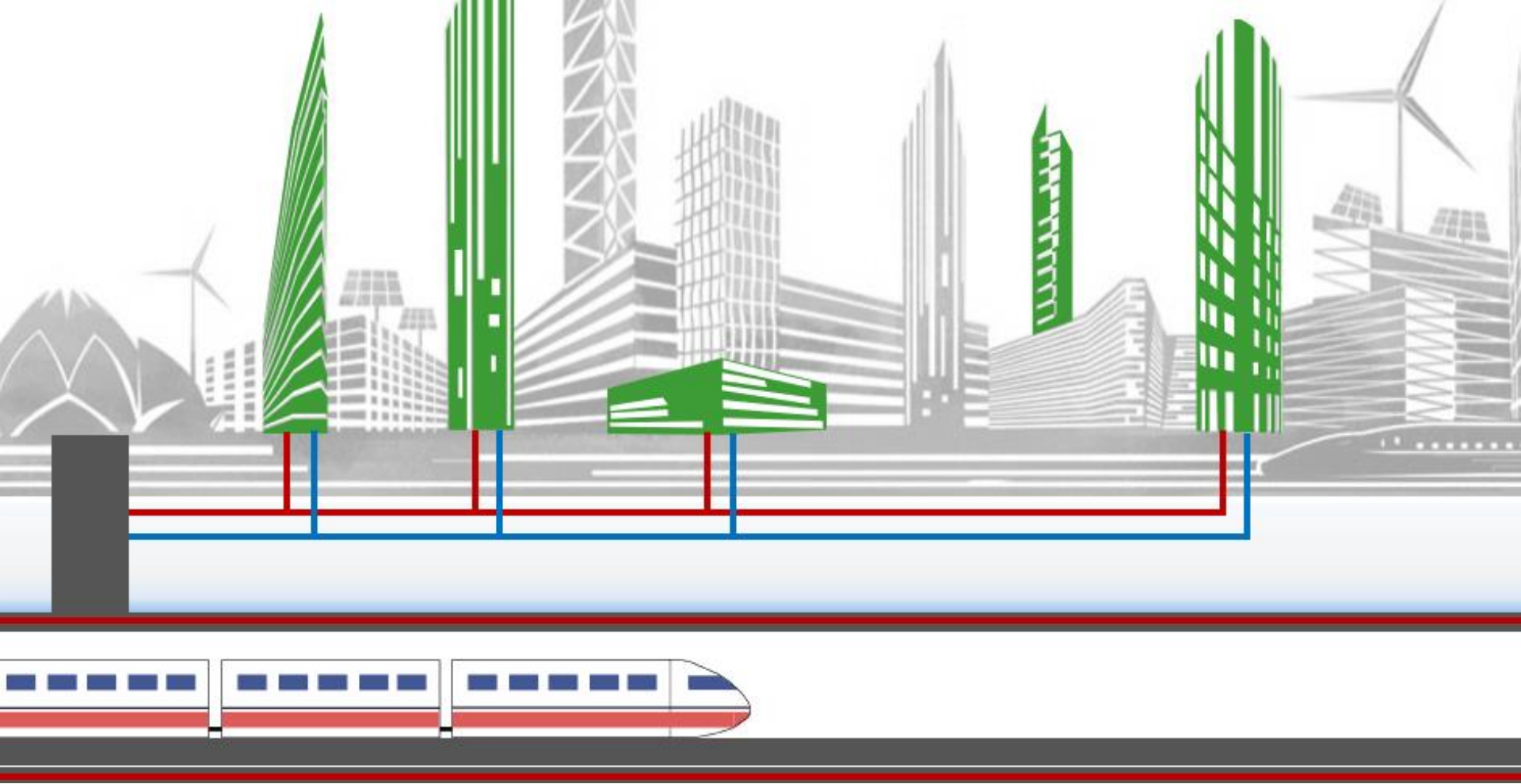




Tunnels énergétiques

Opportunités, enjeux et perspectives

Alessandra Insana

Department of Structural, Geotechnical and Building Engineering | Politecnico di Torino
Laboratoire Navier | ENPC/UGE/CNRS

Marco Barla

Department of Structural, Geotechnical and Building Engineering | Politecnico di Torino

Jean Sulem

Laboratoire Navier | ENPC/UGE/CNRS



POLITECNICO
DI TORINO



Index

- **Tunnels énergétiques**
- **Etude expérimentale**
- **Modélisation numérique**
- **Perspectives**



