

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**

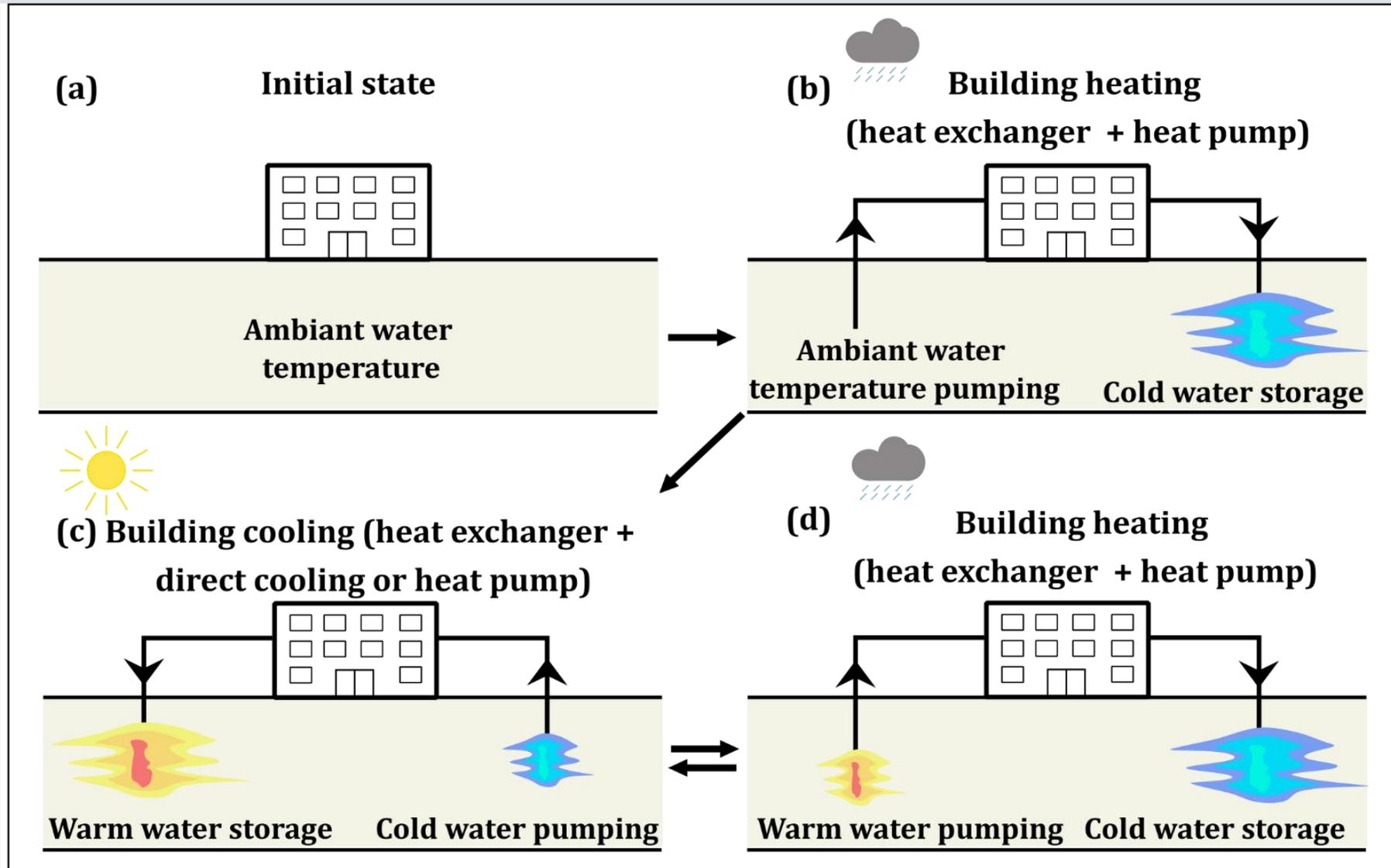
1) Description générale ATES

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

1. Description générale ATES

a) Principe de fonctionnement

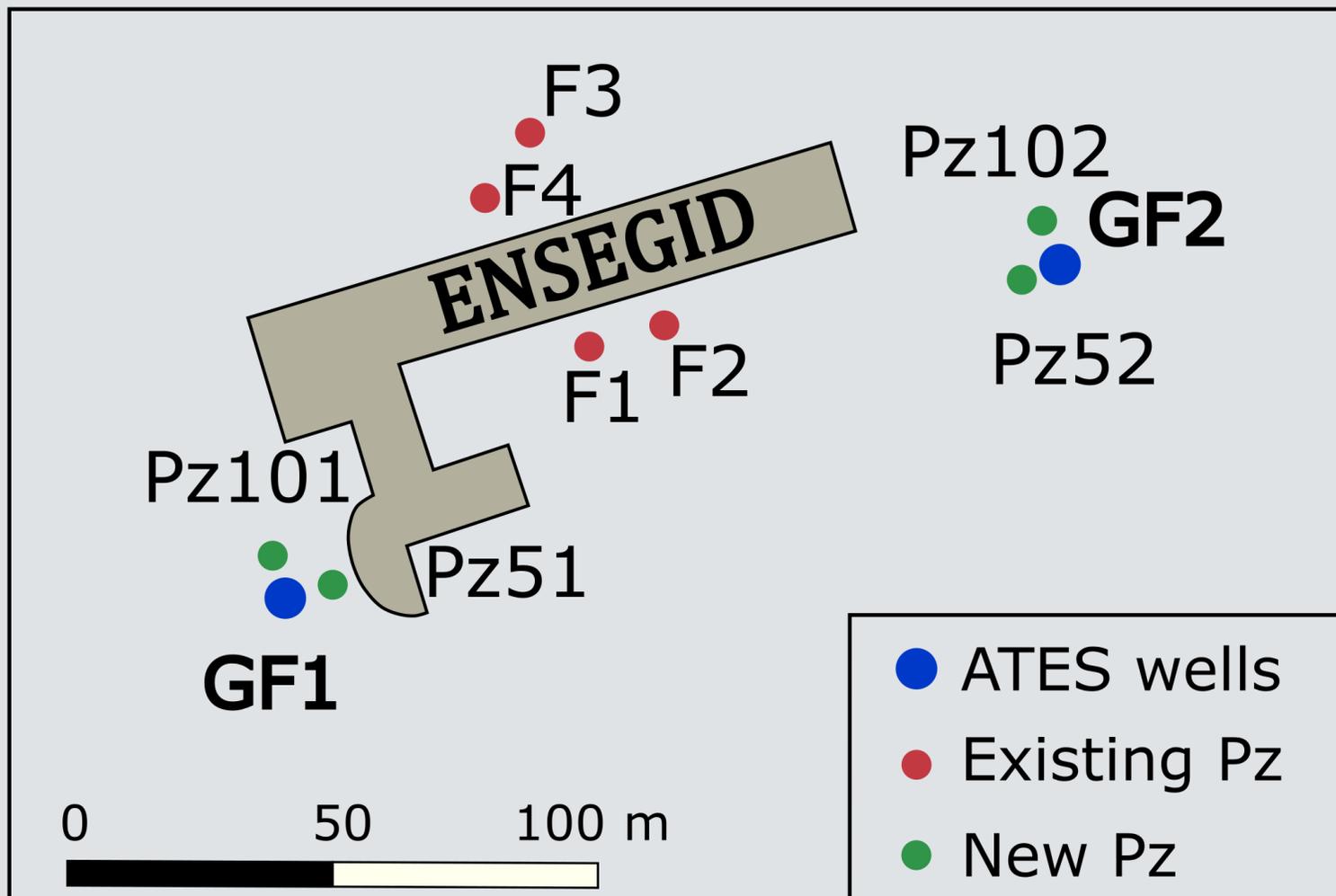
