

Avec le soutien de :



COLLOQUE GESTION DES EAUX SOUTERRAINES

Du 15 au 17 février 2023
à l'ENSEGID - Bordeaux INP

INFLUENCE DE L'ANTHROPISATION DU SOL ET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA PERFORMANCE D'UN SYSTÈME GÉOTHERMIQUE ATES

Jérémy Godinaud
Doctorant ENSEGID



Déroulement de la présentation

- **1) Description générale ATES (Aquifer Thermal Energy Storage)**
- 2) Influence de l'anthropisation de la surface et du climat sur la distribution de température dans le sous sol
- 3) Impact sur la performance d'un système ATES

Déroulement de la présentation

- 1) Description générale ATES (Aquifer Thermal Energy Storage)
- **2) Influence de l'anthropisation de la surface et du climat sur la distribution de température dans le sous sol**
- 3) Impact sur la performance d'un système ATES

Déroulement de la présentation

- 1) Description générale ATES (Aquifer Thermal Energy Storage)
- 2) Influence de l'anthropisation de la surface et du climat sur la distribution de température dans le sous sol
- **3) Impact sur la performance d'un système ATES**

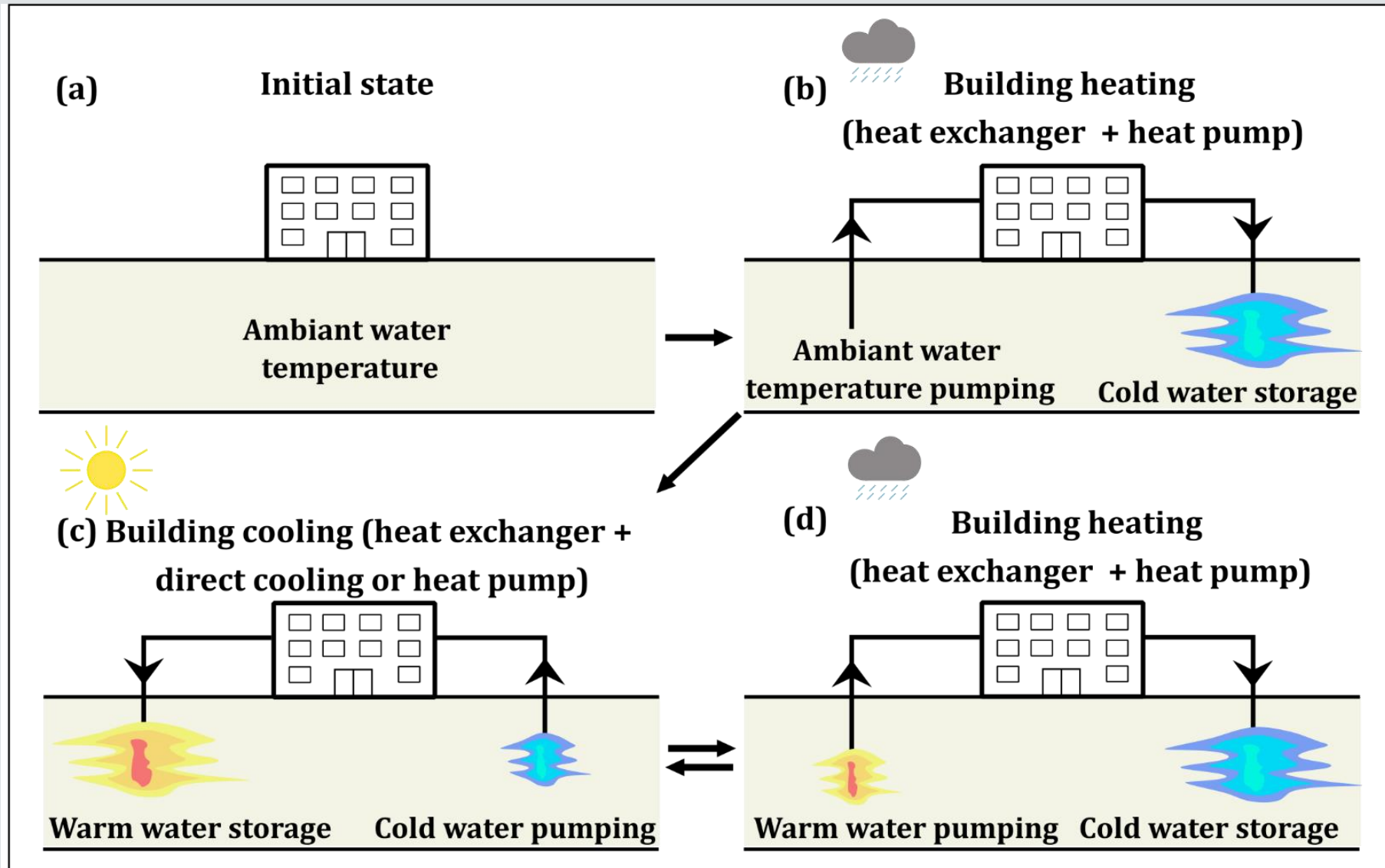
1) Description générale ATES

- a) Principe de fonctionnement
- b) Site de l'ENSEGID

1. Description générale ATES

a) Principe de fonctionnement

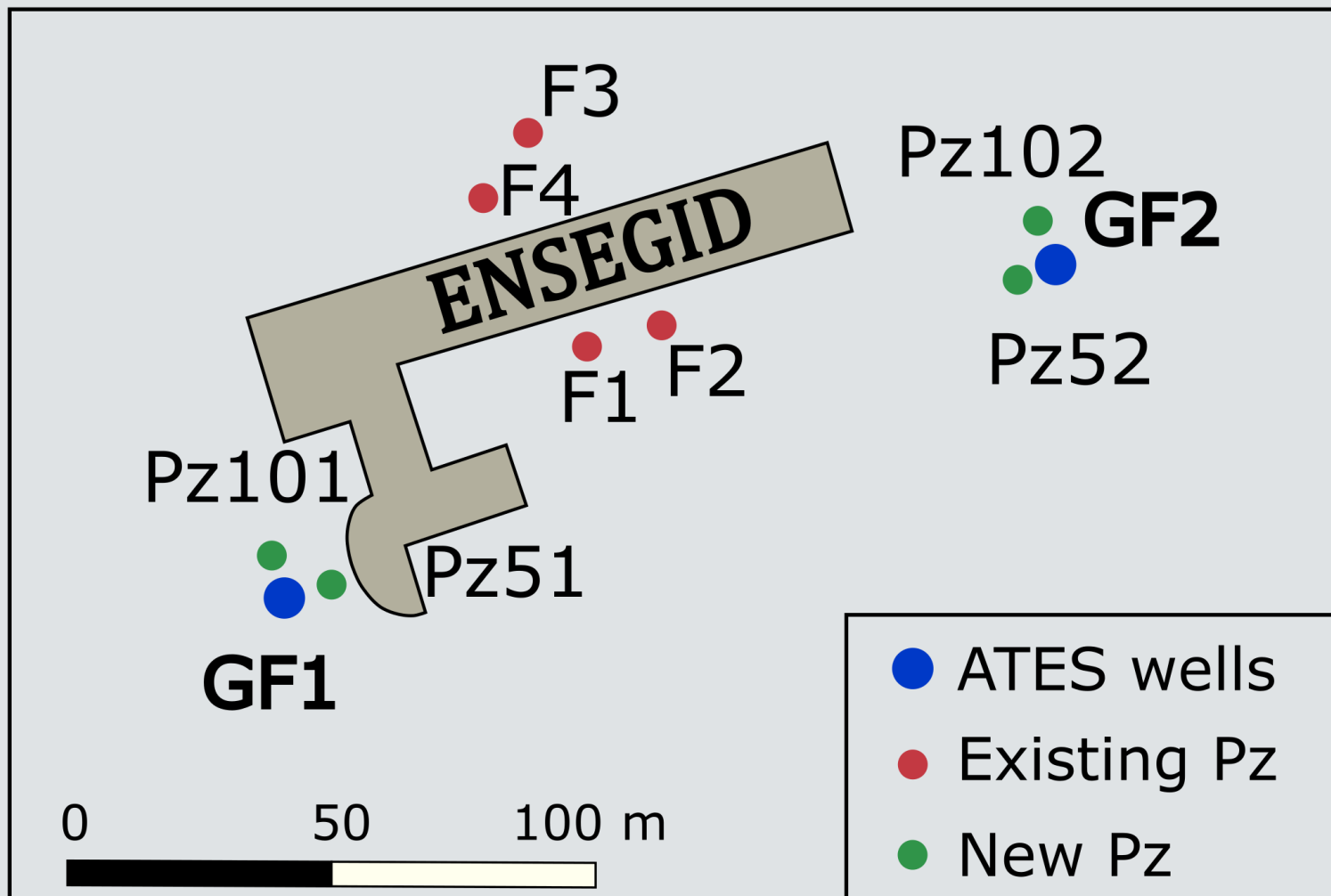
b) Site de l'ENSEGID



1. Description générale ATES

- a) Principe de fonctionnement
- b) Site de l'ENSEGID

Implantation et disposition de l'ATES de l'ENSEGID



2) Influence de l'anthropisation de la surface et du climat sur la distribution de température dans le sous sol

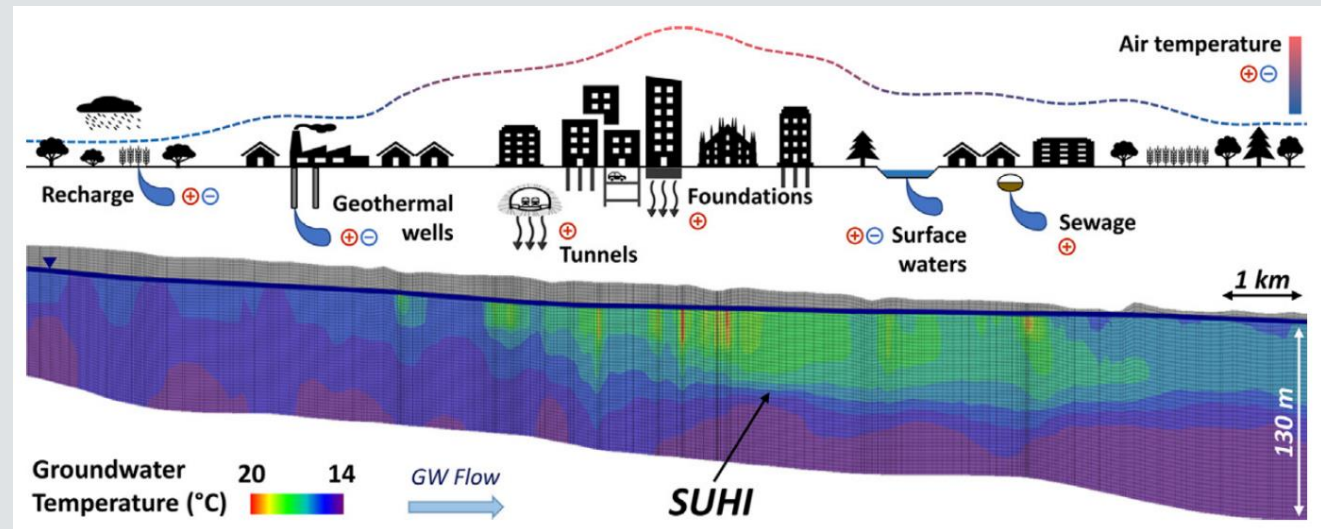
- a) Constat extrait de la littérature
- b) Exemple concret de l'ENSEGID
- c) Formulation analytique

