

# Usage intensif de la cogénération (de chaleur avec électricité) pour le chauffage et ECS (habitat- tertiaire) Grâce à un **Stockage Saisonnier de Chaleur (SSC)**

Un usage potentiel très important à l'échelle de 100 à 200 TWh/an  
Si on sait Résoudre le pb de la forte saisonnalité de la demande avec un SSC

**LE SSC: Etude** faite par un groupe d'ingénieurs et physicien

J-L. Belmont, M Fruneau, M. Lieuvin, JC Ravel et JMLx

Avec le concours de S Xin, R Knikker dui Cethyl de Lyon et support du programme énergie du CNRS

## Les principaux apports de cette étude :

- Expliciter, quantifier les contraintes liées à la forte saisonnalité de la demande de chaleur
- Une conception d'ensemble **avec SSC** adaptée à un usage intensif de Chaleur Cogénérée
- **Une simulation convaincante de la thermique associée à un SSC dans le sol \*\***  
**\*\*avec résultats très encourageants**

**Ce que ce travail n'a fait qu'aborder**

→ La technologie associée à un SSC dans le sol

→ L'étude précise des coûts.

# La chaleur de cogénération *(nucléaire ou autre)*

→ **Chauffage** et **ECS** (Eau Chaude Sanitaire) pour habitat et tertiaire  
*Ordres de grandeur et contraintes d'utilisation*

## La cogénération avec un réacteur nucléaire

Un réacteur Nucléaire de 1300 MW-élec peut fournir 1300 MW-élec sur 10,5 mois

Ou

800 MW-élec + 3000 MW-th à 135°C →  $23,1 \cdot 10^6$  MWh-th/an → Chal-cog pour 5 Millions hab

*H Safa. Electrical Power and Energy Systems 2012*

*½ des besoins nationaux en chaleur avec 9 Réacteurs N1300 à production constante sur l'année  
avec baisse de 6% de prod élect. Nationale répartie tout au long de l'année*

## Transport et distribution

Nécessité d'un caloduc transportant la chaleur sur site de consommation sur typiquement 100 km

Nécessité d'un réseau de chaleur sur site de consommation

pour la distribution de chaleur aux immeubles consommateurs

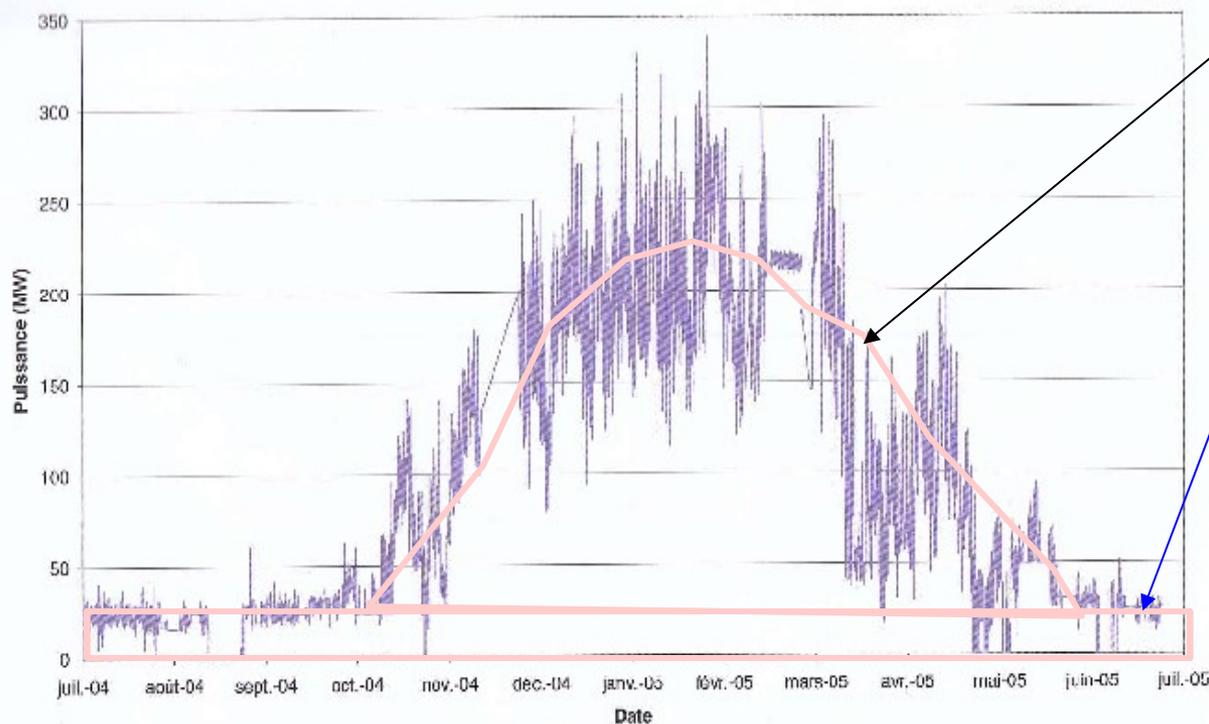
## Une mise à disposition de chaleur qui satisfait la demande

fortement **variable** et **maximale** en hiver *quand la demande d'électricité est la plus élevée*

Comment un Stockage Saisonnier de Chaleur peut «à un coût raisonnable» permettre l'adaptation d'une production constante de chaleur à une demande fortement saisonnière.

# Le profil de la demande de chaleur et ses contraintes

Puissance fournie au réseau sur l'ensemble de la saison de chauffe 2004-2005



Une composante Chauffage  
courbe en cloche  
étalée sur 6,5 mois  
**environ 75% de Etot**

Une composante continue  
→ fourniture d'ECS  
**15 à 25 % de Etot**

De très fortes fluctuations de la  
demande de chauffage

au niveau des jours de la semaine,  
au niveau des heures de la journée

Nécessité de garder une composante de  
production de chaleur à réaction rapide

**30% de Etot** (% à ajuster)  
fournie par des chaudières locales

et donc **70%** de cogé

Pour satisfaire une telle demande, **nous avons choisi** *(pour l'étude!)*

→ 30 % de la chaleur **fournie par des chaudières**  
*en période de chauffe et satisfaisant les variations rapides de la demande*

→ 70 % de la chaleur fournie par **cogénération**  
**à puissance Cte sur l'année**

