

Thermomécanique des roches

Le 20 octobre 2016, CNAM, Paris

Les géostructures énergétiques

Sébastien Burlon, IFSTTAR

Julien Habert, Cerema



IFSTTAR

La géothermie (très) basse température

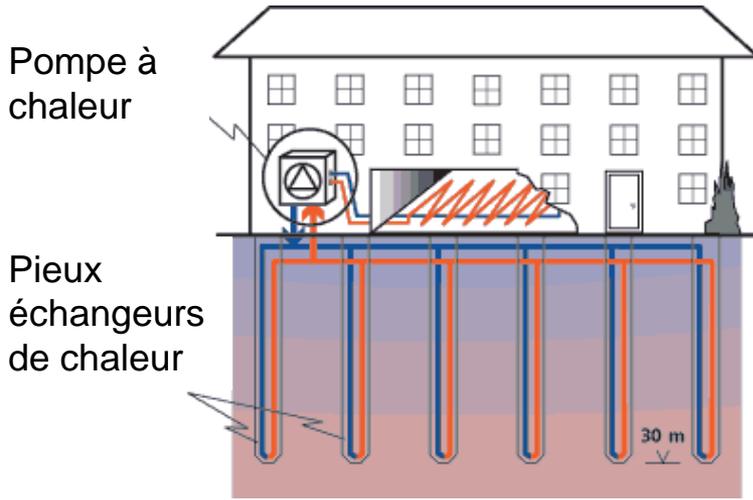
Pompage sur nappe



Sondes géothermiques



Géostructures énergétiques



COP \approx 3 à 4

Pieux

Parois moulées

Tunnels

Réduction des coûts à la mise en œuvre

Mise en œuvre des tubes échangeurs de chaleur



Exemple de structures énergétiques en France



Radier



Pieu



Maître d'Ouvrage : RATP



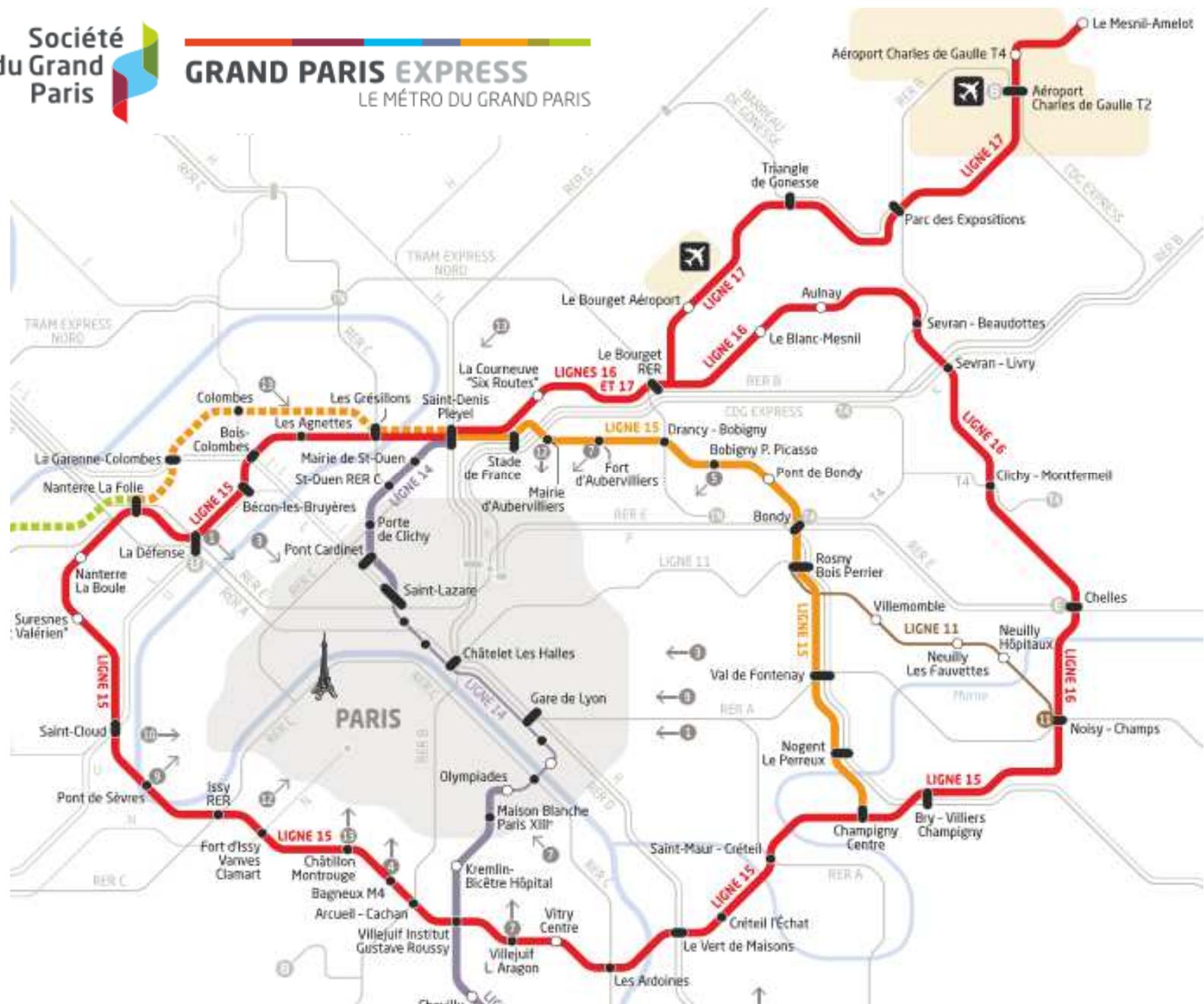
Paroi moulée

3 nouvelles stations de métro en construction au nord de Paris sur les lignes 14 et 12

Développements prochains portés par la SGP



GRAND PARIS EXPRESS
LE MÉTRO DU GRAND PARIS



Pourquoi réaliser des structures énergétiques ?