2. Influence de l'anthropisation de la surface et du climat sur la distribution de température dans le sous sol

a. Constat

- b. Cas concret à l'ENSEGID
- c. Formulation analytique

- La température moyenne du sous sol des zones urbaines est en moyenne **2 à 6°C supérieure** à celle des zones rurales (*Bayer et al, 2019; Banks, 2012; Tissen et al, 2019 etc...*)
- Explication : transferts thermiques de la surface et proche surface (bâtiments, routes, parkings, tunnels etc...) vers les horizons plus profonds ➔ **Création d'Îlots de Chaleur Sub-Urbain**

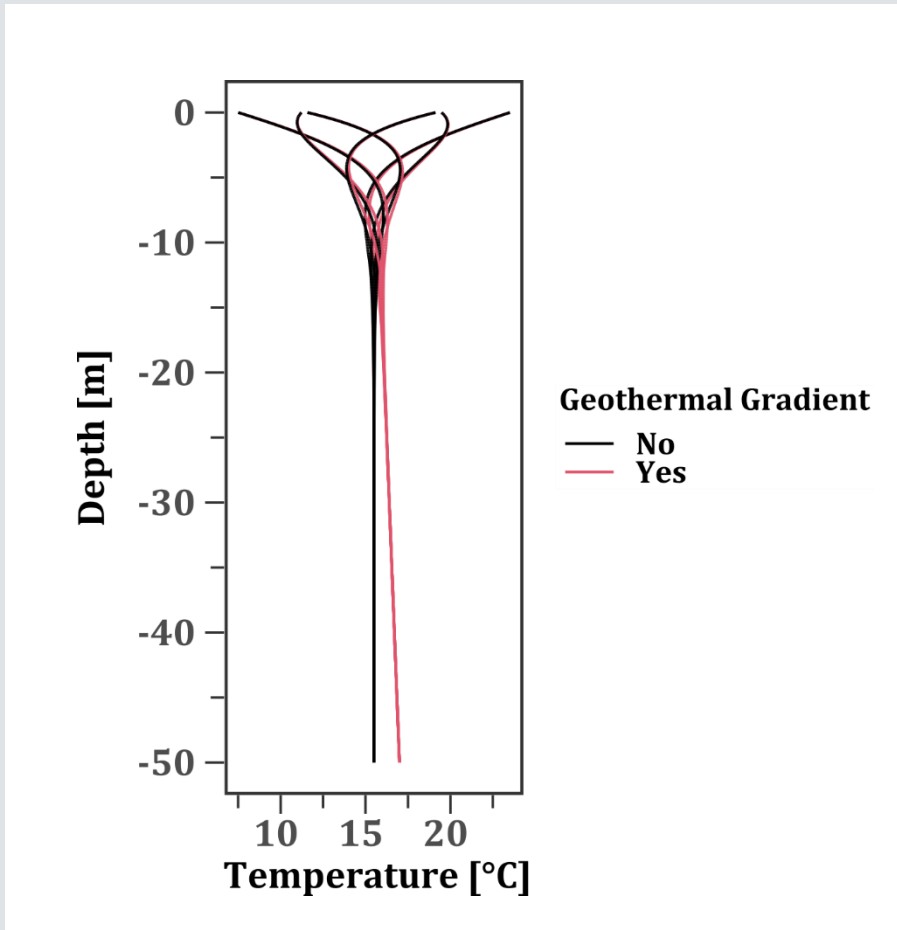


Modélisation numérique de la distribution de température dans le sous sol de Milan (*Previati et al, 2021*)

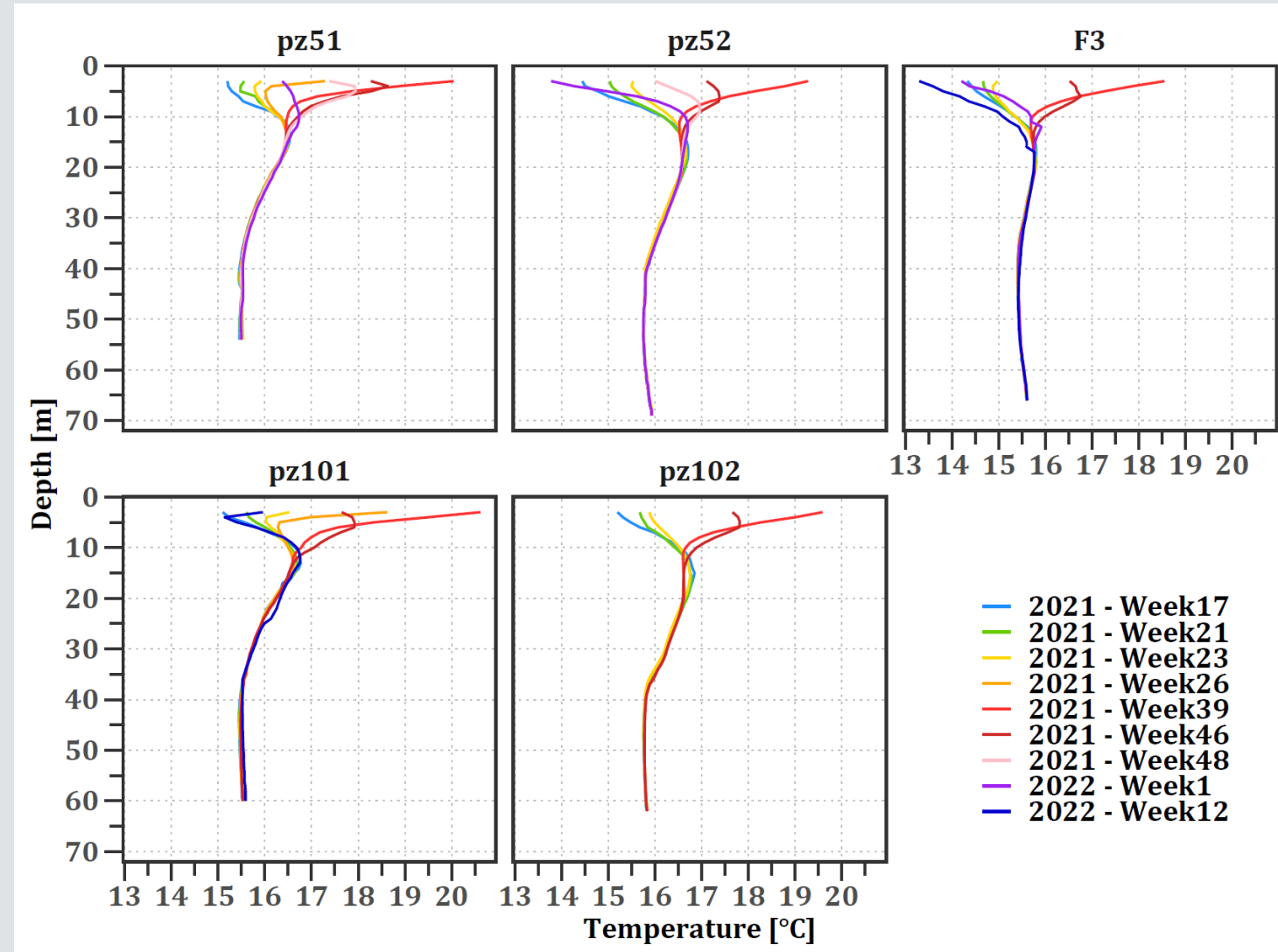
2. Influence de l'anthropisation de la surface et du climat sur la distribution de température dans le sous sol