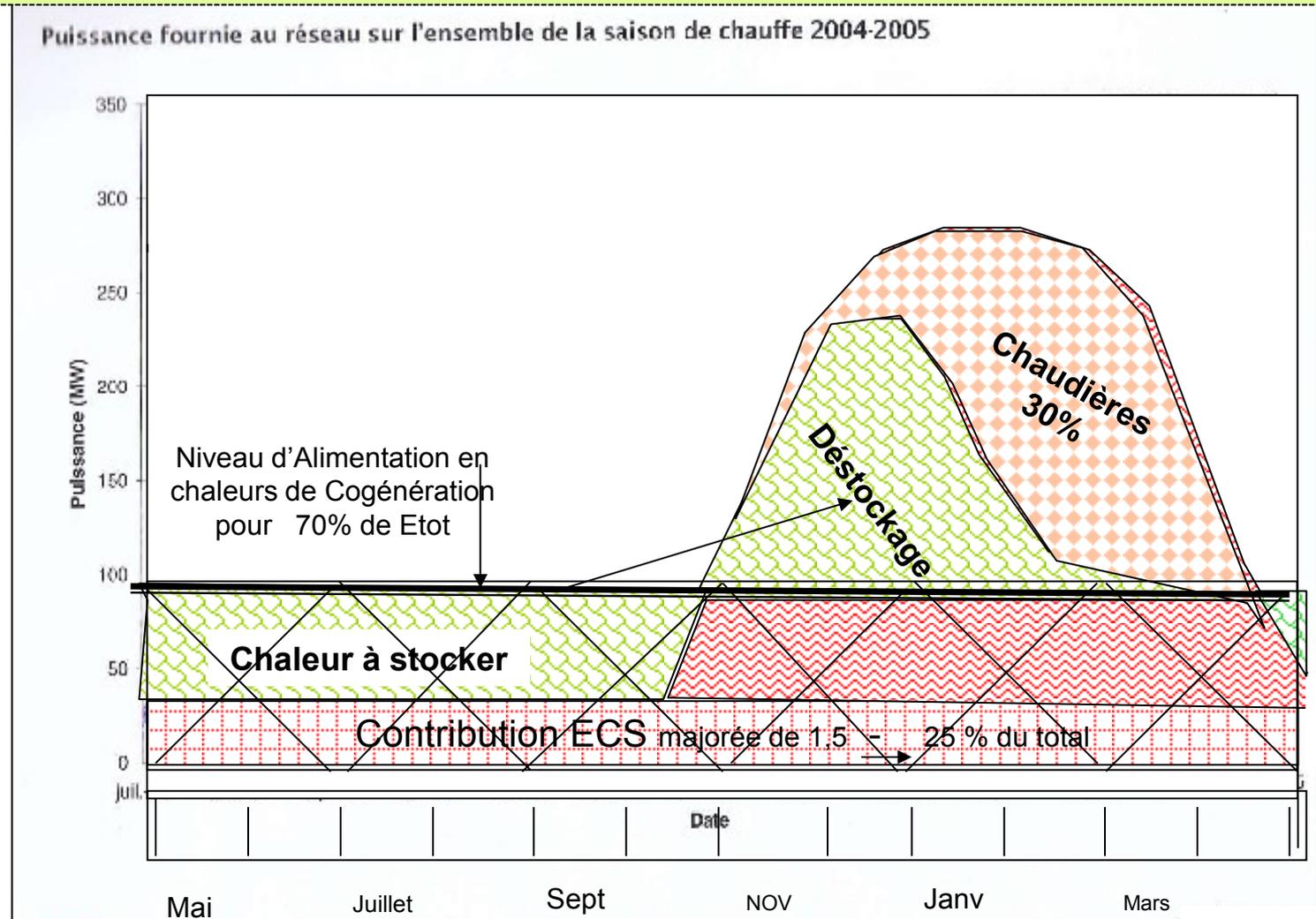
*Les raisons du choix  $P = Cte$  pour la chaleur de cogénération:*

- *Optimisation du fonctionnement du réacteur en mode de cogénération tte l'année*
- *Optimisation des performances du caloduc qui fonctionne à débit constant*
- *Répartition sur toute l'année de la baisse de production électrique*

**La conséquence du choix «Cogénération, à puissance Cte» :**  
**→ Nécessité d'un Stockage Saisonnier de Chaleur**

*qui «marche ! » et qui va être décrit maintenant*

# Illustration de la fonction SSC et de l'usage de la chaleur fournie par la cogénération et par les chaudières au cours de l'année.



La capacité de stockage (*très aisée à déterminer*) Ici 20% de la consommation annuelle totale dépend du profil de la consommation annuelle et de la part fournie par les chaudières.

*Déstockage le plus rapide possible pour avoir 0 MWh de chaleur en stock à la fin de saison de chauffe.*

Pour se rendre compte des pb à résoudre: **On dimensionne** une installation  
pour 500 000 habitants usagers de chaleur Cogénérée pour 70% des besoins

- Chaleur totale consommée: 3,17 E6 MWh/an **\*\***(base France: 412TWh/an)  
**\*\*** *pr 500 000 Habitants* (Chaleur Chauffage + ECS pour habitat et tertiaire)
  - Chaleur cogénérée 70 % : **2,22 10<sup>6</sup> MWh/an** à **Puissance Constante**
  - Chaleur de Chaudières 30 % : **0,95 10<sup>6</sup> MWh/an** *pour réponse aux fluctuations rapides*

- Transport de chaleur cog. ***P= 250 MW sur 12 mois***  
*Sur 100 Km 2 tubes de  $\phi \neq 1m$   $V_{(veau)} = 1m/s$  pertes < 5%*

- Chaleur à Stocker ***sur 5 mois*** : 20 %\*Etot → **0,634 10<sup>6</sup> MWh/an**  
→ ***≠ 10 Millions de M3 d'eau\*\**** ***ou*** ***≠ 20 Millions de m3 \*\* de sol (Granit)***

**\*\***Températures ***T<sub>Chaud</sub> : 135°C*** ***T<sub>Retour</sub> : 50°C***  
***≠ 0,07 MWh utilisable / m<sup>3</sup> d'eau*** ***ou*** ***≠ 0,03MWh utilisable / m<sup>3</sup> de sol***

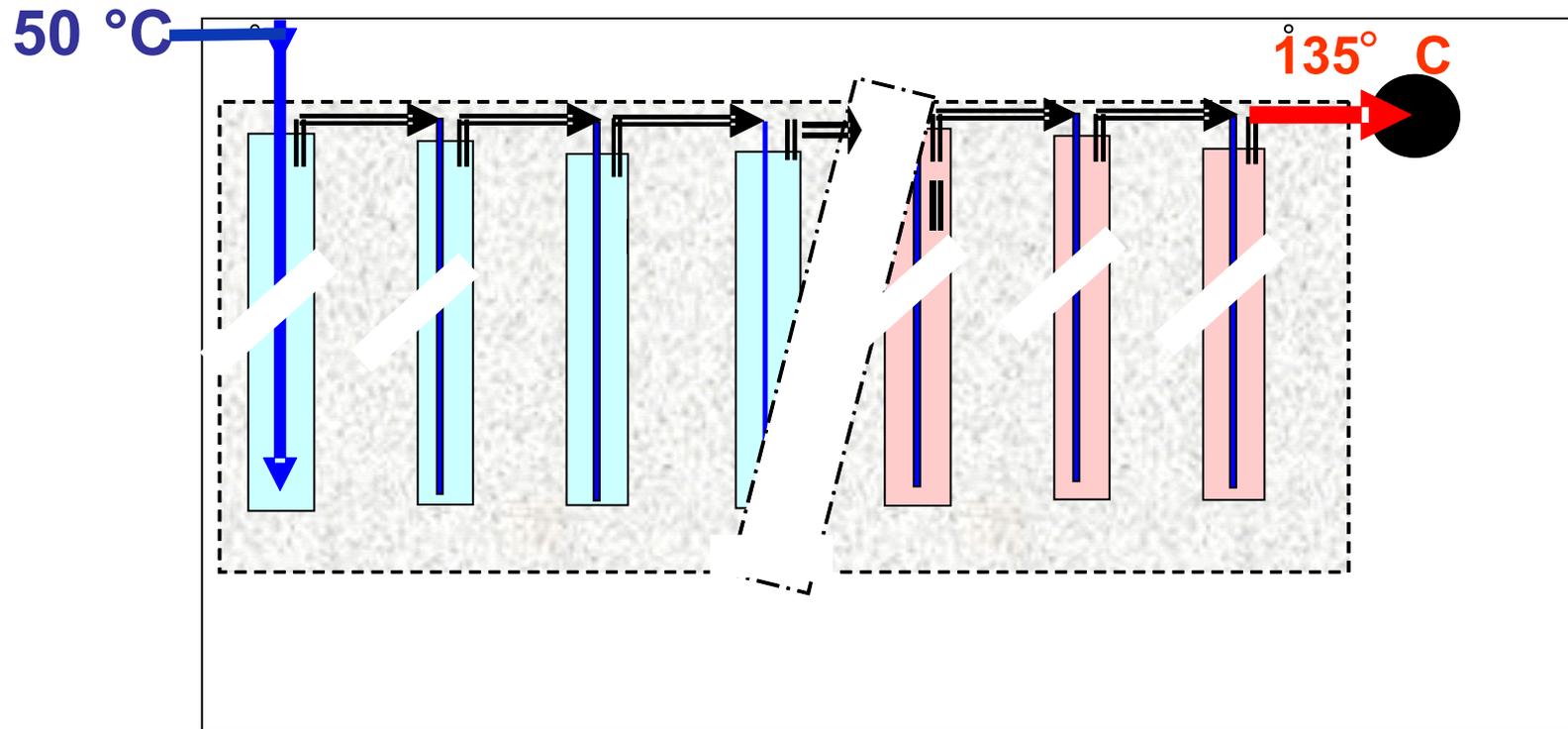
Réseau de Chaleur pour distribution aux 500 000 hab