Contexte

- Augmentation de la demande de chauffage et de climatisation dans les villes
- Accroissement des énergies renouvelables
- Demande de villes auto-suffisantes sur le plan énergétique

Avantages de la géothermie

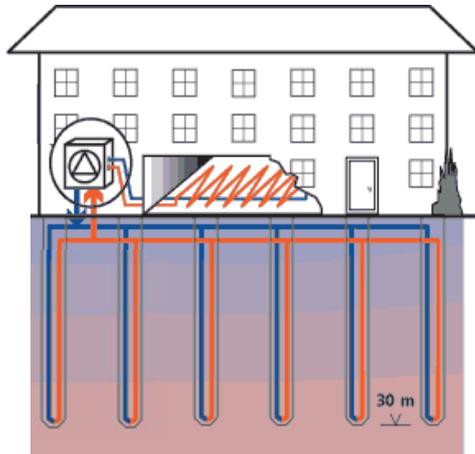
- Partout présente
- Pas de dépendance saisonnière
- Complémentaire avec les autres énergies renouvelables
- Pour les structures géothermiques, les coûts à la mise en oeuvre sont plus faibles

Deux enjeux : efficacité énergétique + dimensionnement mécanique

Les échanges thermiques

→ Différents types d'échanges et échelles de modélisation

1/ Interactions entre le bâtiment, la pompe à chaleur et le terrain



2/ Interactions entre le fluide caloporteur en mouvement, le tube PEHD, le béton, les armatures puis le terrain

$$Q_{total} = Q_{in} - Q_{out} = m_f \cdot c_f \cdot (T_{in} - T_{out})$$



3/ Interactions entre les pieux, le terrain encaissant et la nappe

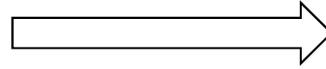
Les échanges thermiques

Conduction

et/ou

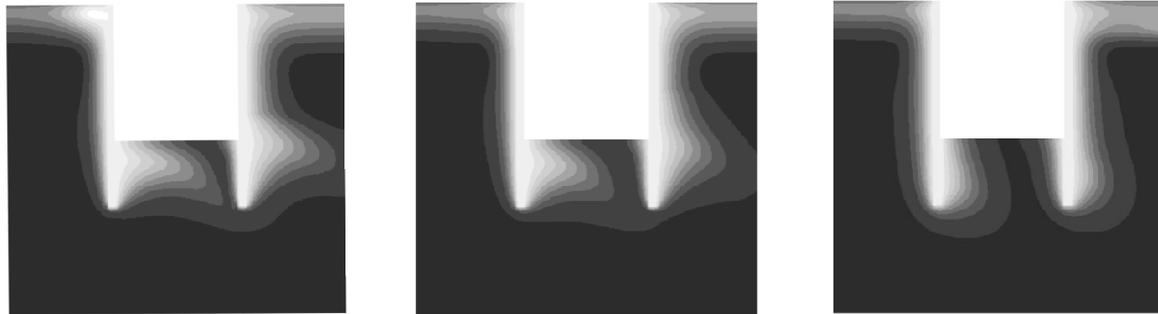
Advection

selon la vitesse de la nappe



**Optimiser les
dimensionnements
thermiques**

(10 à 60 W/m²)



Champs de températures autour de
parois moulées pour différentes
conditions d'écoulement

Les phénomènes de conduction et d'advection

Conduction de la chaleur

$$\overrightarrow{j}_{cond} = -\lambda \cdot \overrightarrow{grad} T$$

$$\overrightarrow{j}_{cond} : \text{W/m}^2 \quad \lambda : \text{W}/(\text{K} \cdot \text{m})$$

Advection de la chaleur

$$\overrightarrow{j}_{adv} = \rho_w \cdot c_w \cdot \overrightarrow{v}_w \cdot T$$

$$\overrightarrow{j}_{adv} : \text{W/m}^2 \quad \rho_w : \text{kg/m}^3 \quad c_w : \text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg}) \quad \overrightarrow{v}_w : \text{m/s}$$

Conservation de la quantité d'énergie par unité de volume et de temps : W/m^3

$$C_{sol} \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div} \overrightarrow{j}_{cond} + \text{div} \overrightarrow{j}_{adv} = 0 \quad C_{sol} : \text{J}/(\text{K} \cdot \text{m}^3)$$