- a. Constat
- b. Cas concret à l'ENSEGID
- c. Formulation analytique

Théorie : Fluctuation saisonnière 0-15m + influence grad géo



Cas réel ENSEGID: Fluctuation saisonnière 0-15m + « gradient inverse » 0-40 m



2. Influence de l'anthropisation de la surface et du climat sur la distribution de température dans le sous sol

- a. Constat
- b. Cas concret à l'ENSEGID
- c. **Formulation analytique**

Mise au point par Rivera et al (2015) permet de prendre en compte :

- **Gradient géothermique**
- **Climat passé**
- **Historique et arrangement anthropisation surface**

$$\vartheta_o(z, t) = T_s \operatorname{erf} \left(\frac{z}{\sqrt{4at}} \right) + kz$$

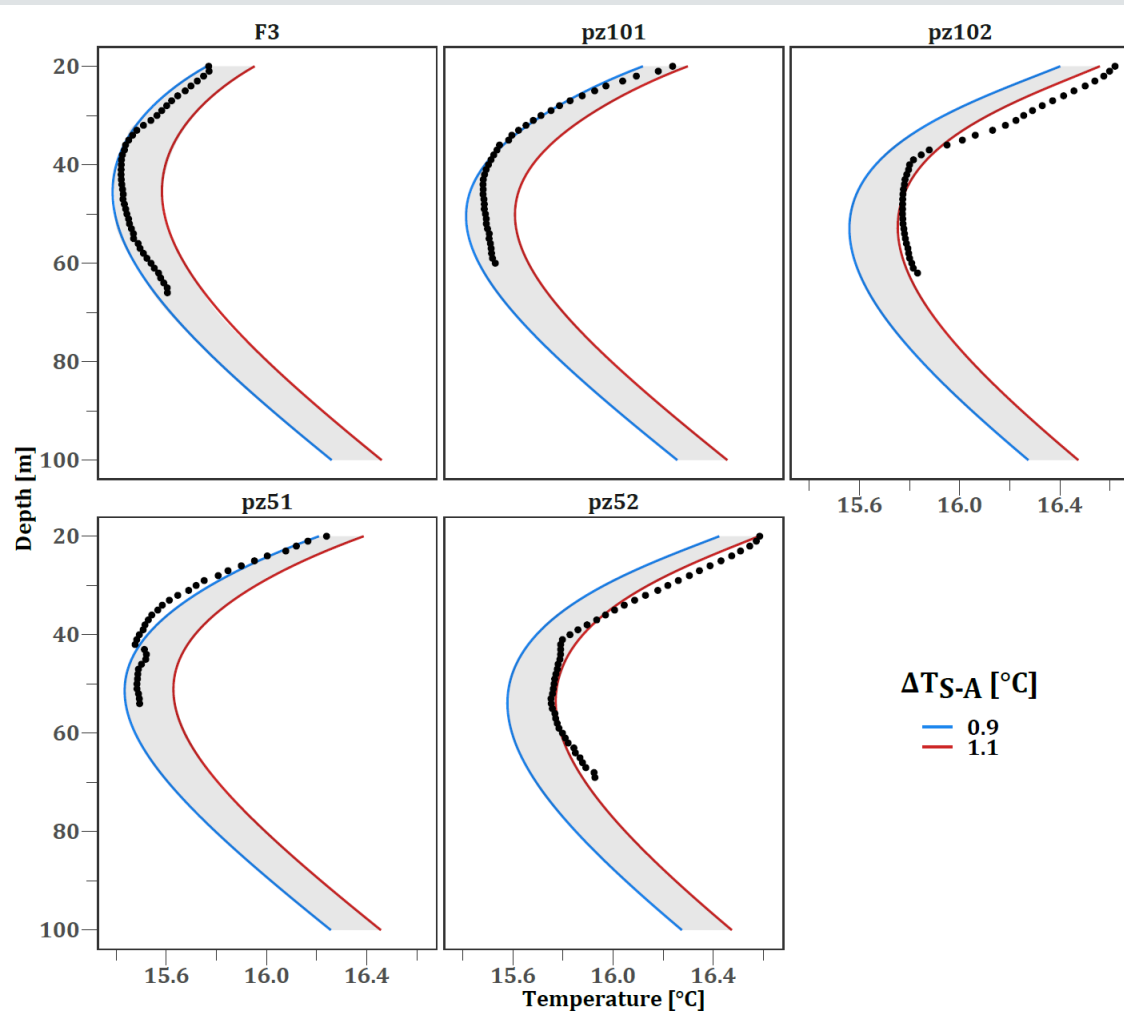
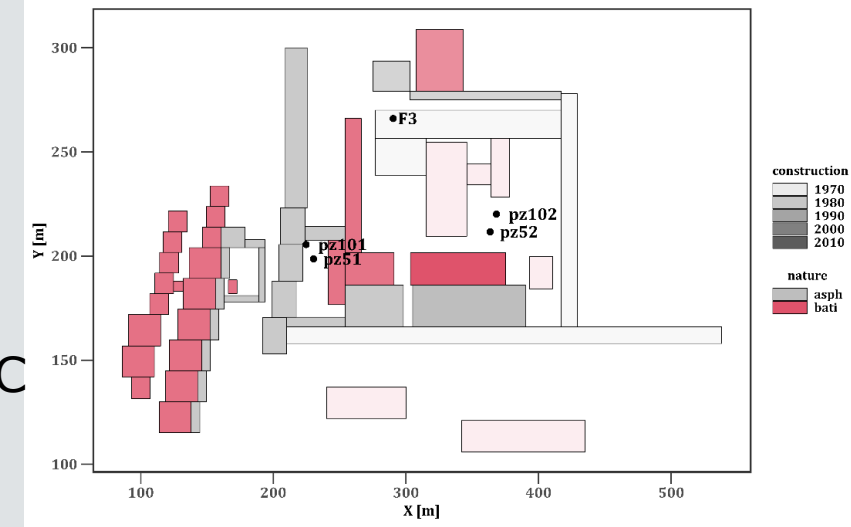
$$\vartheta_{tb}(z, t) = \frac{z}{2\sqrt{\pi a}} \int_0^t \frac{\varphi(\tau)}{(t - \tau)^{3/2}} \exp \left[-\frac{z^2}{4a(t - \tau)} \right] d\tau$$