# Principe utilisé pour le stockage - déstockage de chaleur dans le sol

Le liquide caloporteur circule dans une série de 10 à 40 puits pendant les 5 mois de déstockage

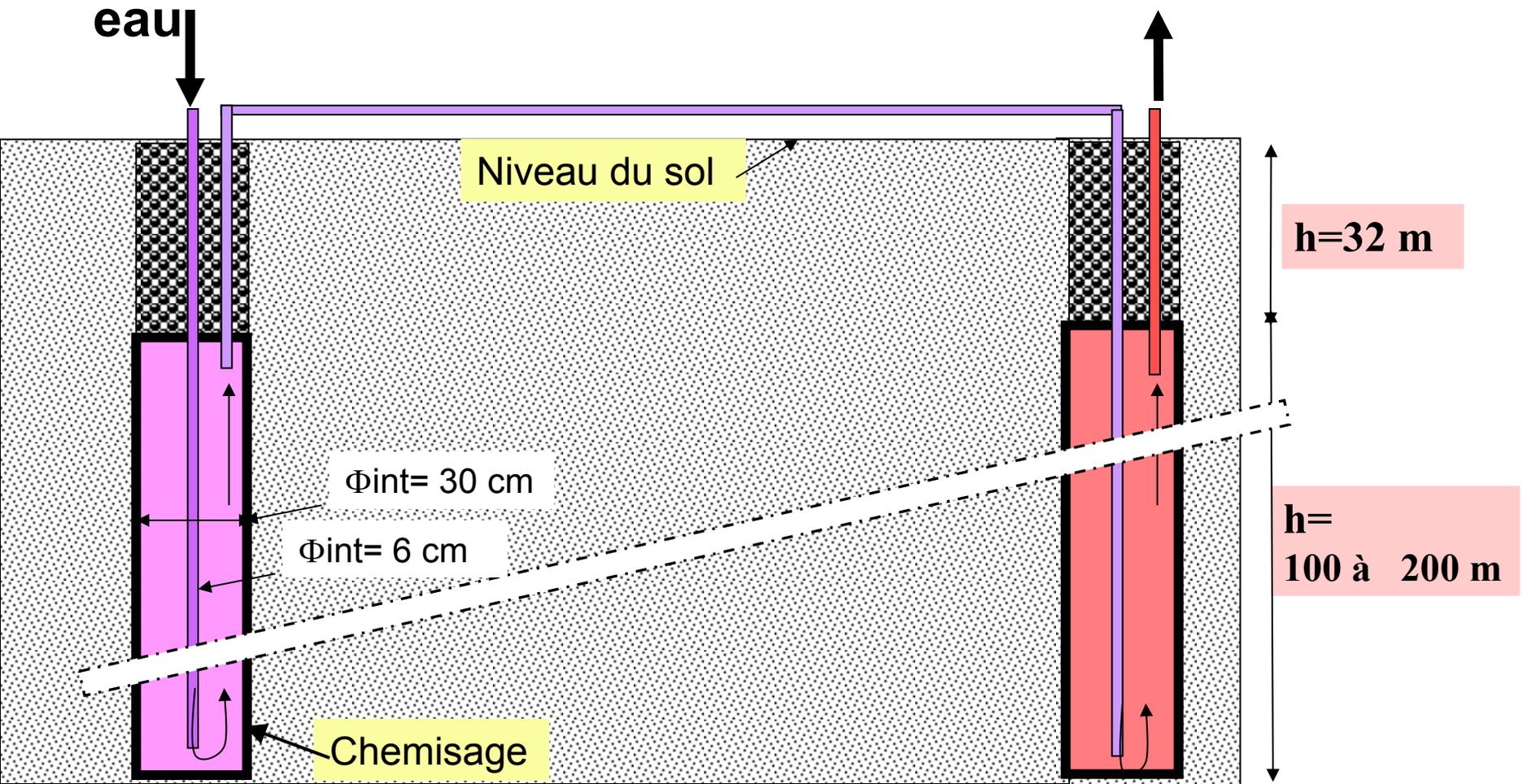
## Déstockage de chaleur

Circulation lente du fluide caloporteur dans 20 à 40 puits de  $h=100\text{m}$  en série



Pour le stockage de chaleur, l'eau à  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$  est injectée à droite au sommet du puits et circule dans le sens inverse des flèches

**Coupe de 2 puits successifs d'une série de 20 à 40 puits  
et Circulation du caloporteur (Eau) en phase de déstockage**

