Géostructures thermiques

Jean de Sauvage (Université Gustave Eiffel)
Eric Antoinet (Antea Group)

anteagroup

Antea Group

Understanding today.
Improving tomorrow.

www.anteagroup.com

PLAN

Partie I –Géostructures thermiques

- I.1 – Les géothermies
- I.2 – Les géostructures thermiques
- I.3 – Eléments de conception

Partie II – Expérimentations Sense-City

- II.1 – Effet d’échelle des projets
- II.2 – Dispositif expérimental
- II.3 – Résultats expérimentaux

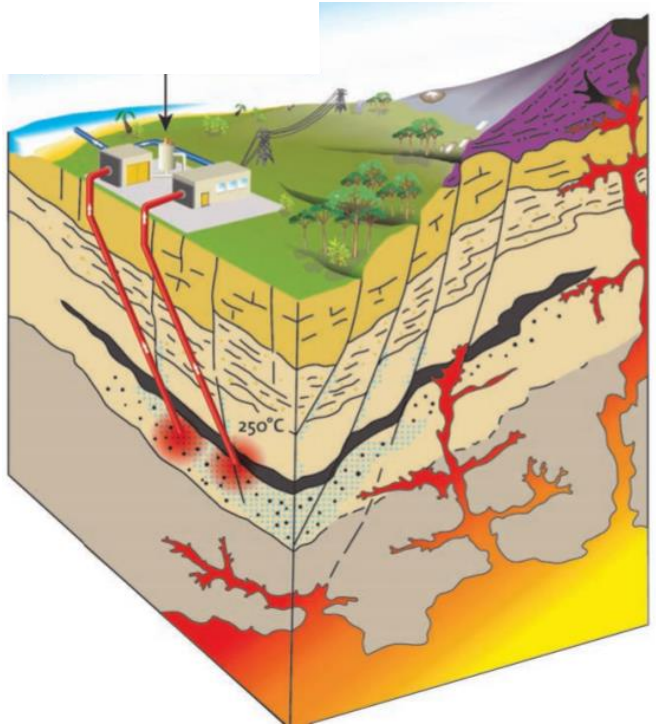
Antea Group

Understanding today.
Improving tomorrow.

Les géothermies :

Permettent d'exploiter l'énergie du sous-sol afin de produire :

- de la chaleur : chauffage, eau chaude sanitaire, piscines, process industriels
- du froid : rafraichissement et climatisation de bâtiment, process industriels
- de l'électricité (géothermie électrogène), via une exploitation de vapeur pouvant faire fonctionner une turbine



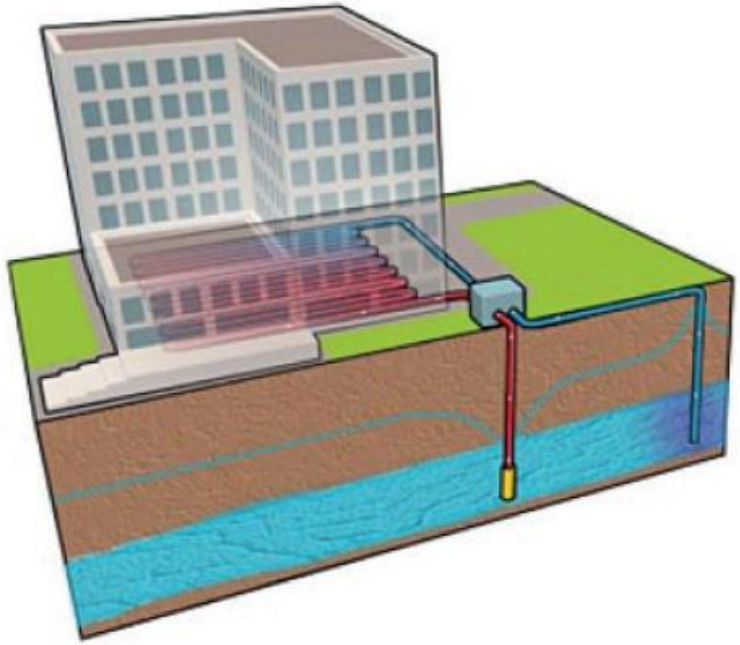
Les géothermies

Moyenne énergie	> 90 °	Sites favorables (ex : Bouillante -971, Soultz-la-Forêt -67) Production électrique + réseau chaleur
Basse énergie	30 à 90°	Ressources profondes (jusqu'à environ 2 000 m) Bassin parisien, Alsace, Aquitaine… Réseau de chaleur
Très basse énergie (superficielle)	< 30°	Premières dizaines de mètres sous la surface (< 200 m) Applications principalement dans l'habitat collectif, le tertiaire et l'individuel Pompes à chaleur (chauffage/climatisation)

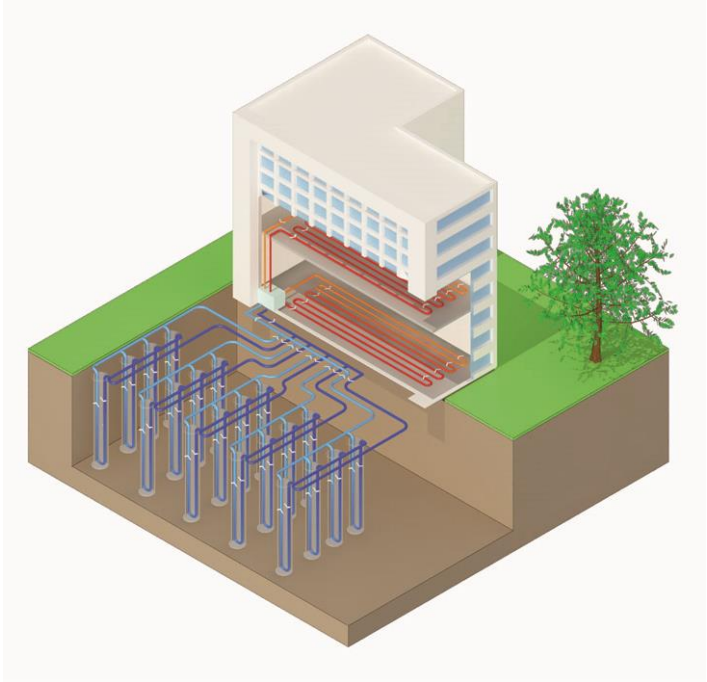
Géothermie très basse énergie

Boucle ouverte ≠ Boucle fermée

Doublets de forages captant les eaux souterraines:
- forage « producteur » servant à prélever les eaux
- forage « injecteur » servant a réinjecter les eaux refroidies (ou réchauffées)



Sondes géothermiques verticales
Tuyaux en PEHD formant une boucle dans lequel circule un fluide caloporteur captant l'énergie du sous-sol



Géostructures thermiques
Utiliser les ouvrages géotechniques pour constituer des échangeurs

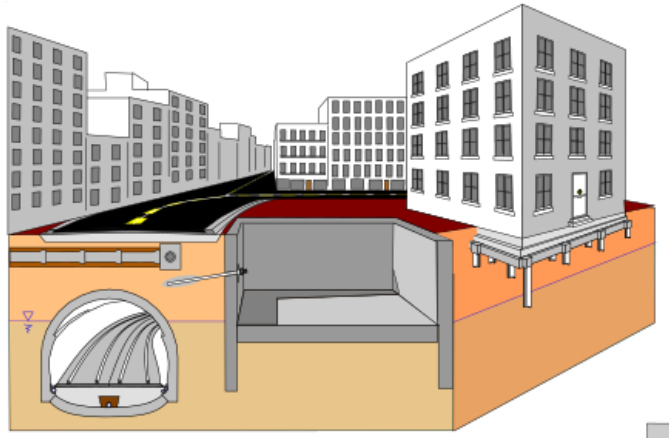
Improving tomorrow.

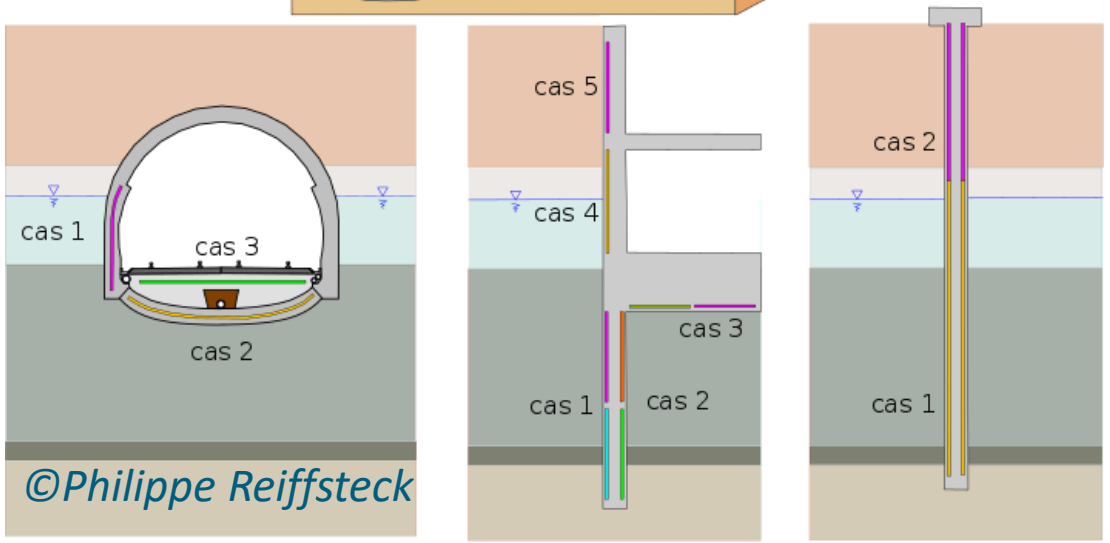
Géostructures thermiques

- Décret 2015-15 du 8/01/2015 :

« Les géostructures thermiques sont des éléments de structure enterrés d'un bâtiment, d'un ouvrage ou d'un équipement, équipés de tubes échangeurs de chaleur dès leur construction. La circulation d'un fluide caloporteur dans les tubes permet l'échange de l'énergie thermique avec le terrain, dans le but de chauffer ou de rafraîchir un bâtiment, un ouvrage ou un équipement ou d'y produire l'eau chaude sanitaire ».