$$T_{lu}(x, t) = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \int_{\frac{z^2}{4at}}^{\infty} \frac{\phi_{lu} \left(t - \frac{z^2}{4au} \right)}{\sqrt{u}} \exp(-u) \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y - y_b}{z} \sqrt{u} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y - y_a}{z} \sqrt{u} \right) \right] \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x - x_b}{z} \sqrt{u} - \frac{vz}{4a\sqrt{u}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x - x_a}{z} \sqrt{u} - \frac{vz}{4a\sqrt{u}} \right) \right] du$$

2. Influence de l'anthropisation de la surface et du climat sur la distribution de température dans le sous sol

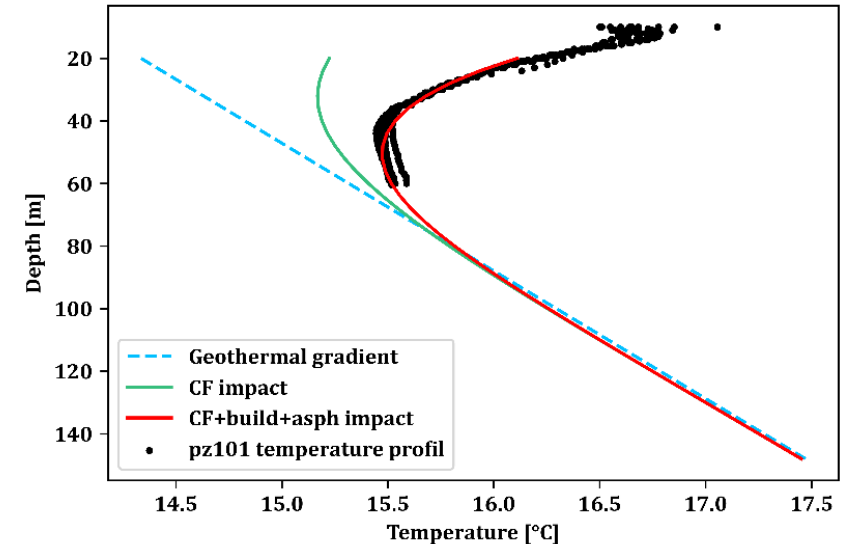
- a. Constat
- b. Cas concret à l'ENSEGID
- c. Formulation analytique

- Simplification de la géométrie en surface à l'ENSEGID
- $T^{\circ}\text{sol} = T^{\circ}\text{atm} + 0,9 - 1,1^{\circ}\text{C}$
- Apport bâtiment = 20°C
- Apport asphalté = $T^{\circ}\text{sol} + 3,5^{\circ}\text{C}$



Pz101

Climate forcing and surface structure effect on pz101 temperature profil



- Gradient géothermique
- Climat passé
- Anthropisation surface

2. Influence de l'anthropisation de la surface et du climat sur la distribution de température dans le sous sol

- a. Constat
- b. Cas concret à l'ENSEGID
- c. **Formulation analytique**

- Influence non négligeable du climat passé et l'historique d'anthropisation de la surface sur le site de l'ENSEGID
- Quel impact sur la performance de l'ATES ?

3) Impact de l'anthropisation de la surface et du changement climatique sur la performance d'un ATES : approche numérique

- a) Définition de la performance de l'ATES
- b) Modélisation numérique d'un site théorique
- c) Résultats

3. Impact sur la performance d'un ATES

a. Définition performance ATES

b. Modélisation numérique d'un site

c. Résultats

Performance ATES :

$$\eta = \frac{(T_{prod} - T_{nat}) \times V_{prod}}{(T_{inj} - T_{nat}) \times V_{inj}}$$