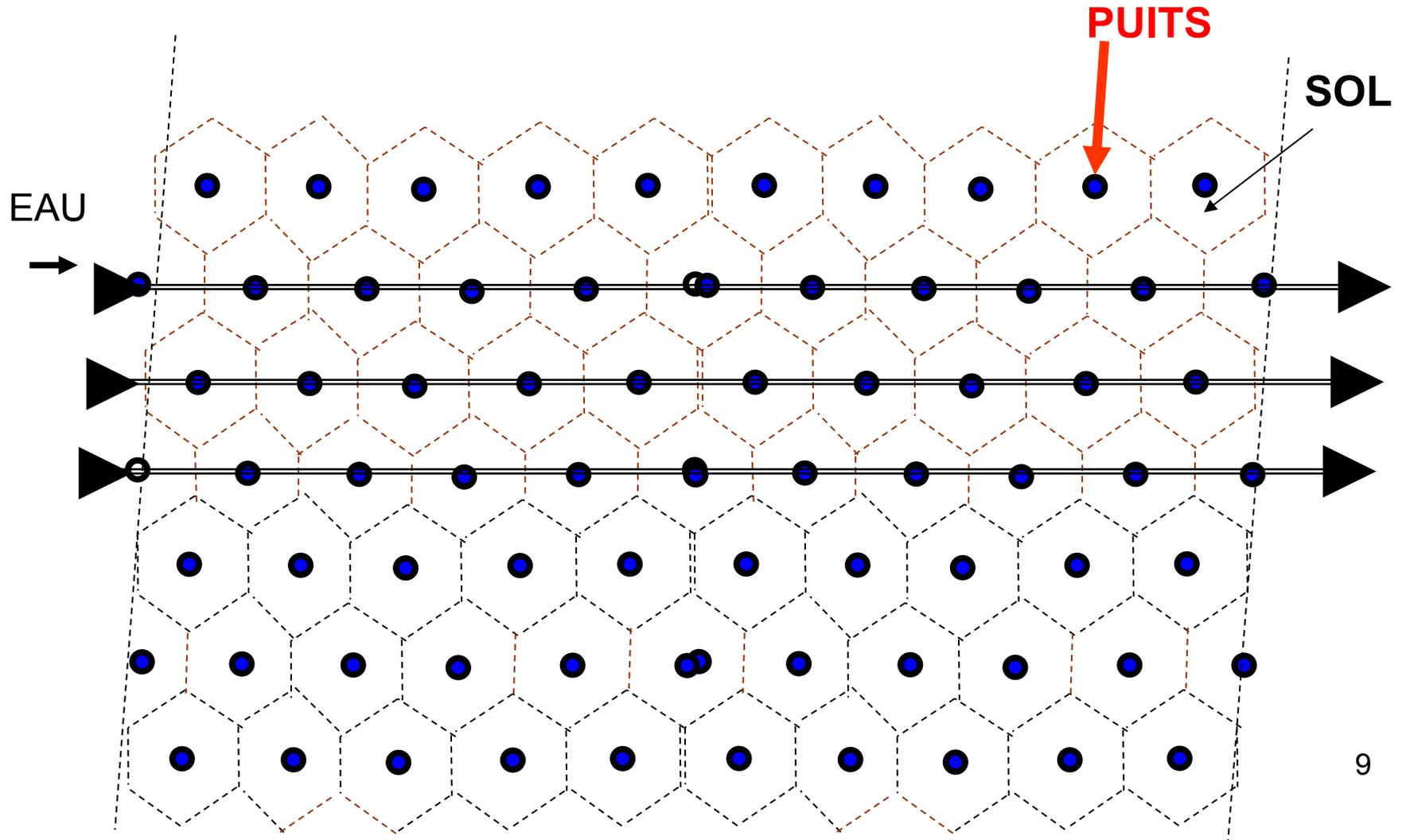


Série de 40 puits ( $h_{\text{tot}} = 132 \text{ m}$ ) ;  $\Phi = 0,275 \text{ m}$  ; **entre-axes 3.30 m à 4,5m**  
hauteur proposée du stockage : 100 m enfoui à -30m

# Vue de dessus du volume de stockage

Forage de puits profonds alignés, disposés en quinconce

Chaque puits stocke la chaleur autour de lui,  
dans un volume limité par un **hexagone**



# La thermique du SSC : étude par simulation numérique

## Conditions et approximations pour la simulation

- Une série de 40 puits de  $h= 100\text{m}$  a été considérée comme un seul tube de 4000 m associé à un cylindre de granit de 3,3 de diamètre
- Les échanges thermiques entre tube central et reste du puits ont été négligés
- Et pas de transfert de chaleur entre les zones de sol associées à chaque puits
  - avec différents valeurs pour
    - Le diamètre des puits de 200 à 500 mm
    - la distance entraxe entre puits d'un réseau hexagonal de 2 à 3,5 m , 5 m

## Le but de cette étude par simulation:

- visualiser et **comprendre la progression du stockage** au cours des 5 mois dédiés au stockage  
**quantifier le remplissage du stockage** par rapport à sa capacité théorique
- Voir comment se fait le **déstockage dit « accéléré »**, et le pourcentage de l'énergie récupérée
- observer la **reproductibilité des cycles de stockage déstockage**
- In fine → **Choix de la configuration de référence**

# REPLISSAGE DE 40 puits : DERNIER MOIS

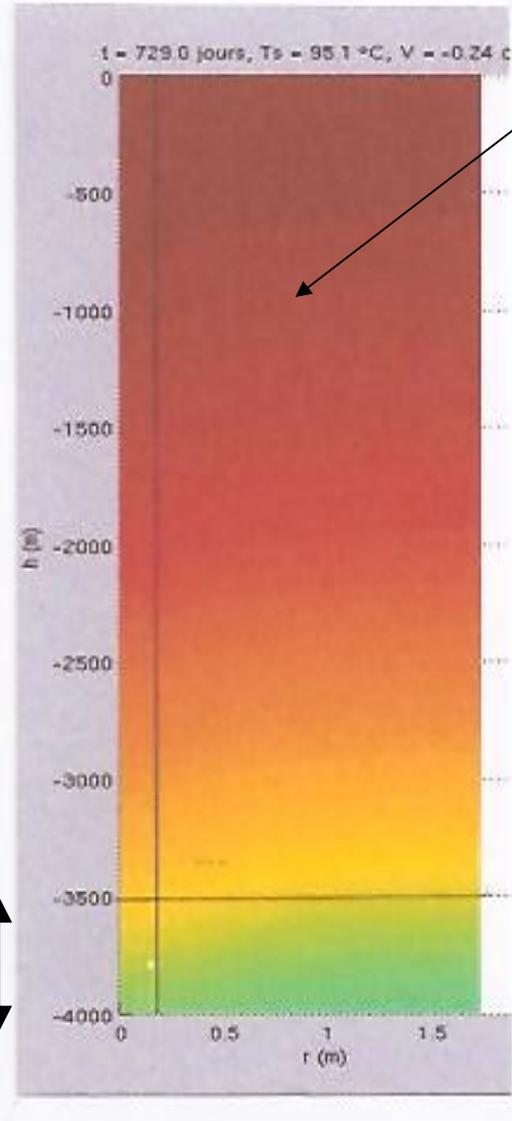
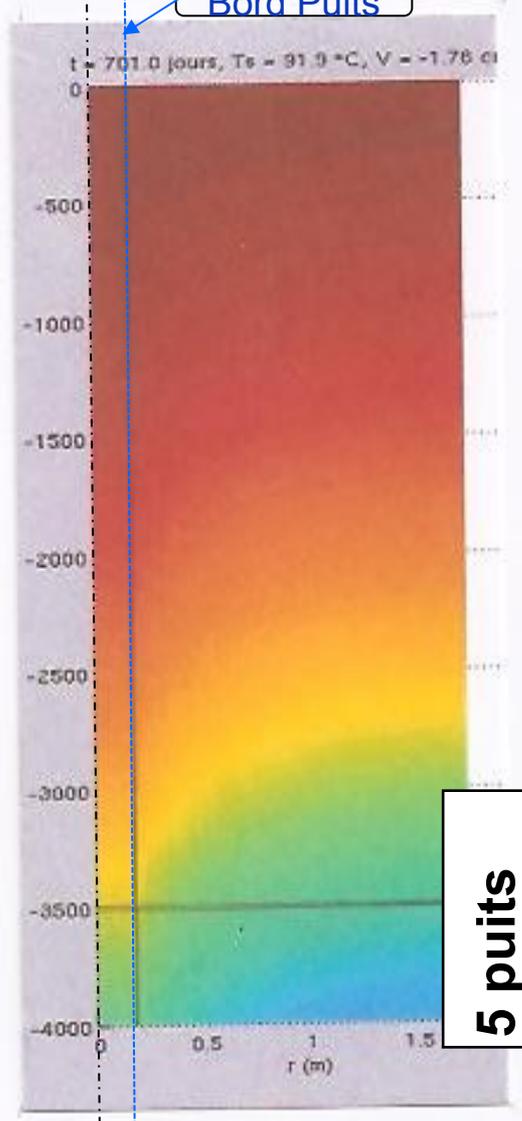
Axe puits

dernier à se refroidir  
1<sup>er</sup> à se réchauffer

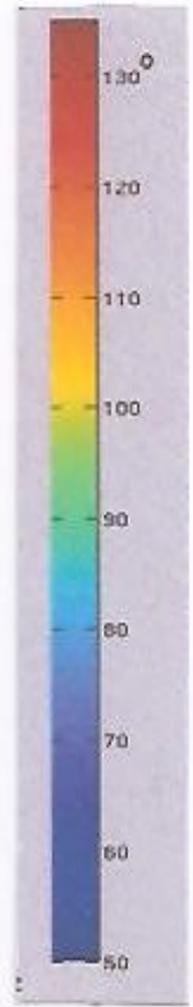
1<sup>er</sup> à se refroidir  
dernier à se réchauffer