b) Site de l'ENSEGID



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

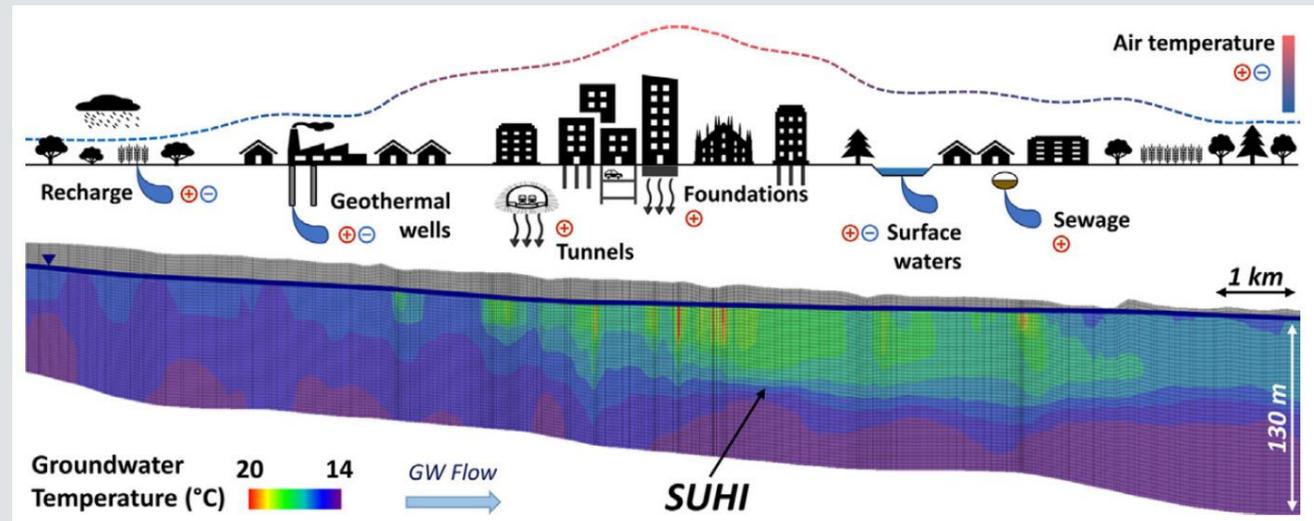
- a) Constat extrait de la littérature
- b) Exemple concret de l'ENSEGID
- c) Formulation analytique

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'Ilots de Chaleur Sub-Urbain**