- Pieux
- Radiers
- Ecrans de soutènement
- Tunnels





©Philippe Reiffsteck

Understanding today.
Improving tomorrow.

Géostructures thermiques

Conditions favorables à une opération de géostructures thermiques :

- **opération d'opportunité** : tirer parti d'un projet de construction en interaction avec le terrain (impacts économiques et techniques marginaux)

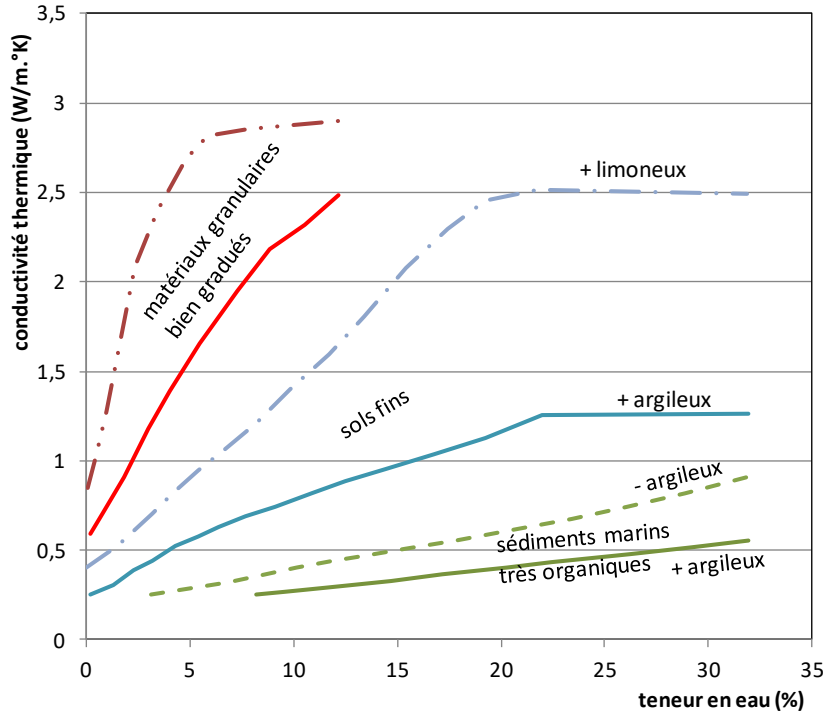
- **opération à envisager le plus en amont possible** (dès le stade des études préliminaires) et suivre le déroulement logique de la vie du projet en **s'intégrant aux phases de conception et d'exécution**.

- **le maître d'ouvrage doit définir une politique énergétique** qui, selon le projet peut :
  - répondre à tout ou partie du besoin énergétique propre de l'ouvrage projeté,
  - être excédentaire pour la fourniture d'énergie des bâtiments voisins existants ou projetés,
  - être totalement dédié à la mise à disposition d'énergie à des tiers

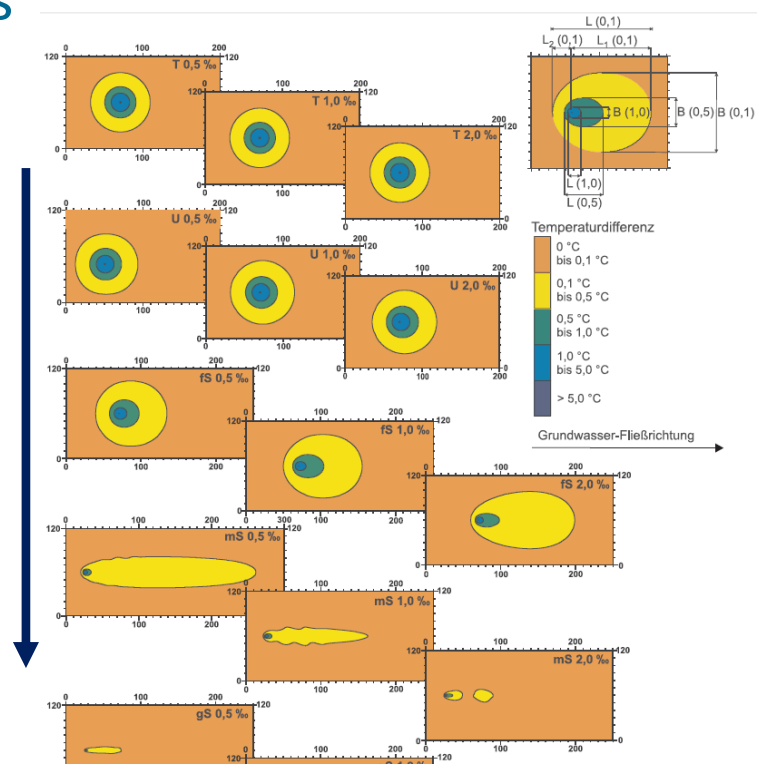
Géostructures thermiques

Conditions favorables :

⇒ Milieu saturé plus favorable aux échanges thermiques



Perméabilité



Gradient nappe

⇒ L'écoulement de la nappe permet une réinitialisation saisonnière du champ de température

Understanding today.
Improving tomorrow.

Géostructures thermiques

Université Gustave Eiffel

antea group

Ordres de grandeur des puissances thermiques mobilisables

- Parois moulées : 10 à 30 W/m²
  fonction des écoulements, des terrains rencontrés (sable plus favorable que argile)

- Pieux : 25 à 60 W/ml – suivant diamètre des pieux et de l'entre-axe (effet de groupe) -
  1 kW pour un pieu de 20 m échangeant 50 W/ml

- Radier : 10 W/m² (retour d'expérience faible)

Exemple de besoin pour un immeuble d'habitation (59 logements sociaux à Lyon 7ème - 3 750 m² de plancher)

Puissance chaud fourni : 85 kW
Energie chaud fourni : 54 MWh de chauffage
53 MWh d'ECS

Débit de pointe : 23 m^3/h

Taux de couverture de la géothermie (boucle ouverte) : 100% des besoins

2 forages de prélèvement de 18 m
1 forage de réinjection de 18 m

Économie sur les émissions de GES : 59 $t_{eq\ CO2}$/an

Understanding today.
Improving tomorrow.

Exemple de réalisation

Terminal de l'aéroport de Zürich - Suisse

Sous-sol formé par d'anciens fonds lacustres reposant sur une moraine.

→ 440 pieux de fondation de gros diamètres (*90 à 150 cm) sur* 30 mètres de prof.

→ **306 pieux sont utilisés en pieux énergétiques avec 5 tubes en U**

Chauffage par P.A.C couplées sur les pieux (avec appoint)

- Puissance nominale 630 kW
- Énergie annuelle de chauffage 2 300 MWh/an

Refroidissement direct (geocooling) sur les pieux (avec appoint)

- Puissance de refroidissement nominale 500 kW
- Énergie annuelle de refroidissement 1 240 MWh/an

Understanding today.
Improving tomorrow.

Version 1 Janvier 2017

Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des géostructures thermiques

CFMS/SYNTEC INGENIERIE/SOFFONS-FNTP

Illustration : géothermie-professionnelle

Revue Française de Géotechnique n°149 - 2016

https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/recommandations/Recommandations_Geostructures_Thermiques_CFMS_SYNTEC_Version_1_Janvier_2017.pdf

https://www.syntec-ingenierie.fr/wp-content/uploads/2017/01/2017-01-01-Guide-Recommandations-geothermiques.pdf

Understanding today.
Improving tomorrow.