Série de puits

Bord Puits



Remplissage à 70-80% de la capacité théorique



# Énergie en stock ( en KWh) dans 40 Puits exploités en série sur 2 ans

Capacité théorique

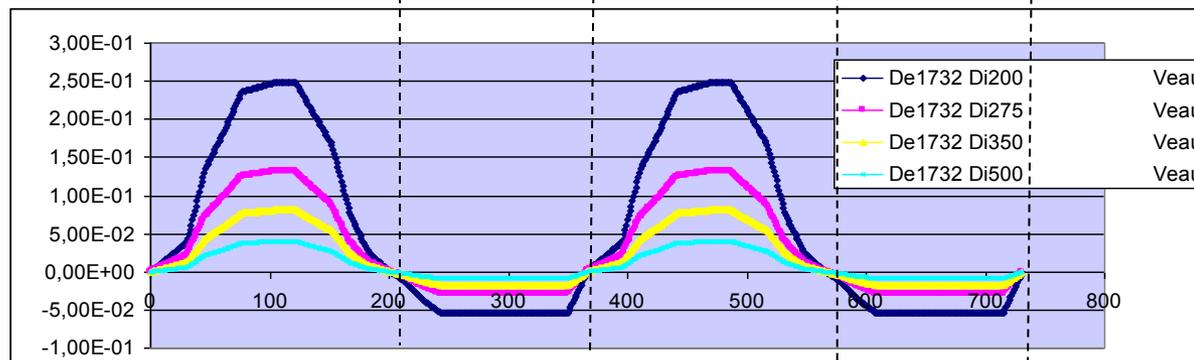
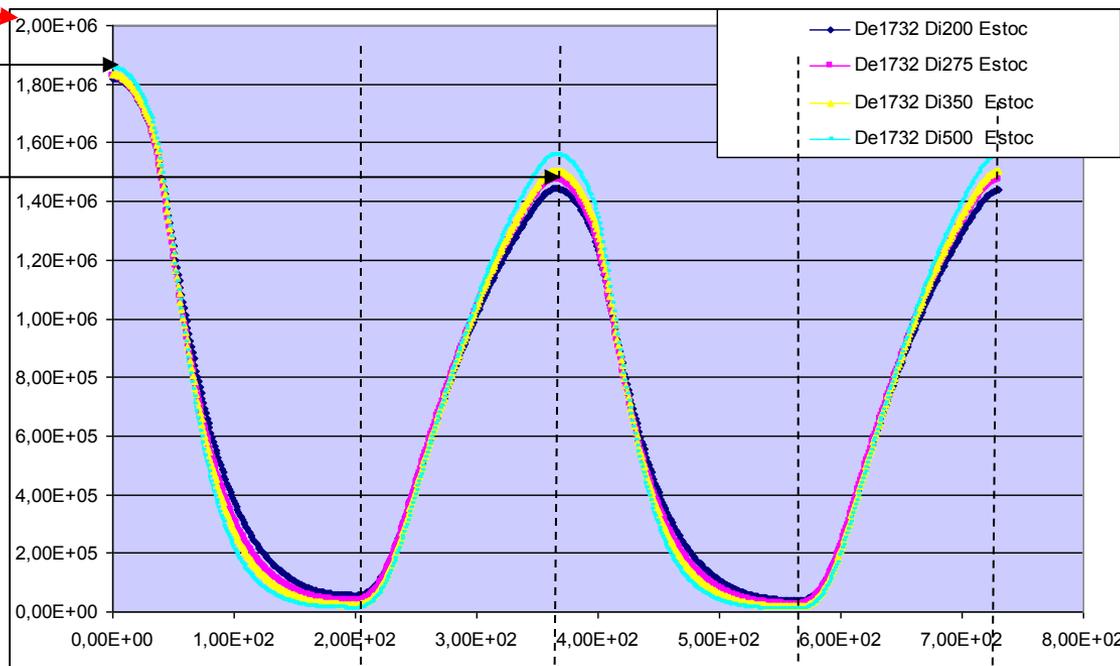
80% Capacité théorique

## Particularité importante

Accélérer autant que possible le déstockage de sorte que le puits et son environnement de 10 M2 de sol soit refroidi rapidement

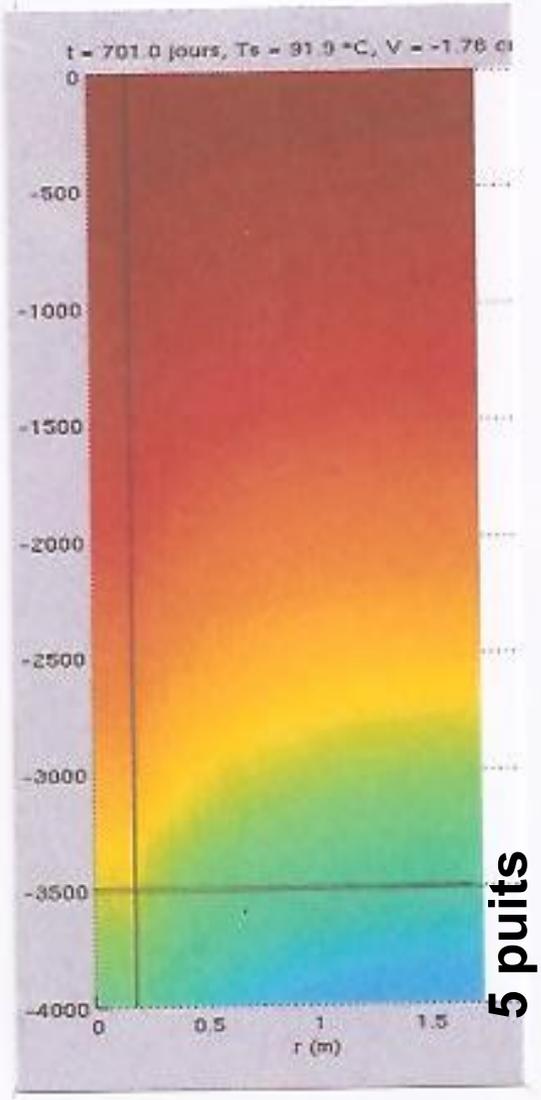
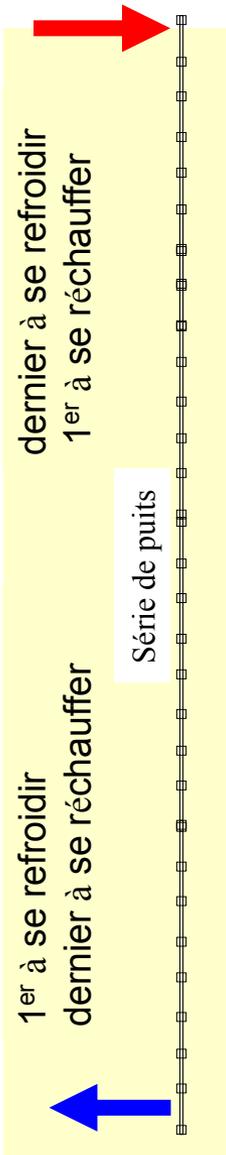
L'eau ne sort à 135°C que pendant 100j mais on réchauffe cette eau avec les Chaudières