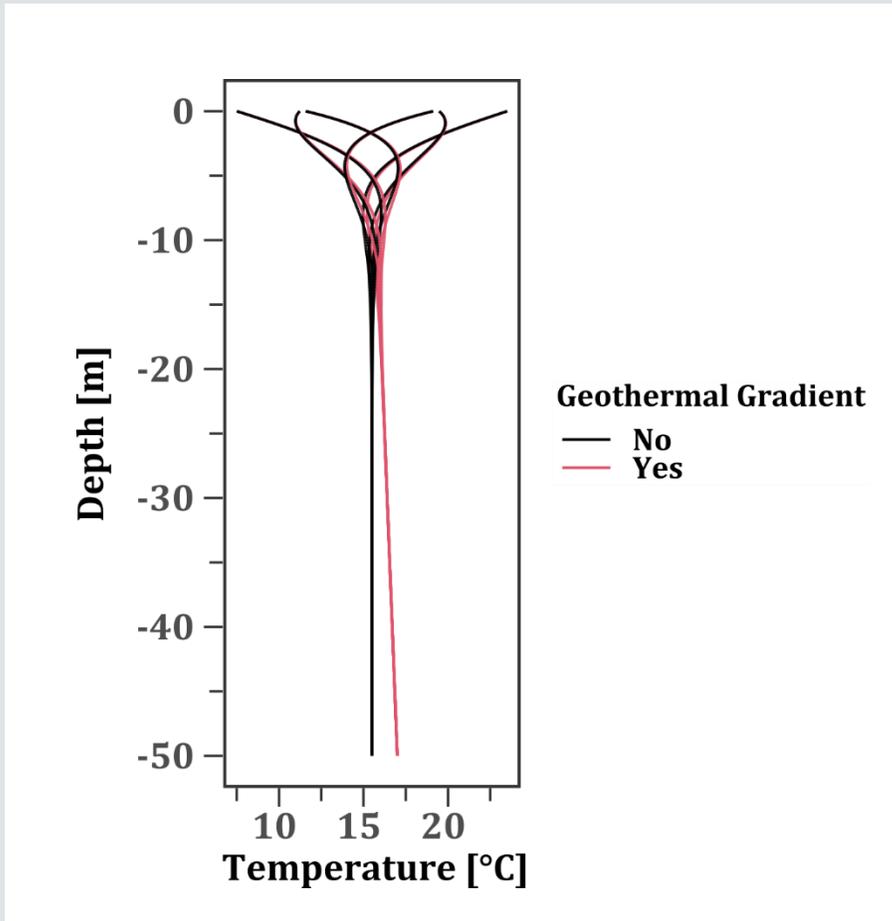


Modélisation numérique de la distribution de température dans le sous sol de Milan (*Previati et al, 2021*)

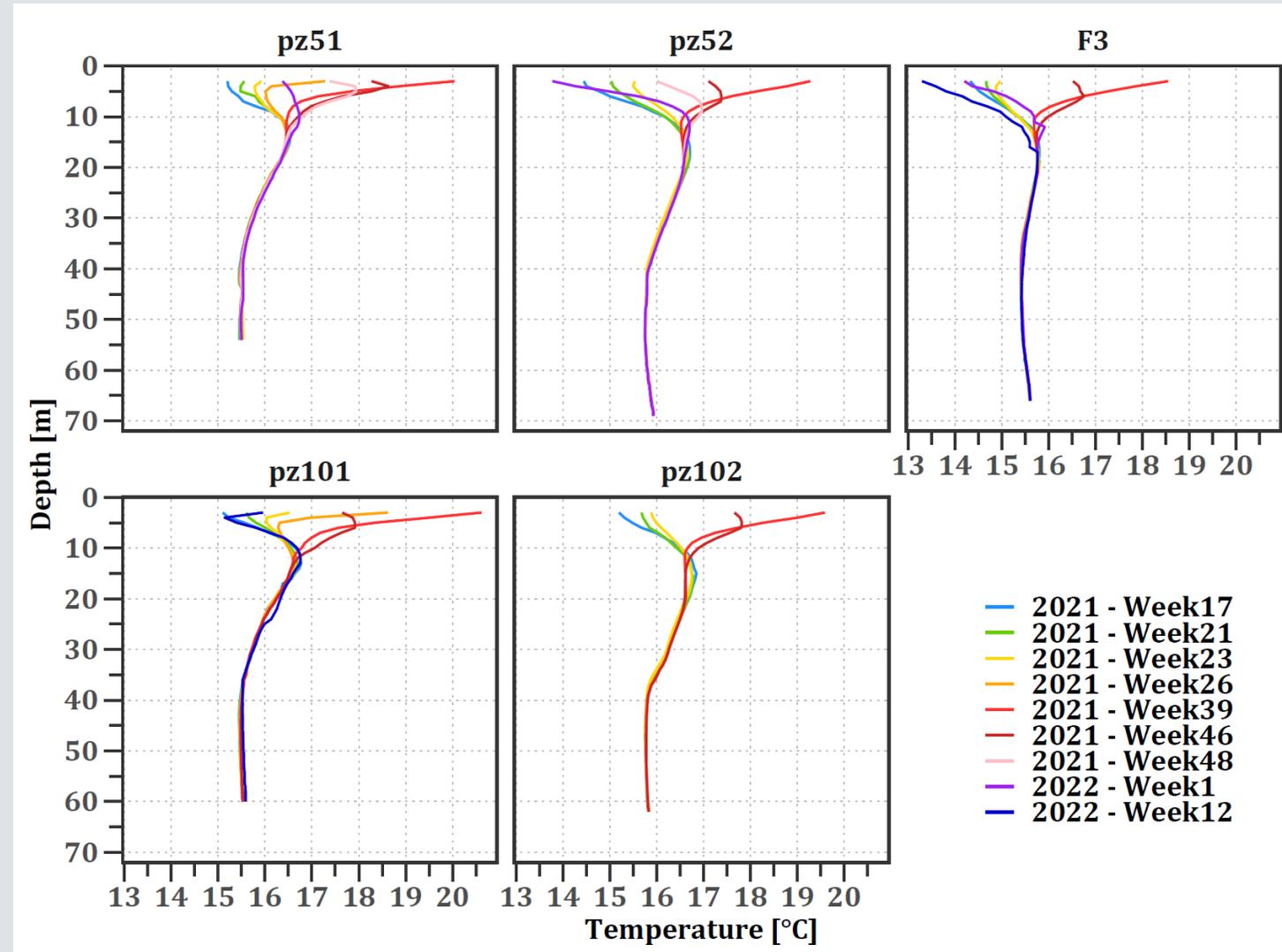
2. Influence de l'anthropisation de la surface et du climat sur la distribution de température dans le sous sol