η = Ratio de Température × Ratio de Volume

Indicateur utilisé pour le puits froid et le puits chaud

3. Impact sur la performance d'un ATES

a. Définition performance ATES

b. Modélisation numérique d'un site

c. Résultats

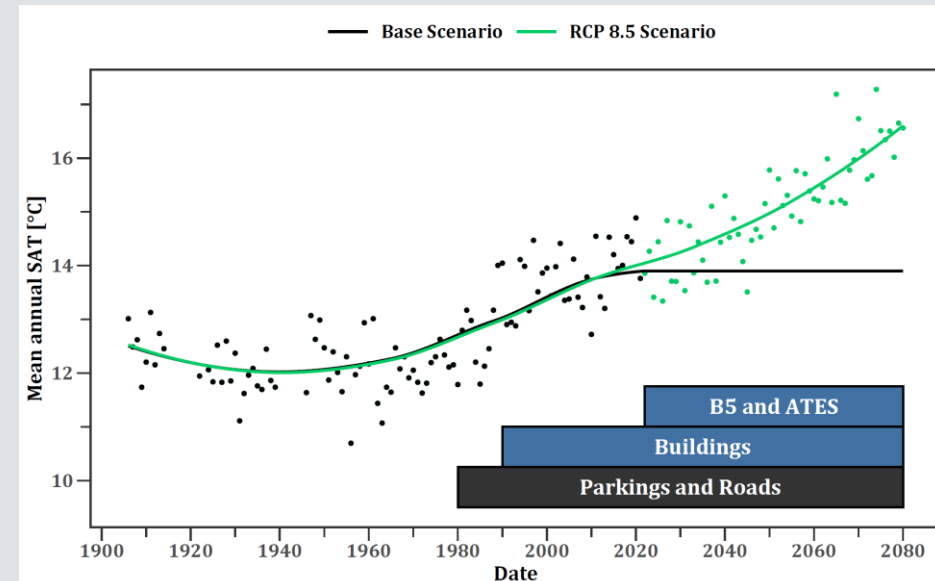
- Incapacité des solutions analytiques à modéliser le fonctionnement d'un ATES en mode transitoire

- **Modèle numérique 3D transitoire** dans Feflow

- Prise en compte des fluctuations climatiques depuis 1900 et projection jusqu'en 2080 à partir de **2 scénarios climatique**

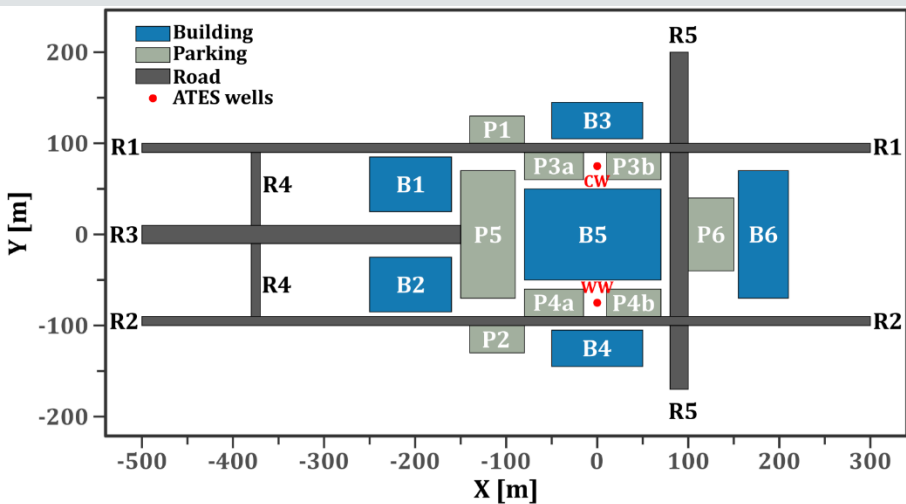
- Prise en compte de **l'historique de l'anthropisation** d'un site théorique

- Installation d'un **ATES en 2022**

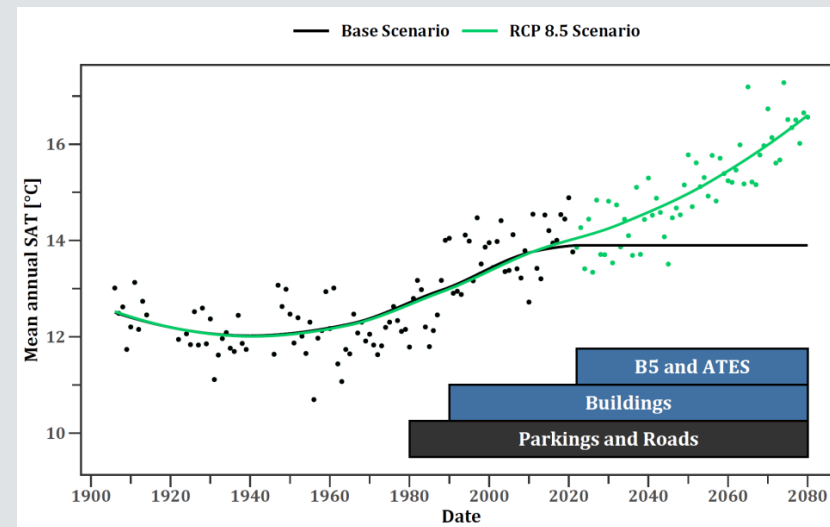


3. Impact sur la performance d'un ATES

- a. Définition performance ATES
- b. Modélisation numérique d'un site**
- c. Résultats



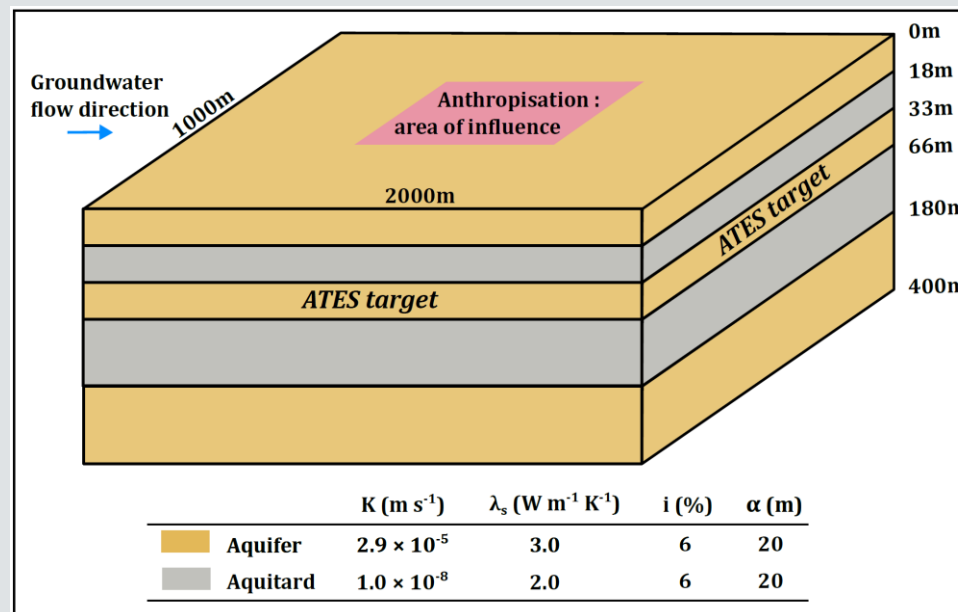
Conditions limites thermiques en surface