Version 1 Janvier 2017

Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des géostructures thermiques

CFMS/SYNTEC INGENIERIE/SOFFONS-FNTP

Illustration : géothermie-professionnelle

CFMS

SYNTEC-INGÉNIERIE

Université Gustave Eiffel

anteagroup

Fourni un référentiel technique commun et des règles de bonne pratique, cohérentes avec les normes en vigueur (EC)

Document de 58 pages, découpé en 4 chapitres et 6 annexes

- Chapitre 1 : données d'entrée et caractérisation des terrains,

- Chapitre 2 : dimensionnement géotechnique et aspects structurels,

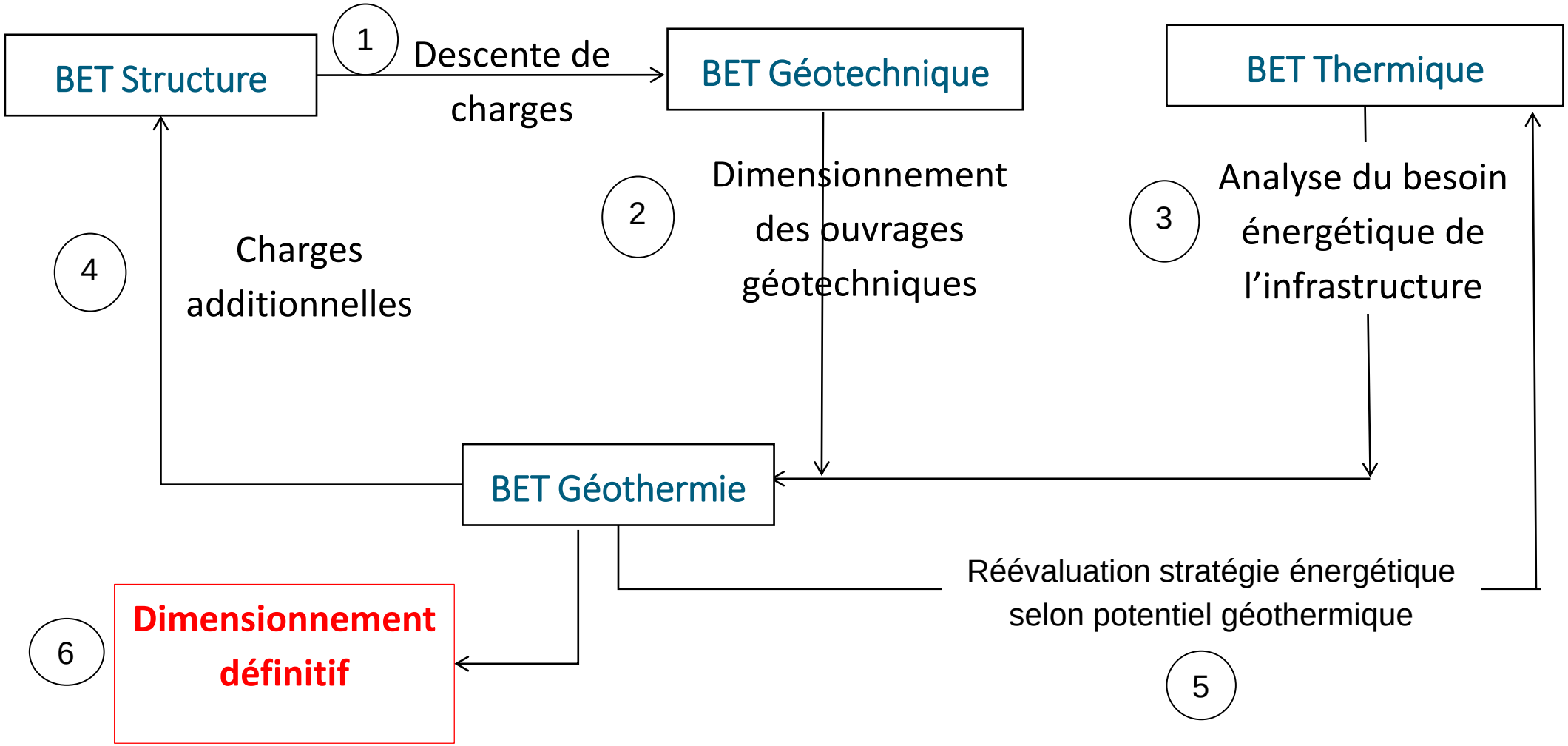
- Chapitre 3 : conditions de réalisation et mise en œuvre,

- Chapitre 4 : aspects contractuels, assurances et responsabilité.

https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/recommandations/Recommandations_Geostructures_Thermiques_CFMS_SYNTEC_Version_1_Janvier_2017.pdf

Understanding today.
Improving tomorrow.

Organisation des études



Missions d'ingénierie géotechnique

Enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique classiques	Eléments complémentaires pour la géothermie	Impact conception projet
Avant mission géotechnique	Stratégie énergétique (tout, partie ou plus des besoins du projet) Etude bibliographique générale géologie + hydrogéologie	Préfaisabilité (avis) + définition des éléments complémentaires à obtenir
Mission G1		Informations complémentaires sur caractéristiques du milieu + caractéristiques dimensionnelle des fondations
Mission G2	Si nappe productive attendue étude des caractéristiques de la nappe : estimation du Darcy et impact potentiel sur les performances du système	Faisabilité (avis définitif) + performance attendue en fonction des données disponibles
	TRT si autres données d'entrée du projet figées (besoin thermique + dimensions des fondations). Sinon report en phase EXE.	
Missions G3/G4 (niveau EXE)	TRT une fois données d'entrée du projet figées (besoin thermique + dimensions des fondations).	Dimensionnement définitif
Mission G5		Phase étude remise en cause du projet possible Phase service réévaluation des performances

Université Gustave Eiffel

anteagroup

Understanding today.
Improving tomorrow.

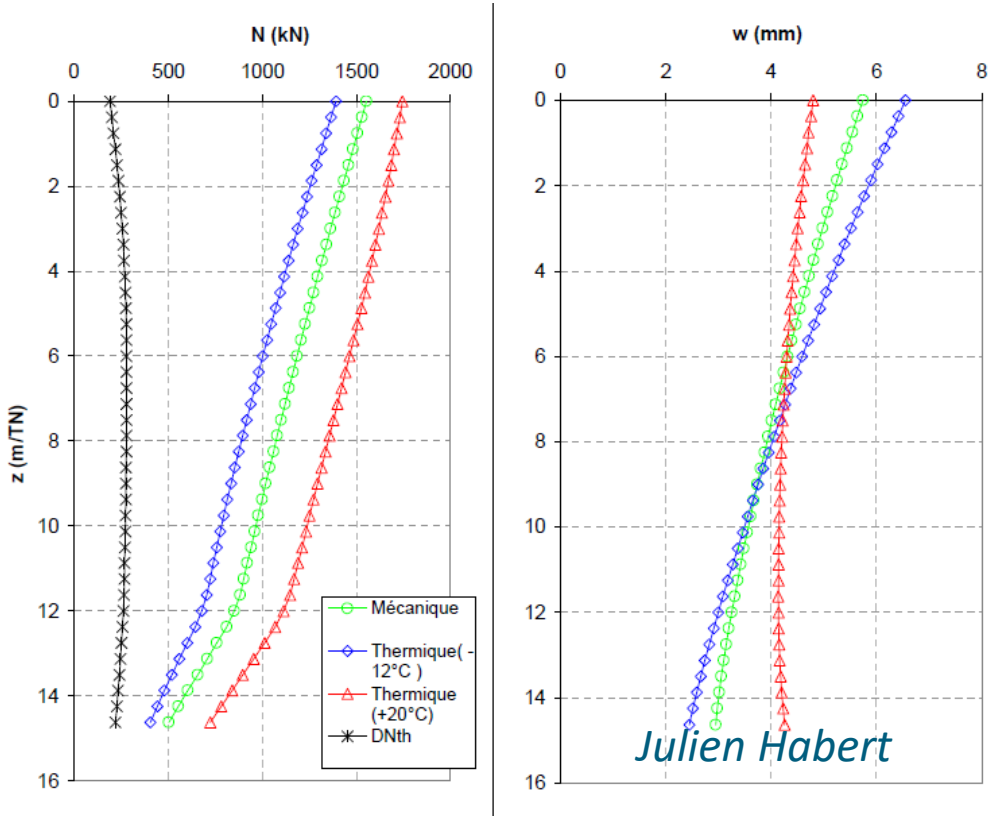
Interactions thermo-mécaniques

Les modifications de température dans les fondations sont susceptibles d'induire deux problématiques mécaniques :

- La modification des propriétés mécaniques des matériaux, en particulier la résistance et la déformabilité (T > 0° !) ;

- Des déformations volumiques internes générées par les modifications de température, qui nécessitent de s'interroger sur les 3 conséquences suivantes :
  - Les efforts dans les éléments de structure ;
  - Les déformations ;
  - La modification de la « sécurité géotechnique ».

$$\Delta\sigma = -E\alpha_T \Delta T$$



Sollicitations induites par une variation ΔT +/- 4°

Understanding today.
Improving tomorrow.

En synthèse

Pieux géothermiques

- Des techniques éprouvées en Europe : 30 ans de REX en Autriche, Suisse, Allemagne, Grande Bretagne
- Des opérations d'opportunité
- Des recommandations géotechniques établies par la profession
- Une certaine méconnaissance de ces techniques par les géotechniciens
- Des interactions études plus importantes

Ecran de soutènement géothermiques

- Peu de projets réalisés (stations de métro)
- Des interactions potentielles plus fortes sur la ressource thermique à l'échelle d'un quartier

Understanding today.
Improving tomorrow.