- 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**

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

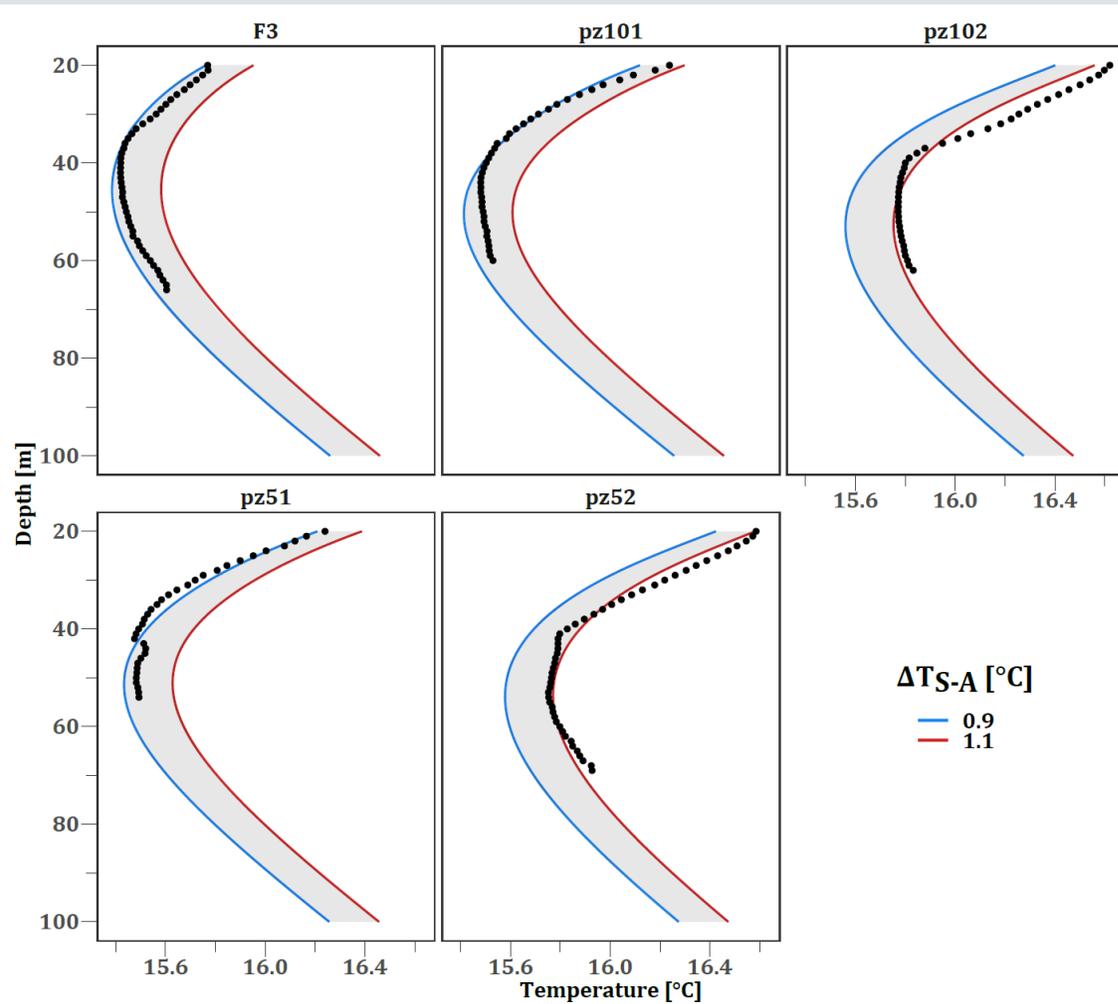
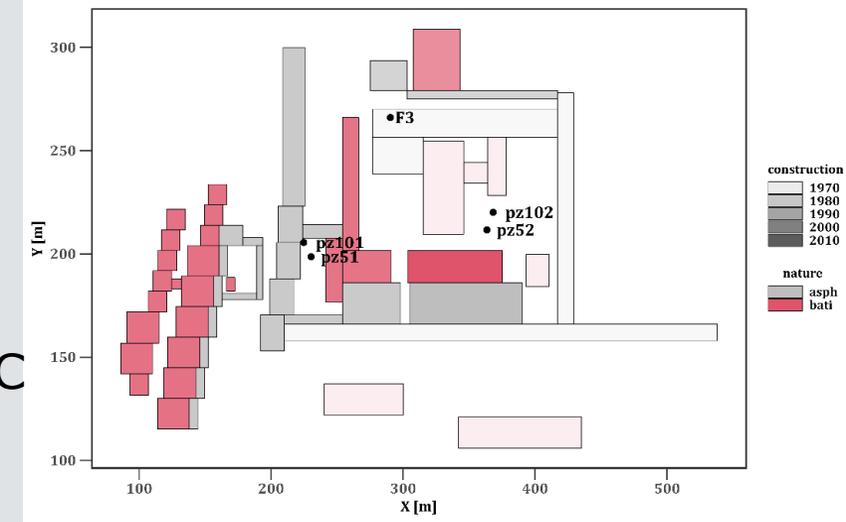
$$\vartheta_{tb}(z, t) = \frac{z}{2\sqrt{\pi a}} \int_0^t \frac{\varphi(\tau)}{(t - \tau)^{3/2}} \exp \left[-\frac{z^2}{4a(t - \tau)} \right] d\tau$$

