

Reconversion d'anciennes ardoisières pour le stockage massif d'énergie thermique en vue de couvrir les besoins de chaleur, de froid et d'électricité d'un ensemble de bâtiments



Vincent Lemort, Aitor Cendoya, Frédéric Ransy, Jacques Windeshausen

Colloque TR2i

Saint-Malo, le 31 mai 2024



Introduction

- Contexte énergétique: Accord de Paris (limiter le réchauffement à 1.5 K), neutralité carbone en 2050, rôle des **énergies renouvelables**... mais problèmes liés à leurs fluctuations et caractère **aléatoire**.
- **Stockage énergétique** = élément pivot dans la transition énergétique

Mécanique

Pompage-turbinage: adapté pour le stockage massif, potentiel géographique limité, déjà utilisé comme service auxiliaire

Electro-chimique

Batterie: adaptée au stockage journalier

Chimique

Thermochimique: adaptée au stockage saisonnier, maturité technique?

Thermique

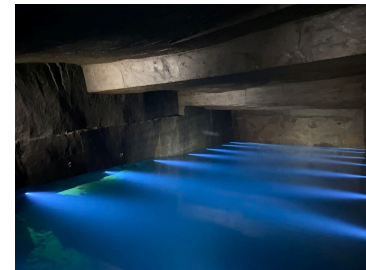
Stockage sensible(/latent): faible impact environnemental, faible coût, stockage de longue durée, couplage secteurs électricité/chaud/froid, peut-être massif (pit, aquifères), couplage avec DHN

Introduction



ARD **VRGY**

WeForming

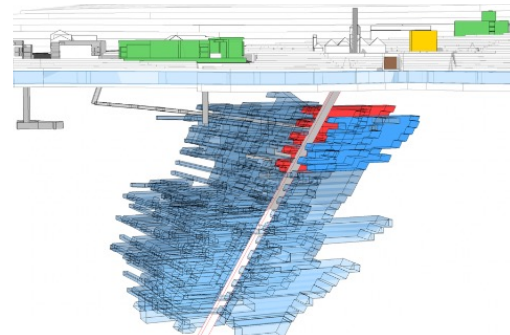


Saint Malo: 651 km

Introduction

- Objectif:

- ❖ démontrer la **faisabilité technique** d'utiliser **des galeries de mine noyées** comme **stockage sensible** massif permettant
 - De couvrir les besoins de chaleur et de froid d'un ensemble de bâtiments
 - ↑ autoconsommation de la production locale (PV)/autoproduction
 - *Décarbonisation de la production de chaleur et de froid*
 - De stocker de l'électricité
 - De fournir des services auxiliaires au réseau électrique (équilibre devient compliqué)
- ❖ Optimiser le **dimensionnement** du système énergétique global: volume des chambres à utiliser, taille PAC...

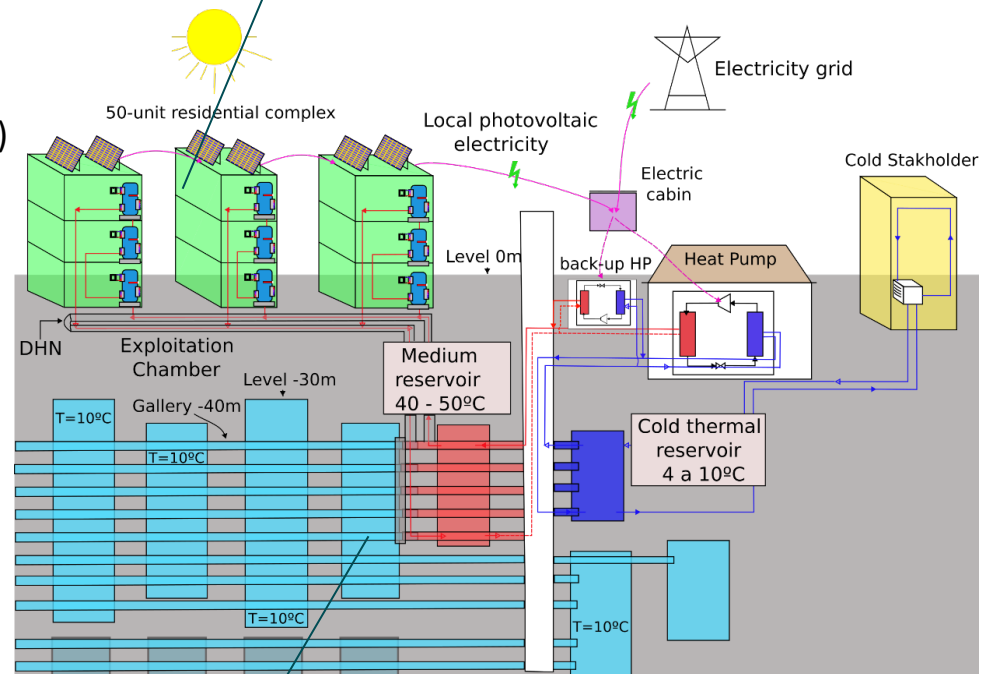


Agenda de la présentation

1. Introduction
- 2. Description des ardoisières et du système énergétique**
3. Simulation du stockage de chaleur et de froid
4. Extension du système en une Batterie de Carnot
5. Conclusions