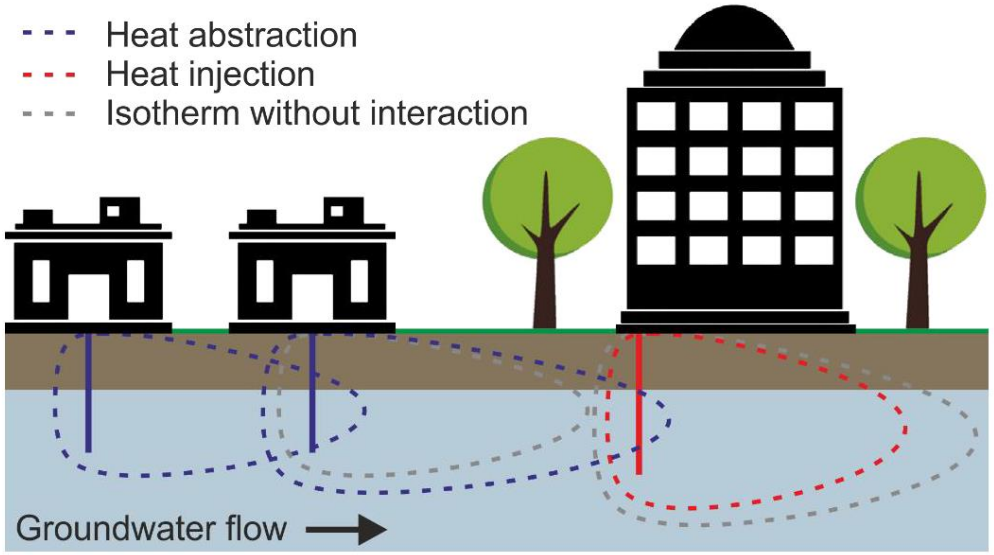
Partie II : Expérimentations Sense-City

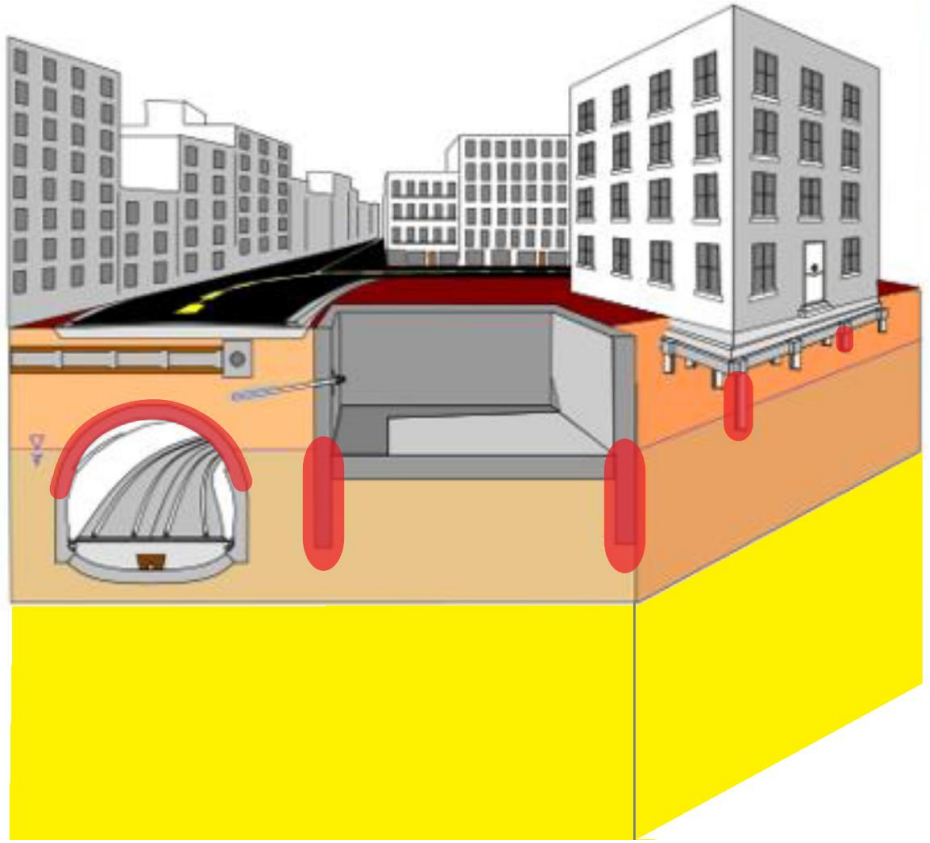
Jean de Sauvage – Université Gustave Eiffel

Understanding today.
Improving tomorrow.

Quid à l'échelle de la ville ?

- ✓ Variété de géostructures
  - Pieux énergétiques
  - Parois moulées thermoactives
  - Tunnels énergétiques
- ✓ Des écoulements souterrains

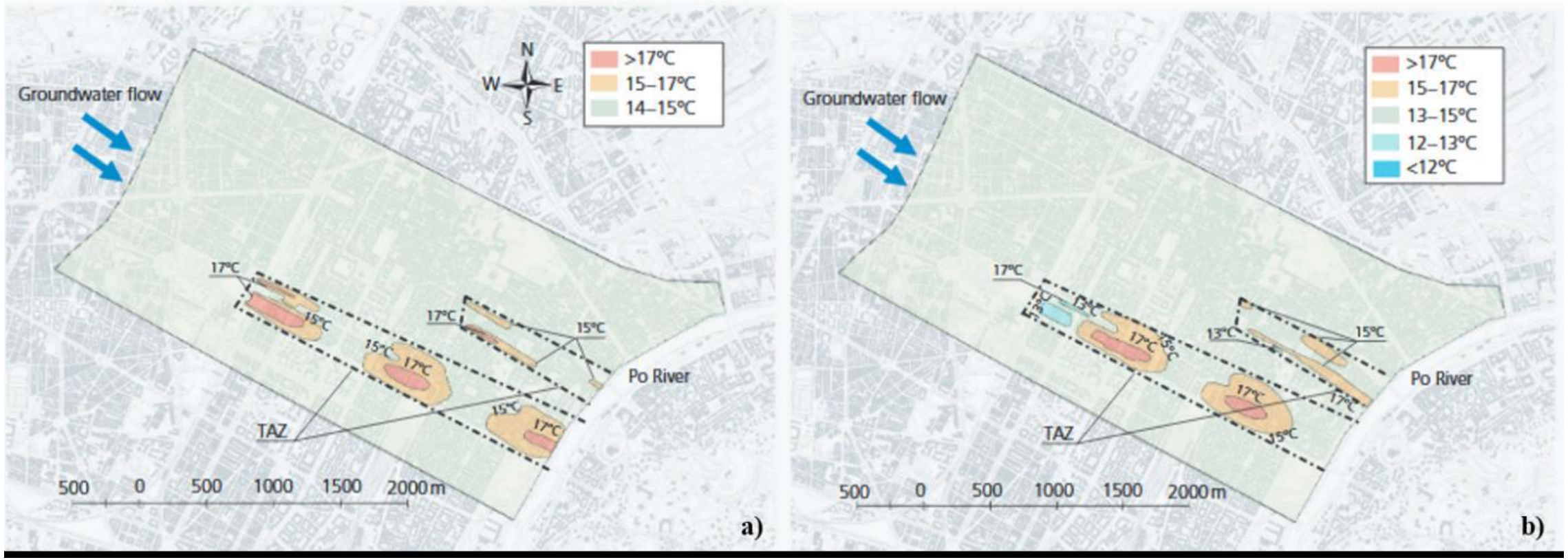




O. Pedchenko, 2018

Understanding today.
Improving tomorrow.

Quid à l'échelle de la ville ?



a) Fin de l'été b) Fin de l'hiver
Barla et al, 2018

Understanding today.
Improving tomorrow.