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

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

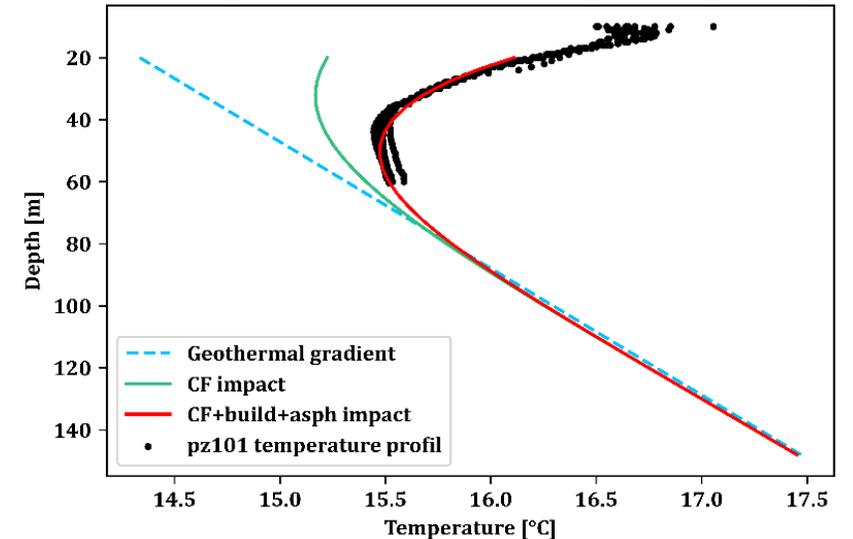
- a. Constat
- b. Cas concret à l'ENSEGID
- c. Formulation analytique

- 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

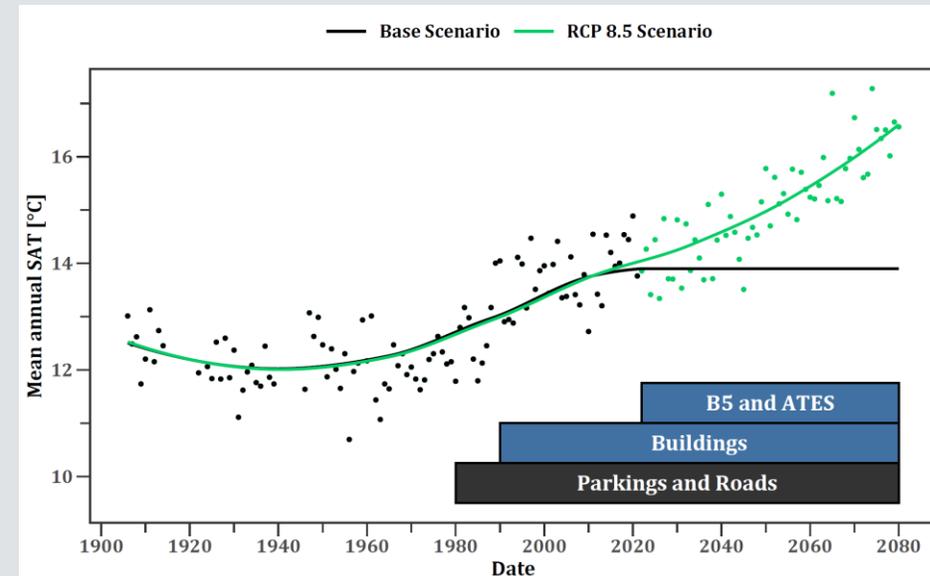
- Incapacité des solutions analytiques à modéliser le fonctionnement d'un ATES en mode transitoire

- **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**

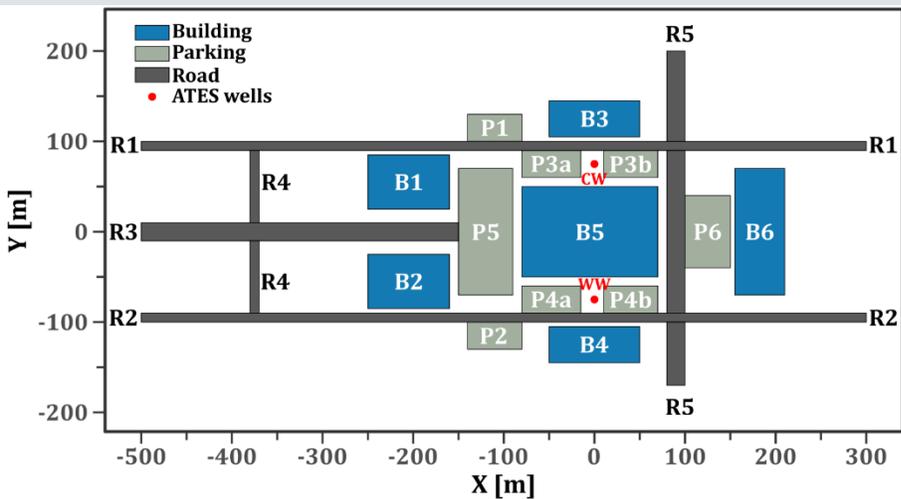
- Prise en compte de **l'historique de l'anthropisation** d'un site théorique