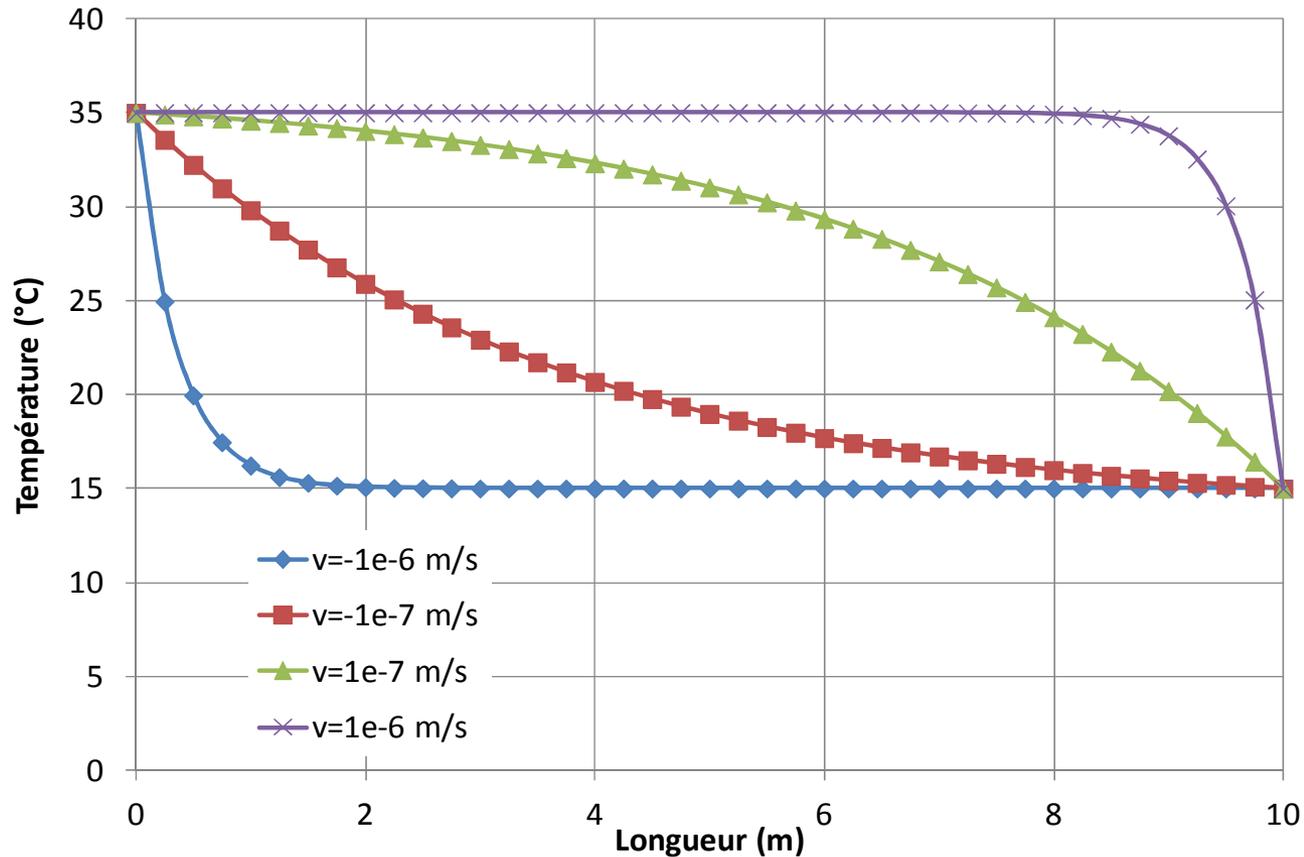
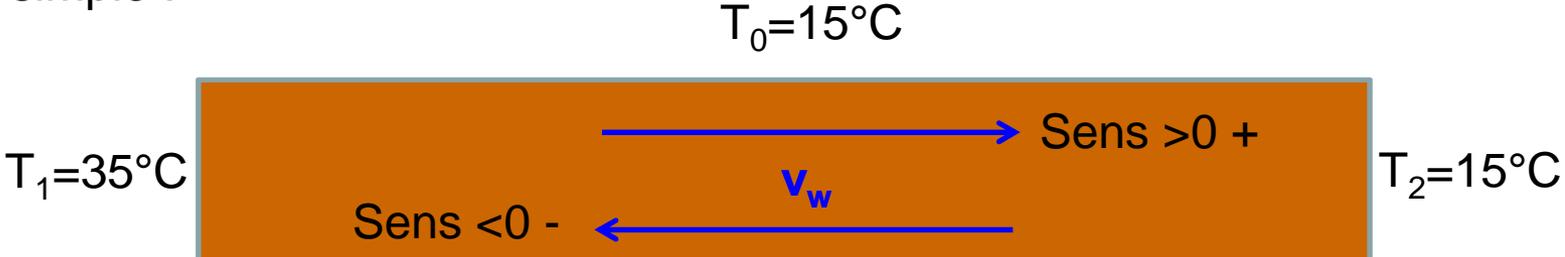
Le système géothermique est pérenne si la température dans le sol ne varie pas.

A l'échelle locale, les divergences des flux de conduction et d'advection doivent donc s'équilibrer.