Les ardoisières et le système énergétique

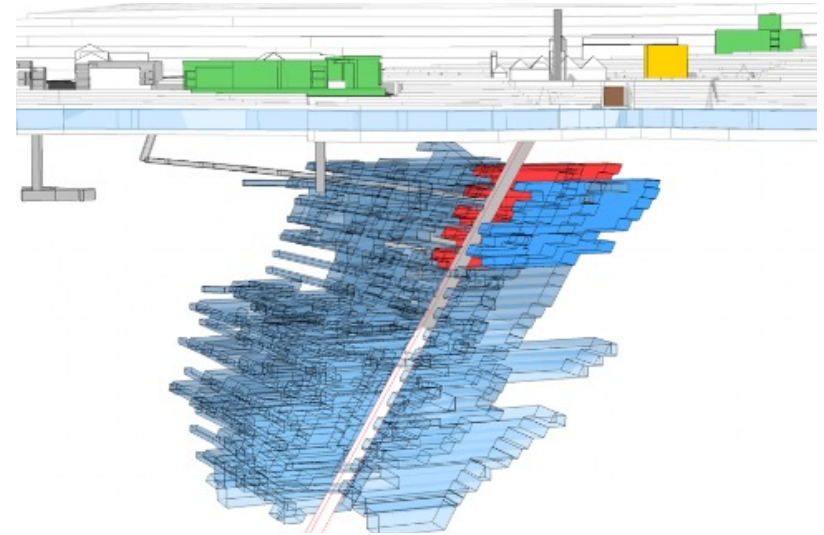
- 5 bâtiments (3 étages), **50 logements**
 - chauffage par le sol, Consignes: 20°C/27°C.
 - Connecté à un DHN
 - Ballon d'eau chaude de 300L (200L ECS) par appartement connecté au DHN, au plancher et à une PAC sur ventilation.
- **Panneaux PV:** 388 m², 30°
- **Batteries** 550 Ah. Le SOC est maintenu entre 10 et 99% grâce à la PAC.
- **Pompes à chaleur principale:** 140 kW, sur batterie (se coupe si t° stockage > 60°C)
- **Pompe à chaleur secondaire:** 60 kW, sur réseau (si t° stockage < 40°C ou Tout<5°C)



Les ardoisières et le système énergétique

Stockage thermique:

- **Galeries de mine:** anciennes ardoisières (mises à l'arrêt en 1990), 500 000 m³
- 9 chambres interconnectées avec une profondeur max de 180 m.
- **2 (3) chambres** sont utilisées comme stockage
 - Stockage chaud (50-40°C): 6840 m³
 - Stockage froid (10-5°C): 20000 m³
(actuellement partiellement régénéré naturellement: un utilisateur de froid est recherché)



Simulation du stockage de chaleur et de froid

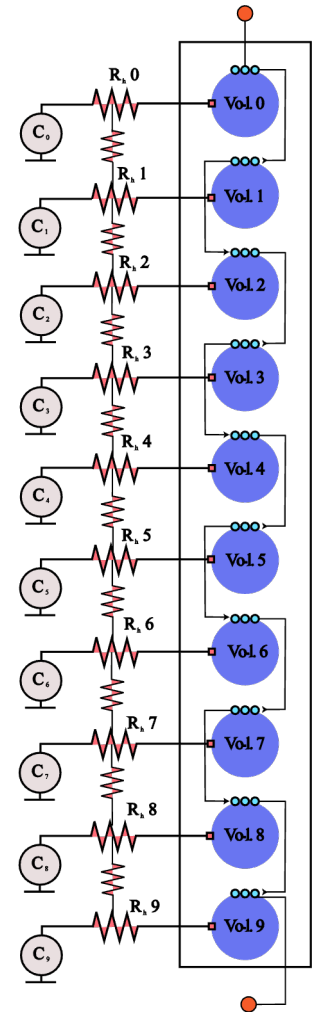
Modélisation

○ Simulation sous Modelica:

- librairie **IDEAS** (KULeuven):
 - ✓ Modèle de bâtiments (1 appartement X 50)
 - ✓ Ballon discrétisé en 10 volumes
 - ✓ Modèle PAC calé sur des données constructeur
- Librairie de l'International Building Performance Simulation Association (**IBPSA**):
 - ✓ modèle PlugFlow utilisé pour simuler le réseau de chaleur
- Modèle des chambre chaude/froide discrétisé en 10 volumes avec échange de chaleur avec le schiste.

