

LE STOCKAGE SAISONNIER DE CHALEUR (SSC)

Une clé pour un usage massif de chaleurs fatales et de cogénération
pour le chauffage et l'ECS de l'habitat et du tertiaire.

Utilité et faisabilité d'un stockage saisonnier de chaleur pour permettre un chauffage urbain par récupération de chaleurs perdues ou issues de cogénérations et donc avec réduction significative d'émission de CO2

Groupe SECCO (Stockage de l'Energie Calorifique pour un Chauffage Optimisé)
J.L. Belmont; M. Fruneau; M. Lieuvin; J.M. Loiseaux; J.C. Ravel
Anciens ingénieurs et Professeur au LPSC Grenoble (IN2P3 CNRS et Université)

CETHIL (Centre d'Etudes Thermiques INSA Lyon)
R. Knikker ; X. Shie. Enseignants chercheurs

*Soutien PIE CNRS,
Participation au Groupe Travail Réseau de chaleur Académie des technologies
Groupe travail sur l'Énergie Société Française de Physique*

Abréviations utilisées

SSC = Stockage Saisonnier de Chaleur

RC = Réseau de Chaleur

ECS = Eau Chaude Sanitaire

EGES = Emissions de Gaz à effet de serre

LE STOCKAGE SAISONNIER DE CHALEUR (SSC)

Une clé pour un usage massif de chaleurs fatales et de cogénération dans le bâti.

Plan

★ Introduction: *un choix de quelques généralités*

- Besoins en énergie pour la chaleur du bâti: Chauffage-ECS habitat-tertiaire
- Ressources en énergie sans CO2 et leurs caractéristiques de production
- Notre démarche

★ I - Une utilisation rationnelle des énergies disponibles
Le SSC, «Une clé pour leur compétitivité économique»

★ II - SSC : Les solutions possibles et la solution retenue

★ III - Les caractéristiques thermiques d'un SSC optimisé

★ IV - Estimation du coût du MWh (sans CO2 distribué) avec SSC?

Conclusions

Introduction : *un choix de quelques généralités*

**Répartition des consommations
pour chauffage et ECS en France dans l'habitat et le tertiaire en E primaires.**

Source: Ministère DD Rep -10-10 pdf année 2010

Total des consommations en E Primaire 68,7 Mtep

Dont électricité spécifique : 12 Mtep pour les secteurs résidentiels et Tertiaire

Gaz	(chauffage+ECS)	→ 21,8 Mtep
Pétrole + Charb.	(chauffage+ECS)	→ 12,8 Mtep
Renouvelables	(chauffage+ECS)	→ 8,7 Mtep
Electricité	25,3 (dont chauffage+ECS)	→ <u>13 Mtep</u>

Total Chauffage et ECS (Résidentiel et Tertiaire) → 56,3 Mtep

dont environ 40 à 50 Mtep d'Energies Fossiles (70%)

→ Des émissions de CO2 importantes **mais pas seulement!!**

→ Un gâchis énergétique Temp. Flamme ~ 2000°C pour un usage à 80°C !!

→ Coût en devises: 25 Milliards de \$ / an à 80\$/ baril équivalent

→ Dépendance énergétique

Introduction : *un choix de quelques généralités*

Les idées de base pour réduire la consommation d'E fossiles

Utilisation chaleurs sans CO2 pour chauffage et ECS (Chaleurs de basse température)
en remplacement d'énergies fossiles et électricité-Effet joule

Ressources Chaleur sans CO2 utilisables pour Chauffage et ECS:
Notables mais pas extrêmement abondantes en France

- **Chaleurs fatales**: (Environ **10 à 15 Mtep** à bas cout d'utilisation)

Incinération de déchets

Débit constant

Industrie(Sidérurgie, Raffineries, Cimenteries)

Débit constant

- **Chaleurs de cogénération** avec électricité (H SAFA) *Débit constant ou presque*

*Ex: Environ **15 Mtep** pour 6% d'électricité produite en moins*

- E solaire (en opposition de phase avec la demande) cout? et Température?

- **Biomasse (10 à 15 Mtep?)** combustible stockable et prod. de chaleur modulable

Total =(10 + 15+ 15) Mtep = 40 Mtep sur 56 Mtep de consommation actuelle

Utiliser de façon optimale les énergies fatales ou de cogénération

pour un effet significatif au niveau national

C'est les utiliser à 100% du temps Il n'y en a pas tant que cela d'utilisables!!

en adaptant la production à la demande par un Stockage Saisonnier de Chaleur

Introduction : *un choix de quelques généralités*

Notre démarche:

- Concevoir un système qui fonctionne et l'optimiser
- Revisiter les techniques du SSC, son principe, sa physique
- Optimiser l'intégration du SSC dans le système
- ***Examiner les questions de coûts***
car la concurrence est puissante!

Pour utiliser ces sources de chaleur (Cogénération et chaleurs fatales)
Il ne faut pas qu'un stockage saisonnier!
Il faut aussi :

Des **caloducs** pour amener la chaleur (fatale ou de cogénération) au réseau de chaleur (sur zone de consommation)

Disposer d'un **réseau de chaleur** pour collecter la chaleur et la distribuer aux usagers

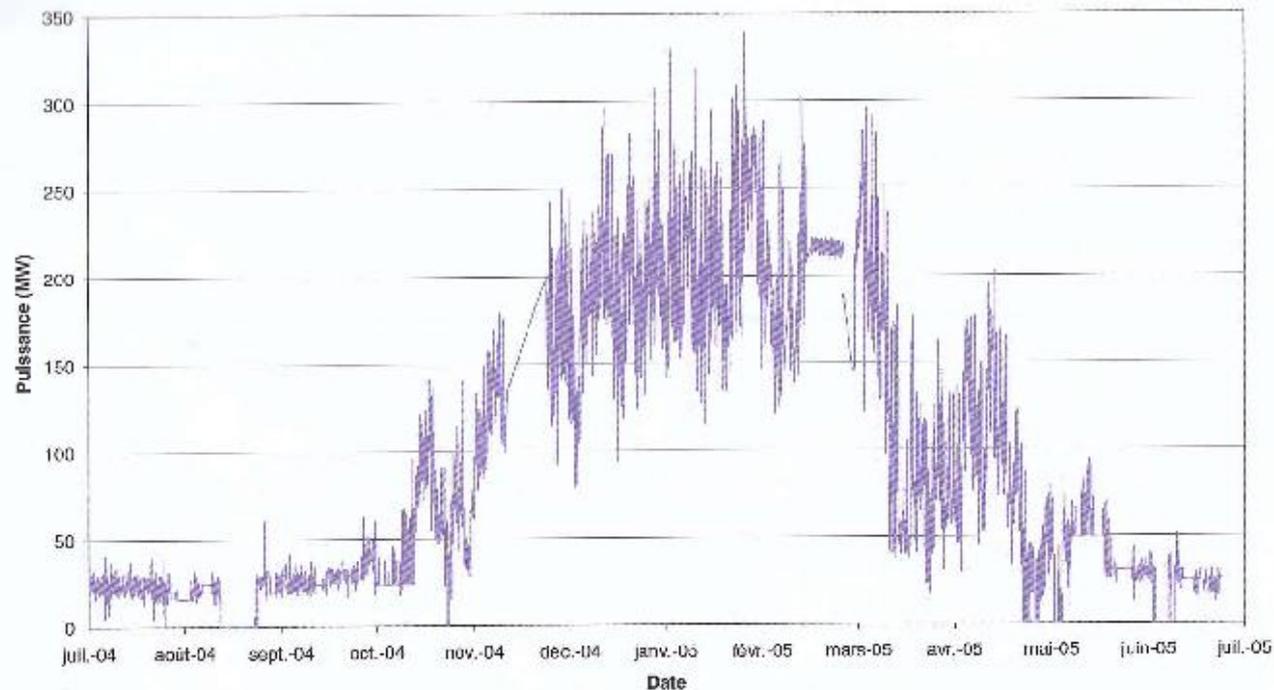
Disposer sur place de **chaleur produite par des chaudières à puissance très rapidement modulable** pour répondre aux fluctuations rapides de la demande en période de chauffe (voir plus loin)