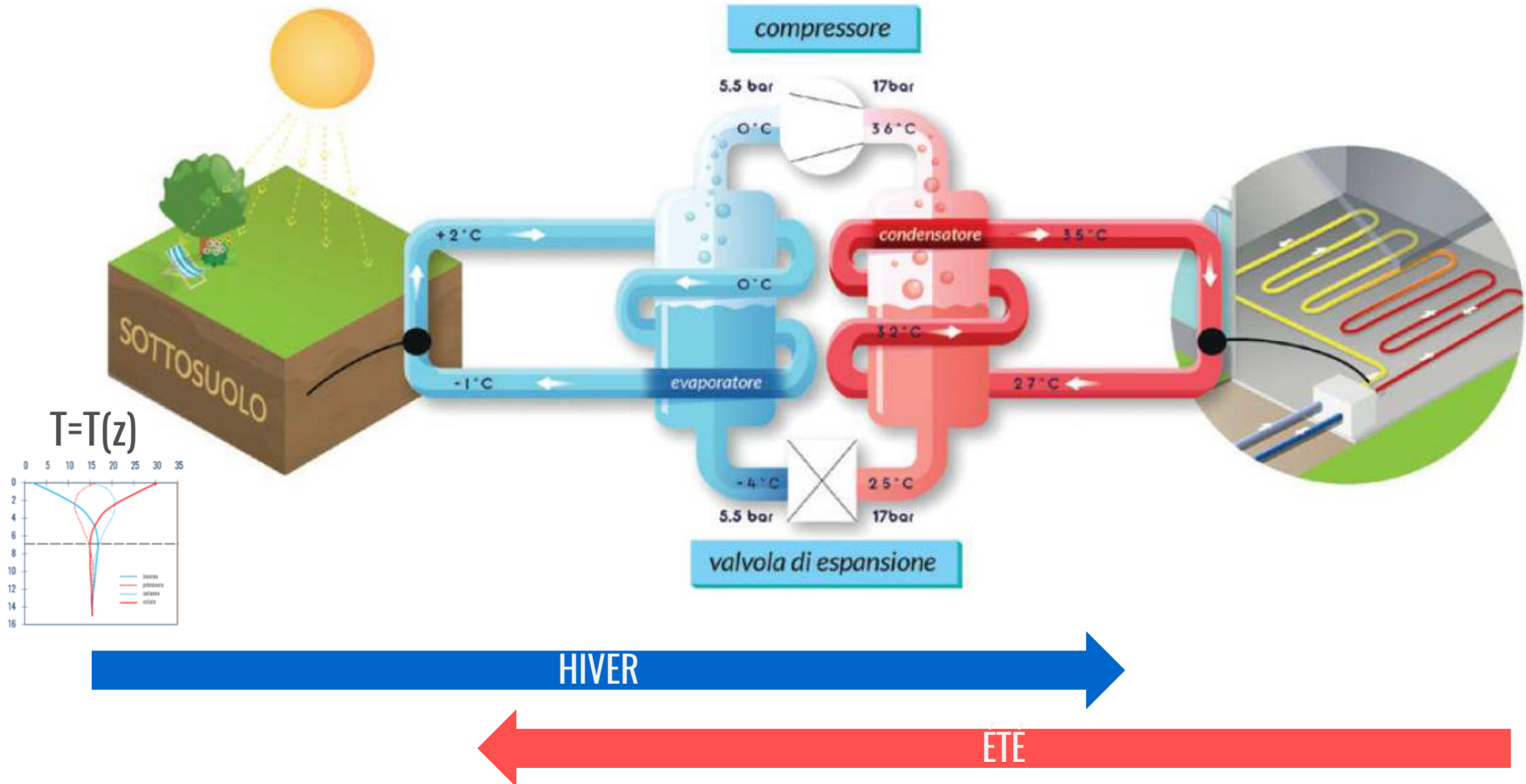
Géostructures énergétiques

Principe

Source
CIRCUIT PRIMAIRE

Pompe à chaleur

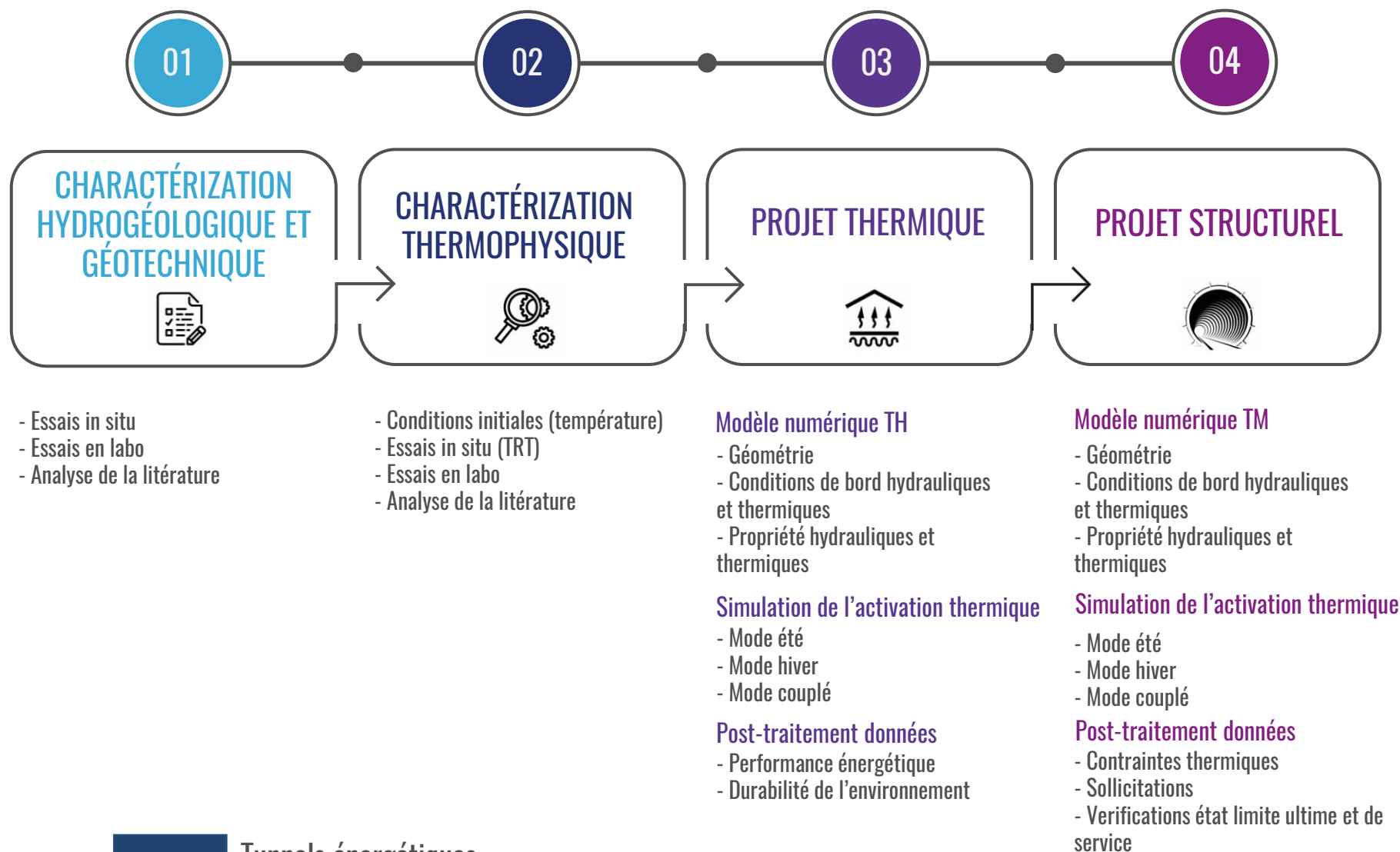
Système de distribution
CIRCUIT SECONDAIRE



Tunnels énergétiques

Méthodologie

Les étapes à suivre dans le projet des tunnels énergétiques



Enertun

Un nouveau revêtement avec voussoirs énergétiques

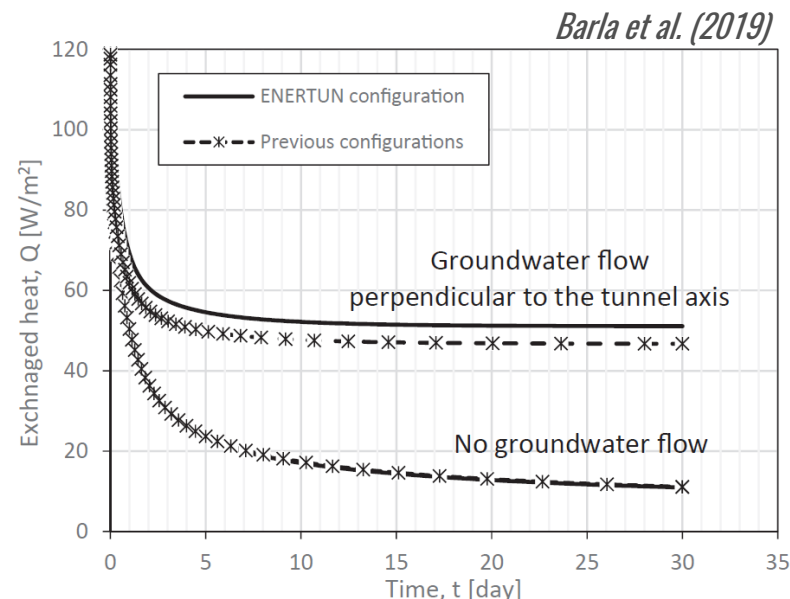
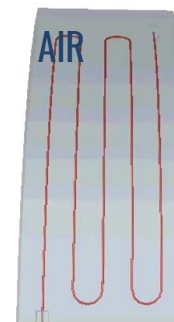
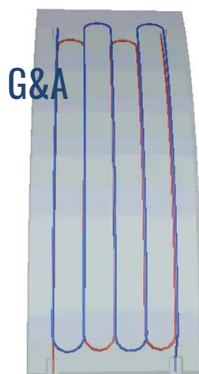
Disposition optimisée du circuit géothermique

- + Chutes de pression réduites de 20-30%
- + Plus grande efficacité énergétique lorsque l'écoulement de la nappe est perpendiculaire à l'axe du tunnel
- + 3 configurations possibles



Barla & Di Donna (2016)

Numéro de brevet: 102016000020821



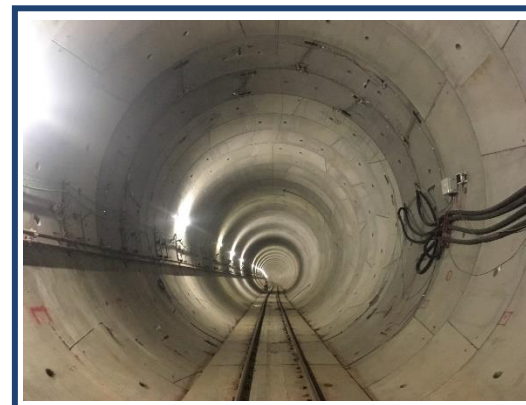
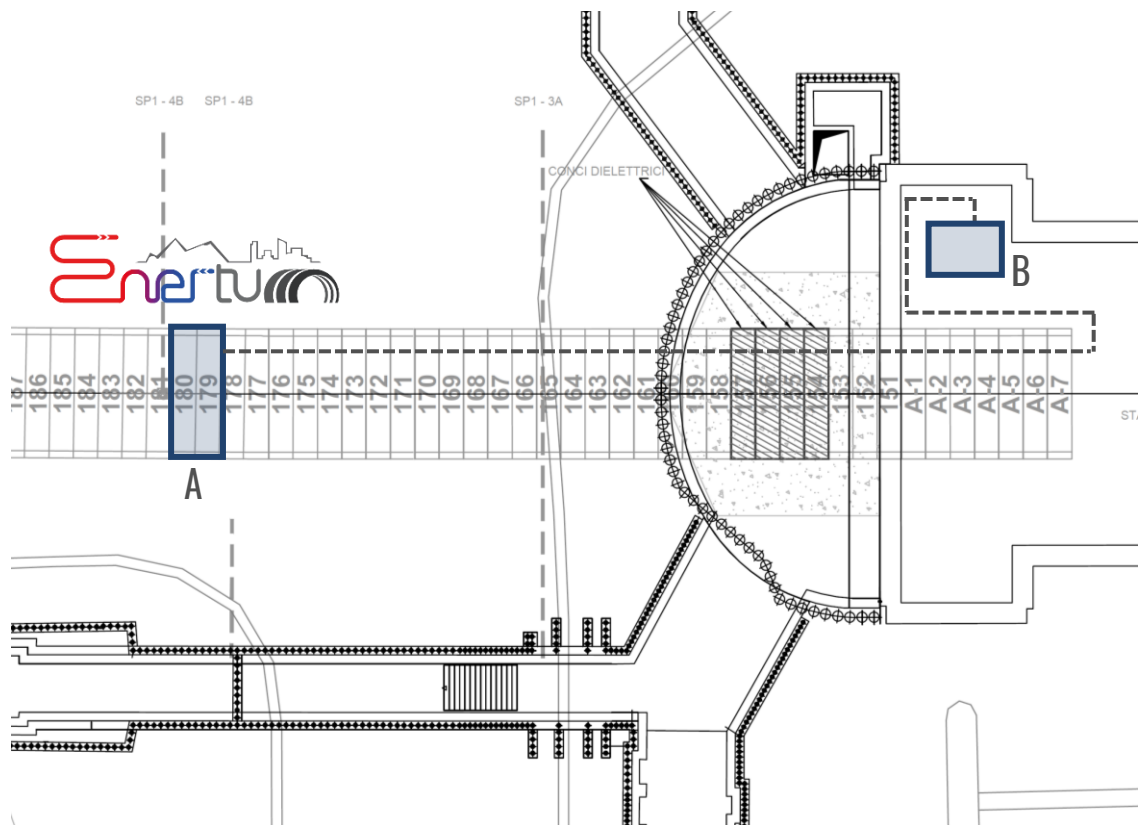
Tunnels énergétiques

Site expérimental



Configuration du test

Deux anneaux énergétiques typologie “ENERTUN” ont été installés pour **tester les cycles de chauffage et refroidissement**. A partir des anneaux, les tuyaux géothermiques rejoignent la station Bengasi où se situent la pompe à chaleur, le système d’acquisition des données de surveillance et un ventilo-convecteur pour dissiper la chaleur.