Le profil de la vitesse d'extraction de chaleur est régulé par la demande de chaleur du RC

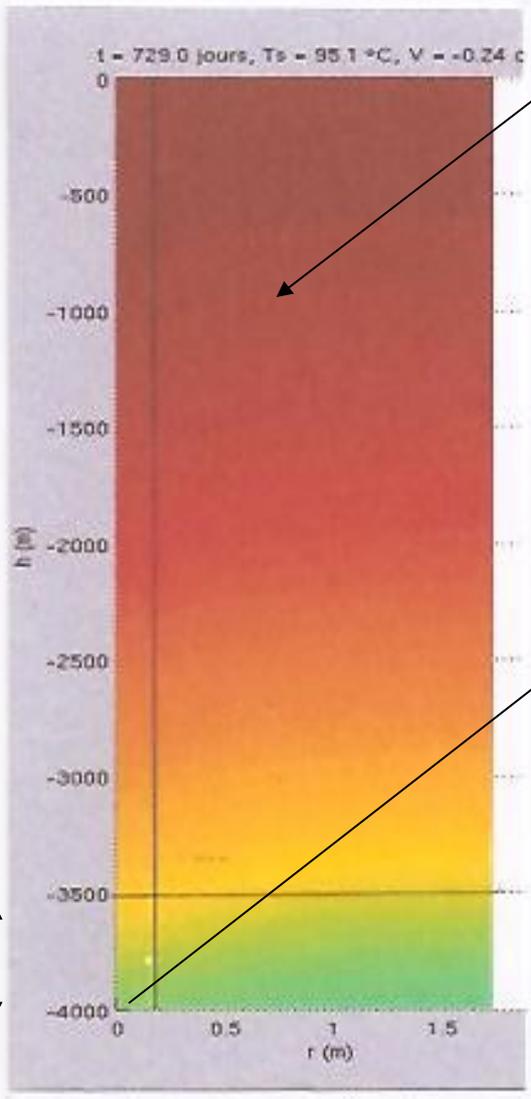


Vitesses de circulation de l'eau dans les puits en m/s

# REEMPLISSAGE DE 40 puits : DERNIER MOIS

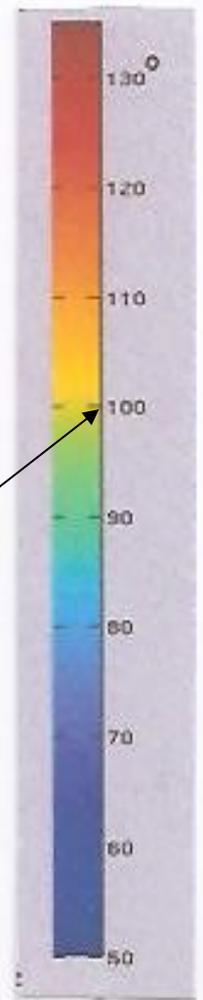


-1 mois



- 0 mois : fin  
stockage

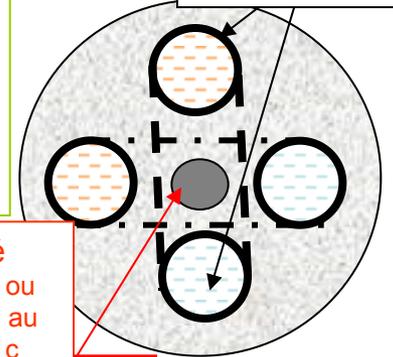
Remplissage à 70-80% de la capacité théorique



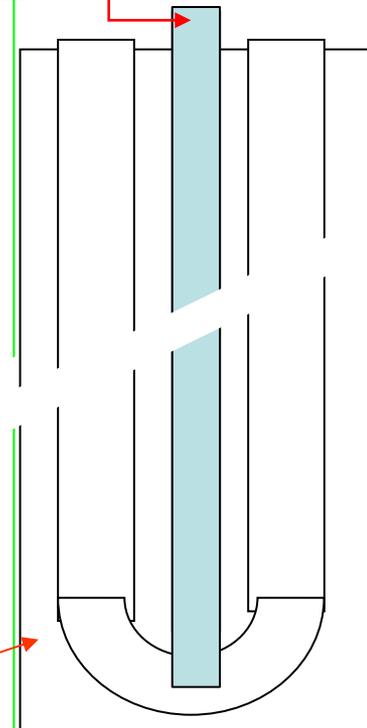
Echelle des T°

# Point sur la technologie du stockage saisonnier de chaleur: Elle reste à définir et à développer de façon détaillée

Tube en U  
Vue de dessus



Tube isolé  
Pour injection ou  
extraction eau au  
fond du puits c



béton conducteur

## • Technologies des puits à développer

L'idée de base serait de partir de la technologie de géothermie semi profonde  
CAD 2 tubes en U qui assurent l'échange entre eau et sol dans chaque puits.

**A développer:** des matériaux adaptés aux températures utilisées 50 à 135°C

## Reste à faire !!!

### -Travail de simulation à compléter

-Vérification expérimentale des caractéristiques thermiques avec assemblage de 7 Puits

- Conception dispositifs de forages, fabrication des éléments du puits et dispositifs de mise en place, circulation du fluide caloporteur, entretien, connexion entre puits etc

- Choix d'un schéma d'exploitation (Nb de puits en série), Systèmes de connexion entre puits, dispositifs de contrôle etc

- **Pour les différentes natures de sols, voir avec BRGM:** notamment sur le comment se prémunir des circulations d'eau au travers du volume de stockage (CETU)

• **Expérimenter un SSC couplé à un Réseau de chaleur proche d'une source de chaleur fatale telle qu'un incinérateur.**

# Conclusions sur la thermique du SSC

→ Le stockage est vidé complètement chaque année et les opérations de stockage dé-stockage sont alors reproductibles année après année.

→ point très important pour le fonctionnement pérenne du SSC

→ Le stockage est efficace

→ à 80 % de sa capacité nominale si entre-axe puits = 3,5 m → 18 000 puits h=100m- 0,5 E6 Hab

→ à 70 % de sa capacité nominale si entre-axe puits = 5 m → 10 000 puits h=100m 0,5 E6 Hab

Emprise au sol du SSC pour ½ million d'habitants : environ 20 ha

20 Ha = 443m x 443m = 0,4 m<sup>2</sup> /hab !

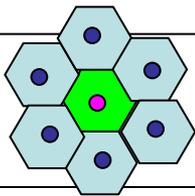
→ Le fait d'avoir 30 % de chaleur produite par des chaudières\*\*

nécessaire pour les pointes de consommation permet aussi le déstockage accéléré et complet

et cela est un élément déterminant de la faisabilité d'un SSC

\*\*Cette proportion de 30 % peut être revue avec la contrainte : X% stockage + Y% Chal. Chaudières = Cte ici 50 %

Les pertes thermiques par les parois du volume de stockage sont faibles (< 5%) après quelques années → si volume de Stockage Minimum de taille suffisante (50 000 Habitants) mais le SSC est mutualisable pour des agglomérations assez proches (R = 10 – 20 Km)



L'expérimentation pour vérifier les performances thermiques: simple à mettre en œuvre.