Un stockage saisonnier qui va permettre
d'utiliser à 100% les chaleurs sans CO2 disponibles

Les caractéristiques de la demande de chaleur

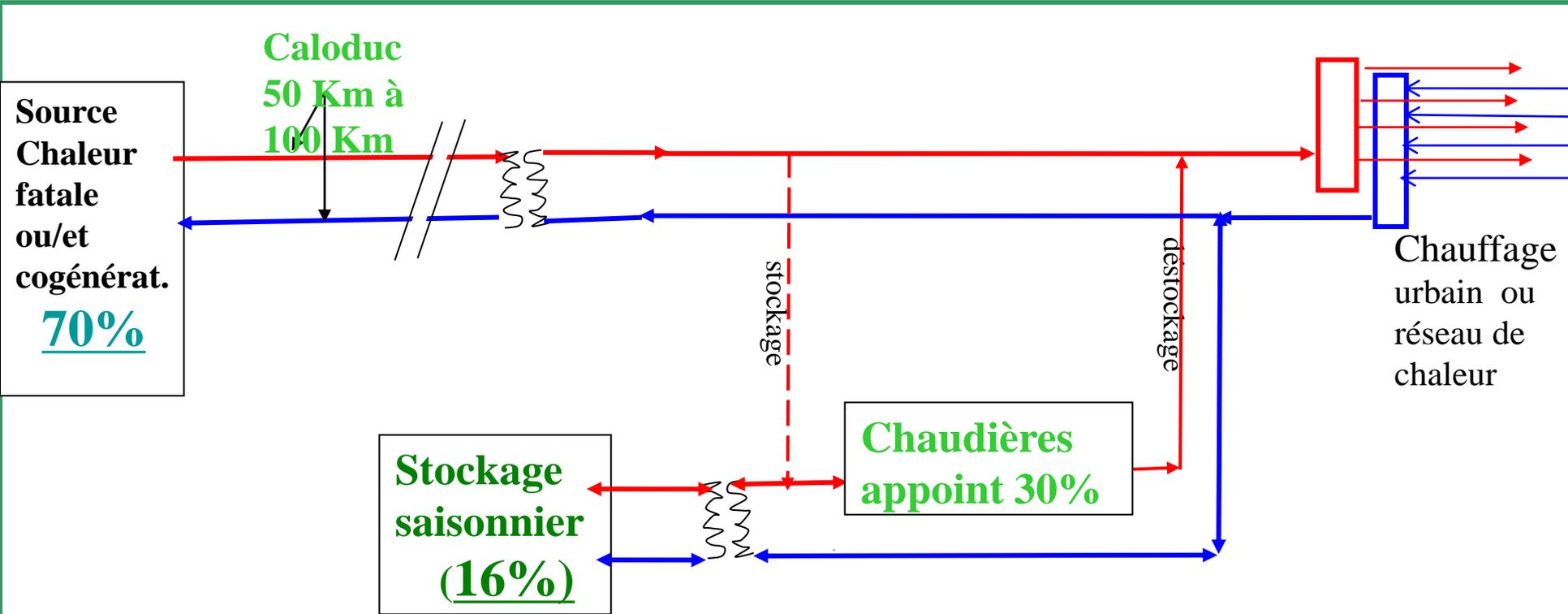
Très fortes fluctuations de la demande niveau heures du jour, jours de semaine, saison

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



I Concevoir un système qui fonctionne et l'optimiser

Schéma de principe d'une installation complète
utilisant des chaleurs fatales et un SSC



Une vue d'ensemble du système

Un tel système doit pouvoir répondre correctement
au profil de la demande constituée :

- d'une demande quasi constante pour l'ECS,
- et d'une demande pour le chauffage sur 6 à 7 mois avec de fortes fluctuations

Pouvoir faire face

- aux fortes fluctuations de la demande

± 30 à 40% à l'échelle de la journée ou semaine,

- à la sécurisation de la prod. de chaleur:

→ ce qui requiert de continuer à avoir des chaudières à Combustibles (E.Fossiles. et Biomasse) pour la modulation rapide d'une partie de la production en période de chauffe

I Concevoir un système qui fonctionne et l'optimiser

Choix des paramètres pertinents :

** en % de la production totale annuelle de chaleur

La demande de chaleur: *son profil sur une année*

-Part de Consommation cte sur l'année **(30%)** = ECS 10%+20% pertes ds Caloduc, RC, SSC

-Part de consommation annuelle pour le chauffage (en période de chauffe) **(70%)**