○ 4 années de simulation

- Pas de temps de 15 minutes
- Deux premières années de la simulation pour monter en température dans le réservoir (initialement à 10°C).



Simulation du stockage de chaleur et de froid

Indicateurs de performance

- Pertes thermiques du stockage

$$E_{UND,loss} = \sum_{i=1}^{i=10} \int_{t_{in}}^{t_f} \frac{T_{w,vol,i}(t) - T_{soil,i}(t)}{R_{soil,i}} dt$$

- Efficacité du stockage de chaleur

$$\bar{E}_{sto} = \frac{\sum \int_{t_{in}}^{t_f} \dot{M}_{w,HP,i} \cdot c_{p,w} \cdot (T_{w,ex,HP,i} - T_{w,su,HP,i}) dt - E_{UND,loss}}{\sum \int_{t_{in}}^{t_f} \dot{M}_{w,HP,i} \cdot c_{p,w} \cdot (T_{w,ex,HP,i} - T_{w,su,HP,i}) dt}$$

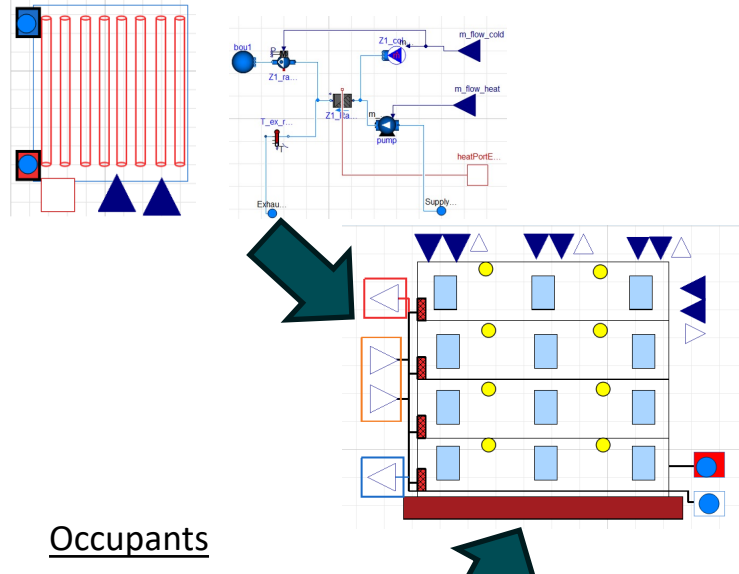
- COP global

$$COP_{sys} = \int_{t_{in}}^{t_f} \frac{\dot{Q}_{build}(t) + \dot{Q}_{DHW}(t)}{\sum \dot{W}_{aux}(t) + \sum \dot{W}_{cp,HP,i}(t) + \sum \dot{W}_{tk,app}(t)} dt$$

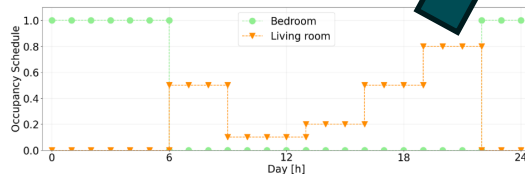
Simulation du stockage de chaleur et de froid

Résultats

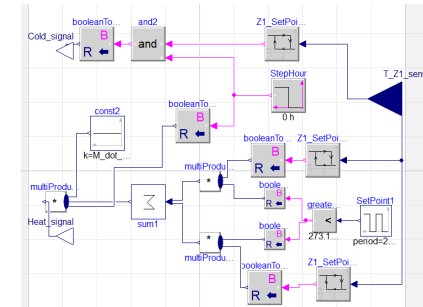
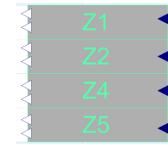
Plancher chauffant