# Conclusion générale.

L'usage proposé de chaleurs de cogénération avec stockage saisonnier, ouvre la voie à un usage massif de chaleur pour l'ECS et le Chauffage du bâti et donc à une amélioration significative \*\*de l'efficacité énergétique nationale

**\*\* Gain potentiel de 200TWh,** et ce avec une perte de production électrique assez minime durant la période critique de l'hiver(env 4 à 5 TWh)

Nous estimons que pour cette application particulière  
(utilisation de chaleurs de cogé. pour la chaleur ECS et Chauffage )

- **que le SSC change la «donne»,**
- **que son fonctionnement parait robuste**
- **que sa faisabilité est «quasi acquise» au moins dans le granit compact**  
**et ce pour un coût de # 6 € /MWh-Chaleur-cog distribué: Inv.10000€/10 par puits stockant 30 à 60 MWh/puits**  
**Coût/ MWh stocké: 21€/ MWh stocké**
- **Que son coût est modéré eu égard à ses apports à l'exploitation de chaleur de cogénération**

Il reste évidemment à conduire un programme expérimental  
visant à qualifier et optimiser ce concept de stockage saisonnier et sa technologie

**Je vous remercie de votre invitation et de votre attention**

# Annexe 1

## Les prix pour un système alimentant une agglo de 500 000 habitants

Le prix d'achat de la chaleur de cogénération couvre l'amortissement des transformations nécessaires pour le prélèvement de chaleurs de cogé Evaluation 15 €/MWh (Rappel 6 MWh-ther ← → - 1MWh-élect)

Le prix du caloduc nécessaire de longueur de 100 Km pour 500 000 hab est estimé à **300 M€** soit 13,5 €/MWh Fat cog

Le prix du stockage saisonnier de chaleur de chaleur nécessaire pour 500 000 hab est estimé à **120 à 180 M€**

soit 4,9 € à 7,4 € / MWh -cog ou 6,15 +/- 1,25 € / MWh-cog

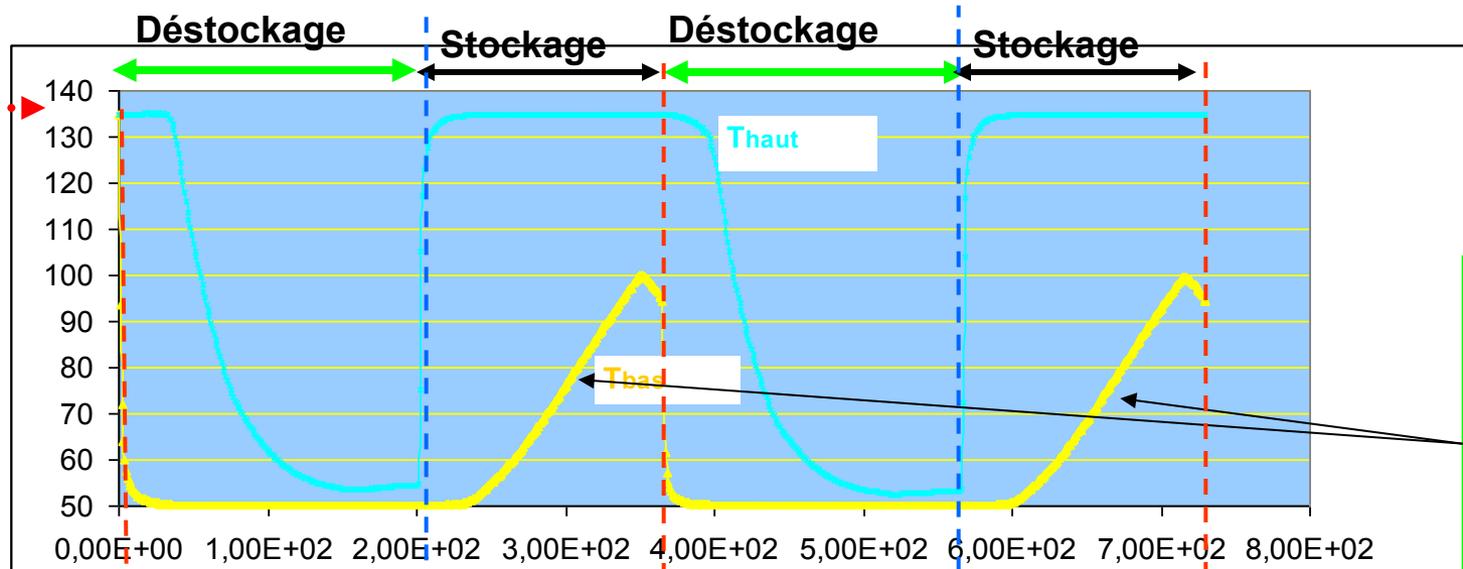
Le prix du réseau de chaleur nécessaire pour 500 000 hab est estimé à **450 M€** soit 14,2 €/MWh distribué

Le prix du MWh de chaleur fatale ou de cogénération rendu chez le consommateur est de **15 + 13,5 + 6,15 + 14,2 → 48,85 €/MWh E-Cog**

Le prix du MWh de chaleur issu des chaudières rendu chez le consommateur est de **60 € ss taxe carbone + 14,2 € → 74,2 €/ MWh de E-Chaud**

**Le prix moyen du MWh- chaleur de cogénération + chaleur issue de chaudières, rendu chez le consommateur est de  $48,85 * 70\% + 74,2 * 30\% → 56,45 € / MWh$**

# Températures en °C Entrée et sortie du fluide (eau) en phase de stockage et déstockage sur 2 cycles de 1 an

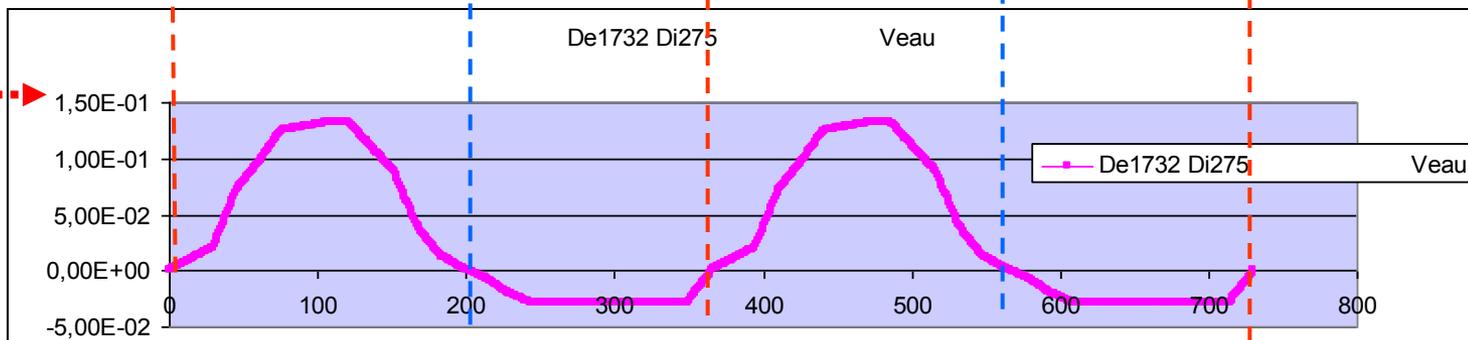


Une partie de la chaleur envoyée dans le stockage ressort des 40 Puits non encore complètement refroidie. Cela correspond à environ 20% de l'énergie stockée

*En augmentant la capacité de stockage de 20 %, cette proportion diminue à environ 8%*

## Question:

Peut-on recycler cette énergie?