Les Sources de chaleur

Part des énergies sans EGES

à production constante sur l'année **70%**

Part de production . modulable à volonté en période de chauffe **30%**

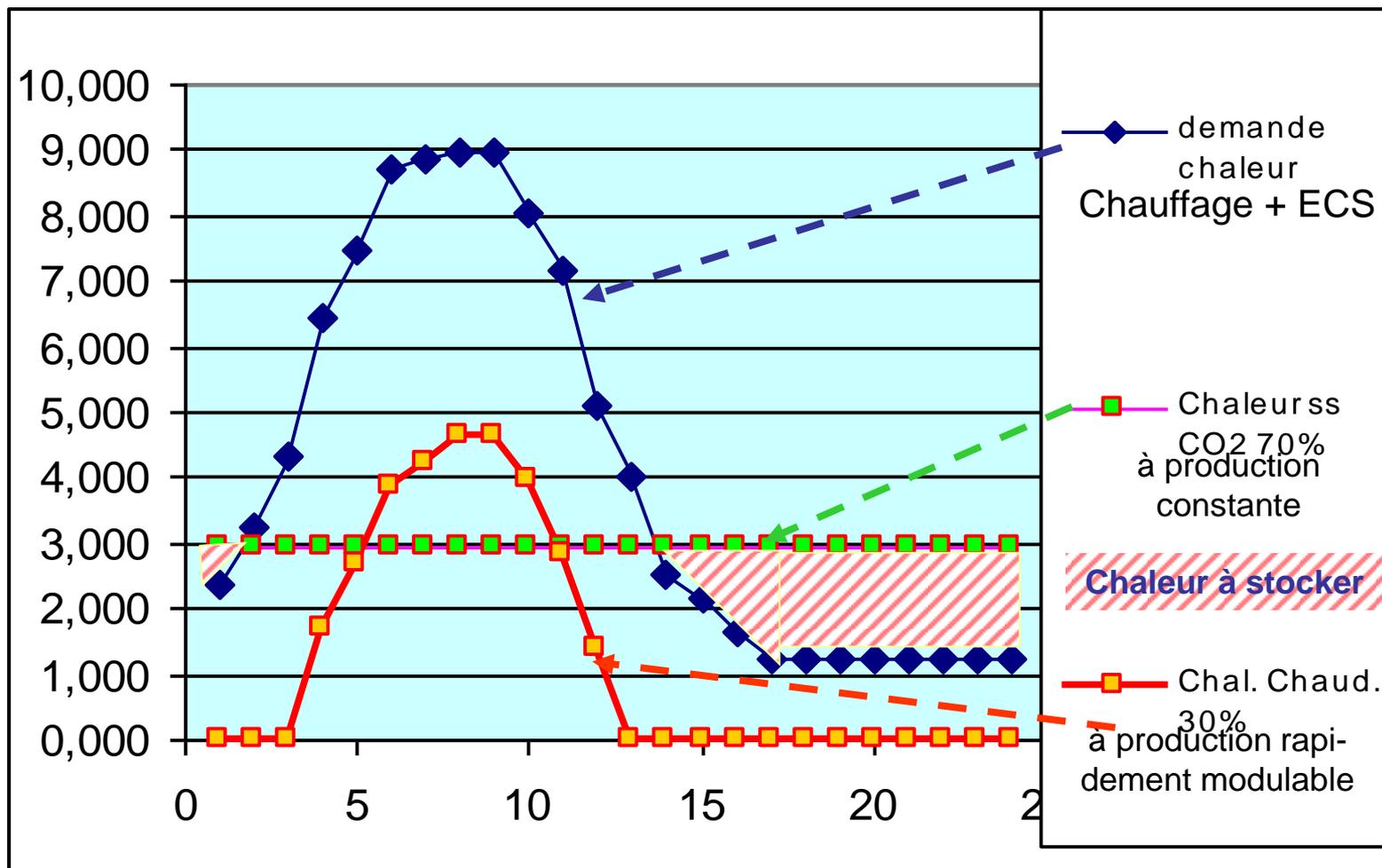
***par Chaudières à combustibles (E Fossiles et biomasse)*

Ces choix déterminent la capacité nécessaire du SSC

(avec les paramètres et profils ci-dessus: 16 % de Production annuelle)

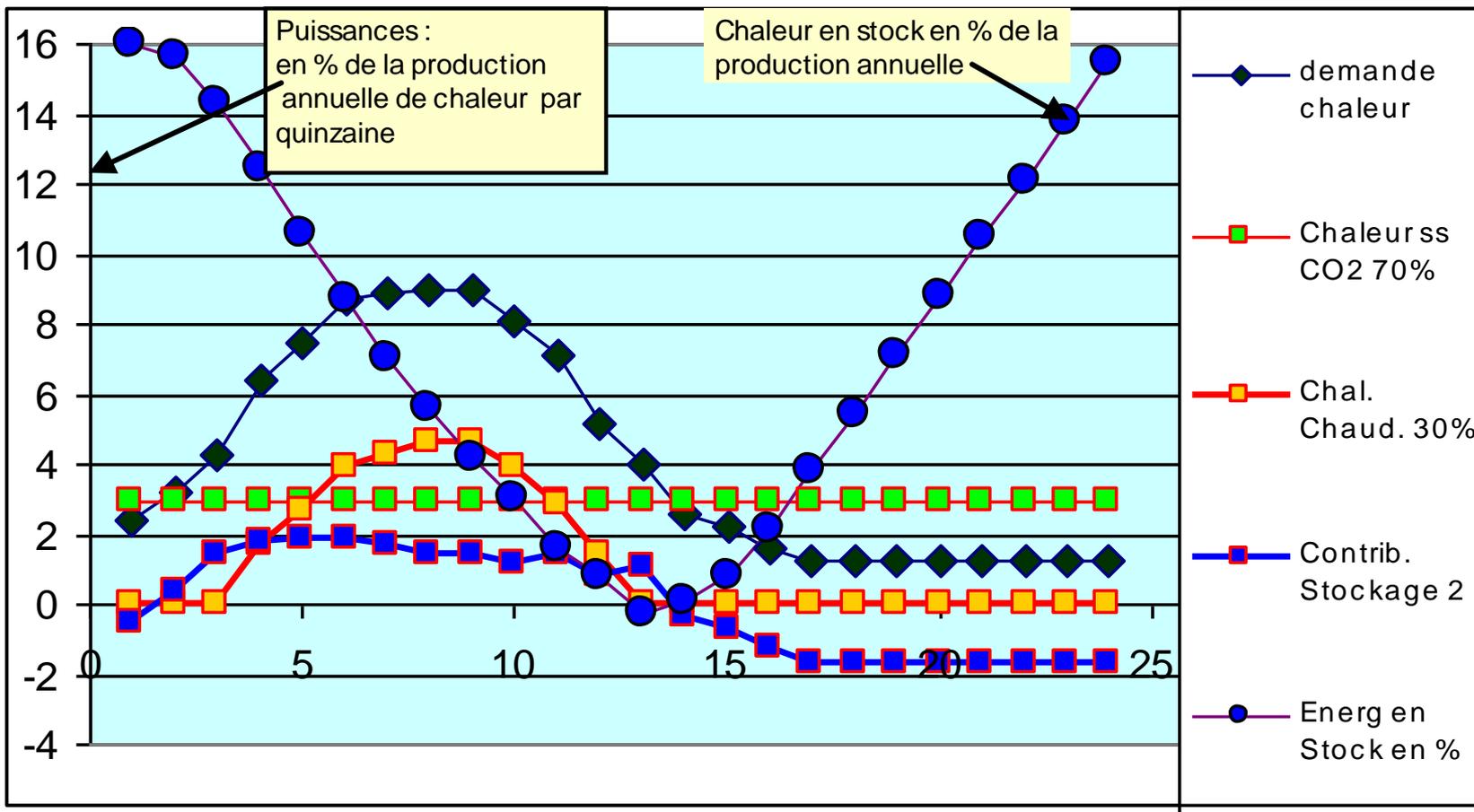
I Concevoir un système qui fonctionne et l'optimiser