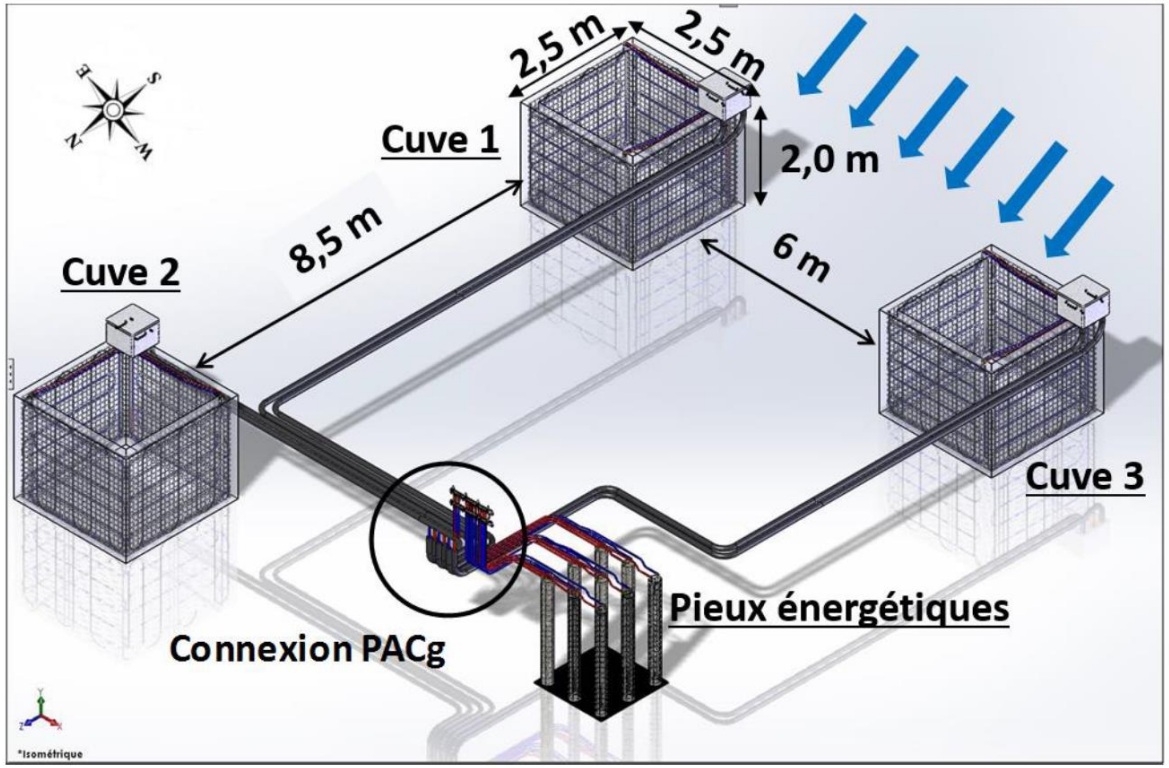
Un moyen d'étude : Sense City

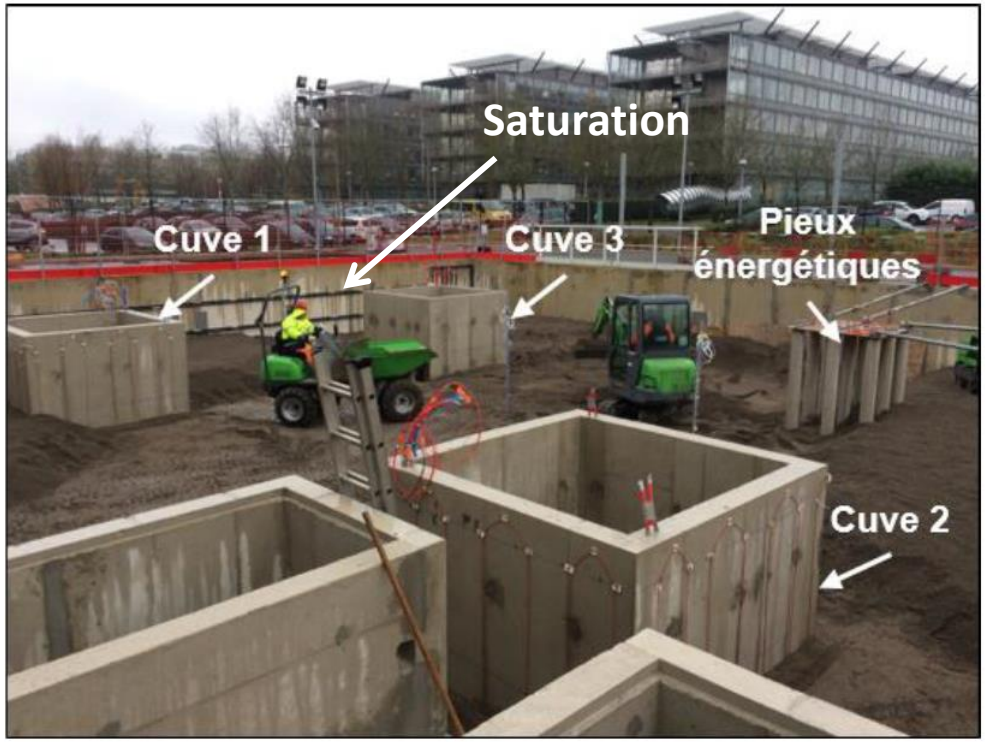
- ✓ Un équipement exceptionnel de l'Université Gustave Eiffel
  - Chambre climatique mobile
  - Fosse géotechnique

Understanding today.
Improving tomorrow.

Un moyen d'étude : Sense City

- ✓ Un équipement exceptionnel de l'Université Gustave Eiffel
  - Chambre climatique mobile
  - Fosse géotechnique
- ✓ Collaboration IFSTTAR – Antea Group
  - Thèse Yvon Delerablée

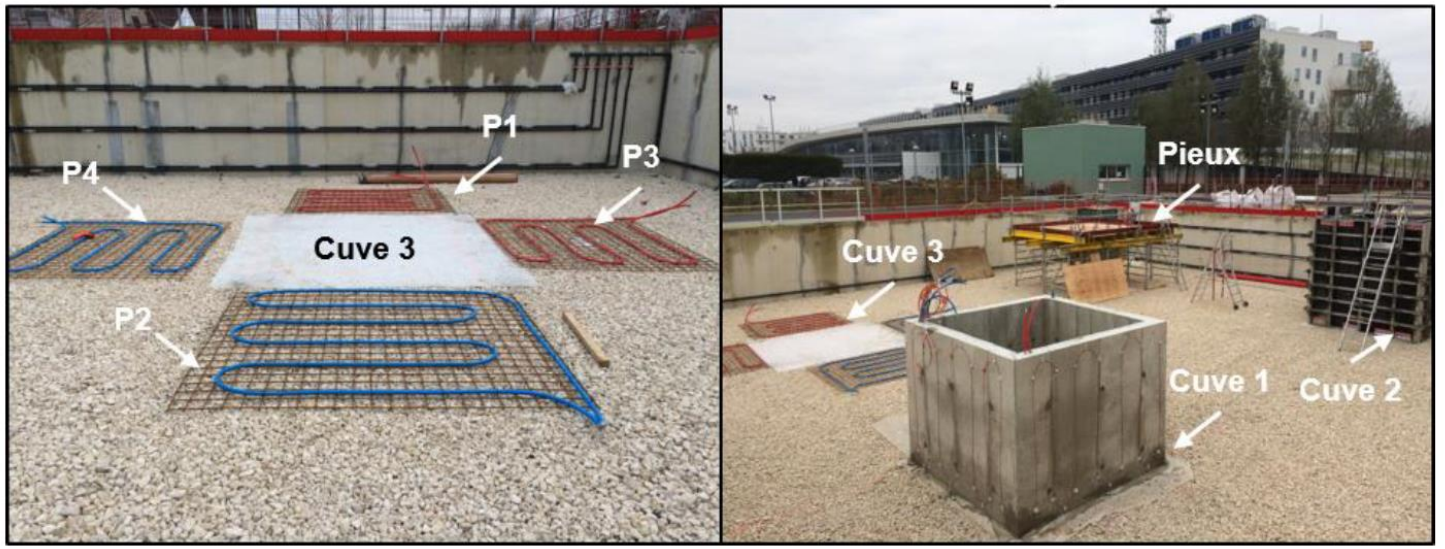


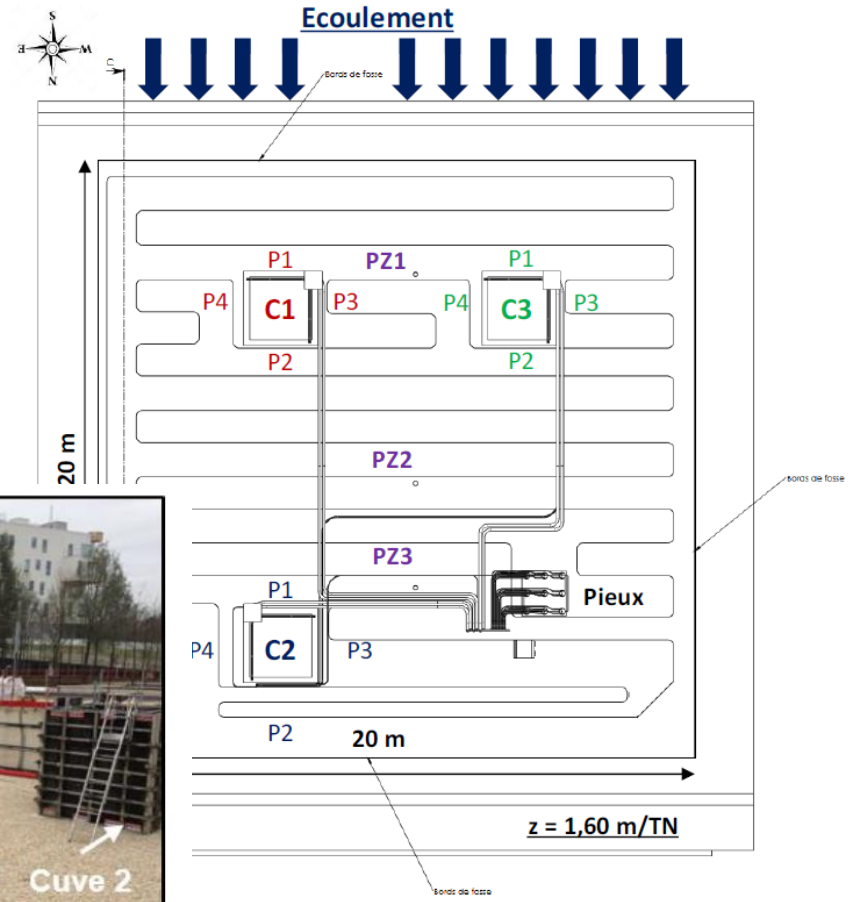


Understanding today.
Improving tomorrow.