A



B

Barla et al. (2019)

Etude expérimentale

Introduction

Tunnels énergét

Modélisation

Perspectives



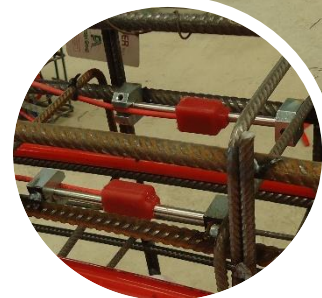
POLITECNICO
DI TORINO

INFRA.TO
infrastrutture per la mobilità



Site expérimental

Système de surveillance



Barla et al. (2019)

Etude expérimentale

Introduction

Tunnels énergét

Modélisation

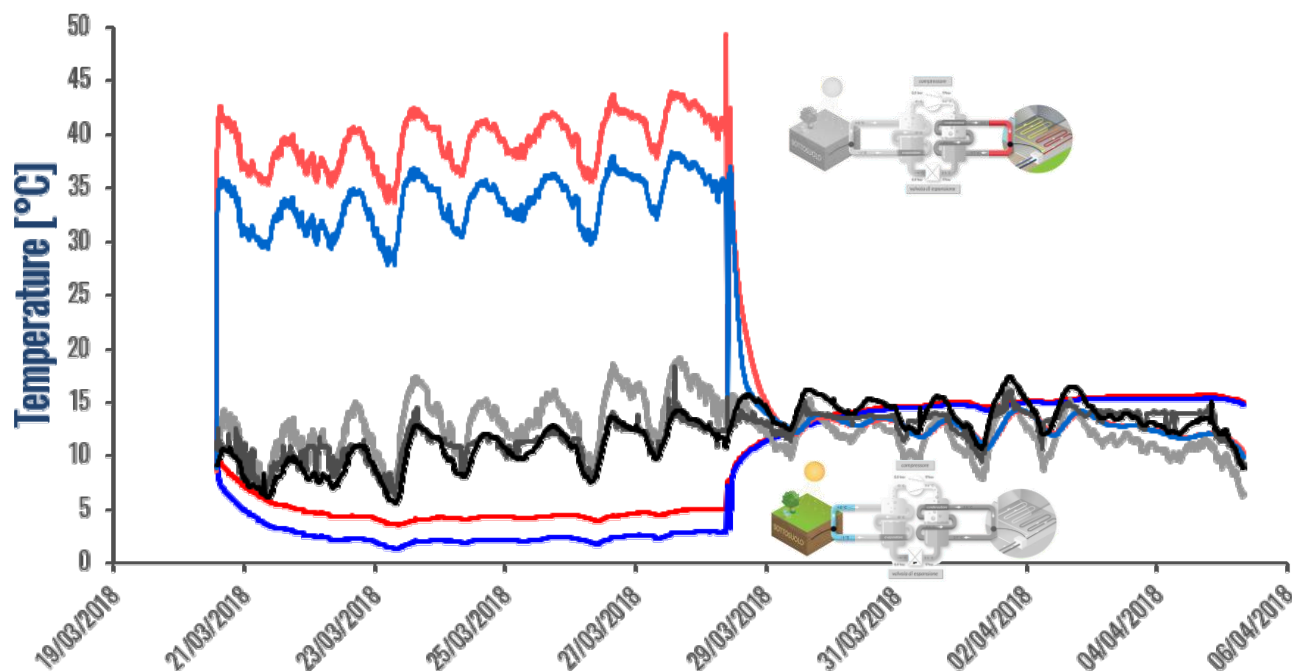
Perspectives

Site expérimental

Exemple d'essai en mode hiver

Phase de charge thermique

Phase de récupération



 1.3 m³/h
0.9 m/s

**PERFORMANCES
MESURÉES** 

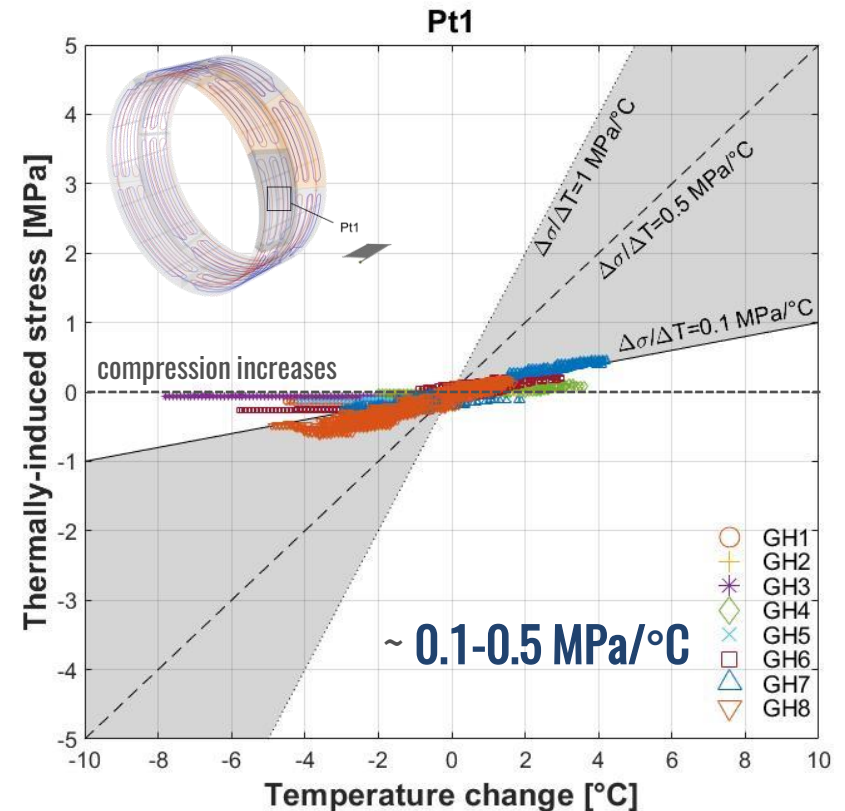
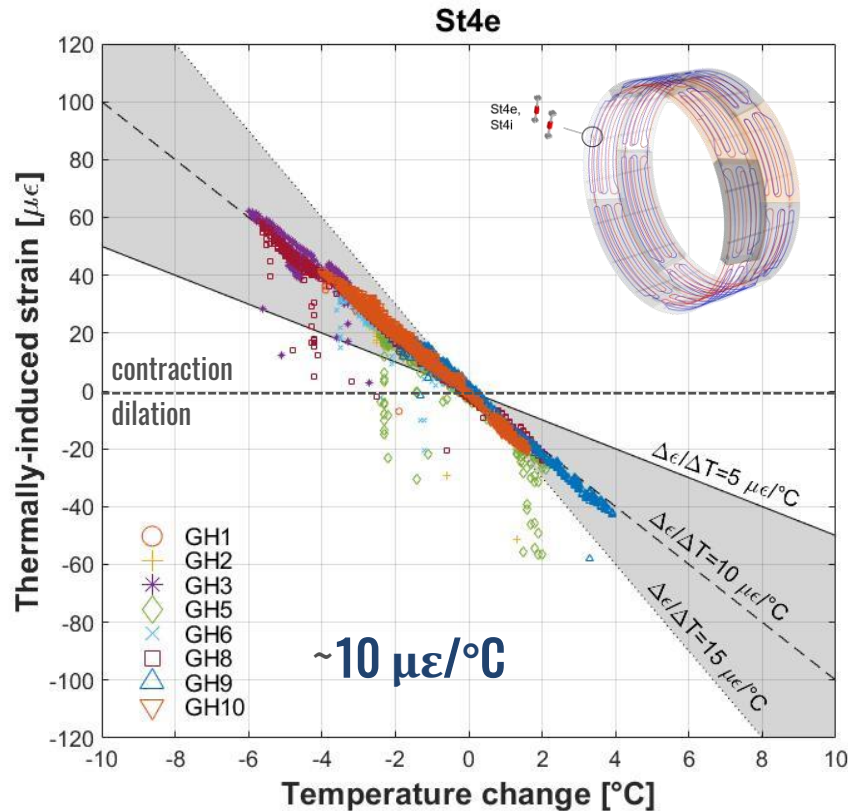
Barla et al. (2019)