Demande de chaleur et profils des sources de chaleur



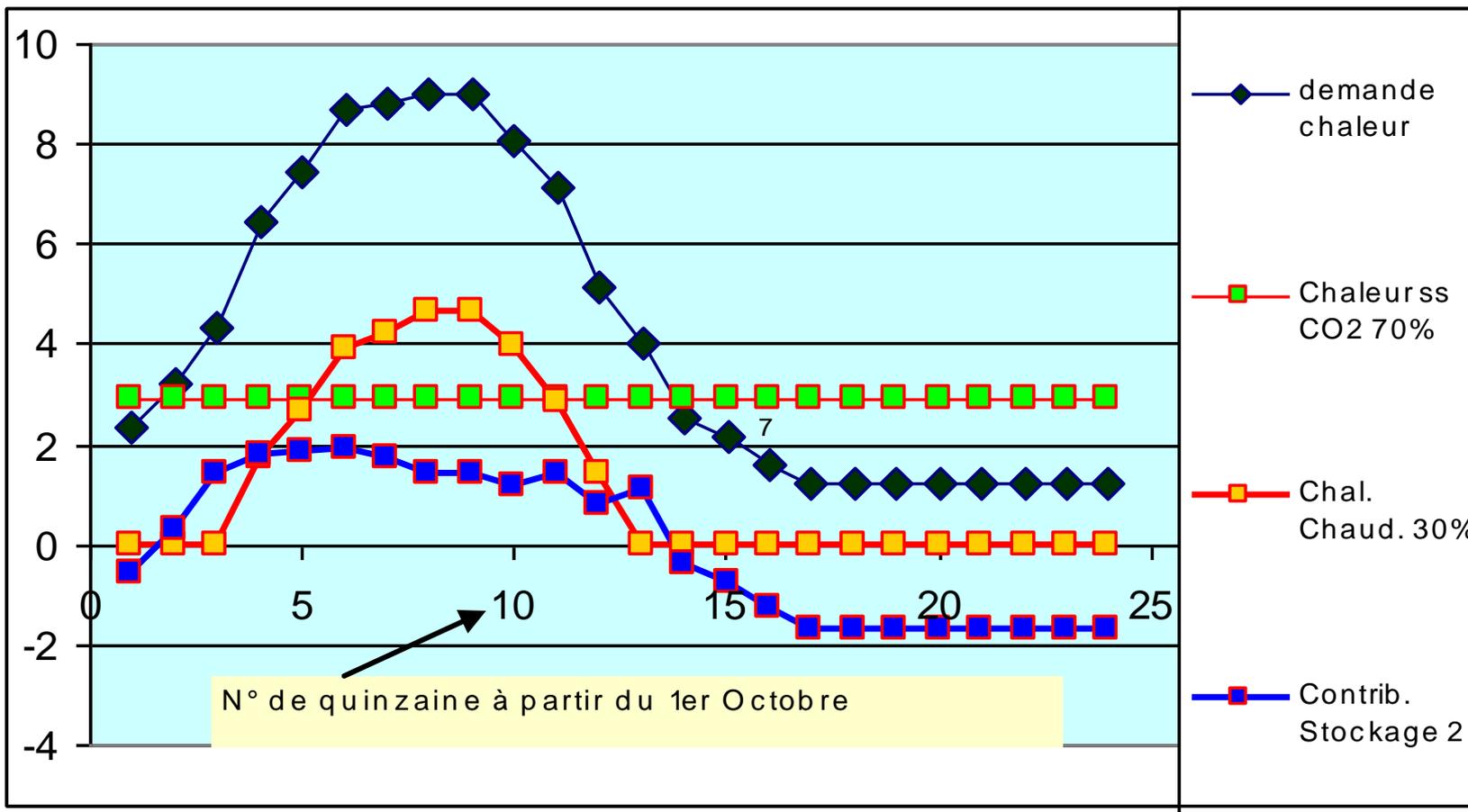
I Concevoir un système qui fonctionne et l'optimiser

Comment le SSC adapte la production à la demande:



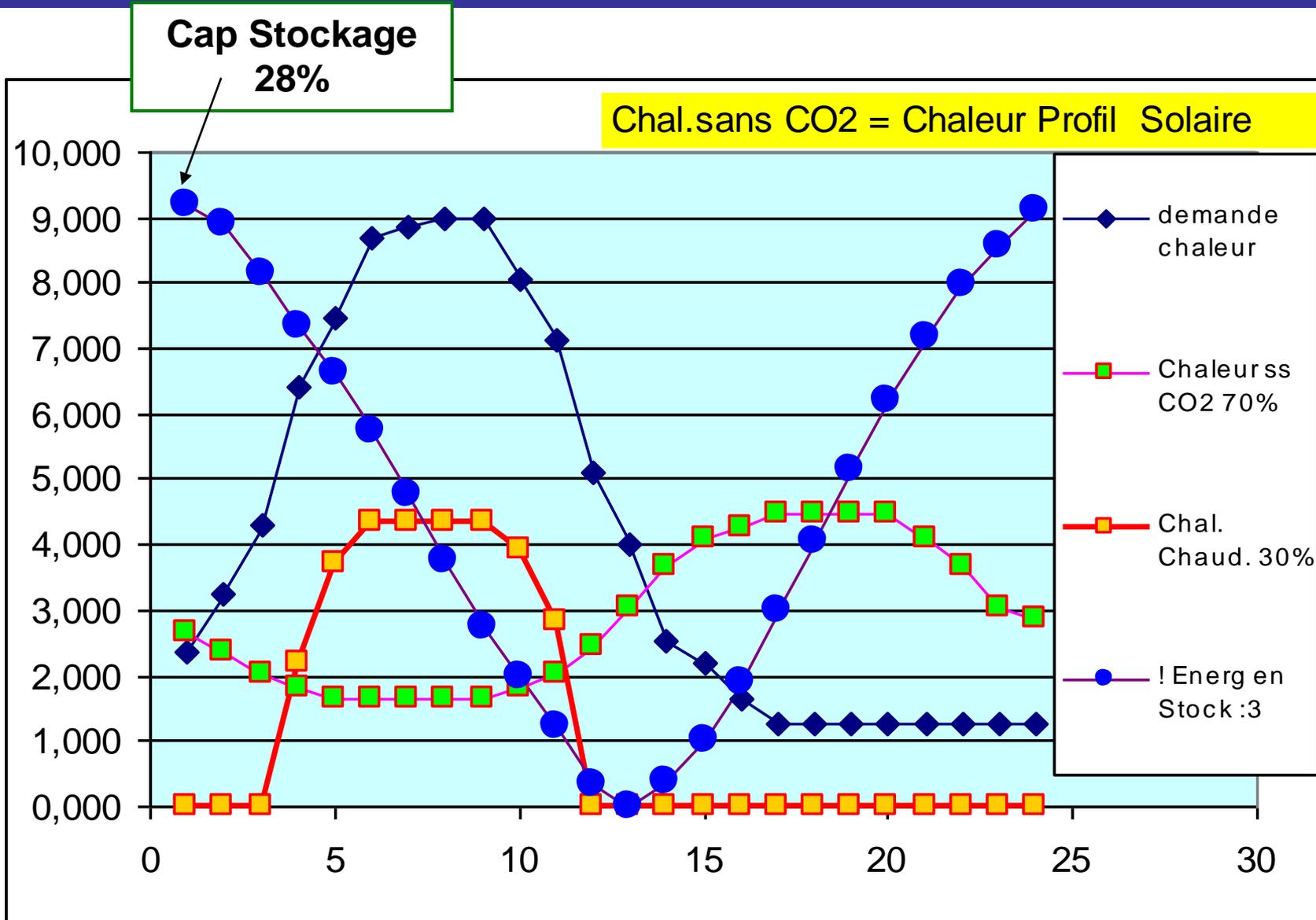
I Concevoir un système qui fonctionne et l'optimiser

Comment le SSC adapte la production à la demande:



I Concevoir un système qui fonctionne et l'optimiser

Comment le SSC adapte la production à la demande:



II SSC : Les solutions possibles et la solution retenue

Comment réaliser un SSC, Contraintes, taille, encombrement, etc?