Un moyen d'étude : Sense City

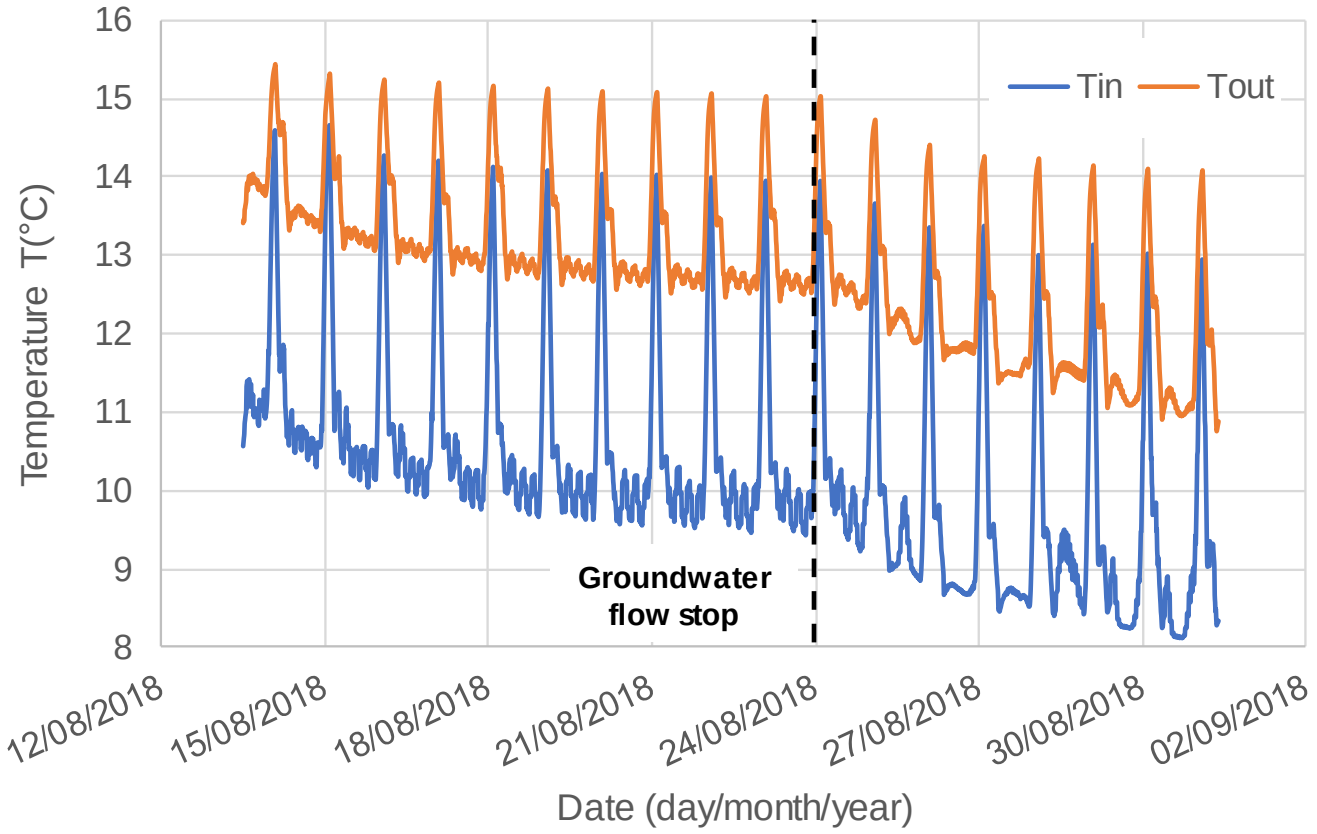
- ✓ Un équipement exceptionnel de l'Université Gustave Eiffel
  - Chambre climatique mobile
  - Fosse géotechnique
- ✓ Collaboration IFSTTAR – Antea Group
  - Thèse Yvon Delerablée
  - Pt100, piézos, fibre optique





Understanding today.
Improving tomorrow.

Premiers résultats

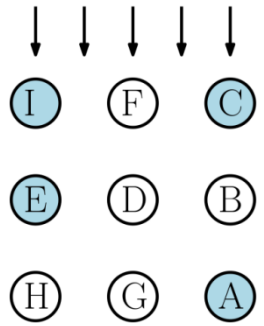


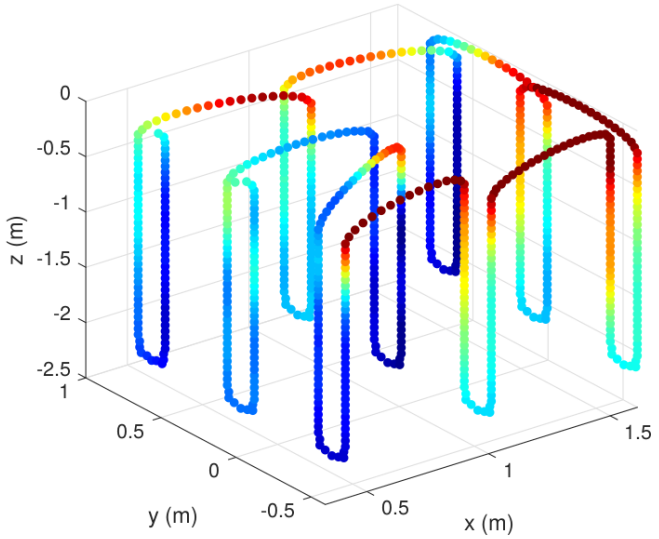
- ✓ Influence de l'écoulement
  - Températures dans la cuve 1
  - Incidence sur l'anomalie thermique
- ✓ Interactions entre cuves
  - Temps longs
  - Problèmes de maintenance Sense City

Understanding today.
Improving tomorrow.

Premiers résultats

- ✓ Interactions entre pieux
  - Fibre Optique dans les pieux !
  - Scénarios de chauffage modulables





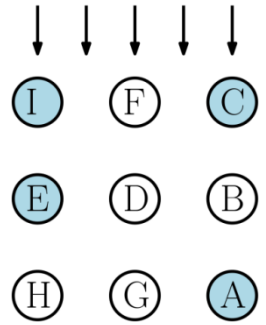
ACTIF

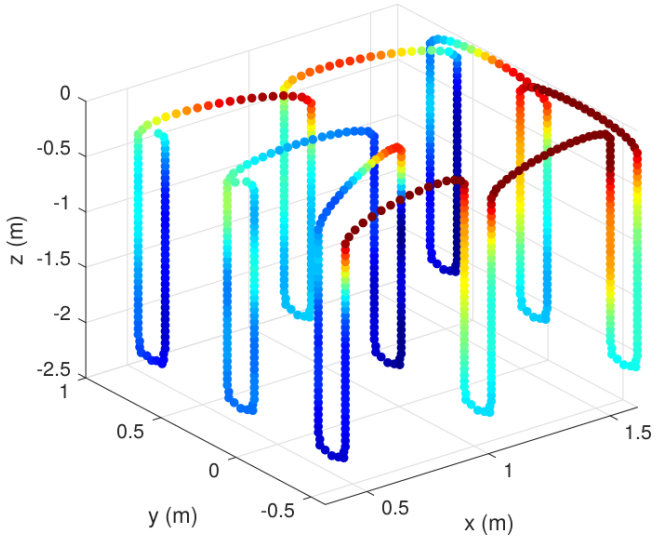
INACTIF

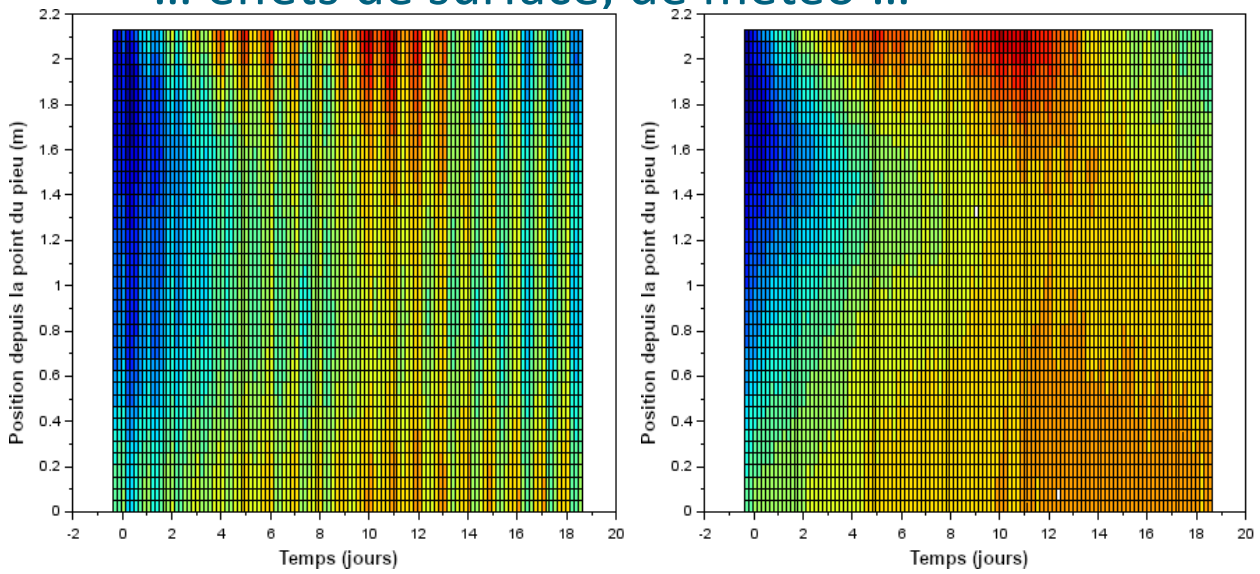
Understanding today.
Improving tomorrow.