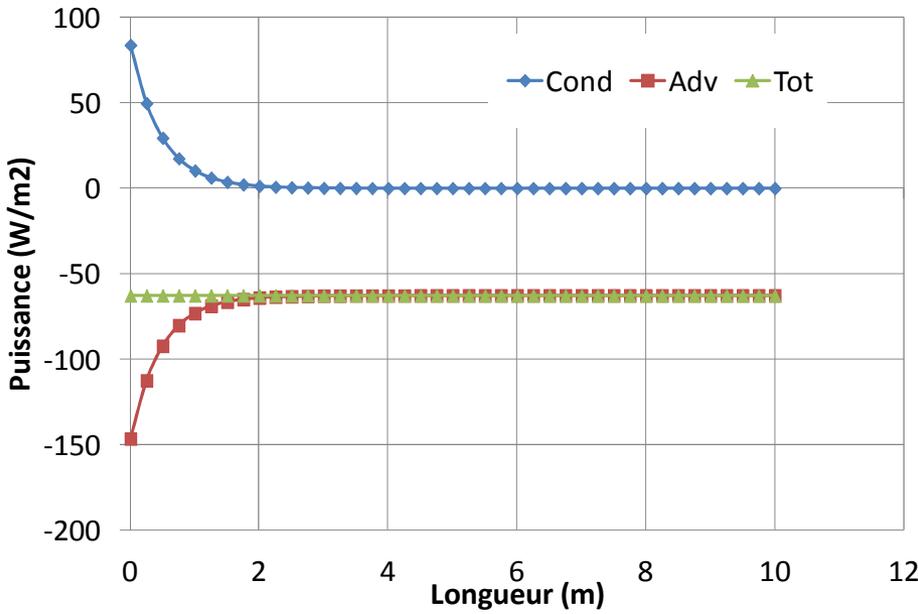
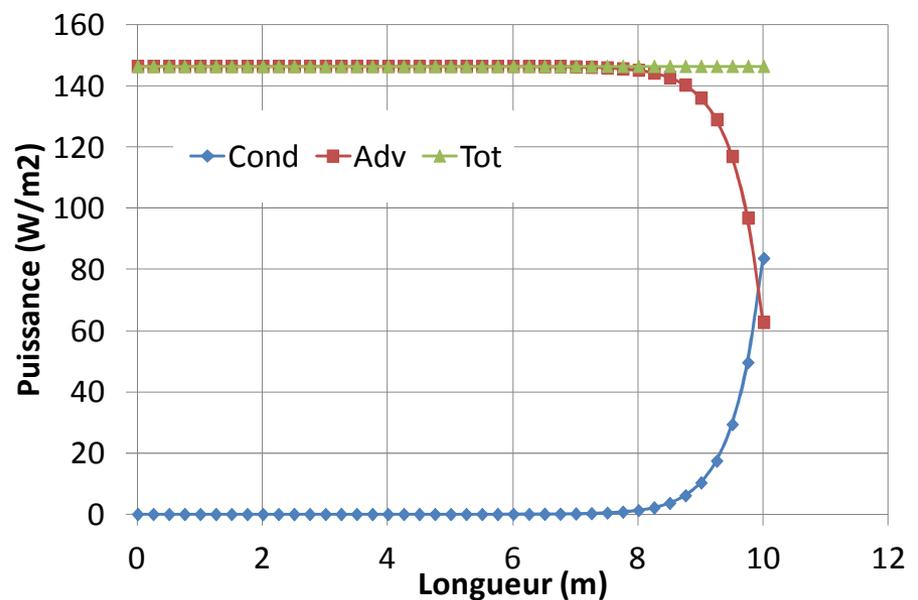
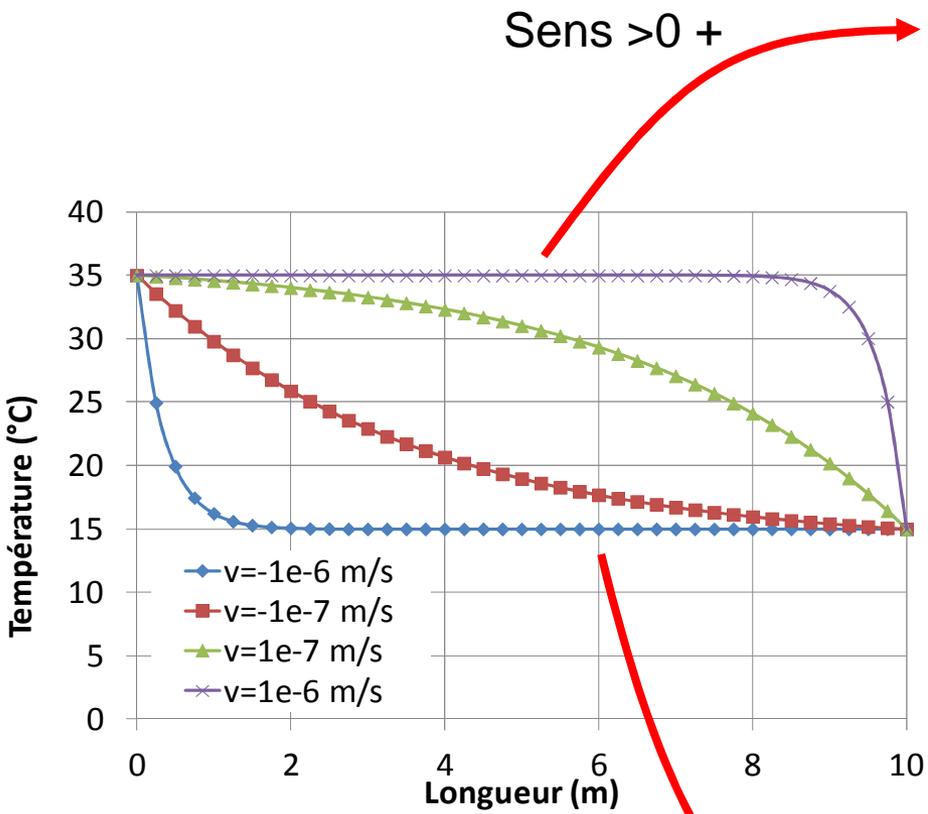
Si la divergence est négative alors la température augmente.