Quelques solutions possibles, leurs avantages et inconvénients

- Réservoir d'eau** *Pour $0,5 \cdot 10^6$ habitants: $5 \cdot 10^6$ m³ d'eau 135-50°C*
- Puits dans le sol avec galeries souterraines
(Solution non universelle dépend de nature du sol , difficile à chiffrer pas de réalisation progressive)
- Réseau de puits borgnes dans sol (connectés par le haut) (solution retenue)
sans galeries souterraines

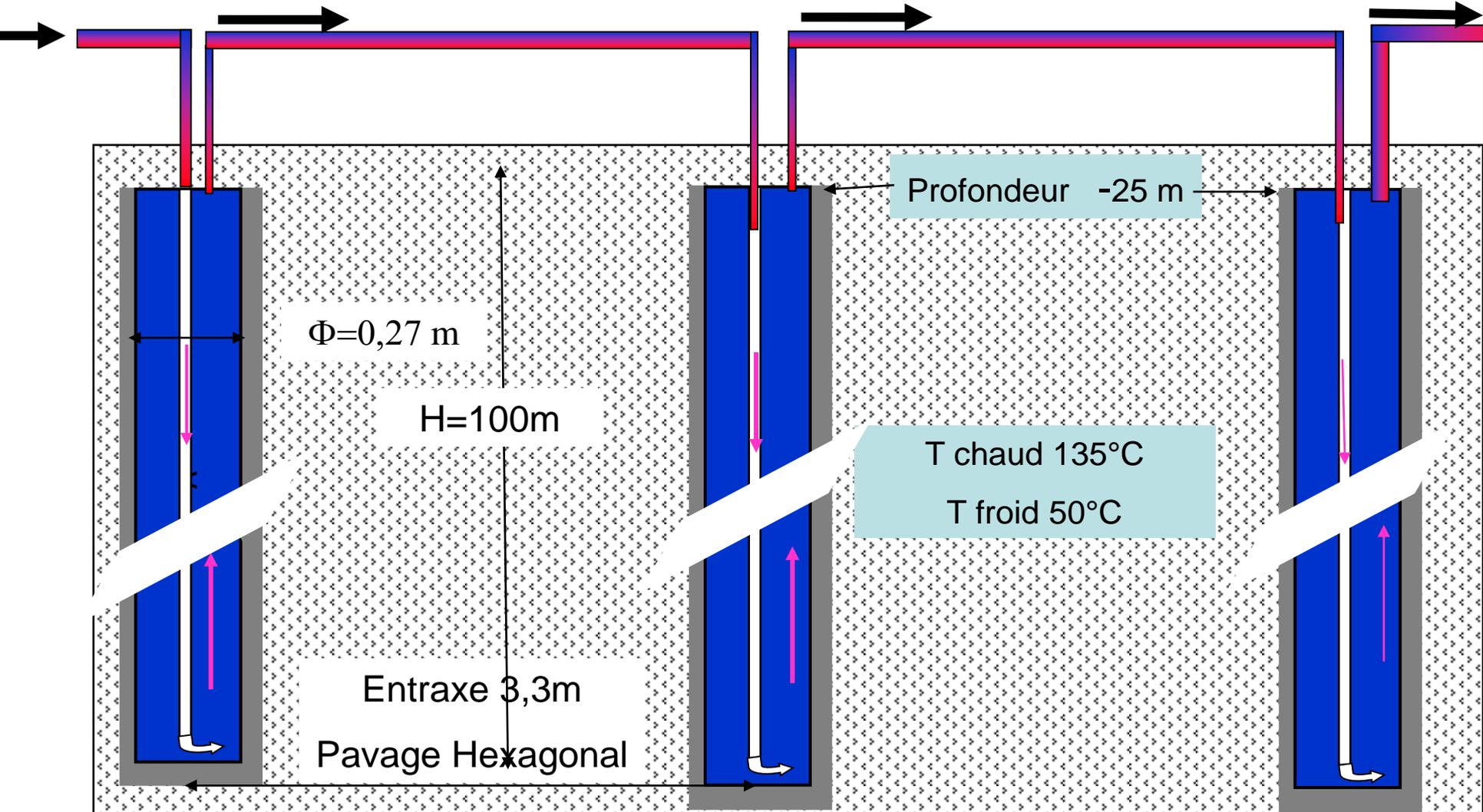
Puits exploités en séries de 40 puits reliés hydrauliquement par le haut

****Quelle Taille pour 500 000habitants ?**

- Stockage dans l'eau: 0,1 MWh/m³ si $\Delta T = 85^\circ C$ *volume énorme et trop mobile et pb acceptabilité !*
0,5 Million habitants, $3 \text{ E}6 \text{ MWh} \cdot 16\% / 0,1 \text{ MWh/m}^3 \rightarrow \approx 5 \cdot 10^6 \text{ m}^3 = 170\text{m} \cdot 170\text{m} \cdot 170\text{m}$
- *Stockage puits borgnes ds Sol: Réseau de 14000 Puits occupant une surface de $S = 13 \text{ ha}$ réalisation progressive .Technique analogue à celle de la géothermie semi profonde*