Premiers résultats

- ✓ Interactions entre pieux
  - Fibre Optique dans les pieux !
  - Scénarios de chauffage modulables
- ✓ Activation quotidienne de la PAC
  - Variations quotidiennes pieux actifs
  - Variations « lissées » des pieux inactifs
  - … effets de surface, de météo …







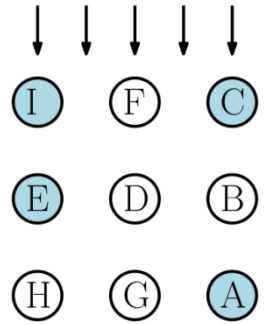
ACTIF

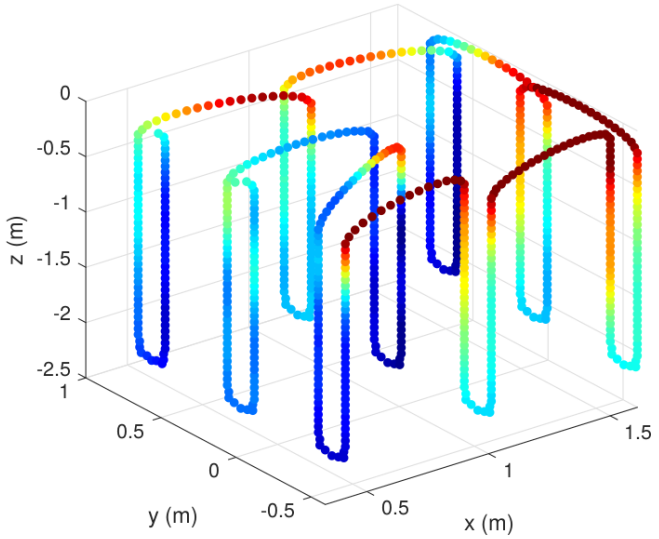
INACTIF

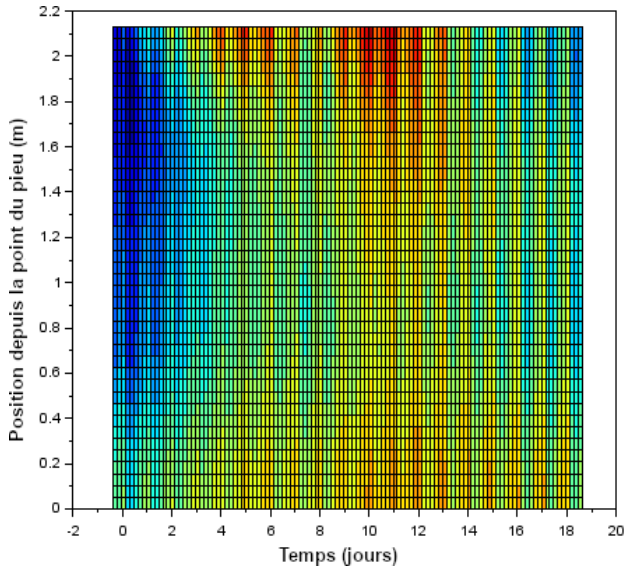
Understanding today.
Improving tomorrow.

Premiers résultats

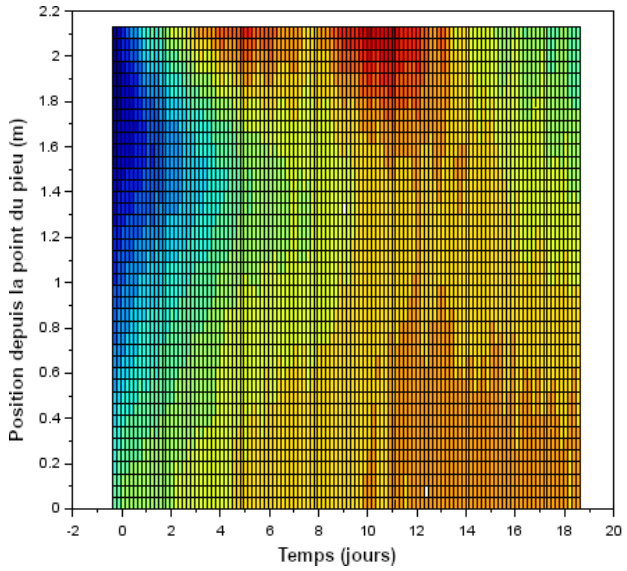
- ✓ Interactions entre pieux
  - Fibre Optique dans les pieux !
  - Scénarios de chauffage modulables
- ✓ Activation quotidienne de la PAC
  - Variations quotidiennes pieux actifs
  - Variations « lissées » des pieux inactifs
  - … effets de surface, de météo …
- ✓ Analyse des interactions



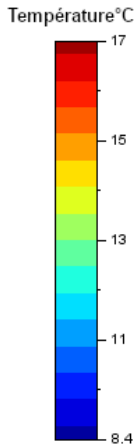


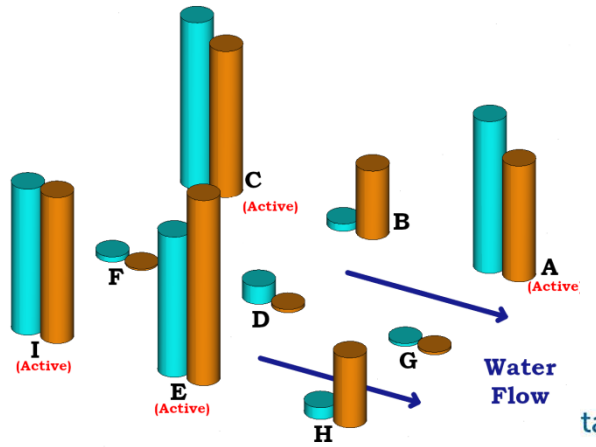


ACTIF



INACTIF

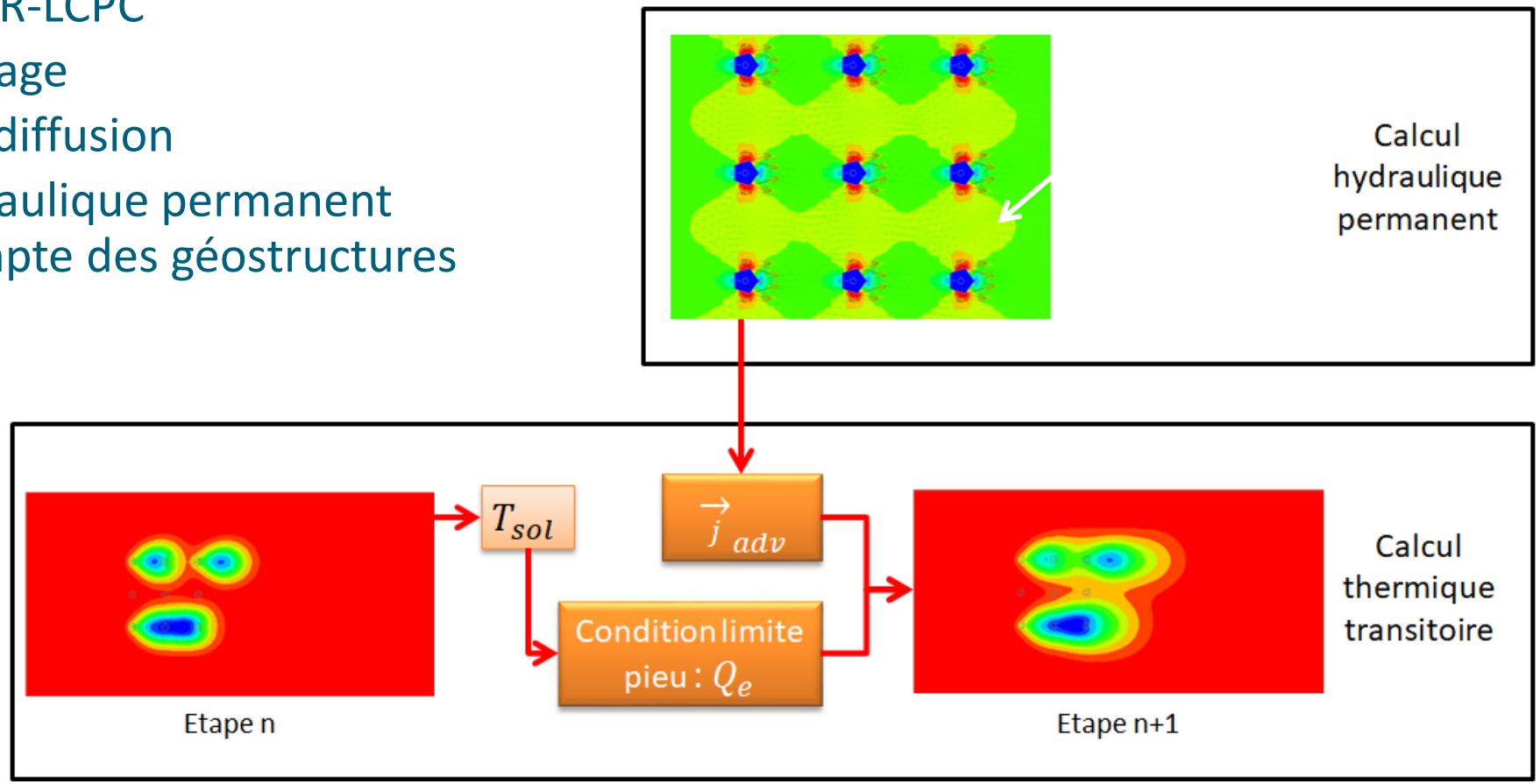




tanding today.
Improving tomorrow.