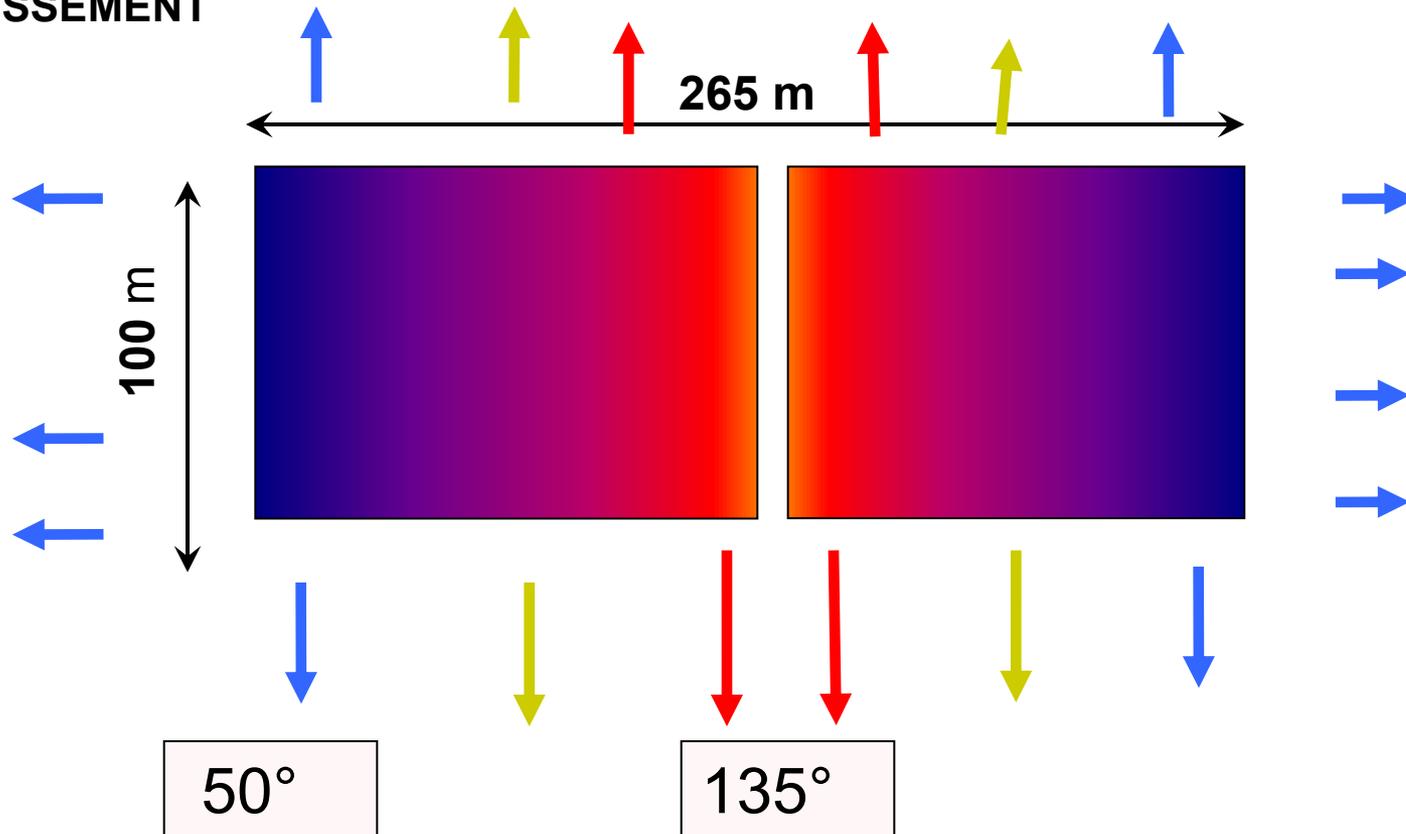
Vitesses de l'eau en m/s dans une série de puits en phase de stockage et déstockage

→ **Exemple : 2 800 puits : → 100 GWh stockés**

N.B. Avec 2 côtés à 135° **face à face** : stockage x 2,  
mais pertes x # 1,6 seulement

Vue de dessus de 2 ensembles de séries de 40 puits

En phase de  
REFROIDISSEMENT



**Pourquoi n'utilise-t-on pas ou presque pas,  
les sources de chaleurs fatales ou de cogénération ,  
en dépit de leur quasi gratuité ?**

**Y a-t-il de bonnes raisons ? Réponse oui !!!!**

De fait nous n'utilisons pas une source même gratuite de chaleur fatale pour le chauffage  
qui est à coté de notre ville, voir de notre immeuble!!

**Parce que pas sûre, pas rentable**, situation incommode pour le détenteur de cette source qui ne veut pas  
s'engager même avec une contrepartie financière qui sera très marginale car utilisée seulement pendant 3 mois de  
l'année et probablement pas à 100% . *Même chose ou presque pour la chaleur de cogénération*

*pour la chaleur de cogénération, il faut aussi*

- l'acheter à un bon prix pour fidéliser le fournisseur,
- l'utiliser pleinement à 100% du temps *car sinon*

*la perte de production d'électricité en hiver* associée à la production de chaleur est dissuasive.

# L'arithmétique d'une Transition énergétique optimisée

pour la chaleur de l'habitat et tertiaire via un usage intensif de chaleur de cogénération avec SSC  
Comparaison avec le scénario facteur 4

Supposons une **Opération A0- (Facteur 4) de transition énergétique par**

**Réduction par 4** de l'énergie consacrée au chauffage

Actuellement : 580 TWh de consommation annuelle de chaleur

dont 500TWh pour chauffage et 80TWh pour ECS

Résultat: une consommation pour le chauffage de 125 TWh (= 500/4 TWh) et de 80 TWh pour l'ECS

**Chaleurs conventionnelles consommées pour Chauffage et ECS**

après facteur 4 sur chauffage :  $125 + 80 = 205$  TWh

**Cout estimé :  
900 Mds d'€ ??**

## Opération A1 Transition optimisée

**Réduction de 1,5 sur chauffage par isolation + usage chaleurs fatale-cogé\*\***

**A1.1- Réduction par 1,5 de la consommation chauffage → 333 TWh ( chauffage) = 500 / 1,5**

**Consommation annuelle totale après facteur 1,5 = 333 (Chauff)+ 80 (ECS) = 413TWh**

**A1.2- Usage de chaleurs fatales+ cogé :  $0,7 * x 0,7 * x 413 = 202$  TWh sans coût énergétique notable**

**$0,7 * x 0,7 * :$  → 70 % de la population est équipée de RC, 70% de ses besoins sont fournies par les chaleurs Fat-Cog**

**- Chaleurs conventionnelles consommées  $413 - 202 = 211$  TWh**

**A1.1 Coût 100 Mds à 150 Mds € pour opération Réduction par 1,5 ?**

**A1.2 Coût 100 Mds à 150 Mds € pour opération usage chaleur cogénération**

**Cout estimé :  
200 à 300 Mds d'€**