Les phénomènes de conduction et d'advection

Exemple simple :

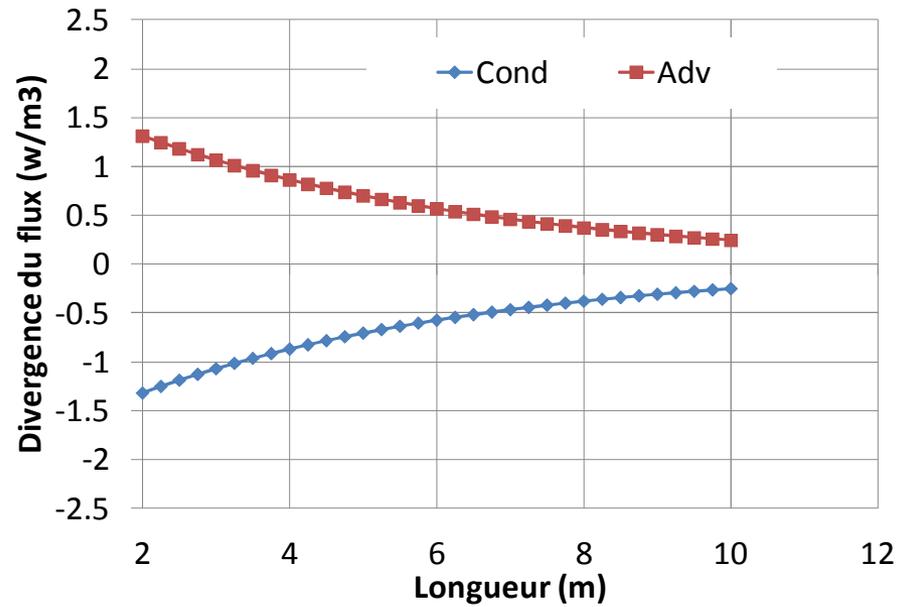
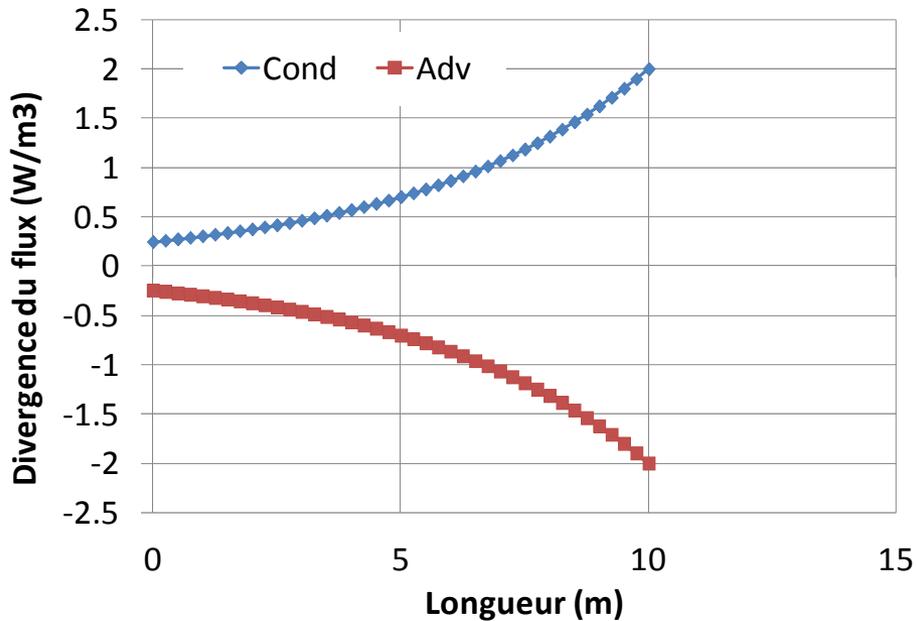
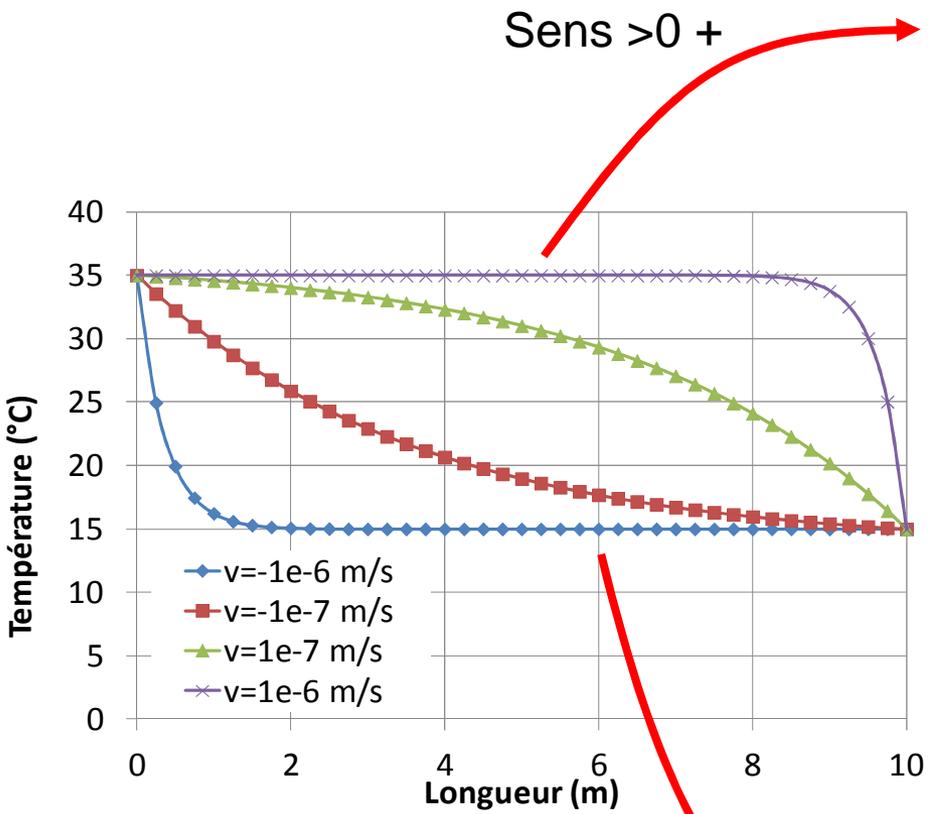