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

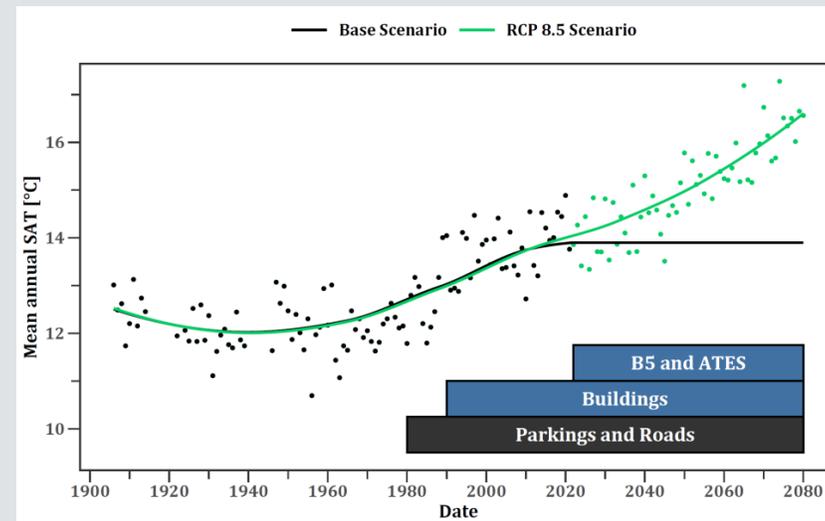


3. Impact sur la performance d'un ATES

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



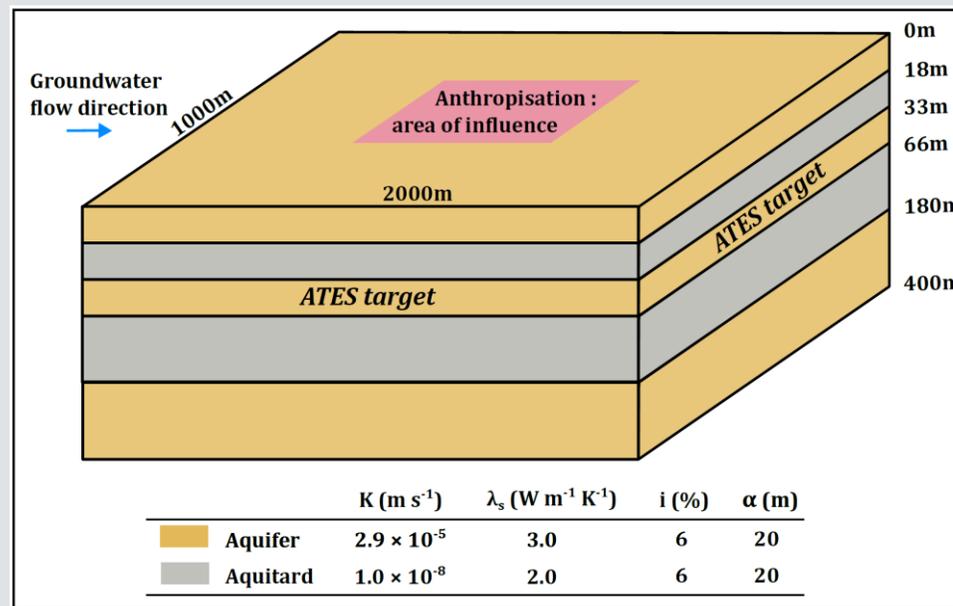
Conditions limites thermiques en surface



Configuration du site théorique en surface



Extension et propriétés du modèle numérique



Scénarios climatiques et historique anthropisation



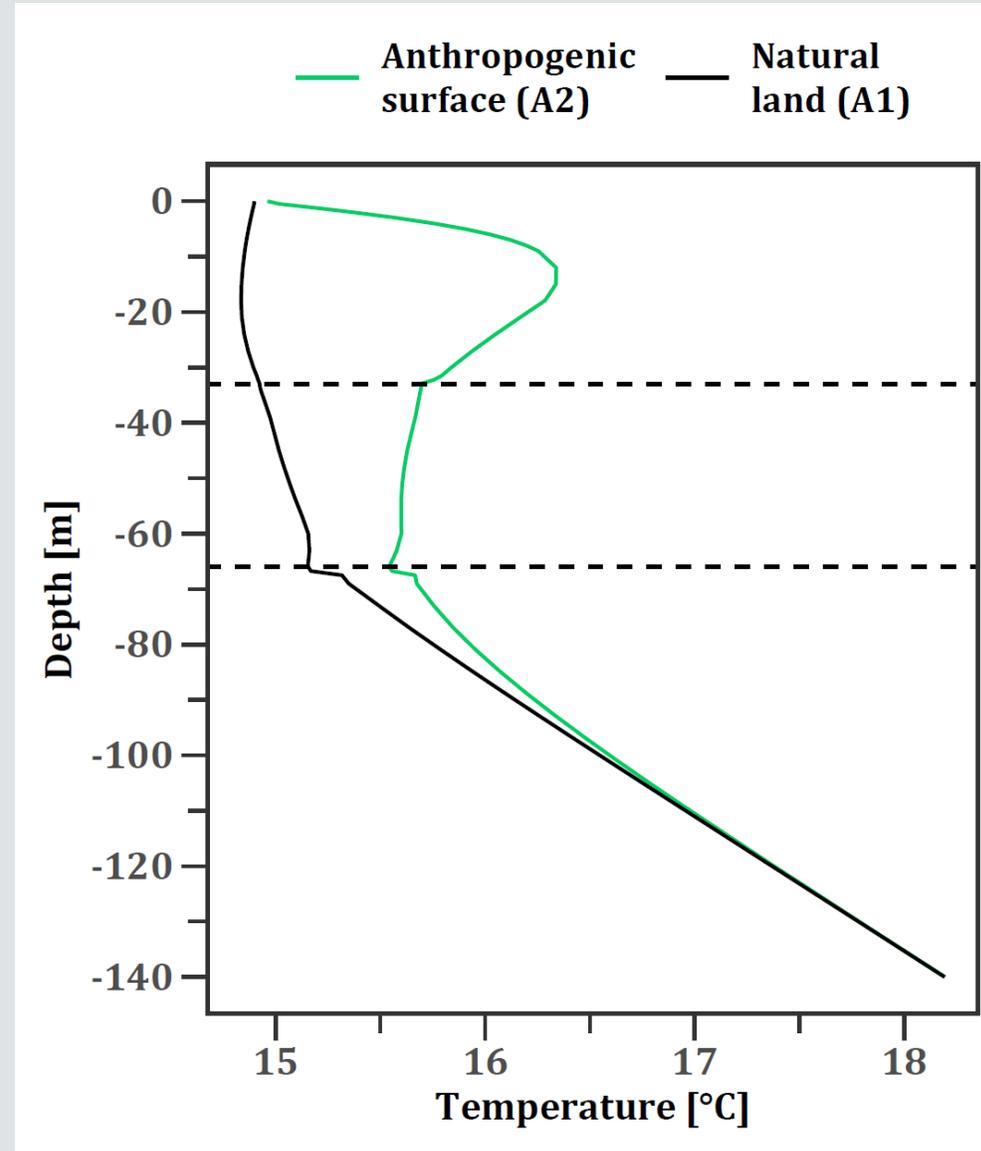
Profondeur de l'aquifère exploité : **33-66m**