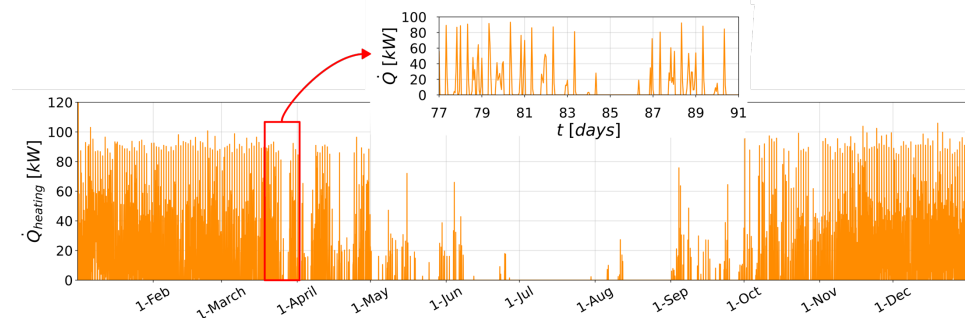
Occupants



Système de contrôle



Demande de chauffage pour un bâtiment

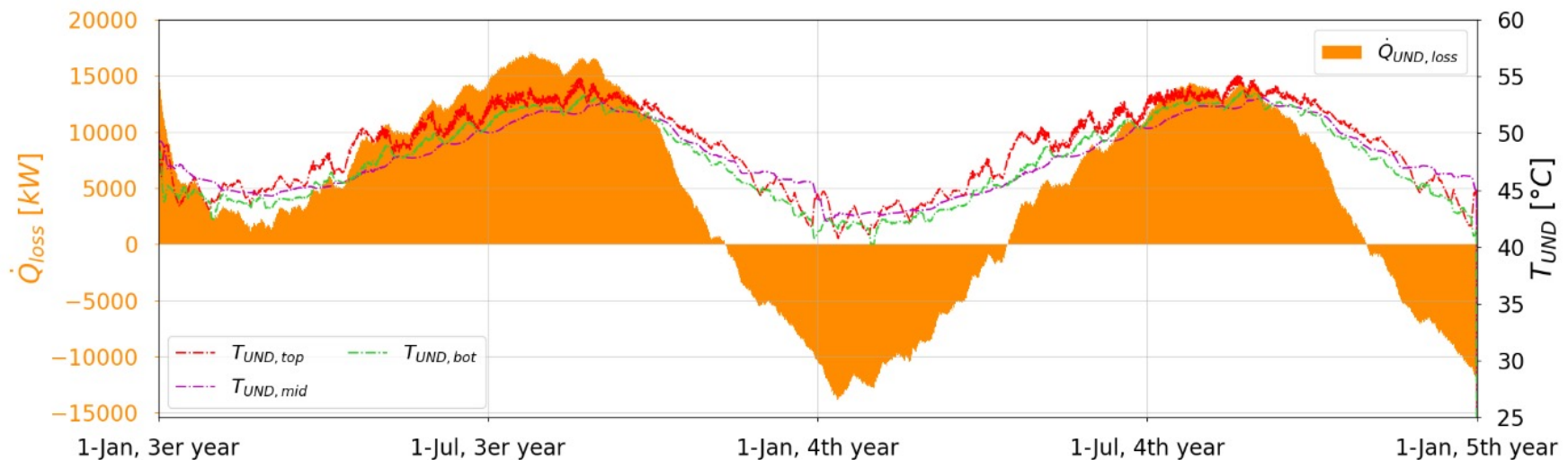


- Besoins de chaleur: 387.2 MWh/y pour le chauffage, 182.5 MWh/y pour l'ECS => Total: 569.7 MWh/y
- Production PV transmise à la PAC principale: 88.1 MWh/y (après les 2 années de charge)
- Autoconsommation: 95.2% (après les 2 années de charge)

Simulation du stockage de chaleur et de froid

Résultats

- Efficacité du stockage $\bar{E}_{sto}$ ($E_{UND,loss}$) :
 - Année 1: 43% (269 MWh)
 - Année 2: 30,6% (248,2 MWh): température du stockage $\uparrow$ et donc capacité de la PAC $\downarrow$
 - Année 3: 87% (70 MWh)
 - Année 4: 92% (44.3 MWh): l'eau récupère de la chaleur du schiste



Simulation du stockage de chaleur et de froid

Résultats

- Energie thermique extraite par le réseau de chaleur (*Pompe à chaleur ballon*) :
 - Année 1: 0 (0 MWh)
 - Année 2: 0 (0 MWh)
 - Année 3: 442 MWh (133.8 MWh): structure bâtiment doit être « chargée »
 - Année 4: 430 MWh (132.7 MWh):
- Autoproduction/autoconsommation des panneaux PV: 44,5%/95,2 (années 3 et 4)
- **COP: 2.86** et 2.81 (années 3 et 4): bonnes valeurs avec presque la moitié de l'électricité issue des ERN