Les phénomènes de conduction et d'advection



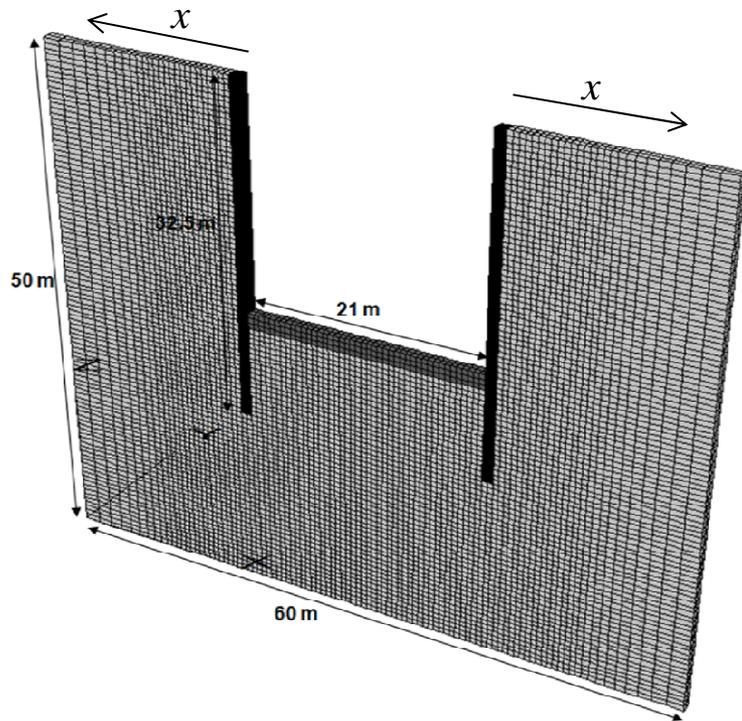
→ La puissance transmise n'est pas forcément un bon indicateur.

Les phénomènes de conduction et d'advection



→ L'analyse des divergences est plus prometteuse, des travaux sont en cours...

Autre approche du calcul des puissances



$$P(x,t) = \frac{P_c(x,t)}{L_c} + P_v(x,t) \quad \text{à différents niveaux}$$

$$P_c(x,t) = \frac{\Delta T(x,t)}{R_{eq}} = \frac{T_s(x,t) - T_{es}}{R_s + R_{es}}$$

par conduction

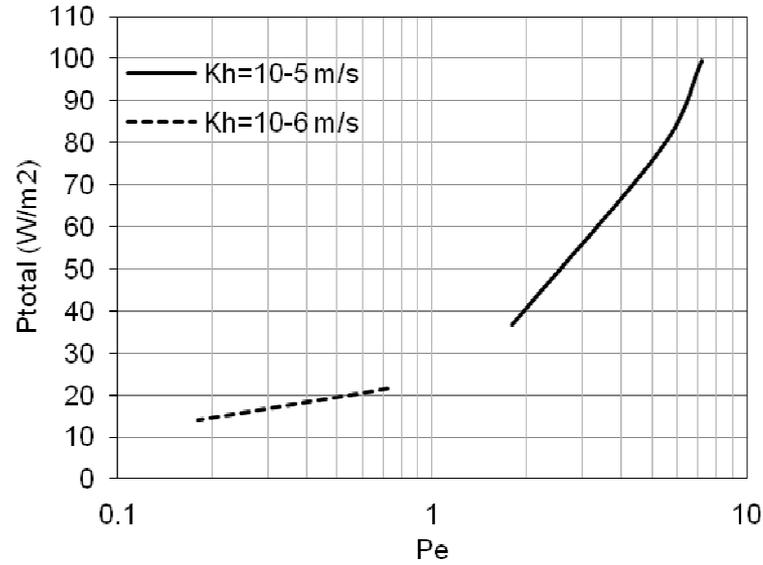
$$P_v(x,t) = v \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_s(x,t) - T_{es})$$

par advection

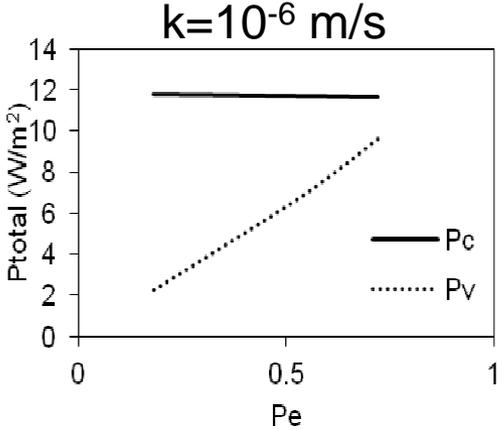
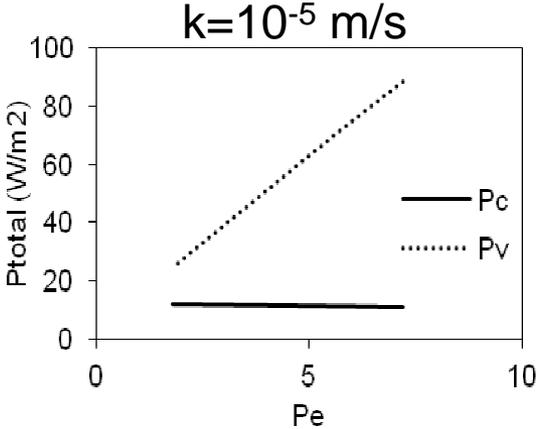
$$P_{total} = \bar{P}(x,t)$$

$\bar{P}(x,t)$ est la moyenne échangée par la paroi durant une certaine période.