Quantité	Unité de mesure	Valeur
Extraction d'énergie	kWh	601.1
Puissance spécifique par m ²	W/m ²	48.3
Puissance spécifique par m	W/m	1135

Etude expérimentale

Site expérimental

Comportement thermo-mécanique – déformations et contraintes



lining temperature ↓

rev. contractive strains

rad, hoop compressive stresses ↓



lining temperature ↑

rev. expansive strains

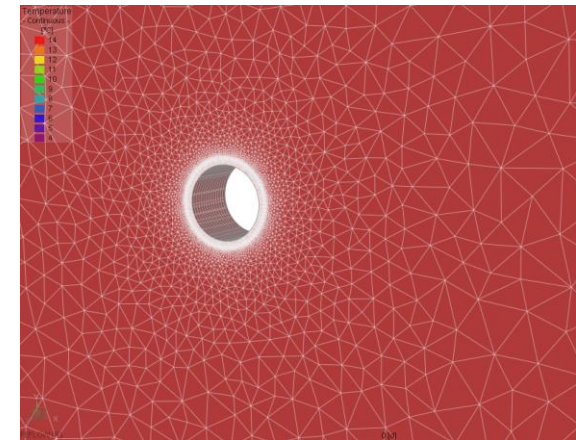
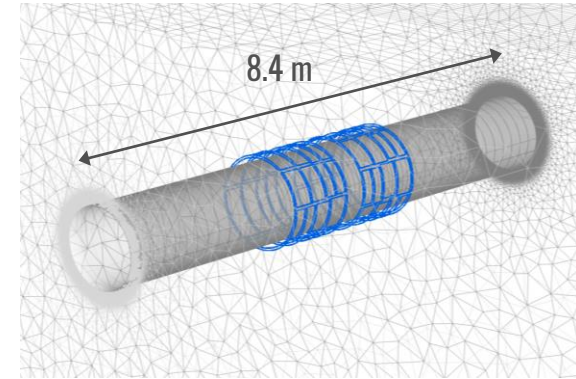
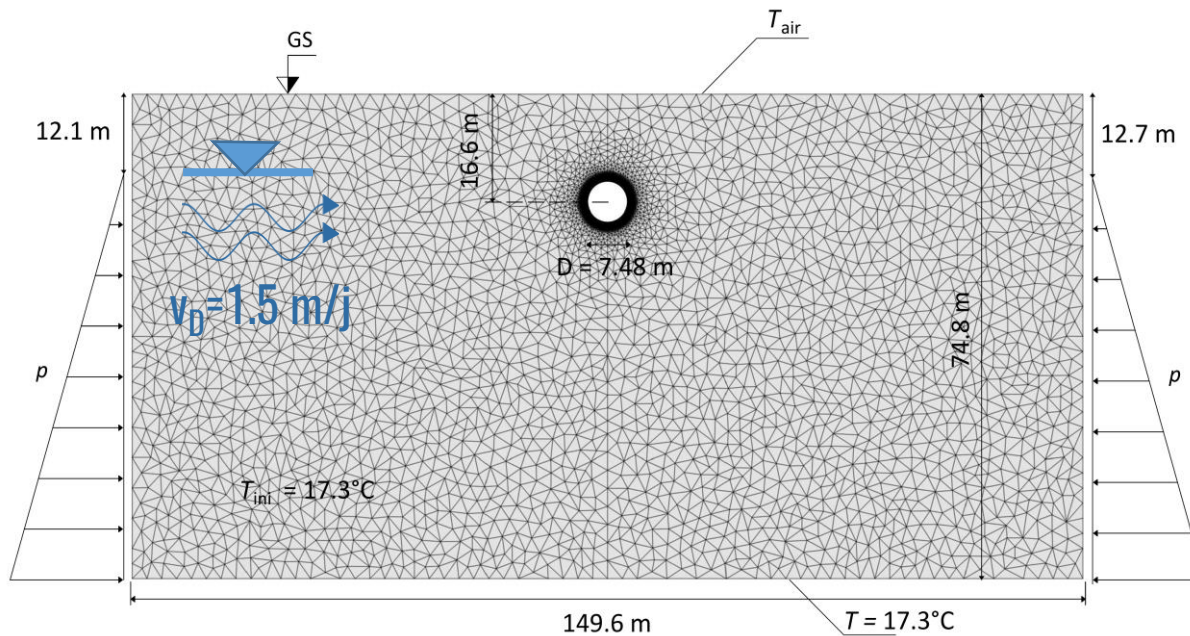
rad, hoop compressive stresses ↑

Etude expérimentale

Insana (2020)

Modélisation thermo-hydraulique

- ✓ Modèle numérique thermohydraulique 3D reproduisant le site expérimental
- ✓ Géométrie réelle du circuit géothermique
- ✓ Paramètres thermiques et hydrauliques du sol, du revêtement, du mortier
- ✓ Flux de la nappe, conditions de bord et initials, charges thermiques



Insana & Barla (2020)

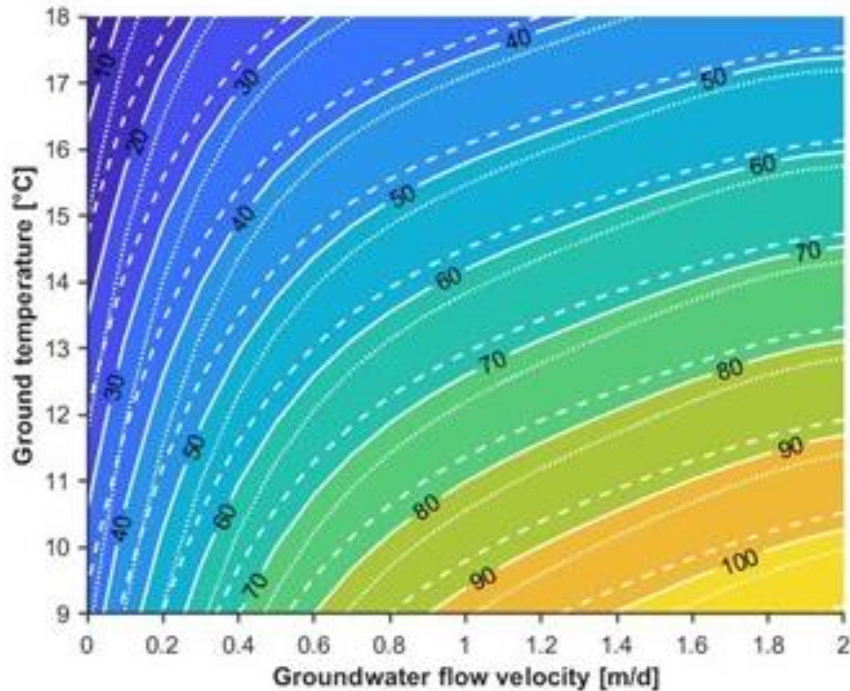
Modélisation numérique

Modélisation thermo-hydraulique

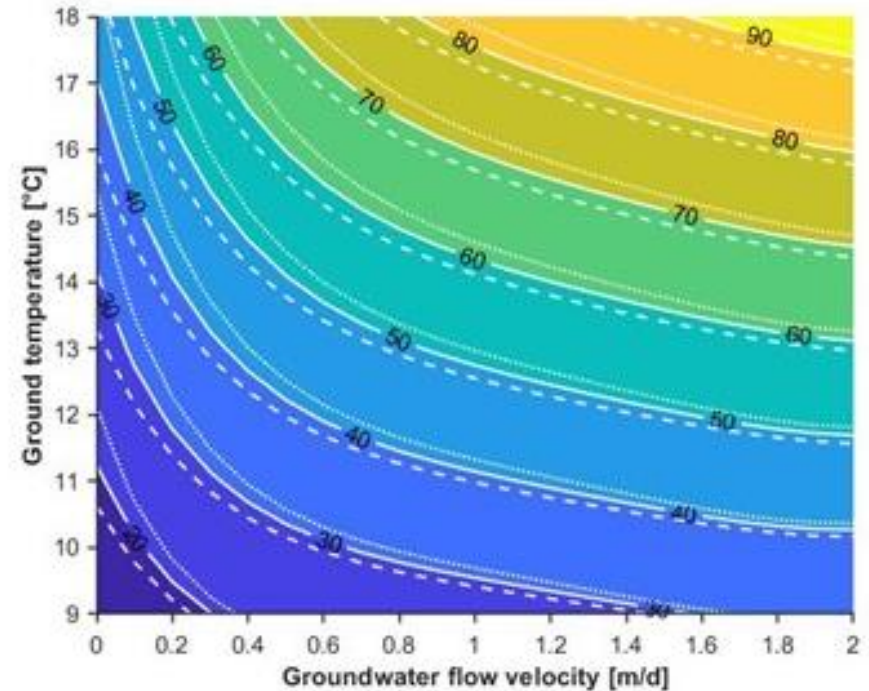
Abaque de calcul pour l'estimation préliminaire de la puissance en W/m^2