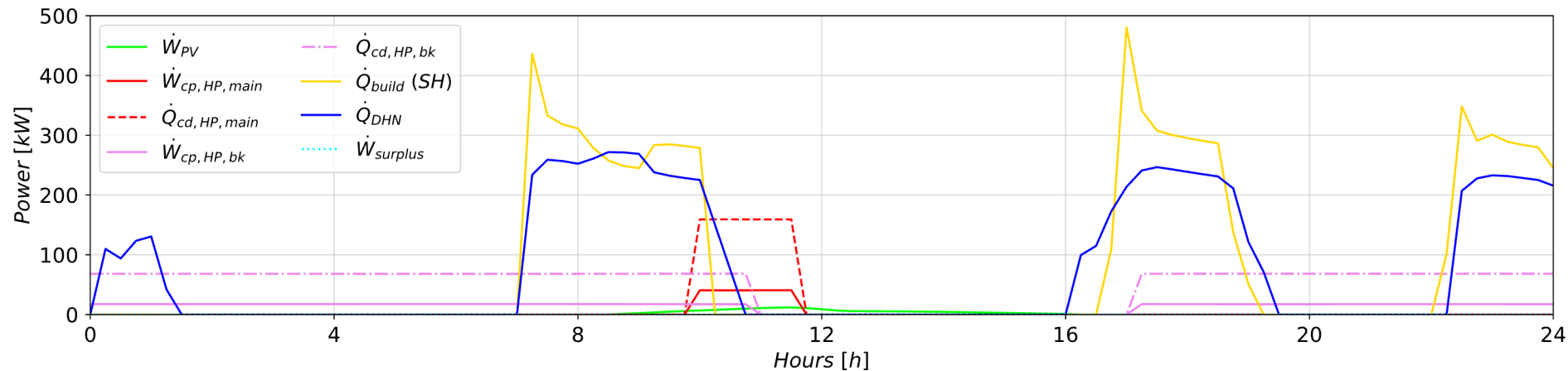
$$COP_{sys} = \int_{t_{in}}^{t_f} \frac{\dot{Q}_{build}(t) + \dot{Q}_{DHW}(t)}{\sum \dot{W}_{aux}(t) + \underbrace{\sum \dot{W}_{cp,HP,i}(t)}_{\substack{\text{Pompes à chaleur} \\ \text{primaire et secondaire}}} + \underbrace{\sum \dot{W}_{tk,app}(t)}_{\substack{\text{Pompe à chaleur et} \\ \text{résistance élec.} \\ \text{ballon}}} dt$$

Simulation du stockage de chaleur et de froid

Résultats

○ Jour typique d'hiver:

- Réseau couvre une partie importante de la demande de chaleur
- Pompe à chaleur principale fonctionne peu (peu de PV)
- Utilisation importante de la PAC d'appoint