Effet de la nappe



La puissance totale augmente avec la vitesse de l'écoulement dans des gammes mesurables sur site.



La part de la puissance échangée par advection est prépondérante et doit être prise en compte avec un certain niveau de risque dans les projets.

Le comportement mécanique

Coefficient de dilatation thermique du béton : $\alpha_T = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

Pour un pieu de longueur $L = 20 \text{ m}$ et une variation de température $\Delta T = 15^\circ$

→ 1.8 mm à chaque extrémité du pieu

$\Delta T = -15^\circ\text{C}$



$\Delta T = +15^\circ\text{C}$

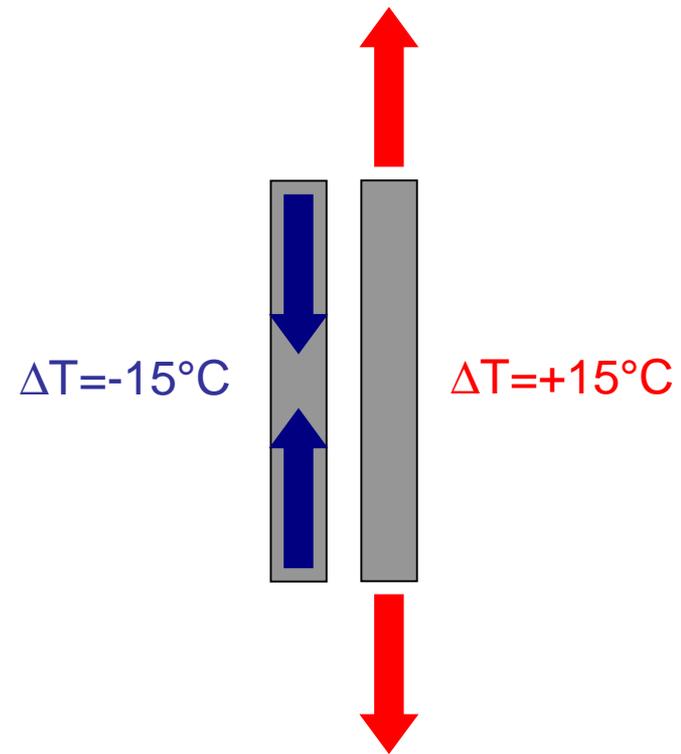


Le comportement mécanique

Coefficient de dilatation thermique du béton : $\alpha_T = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

Pour un pieu de longueur $L = 20 \text{ m}$ et une variation de température $\Delta T = 15^\circ$

→ 1.8 mm à chaque extrémité du pieu



1/ Déplacements des structures portées – soulèvements-tassements → OUI

2/ Efforts parasites dans le pieu par dilatation et contraction empêchées – vérification structurelle → OUI

3/ Dégradation mécanique des sols sous l'effet du chargement cyclique – vérification de la portance du pieu → OUI

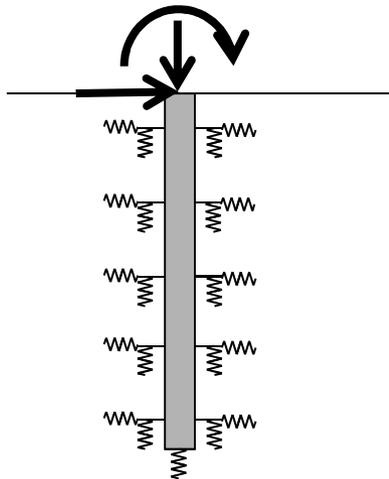
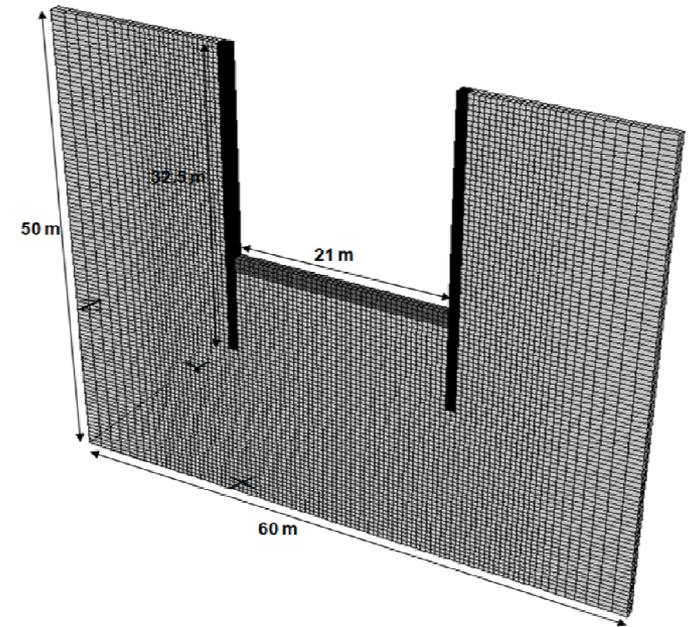
4/ Variation des propriétés mécaniques du sol et du béton avec la température → NON dans le béton, éventuellement dans les sols sensibles à l'eau