II SSC : Les solutions possibles et la solution retenue

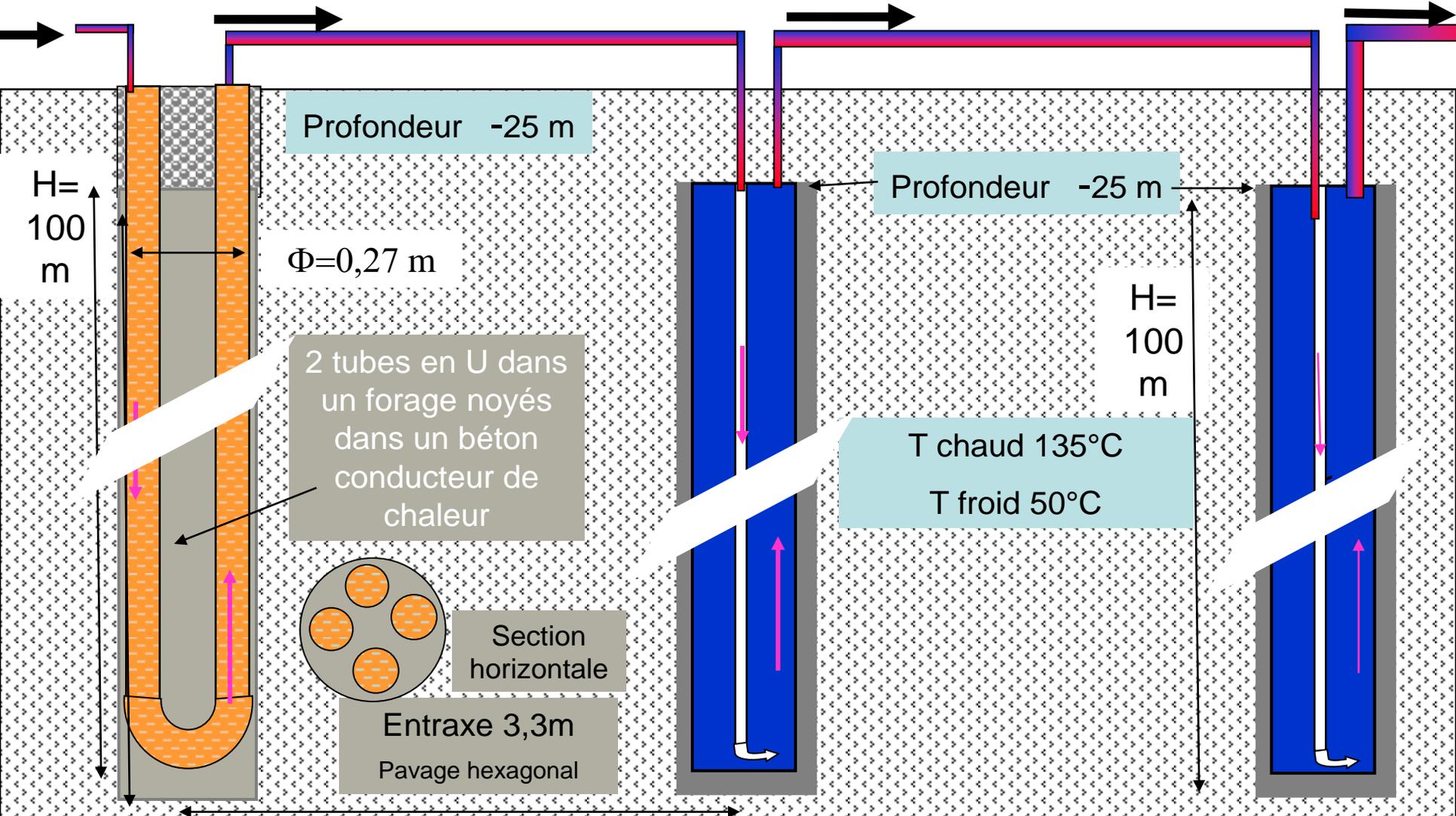
Schéma de principe de la circulation du fluide caloporteur mise dans une série de puits (40 Puits) *Vue de profil*



Phase de déstockage: l'eau arrive à 50°C par la gauche et est injectée au fond du puits par le tube coaxial, et remonte en se réchauffant. En phase de stockage, le sens de circulation est inversé, l'eau à 135°C arrivant par la droite et injectée dans le puits

II SSC : Les solutions possibles et la solution retenue

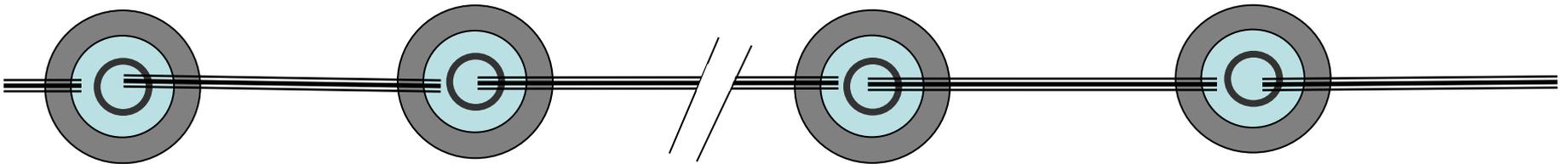
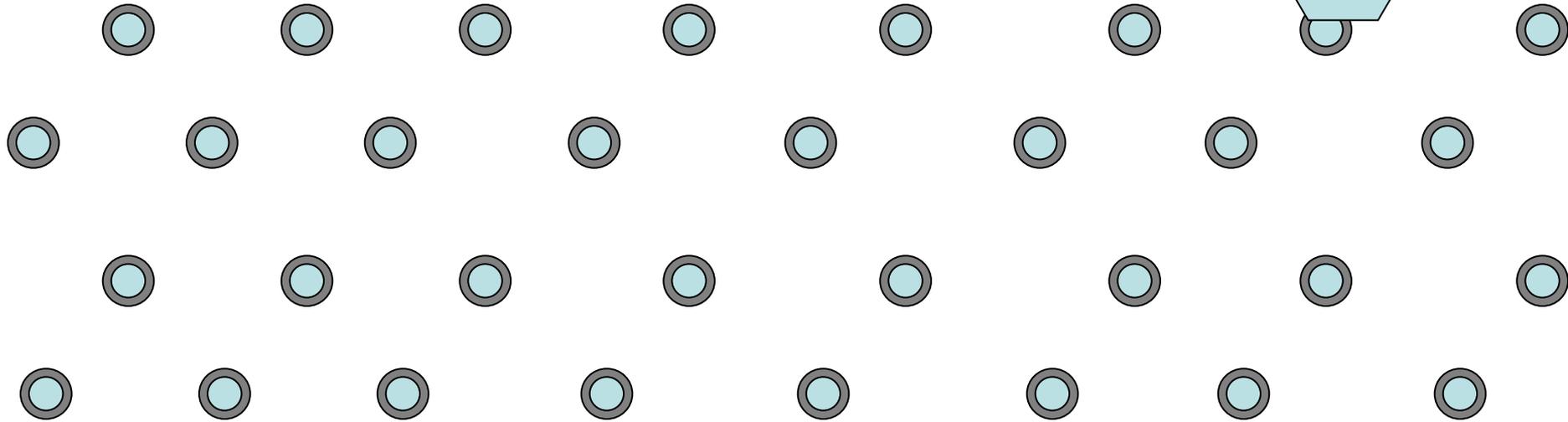
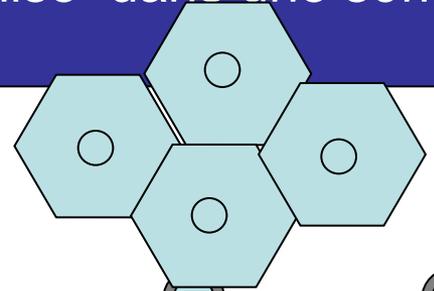
Schéma de principe de la circulation du fluide caloporteur mise dans une série de puits (40 Puits) *Vue de profil*



II SSC : Les solutions possibles et la solution retenue

Schéma de principe de la circulation du fluide caloporteur mise dans une série de puits (40 Puits) *Vue de profil*