Modélisation numérique

- ✓ Logiciel CESAR-LCPC
  - Semi couplage
  - Advection-diffusion
  - Calcul hydraulique permanent tenant compte des géostructures



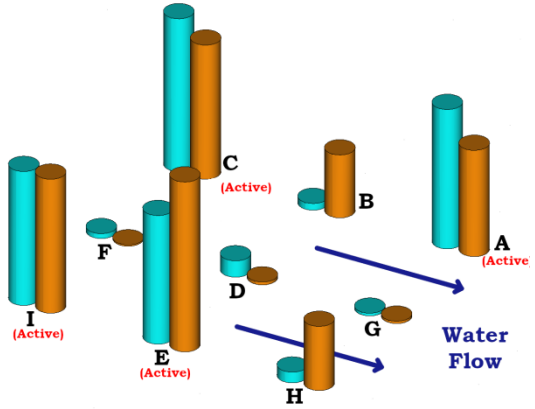
ACTIF

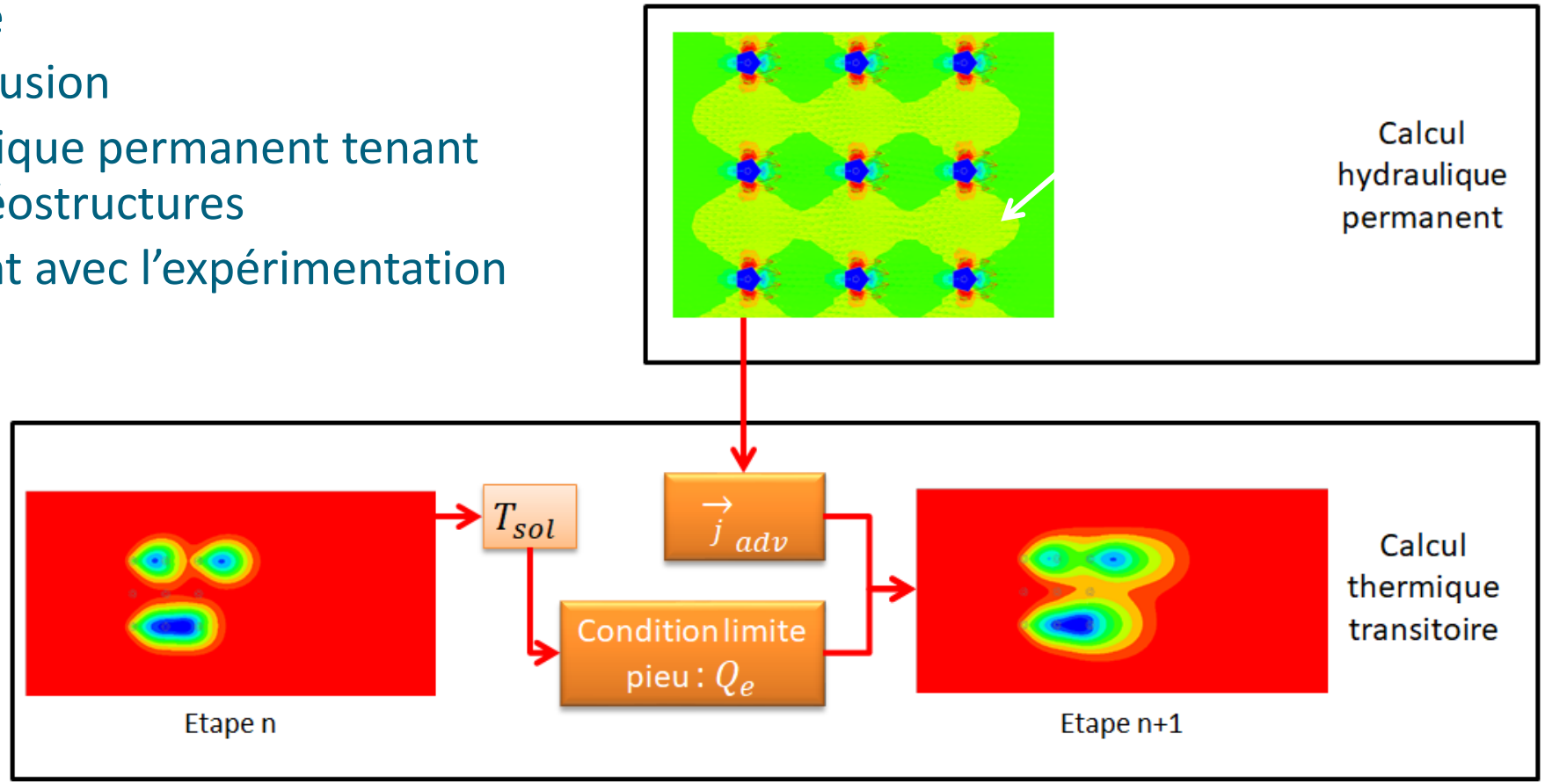
INACTIF

Understanding today.
Improving tomorrow.

Modélisation numérique

- ✓ Logiciel CESAR-LCPC
  - Semi couplage
  - Advection-diffusion
  - Calcul hydraulique permanent tenant compte des géostructures
- ✓ Modèle cohérent avec l'expérimentation





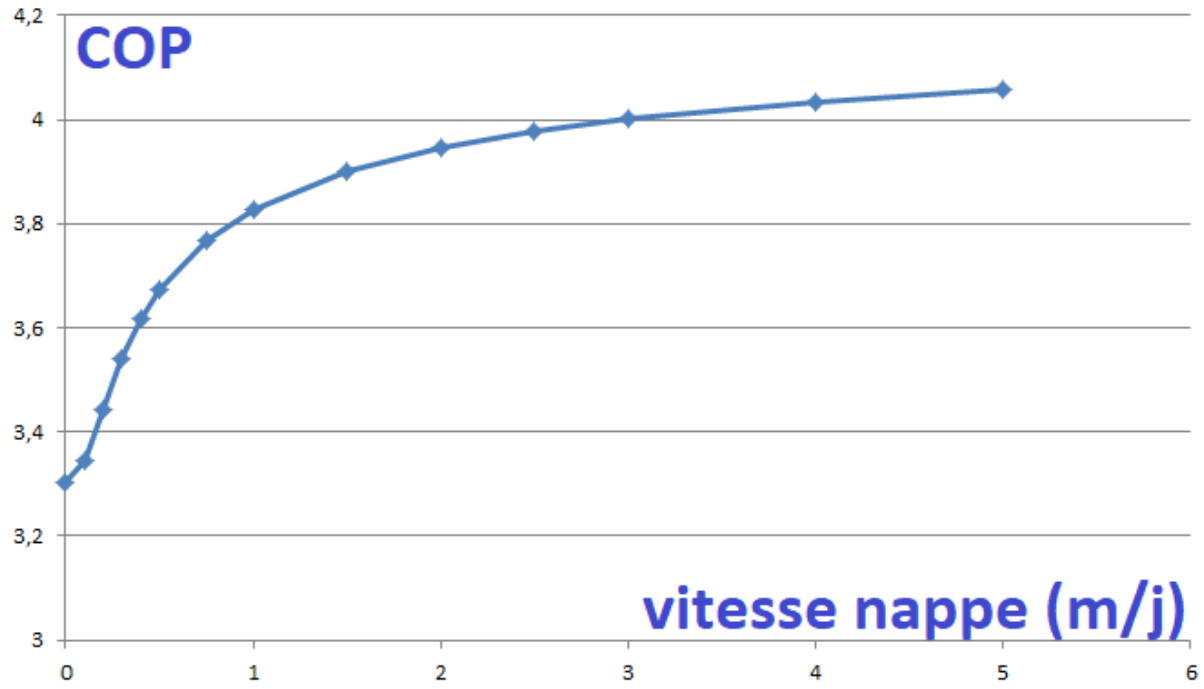
ACTIF

INACTIF

Understanding today.
Improving tomorrow.

Efficacité énergétique ?

- ✓ Interface Python simulant une PAC
  - COP = Qc/W
  - Qe dépend de la température du sol
  - Tsol évolue en fonction de Qe
- ✓ Couplage avec modèle CESAR-LCPC
  - Evaluation du COP en fonction des conditions ?
- ✓ La présence d'écoulement augmente le COP
  - 1 W d'électricité pour 3 W « gratuits »



ACTIF

INACTIF

Understanding today.
Improving tomorrow.

Perspectives

- ✓ Etudier des ouvrages plus complexes
- ✓ Faire le bilan des méthodes de calcul
- ✓ Penser l'intégration à l'échelle de la ville
- ✓ Penser l'intégration dans le mix énergétique
- ✓ Evaluer l'impact des incertitudes liées aux écoulements
- ✓ …
- ✓ Montage d'un projet National IREX (Prométhée)

ACTIF

INACTIF

Understanding today.
Improving tomorrow.

Merci pour votre attention

Antea Group

Understanding today.
Improving tomorrow.

www.anteagroup.fr