Thermo-mécanique

Plusieurs approches sont possibles pour rendre compte du comportement thermo-mécanique des géostructures énergétiques :

-Celles basées sur la mécanique des milieux continus : approche couplée ou non, en régime transitoire ou permanent ;

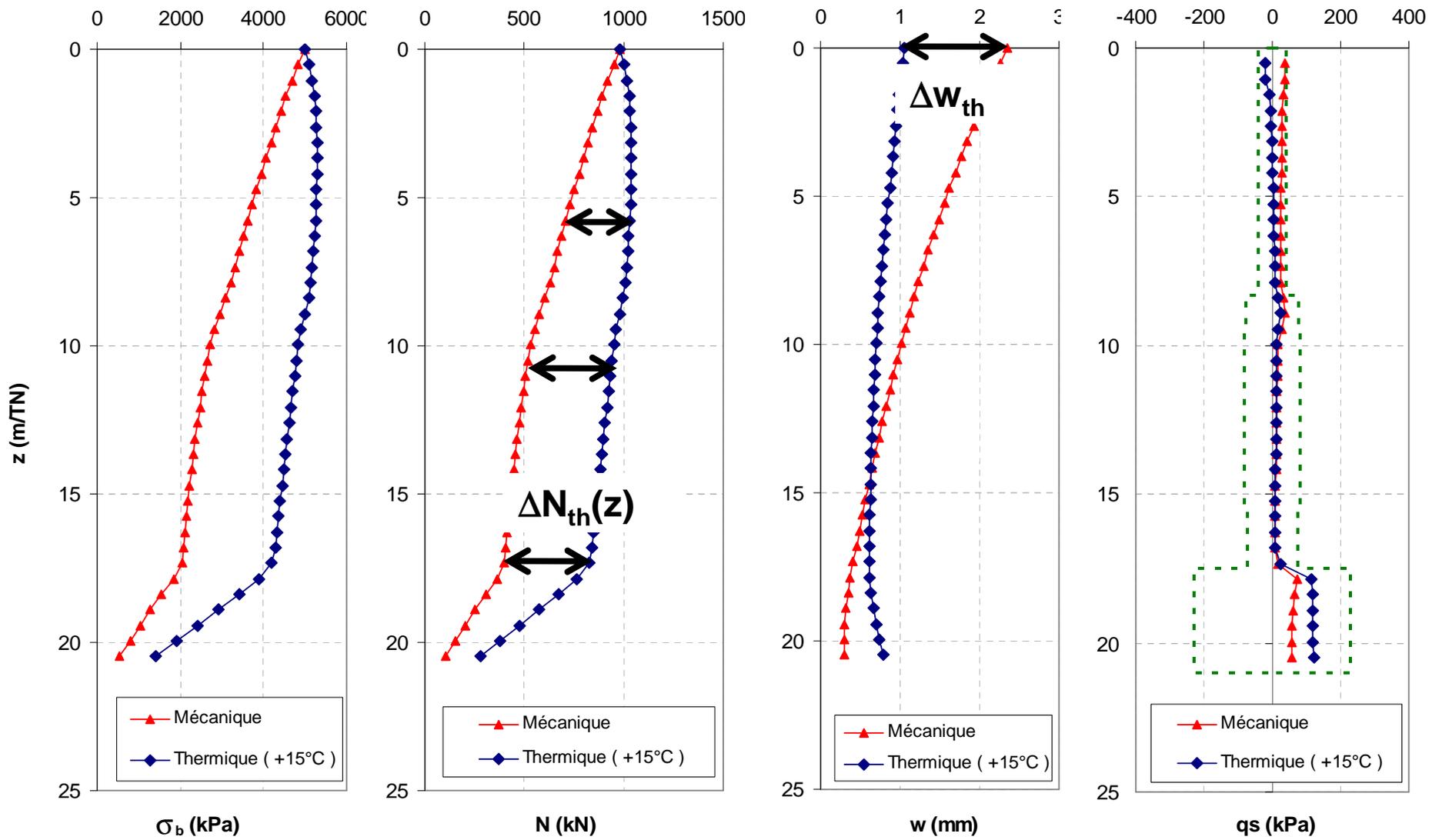
-Celles basées sur la notion de coefficient d'interaction locale



$$EA \frac{d^2 w}{dz^2} - \pi B \tau = 0 \quad \tau = f(w)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon^e = E(\varepsilon - \varepsilon^{th}) = E(\varepsilon - \alpha \Delta T)$$

Exemple : injection d'un fluide chaud – libre en tête



$$\Delta R_{mob} = R_{mob;th} - R_{mob;mec}$$

→ Prise en compte de ces différentes grandeurs selon les différents états limites

Conclusions et perspectives

Le besoin de développer les géostructures énergétiques oblige à considérer le comportement thermo-mécanique des fondations et même thermo-hydro-mécanique avec les effets de la conduction et de l'advection.

Des méthodes pratiques ont été développées pour procéder aux études en cours.

Des développements sont en cours en France et partout en Europe :

- meilleure caractérisation des échanges thermiques ;
- interactions à l'échelle du quartier puis de la ville ;
- comportement singulier de certains sols ;
- comportement d'ouvrages types (station de métro, groupes de pieux, tunnels, etc.).

Merci de votre attention

IFSTTAR

Cité Descartes

Boulevard Newton

77420 Champs-sur-Marne

Tél. +33 (0)1 40 43 50 00

Fax. +33 (0)1 40 43 54 98

www.ifsttar.fr

communication@ifsttar.fr



IFSTTAR