Vue de dessus: Pavage hexagonal



Connexions entre puits d'une série de 40 puits

III Les caractéristiques thermiques d'une solution optimisée

Simulations numériques de la thermique du stockage

Un assez large ensemble de géométries ont été étudiées pour comprendre le fonctionnement du stockage

En effet on s'attend à ce que

- la capacité de stockage associée à un puits soit liée au volume de sol associé à ce puits et dépend donc du carré de l'entre-axe.
- que le prix de réalisation d'un stockage de capacité donnée est lié au nombre de puits à forer et à équiper
- que les constantes de temps caractérisant les transferts thermiques entre eau des puits et sol vont dépendre de l'entraxe entre puits et aussi du diamètre utile des puits

Configurations simulées : Diamètres puits: entre 0,2 à 0,5m
Entraxes des puits: entre 1,5 et 3,5m

Le meilleur compromis se situe autour des valeurs suivantes:

Diamètre des puits = 0,275m et Entraxe des puits = 3,3m

IV Fonctionnement thermique du SSC Quelques résultats de Simulation

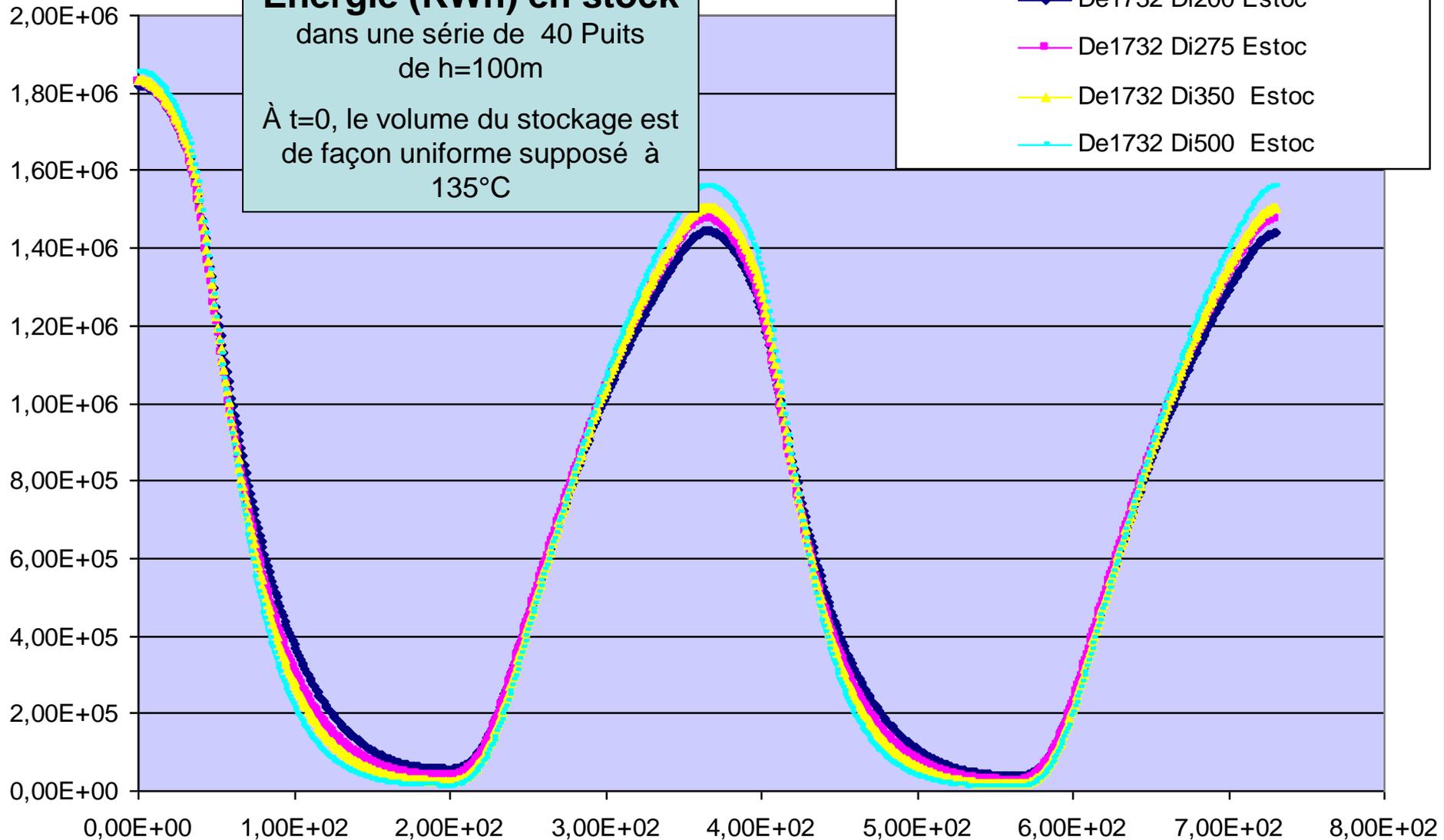
Variations avec la géométrie

Énergie (KWh) en stock

dans une série de 40 Puits
de $h=100\text{m}$

À $t=0$, le volume du stockage est
de façon uniforme supposé à
 135°C

- De1732 Di200 Estoc
- De1732 Di275 Estoc
- De1732 Di350 Estoc
- De1732 Di500 Estoc



IV Fonctionnement thermique du SSC Quelques résultats de Simulation

Energie stockée en kWh par le sol associé à une série de 40 puits.
Variation sur 2 ans