Le modèle ainsi calé est utilisé pour étendre les résultats à d'autres conditions thermo-hydrogéologiques (conductivité thermique du sol, vitesse/direction de l'écoulement, température du sol)

ÉTÉ



HIVER



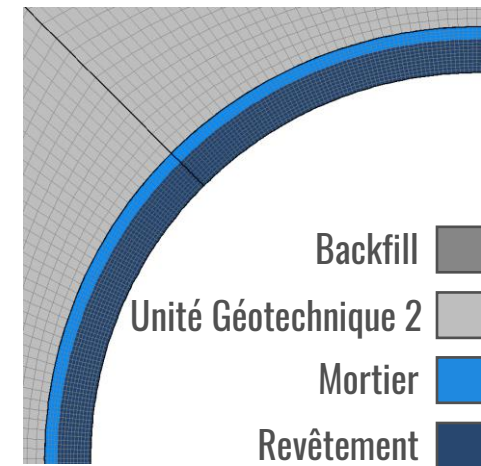
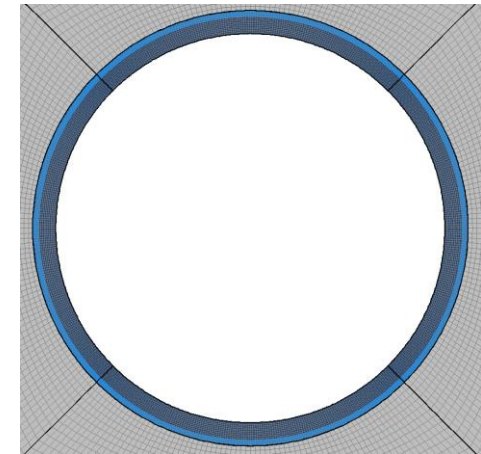
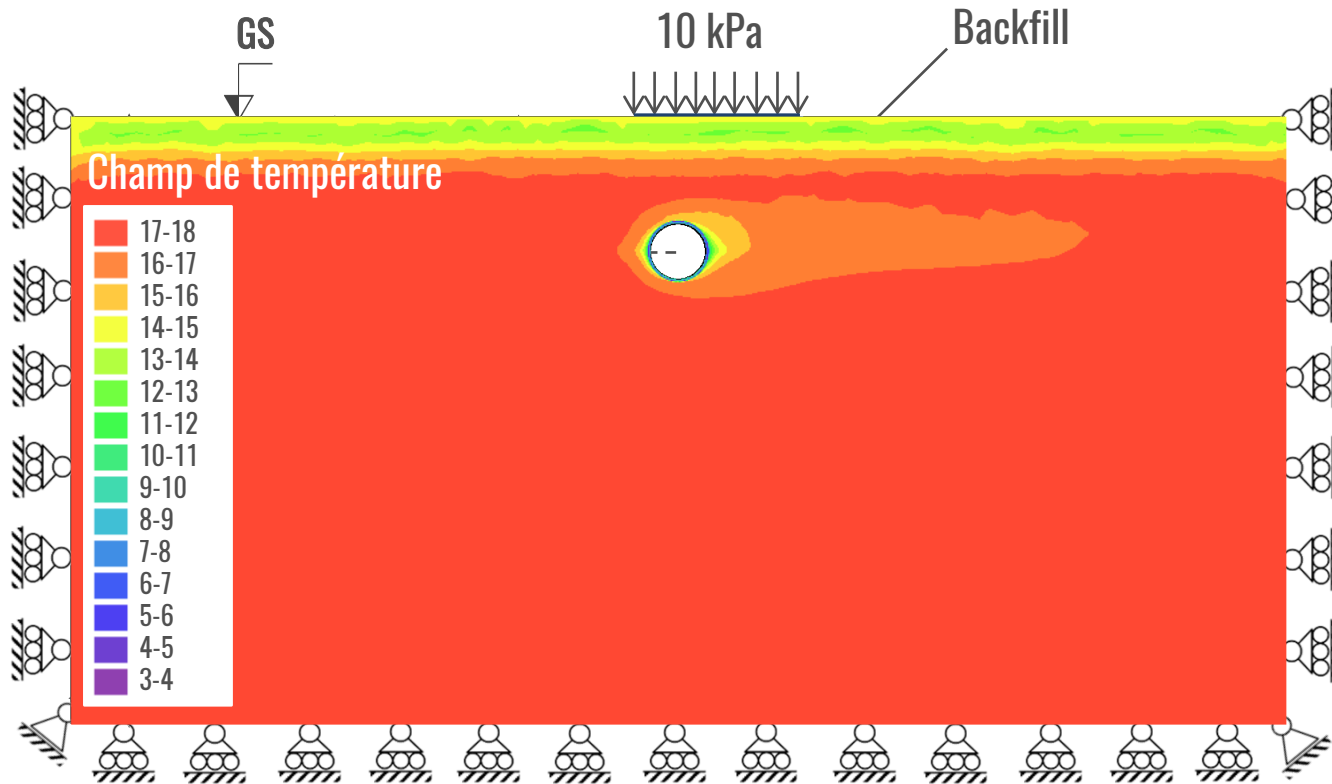
Cas de nappe perpendiculaire

Insana & Barla (2020)

Modélisation numérique

Modélisation thermo-mécanique

Le champ de température obtenu dans les modèles TH a été importé dans FLAC à plusieurs instants. Le modèle thermo-élastique a été validé, pour permettre une meilleure compréhension des interactions thermo-mécaniques, et utilisé pour l'évaluation des effets structuraux à long terme.



Insana et al. (2020)

Modélisation numérique

Modélisation thermo-mécanique

Étapes suivies



1

Analyse purement mécanique

(propriétés mécaniques des matériaux, méthode convergence-confinement, surcharges)

- État tensio-déformatif à la fin du creusement
- Validation avec les données in situ (tassements, contraintes dans le revêtement)

2a

Analyse thermo-mécanique - simulation des essais expérimentaux

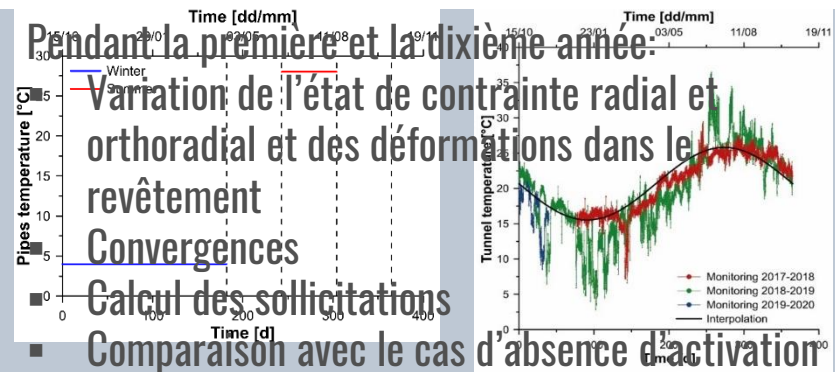
- Propriétés thermiques des matériaux (hypothèse de comportement thermo-élastique isotrope)
- Importation du champ de température $T(x,y,t)$ obtenu par l'analyse couplée TH 3D

- Variation de l'état de contrainte et de déformation dans le revêtement
- Convergences
- Validation du modèle thermo-mécanique

2b

Analyse thermo-mécanique - simulation du fonctionnement réel à long terme

- Propriétés thermiques des matériaux (hypothèse de comportement thermo-élastique isotrope)
- Importation du champ de température $T(x,y,t)$ obtenu par l'analyse couplée TH 3D



Modélisation numérique

Insana (2020)

Modélisation thermo-mécanique

Résultats obtenus (conditions de travail typiques avec $\Delta T = \pm 10^\circ\text{C}$)

- L'effet de l'activation thermique est d'induire un profil non-linéaire des contraintes sur l'épaisseur du revêtement et la variation maximale est d'environ $\pm 1\text{ MPa}$.

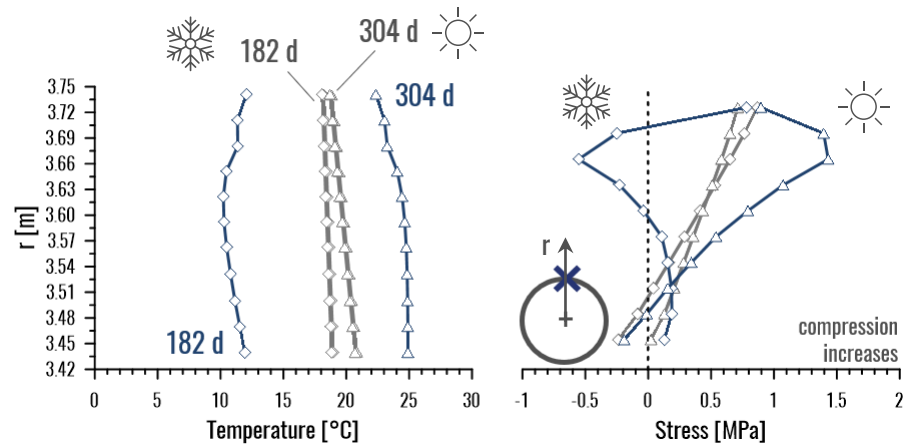
- Les convergences obtenues sans activation thermique l'activation elles vont de -1.3 à 0.8 mm , vers l'intérieur lors du chauffage. Elles restent pourtant très limitées.