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)

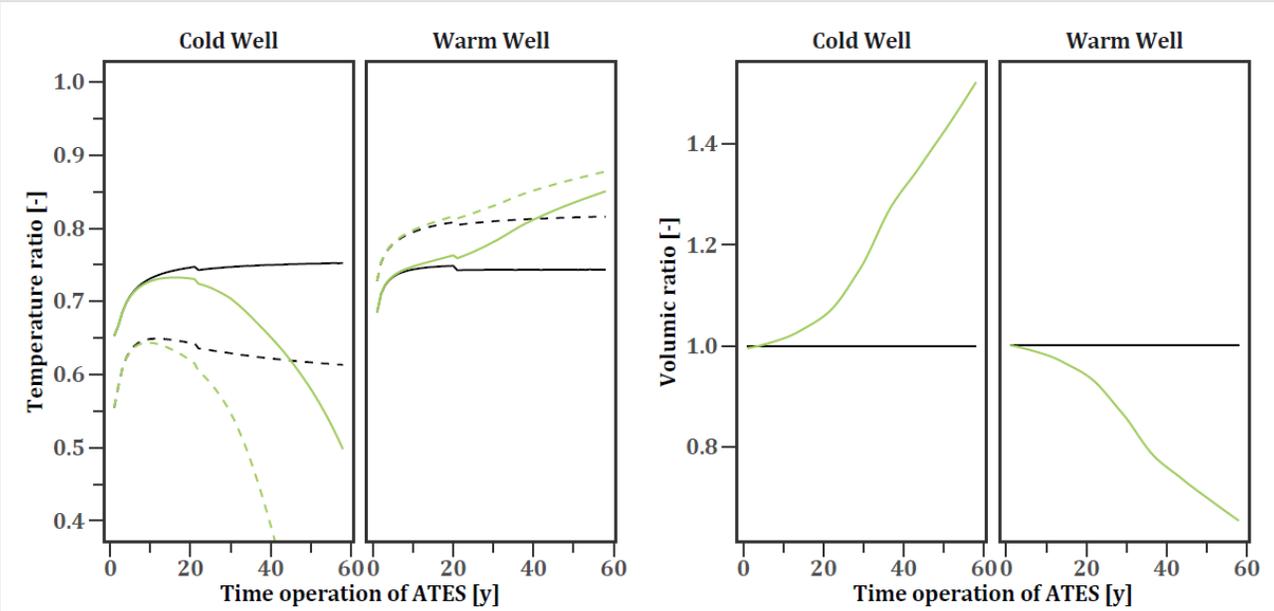
Influence marquée de l'anthropisation et du climat passé