Configuration du site théorique en surface



Extension et propriétés du modèle numérique



Scénarios climatiques et historique anthropisation



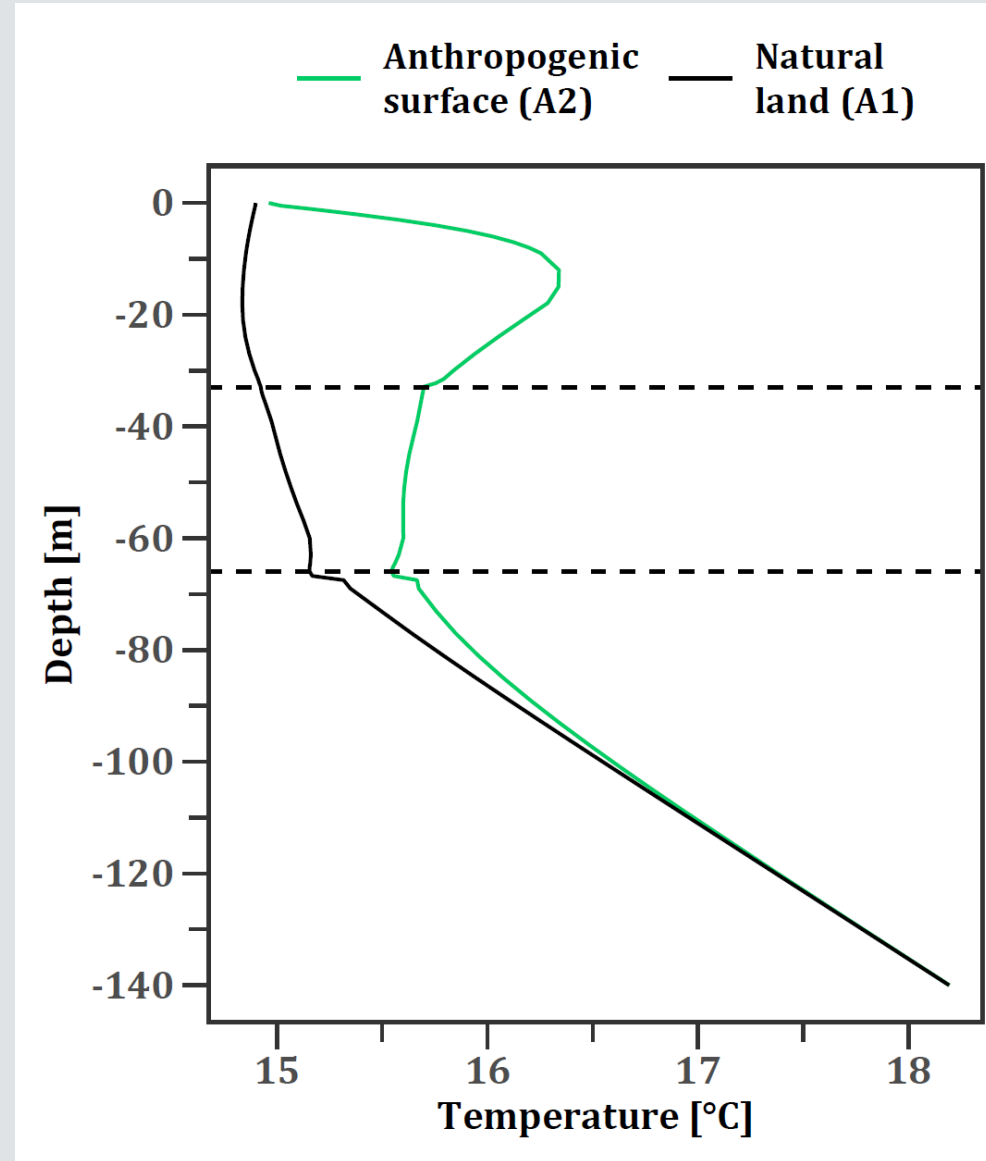
Profondeur de l'aquifère exploité : **33-66m**

3. Impact sur la performance d'un ATES

- a. Définition performance ATES
- b. Modélisation numérique d'un site
- c. Résultats

Profil de température en 2022 (avant exploitation ATES)