- La force axiale diminue en mode chauffage (hiver)
 $\Delta N_{TH} = -15 \div 185\text{ kN/m}$

Le moment de flexion et la force de cisaillement se tendent autour de l'anneau reflète l'activation thermique

$$\Delta M_{TH} = -20 \div 20\text{ kN/m}$$

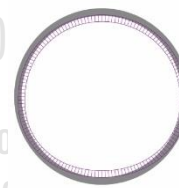
$$\Delta T_{TH} = -10 \div 10\text{ kN/m}$$



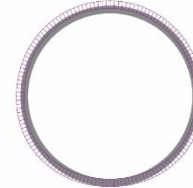
Modélisation thermo-mécanique

Résultats obtenus (conditions de travail typiques avec $\Delta T = \pm 10^\circ\text{C}$)

- L'effet de l'activation thermique est d'induire un profil non-linéaire des contraintes sur l'épaisseur du revêtement et la variation maximale est d'environ ± 1 MPa.
- Les convergences obtenues sans activation thermique sont de l'ordre de 0.15-0.30 mm, tandis qu'avec l'activation elles vont de -1.3 à 0.8 mm, vers l'intérieur du tunnel lors du refroidissement et vers l'extérieur lors du chauffage. Elles restent pourtant très limitées.
- La force axiale diminue en mode chauffage (hiver)
 $\Delta N_{TH} = -15 \div 185 \text{ kN/m}$
Le moment de flexion et la force de cisaillement se
tendance autour de l'anneau reflète l'activation th
 $\Delta M_{TH} = -20 \div 20 \text{ kN/m}$
 $\Delta T_{TH} = -10 \div 10 \text{ kN/m}$



End of heating
1st year (day 182)
-1.12 mm
-0.016%



End of cooling
1st year (day 304)
0.72 mm
0.010%



End of heating
10th year (day 3467)
-1.28 mm
-0.018%



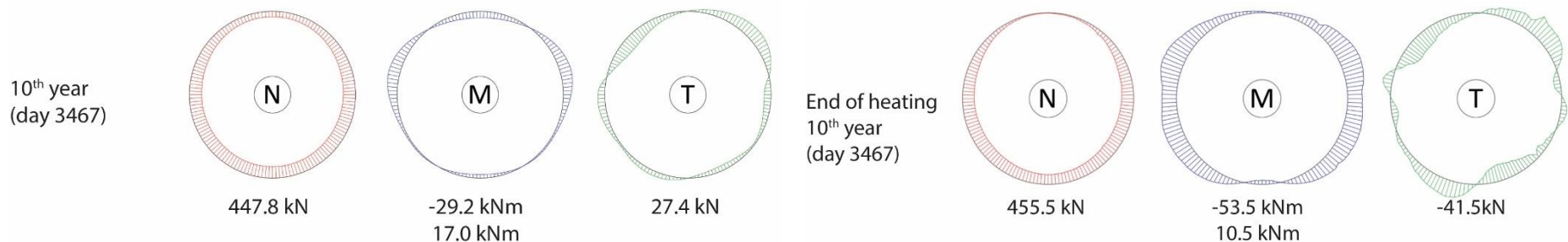
End of cooling
10th year (day 3589)
0.81 mm
0.011%

Magnifying scale factor 500
(displacement zeroed at the end of excavation)

Modélisation thermo-mécanique

Résultats obtenus (conditions de travail typiques avec $\Delta T = \pm 10^\circ\text{C}$)

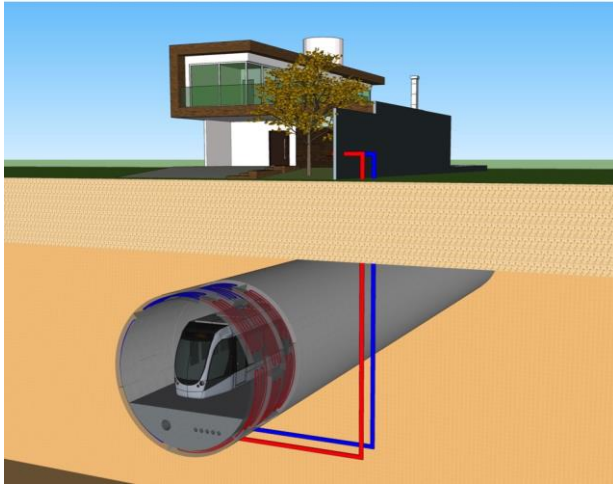
- L'effet de l'activation thermique est d'induire un profil non-linéaire des contraintes sur l'épaisseur du revêtement et la variation maximale est d'environ ± 1 MPa.
- Les convergences obtenues sans activation thermique sont de l'ordre de 0.15-0.30 mm, tandis qu'avec l'activation elles vont de -1.3 à 0.8 mm, vers l'intérieur du tunnel lors du refroidissement et vers l'extérieur lors du chauffage. Elles restent pourtant très limitées.
- La force axiale diminue en mode chauffage (hiver) et augmente en mode refroidissement (été)
 $\Delta N_{TH} = -15 \div 185 \text{ kN/m}$
Le moment de flexion et la force de cisaillement sont légèrement modifiés par les charges thermique et leur tendance autour de l'anneau reflète l'activation thermique et l'emplacement des tuyaux.
 $\Delta M_{TH} = -20 \div 20 \text{ kNm}$
 $\Delta T_{TH} = -10 \div 10 \text{ kN/m}$



Modélisation numérique

Echelle urbaine

Chauffage et refroidissement urbain

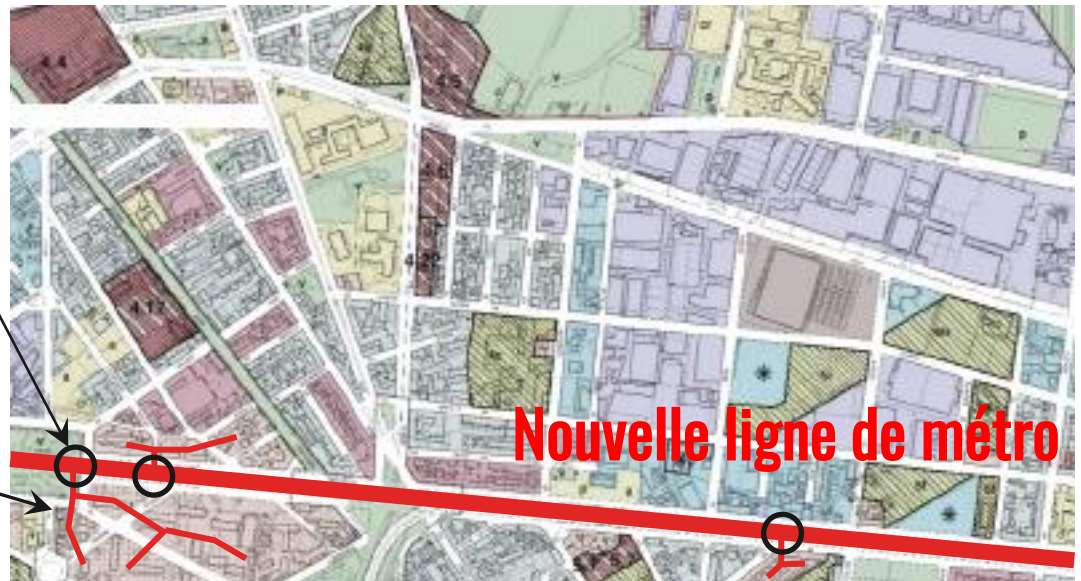


Un tunnel de métro traverse la ville sur **plusieurs kilomètres** en passant par des zones de développement urbain.

Il peut donc fonctionner à la fois comme source de chaleur et comme **système de distribution de téléchauffage et télérefroidissement urbain** à basse température.