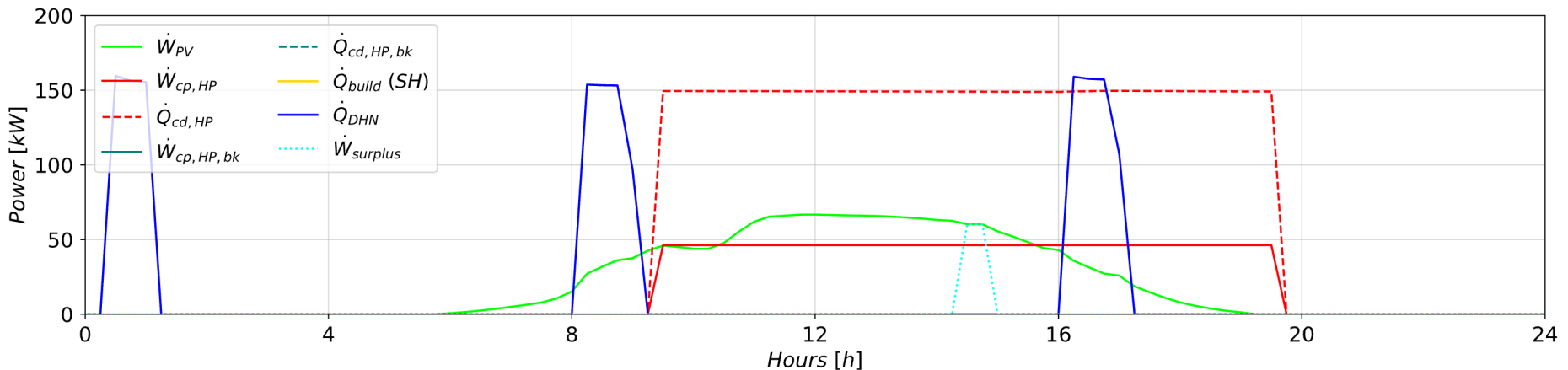


Simulation du stockage de chaleur et de froid

Résultats

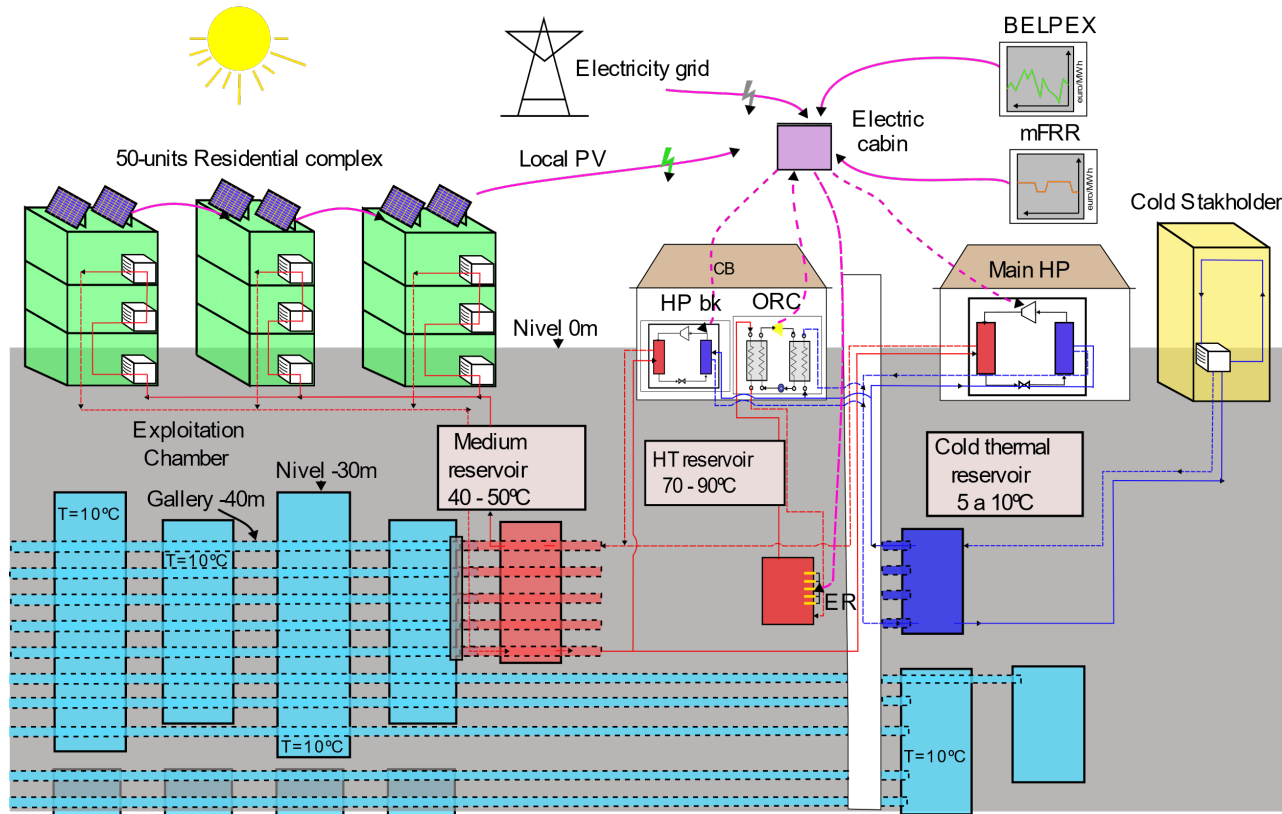
○ Jour typique d'été:

- Principalement mode charge thermique (production PV importante)
- Réseau de chaleur utilisé pour l'ECS.
- Pompe à chaleur principale fonctionne pendant longue durée (pompe à chaleur secondaire à l'arrêt)



Extension du système en une batterie de Carnot

Niveaux de températures



- 3 chambres
 - 800 m³ à HT (90-70°C)
 - 6840 m³ à MT (50-40°C)
 - 80000 m³ à LT (10-5°C)
- ORC
- Résistances électriques (moins performante qu'une PAC, mais constante de temps plus faible)

Extension du système en une batterie de Carnot

Composants de la batterie de Carnot

○ Caractéristiques

✓ ORC

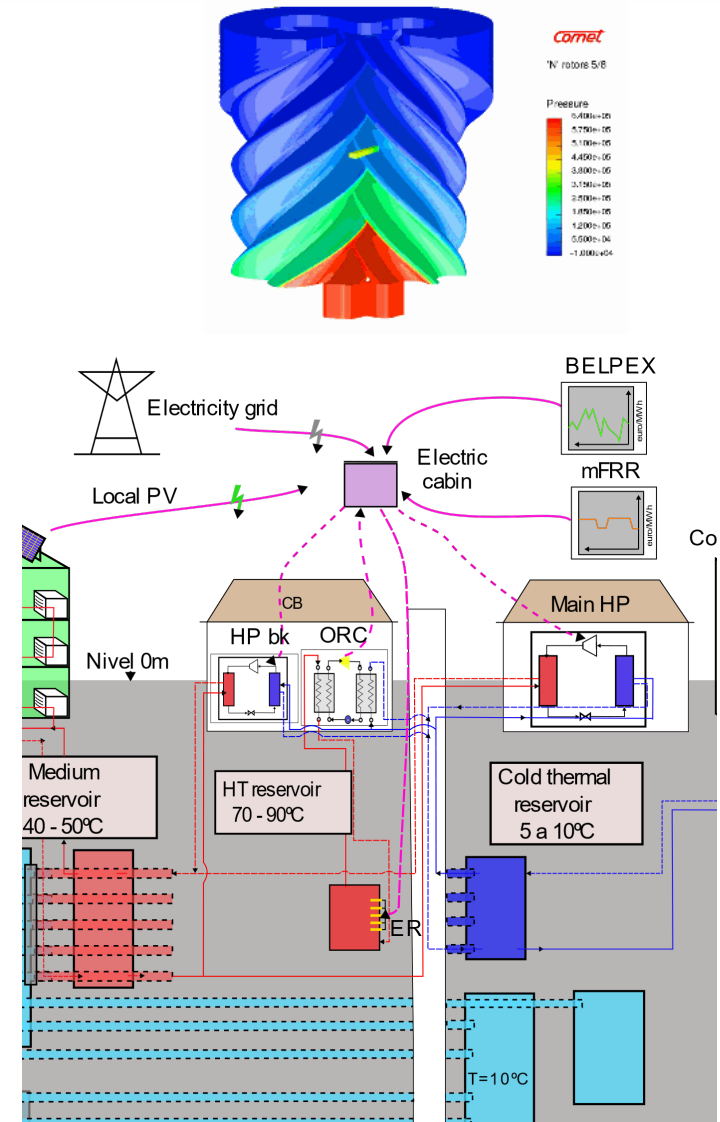
- 48 kWe (90°C à l'évaporateur et 10°C au condenseur),
- fonctionnant au R1233zd(e)
- Expanseur à vis
- Activé si prix BELPEX > 100 EUR/MWhe