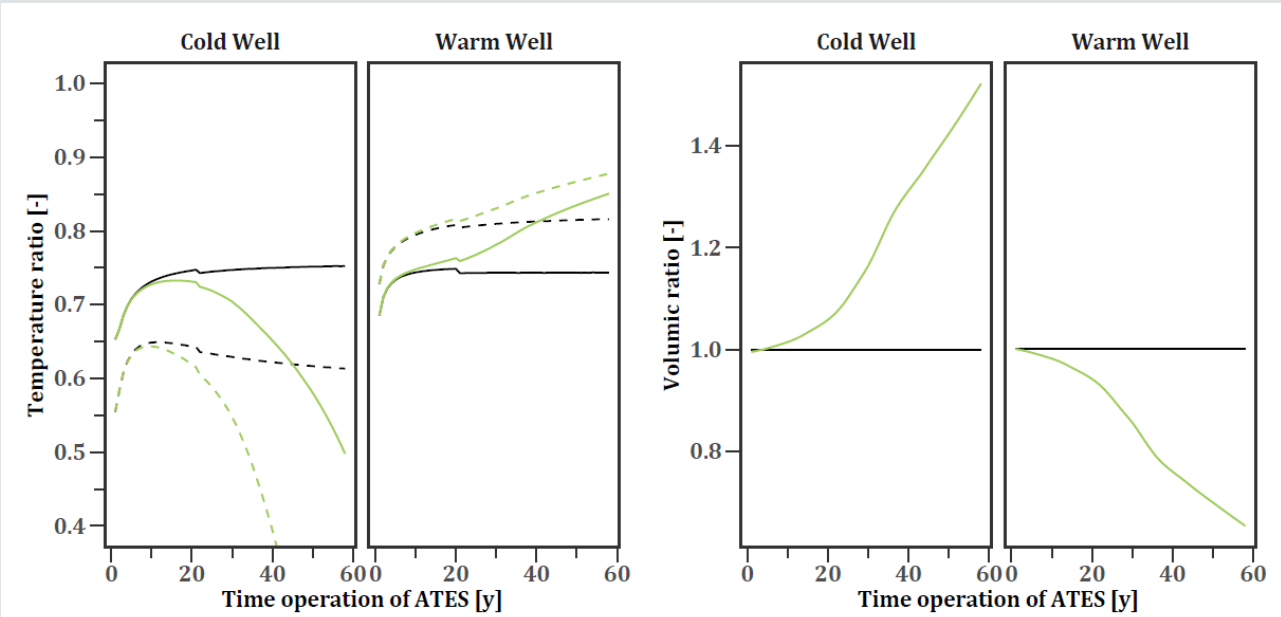
Influence marquée de l'anthropisation et du climat passé



3. Impact sur la performance d'un ATES

- a. Définition performance ATES
- b. Modélisation numérique d'un site
- c. **Résultats**

Ratio de T°



Ratio de V

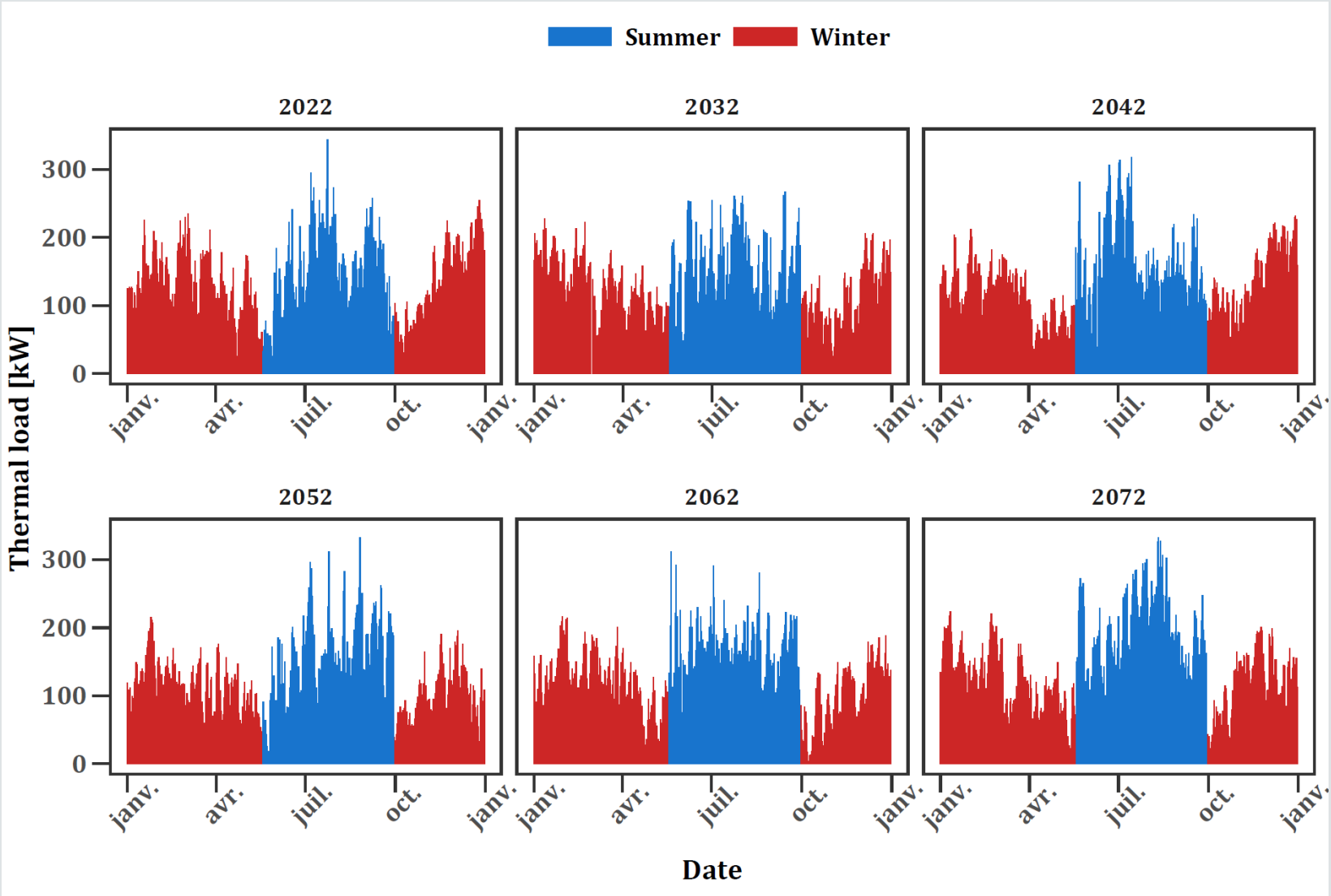
Performance de stockage

Surface Anthropisation Climat Scenario
— No — Base
- - - Yes — RCP 8.5

Merci !

Des questions ?

Evolution demande thermique (RCP 8.5)



Evolution puissance et volume pompé (RCP 8.5)