Points d'extraction
(e.g. stations, puits)

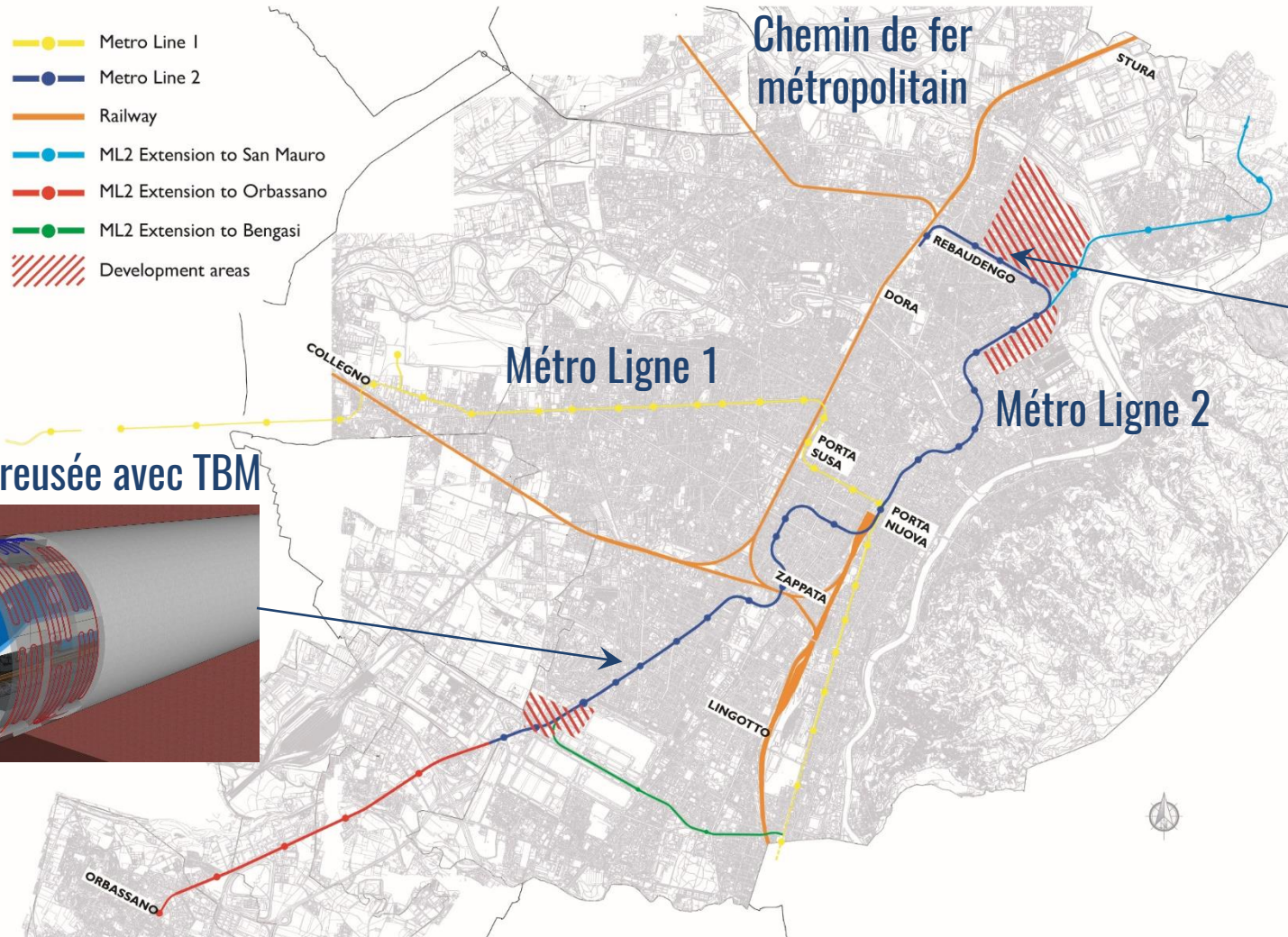
Distribution locale
de chaleur



Perspectives

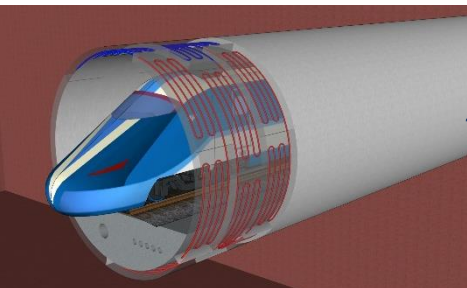
Echelle urbaine

Réseau de chemin de fer métropolitain de Turin



Section creusée en cut & cover

Section creusée avec TBM



Perspectives

Echelle urbaine

Chauffage et refroidissement urbain

PROCÉDURE

Collecte des données

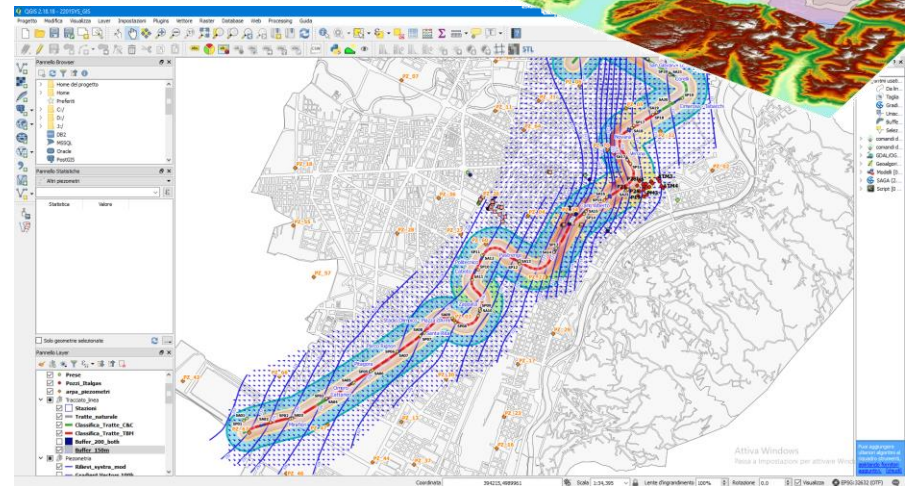
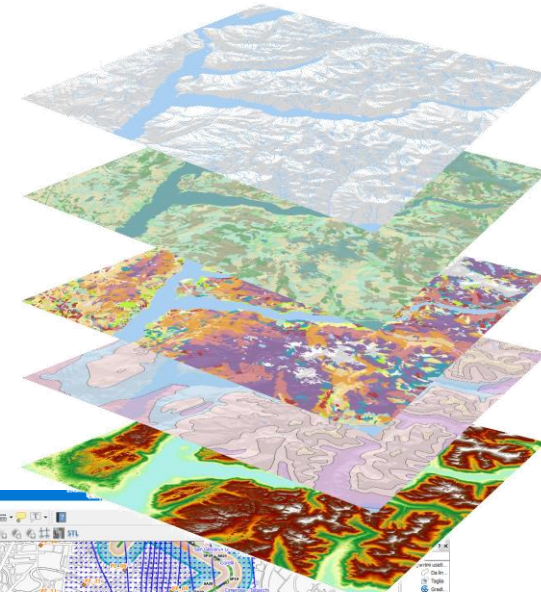
Sections homogènes

Modélisation numérique

Potentiel géothermique

Identification des récepteurs

Toutes les données sont géoréférencées et chargées sur la plateforme GIS en tant que couches distinctes avec les attributs associés.

