isolant des conduites en PE pour ce niveau de température
Conductivité thermique faible du matériau ($0,33 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
3. En hiver la température moyenne d'arrivée au HIB est d'environ 8°C contre 13°C en été

Résultats et analyses

Performances des pompes à chaleur



Hypothèses de simulation :

- Puissances des PACs: 660 kW et 180 kW
- Température client: $T_c = 40 \text{ °C}$
- Pincements: $\Delta T_f = 1,5$ et $\Delta T_c = 6$ (660 kW), $\Delta T_c = 5$ (180 kW)
- Rendement isentropique du compresseur $\eta_{KS} = 70\%$
- Fluide: R1234ze

Analyses :

1. COP (3,2-4):

- PACs légèrement plus performantes en été (diminution du différentiel de température entre sources chaude et froide)

2. Rendement exergetique (30- 35%):

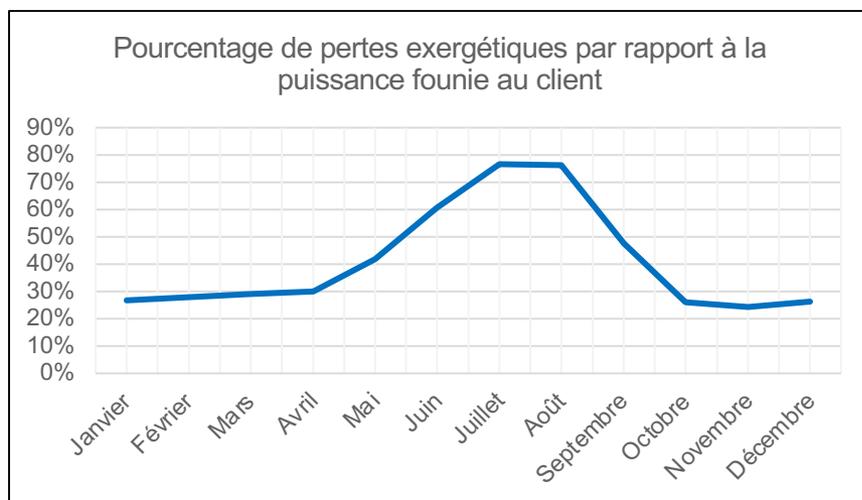
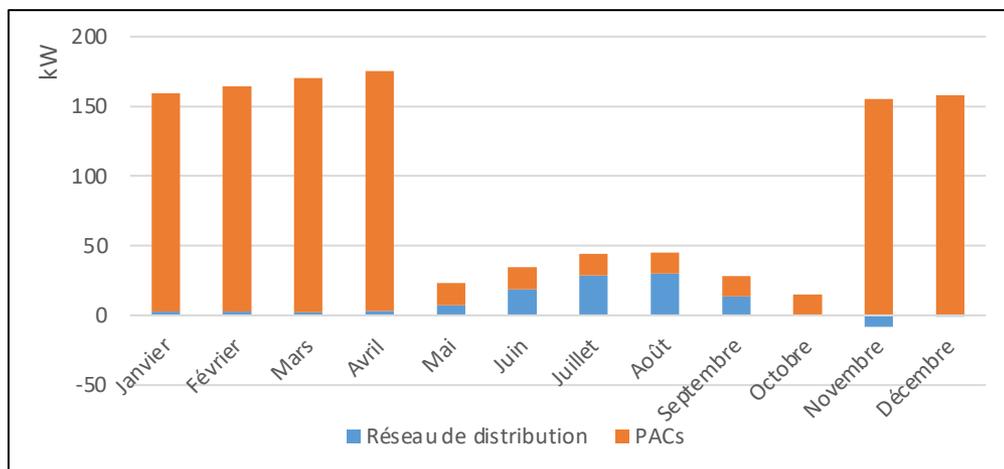
- Eté: Les PACs fournissent moins que ce qu'elles *pourraient*

$$COP_{real} = \eta(T_c, T_f) \cdot COP_{max}$$

- Rendement faible car prise en compte de la consommation électrique + la source froide fournit une prestation (pas gratuite)

Résultats et analyses

Pertes exergetiques



1. Principalement dues aux pompes à chaleur
2. Hiver:
 - Faible influence des pertes exergetiques par dissipation: bon dimensionnement des conduites
3. Eté:
 - Les pertes exergetiques thermiques dominant car la chaleur n'est pas pleinement exploitée (rejets à des temperatures élevées)
 - 76% de pertes exergetiques par rapport à la puissance fournie

| Données initiales | Débit nominal $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | Puissance nominale kW |
|-------------------|---|--------------------------|
| Hiver | 170 | 840 |
| Eté | 15 | 80 |

Conclusions et perspectives

Conclusions

- Température d'arrivée au HIB \approx Température en sortie de la Conduite sous-lacustre
- Comportement isolant des conduites en PE pour ces niveaux de température
- Rendement exergetique :
 - Plus faible en été (contrairement au COP): la PAC fournit beaucoup moins que ce qu'elle pourrait
- Pertes exergetiques:
 - Chaleur pas assez valorisée en été

Perspectives

- Variation de la température de consigne des bâtiments selon un profil usagers
- Affiner les modèles exergetiques
- Confronter le modèle avec les données réelles d'exploitation



Merci de votre attention !