✓ Pompe à chaleur secondaire (crée froid):

- 60 kWth
- R410a

✓ Résistances électriques

- 800 kWe
- Activées si prix de l'électricité BELPEX < 0 ou, en priorité, si mFRR à la baisse (« downwards »)

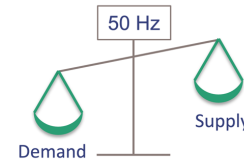


Extension du système en une batterie de Carnot

Services au réseau

- Offrir des services au réseau électrique:
BELPEX (prix $\neq 0$), **mFRR** (réserves tertiaires, réaction < 15 minutes)

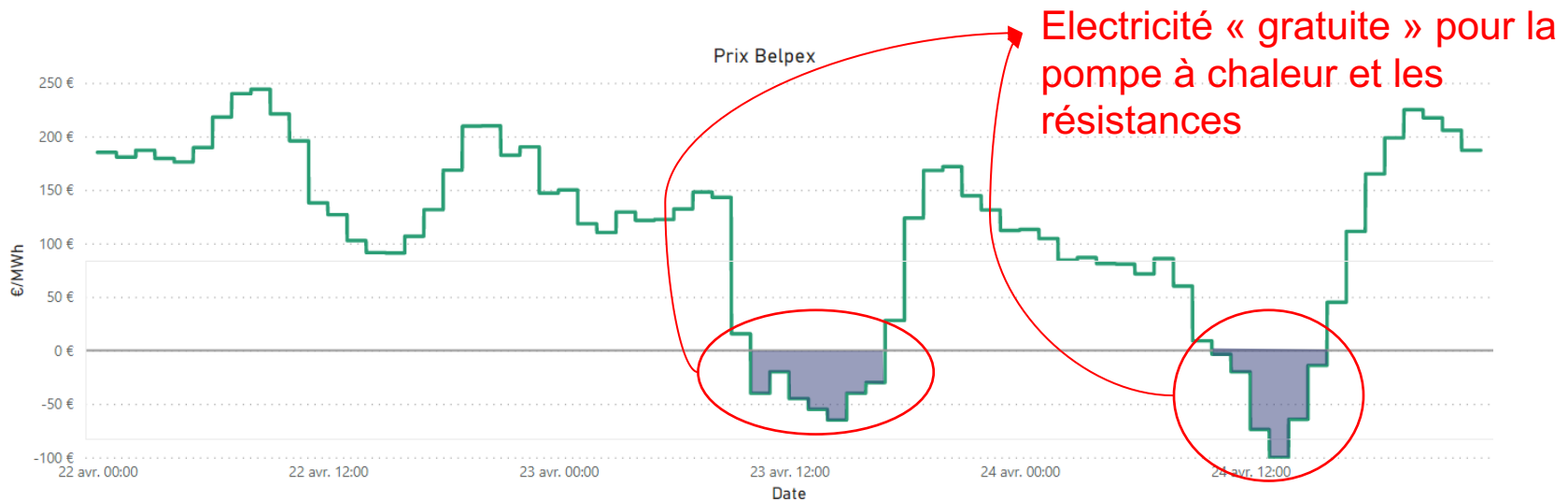
Services Auxiliaires



Belpex Day Ahead

De prix **élevés** ...