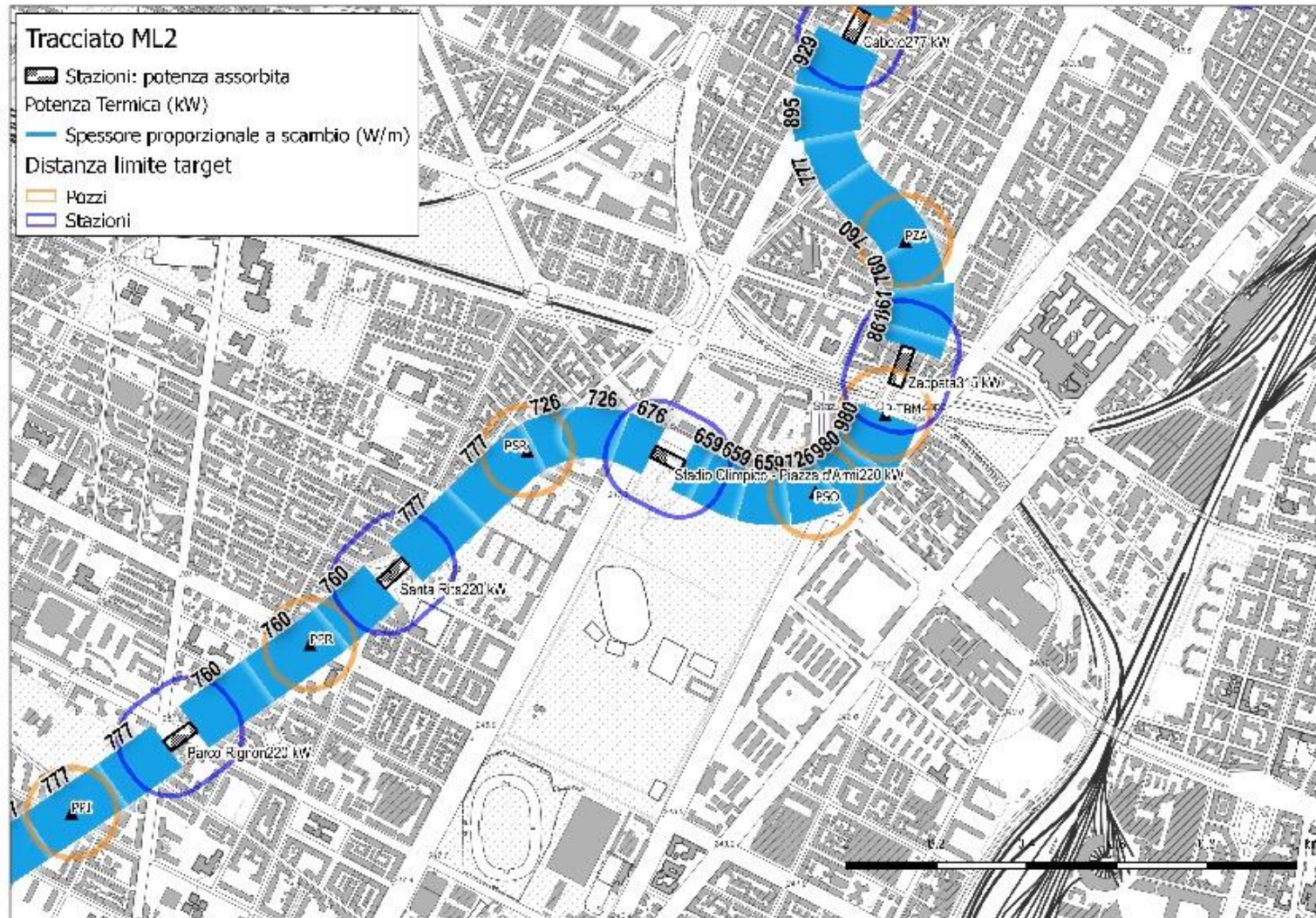


Baralis et al. (2018)

Perspectives

Echelle urbaine

Exemple de puissance thermique (Turin ML2)



SYSTRA
SOTECNI
SYSTRA GROUP

ITALFERR
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

Neosia
Maire Technimont Group

AiSTUDIO

ar thème
ARCHITECTES URBANISTES ASSOCIES

STUDIUM s.a.s.

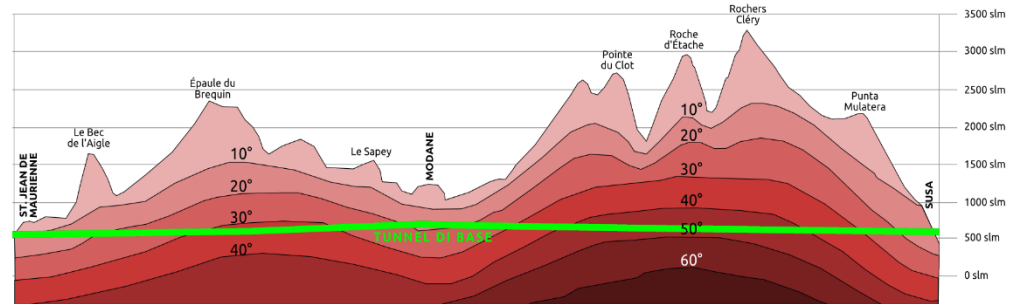
geosolving

Barla et al. (2019)
Barla et al. (2020)

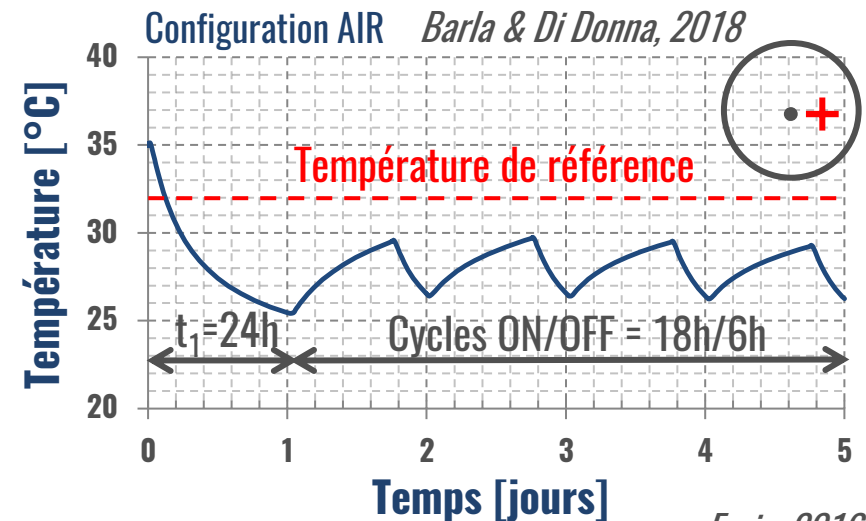
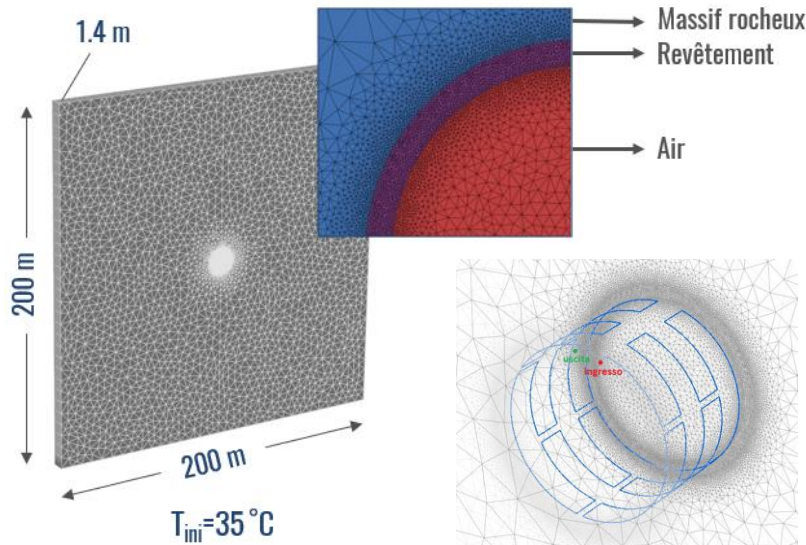
Tunnels profonds

Refroidissement des tunnels Alpins: le cas du tunnel de base Lyon-Turin

Dans certaines parties du tunnel la température est $>40^{\circ}\text{C}$!
Il faut garder la température du tunnel au dessous de 32°C .



Conception du système: cycles ON/OFF pour garder la température entre 25 et 30°C



Furio, 2016

Conclusions

La campagne expérimentale et les études numériques présentés ont essayé de démontrer les **opportunités** offertes par les tunnels énergétiques et les **avantages** par rapport à des installations traditionnelles.

L'**efficacité énergétique** doit être étudiée ad hoc pour chaque projet parce qu'elle est étroitement liée aux conditions thermo-hydro-géologiques du site spécifique. Les abaques de calcul peuvent aider dans cette direction dans les phases initiales du projet.

Les résultats ont montré que les charges thermiques agissant sur les tunnels dans les sols alluviaux ont des effets mesurables et quantifiables. Cependant, ces effets **ne sont pas considérés comme menaçant l'intégrité structurelle** ou la fonctionnalité du revêtement.

Le défi est de passer vraiment de la **théorie** à la **pratique**.

Publications

- Barla, M., Di Donna A. (2016). Conci energetici per il rivestimento delle gallerie. *Strade e autostrade*, 2–5.
- Barla M., Di Donna, A. (2018). Energy tunnels: concept and design aspects. *Underground Space* 3, 268-276.
- Baralis, M., Barla, M., Bogusz, W., Di Donna, A., Ryzynski, G., Zerun, M. (2018). Geothermal potential of the NE extension Warsaw metro tunnels, *Environmental Geotechnics* 1-13.
- Barla, M., Di Donna, A. Insana A. (2019). A novel real scale experimental prototype of energy tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology* 87, 1-14.
- Barla, M., Baralis, M., Insana, A., Zacco, F., Aiassa, S., Antolini, F., Azzarone, F. Marchetti, P. (2019). Feasibility study for the thermal activation of Turin metro line 2. In: Proceedings of World Tunnel Congress, Napoli, May 3-9, 2019.
- Insana, A., Barla, M. (2020). Experimental and numerical investigations on the energy performance of a thermo-active tunnel. *Renewable Energy* 152, 781-792.
- Insana (2020). Thermal and structural performance of energy tunnels. PhD thesis.
- Insana, A., Barla, M., Sulem, J. (**under review**). Energy tunnel linings thermo-mechanical performance: comparison between field observations and numerical modelling, In: Proceedings of 2nd International Conference on Energy Geotechnics, La Jolla, California (USA) March 28-31, 2021.



Contactez-nous

Alessandra Insana
Marco Barla
Jean Sulem

Politecnico di Torino
Ecole des Ponts ParisTech



POLITECNICO
DI TORINO



www.rockmech.polito.it



alessandra.insana@polito.it



facebook.com/enertun/



Rockmech PoliTO