3. Impact sur la performance d'un ATES

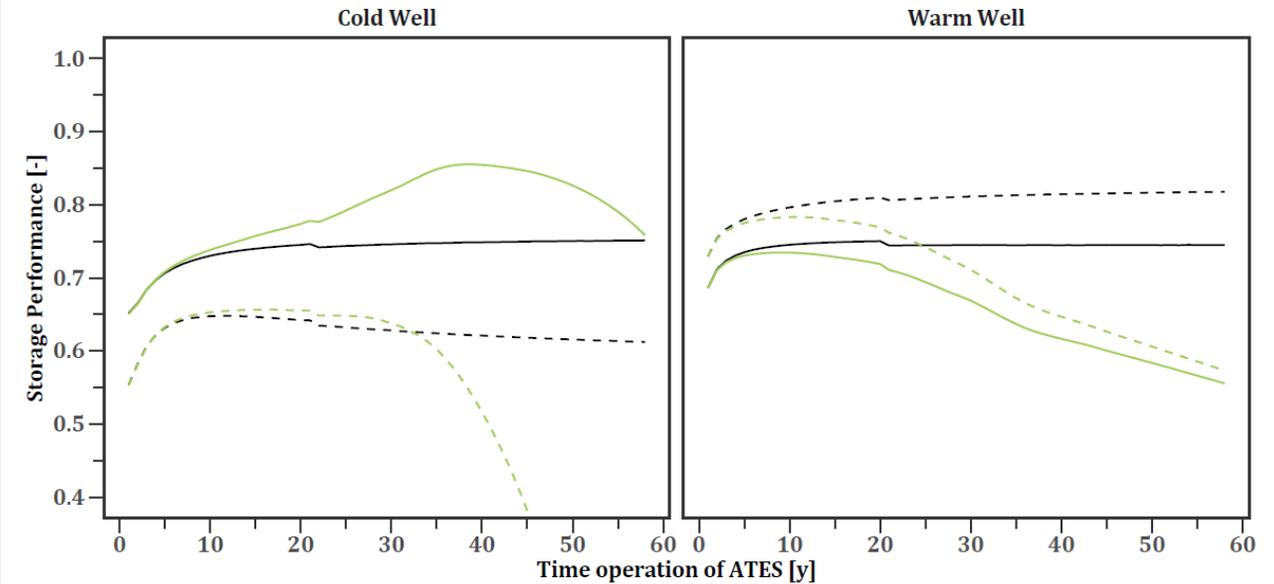
- a. Définition performance ATES
- b. Modélisation numérique d'un site
- c. **Résultats**

Ratio de T°



Ratio de V

Performance de stockage

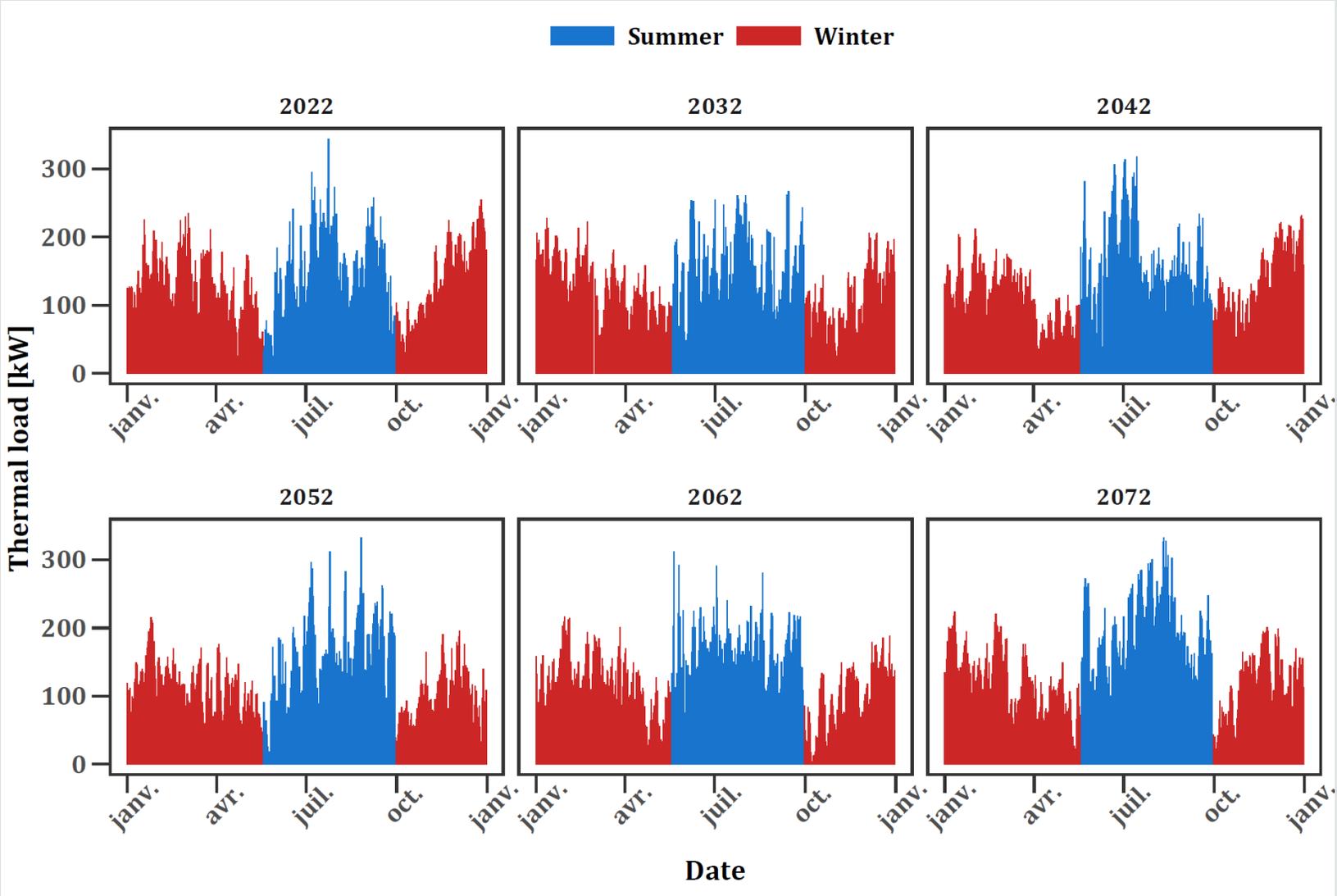


Surface Anthropisation: — No, - - - Yes
Climat Scenario: — Base, — RCP 8.5

Merci !

Des questions ?

Evolution demande thermique (RCP 8.5)



Evolution puissance et volume pompé (RCP 8.5)