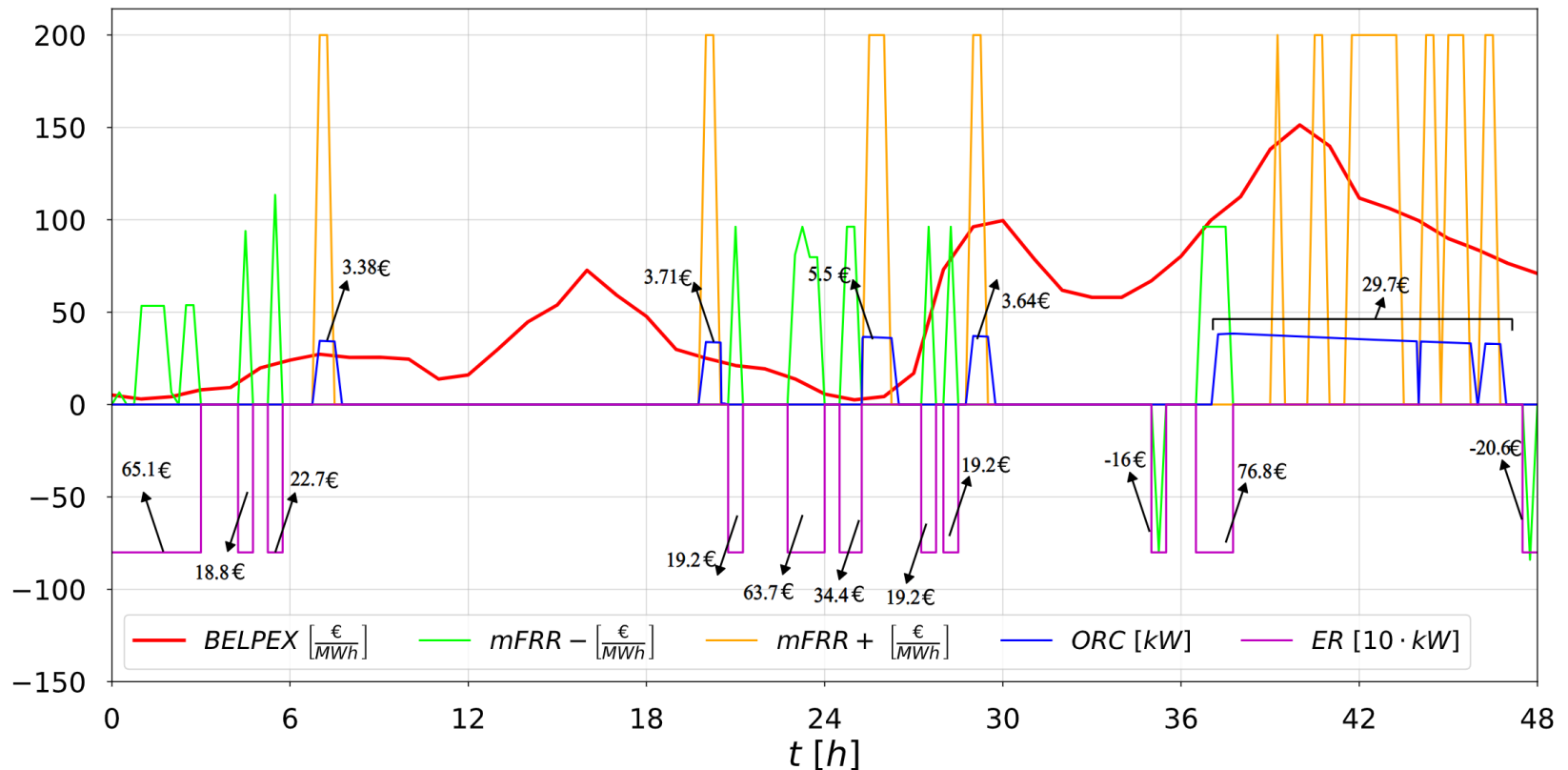
...à des prix **négatifs**



Extension du système en une batterie de Carnot

Composants de la batterie de Carnot

Exemple d'injection et soutirage d'électricité pendant 2 jours



Conclusions et perspectives

- Ce projet **démontre l'intérêt de reconvertir d'anciennes mines** pour réaliser du stockage thermique massif
- **Montée en température de l'eau et de la roche** pendant les deux premières années
- Avantages pour les utilisateurs à ne pas négliger
 - ✓ Autoconsommation du PV: 95% (388 m² PV)
 - ✓ Chambre de 6840 m³ fournit 77% de la demande de chaleur de 50 logements via un DHN.
 - ✓ **Réduction du coût du chauffage pour les occupants** (et les émissions de CO₂)
- L'extension en batterie de Carnot permet d'offrir des **services au réseau électriques...** et donc d'absorber des ERN produites en dehors du site (éolien)

Perspectives:

- Finaliser la mise en place du système...

Conclusions et perspectives



Merci pour votre attention!

Merci aux contributeurs à cette présentation

Merci TR2i!

Vincent Lemort

Vincent.Lemort@uliege.be

Thermodynamics Laboratory

University of Liège

Belgium