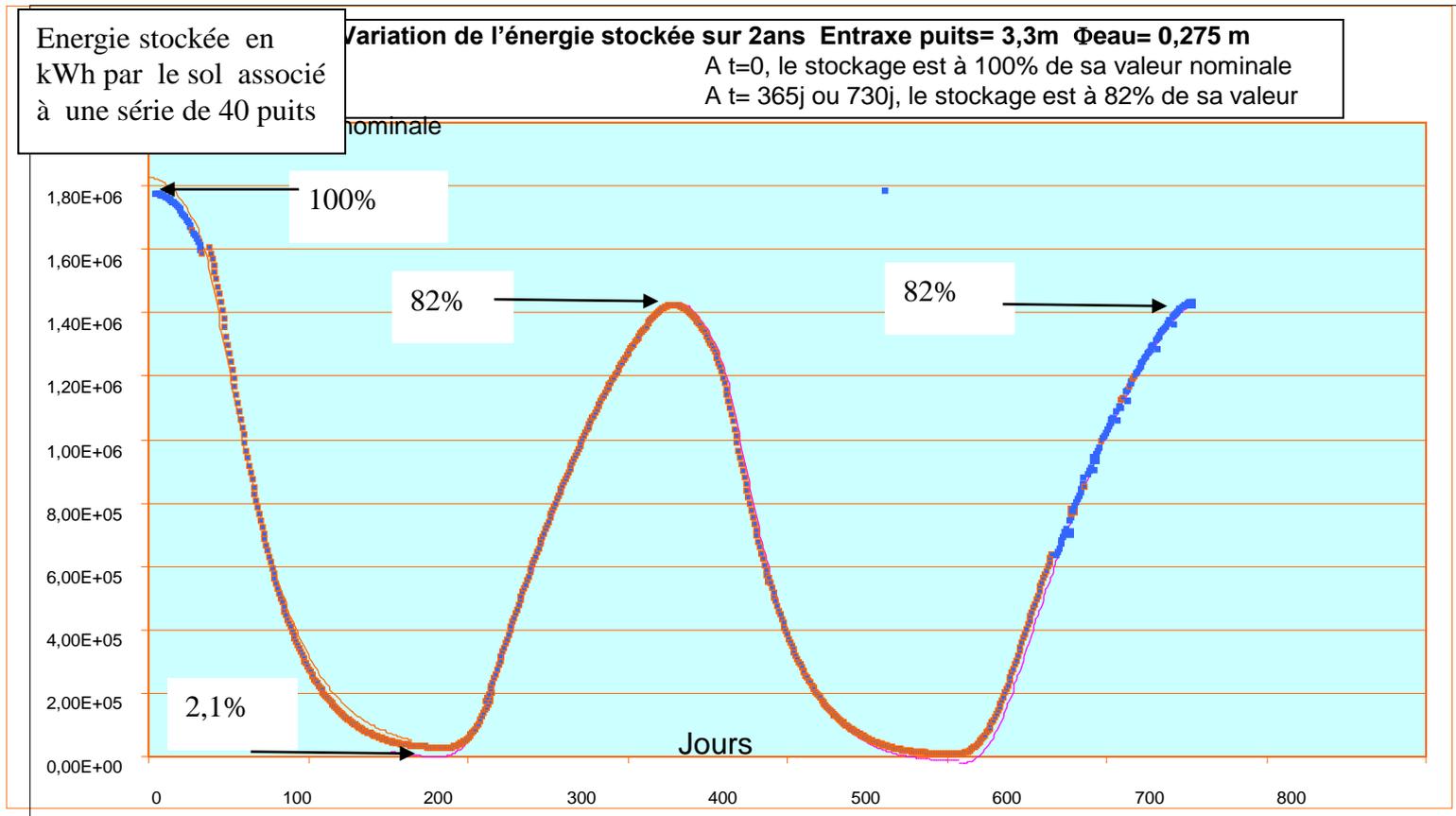


Figure 6 : Variation de l'énergie stockée au cours de 2 cycles consécutifs.

A t = 0, le stockage a été choisi à 100% de sa valeur nominale (100% du volume de sol correspondant à chaque puits est à 135 ° C).

On observe que le « stockage – déstockage » se répète à l'identique dès la fin du premier déstockage, ce qui est une propriété importante et que la capacité utilisable du stockage est de 80% de la capacité nominale pour un régime cyclique..

Vitesse de déstockage et vitesse de stockage

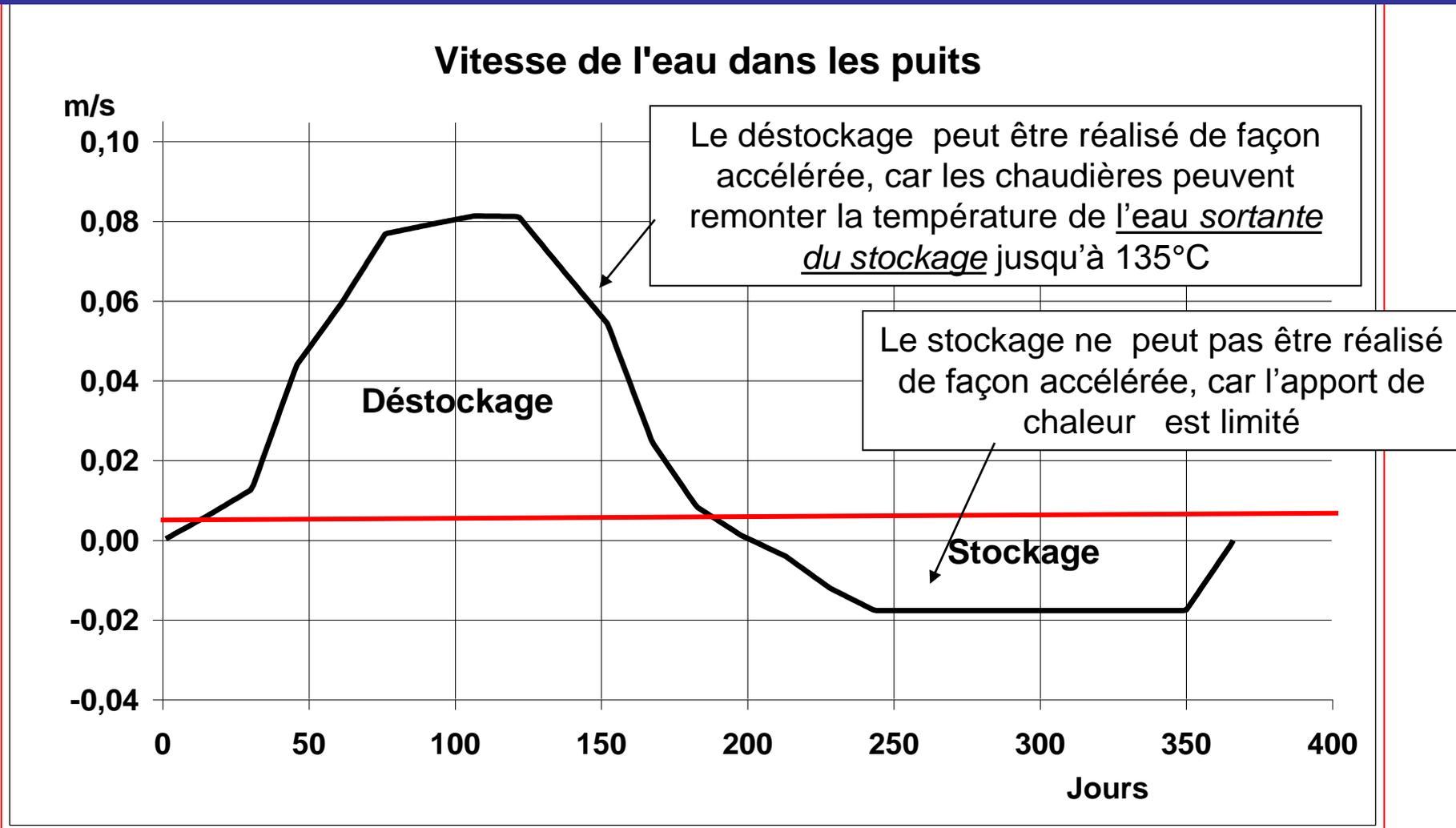


Figure 4: Vitesse utilisée pour la circulation de l'eau dans les puits au cours de l'année. On remarquera que la vitesse de l'eau pour le déstockage (représentée en valeurs positives) est plus importante qu'en phase de stockage (valeurs négatives).

IV Fonctionnement thermique du SSC Quelques résultats de Simulation

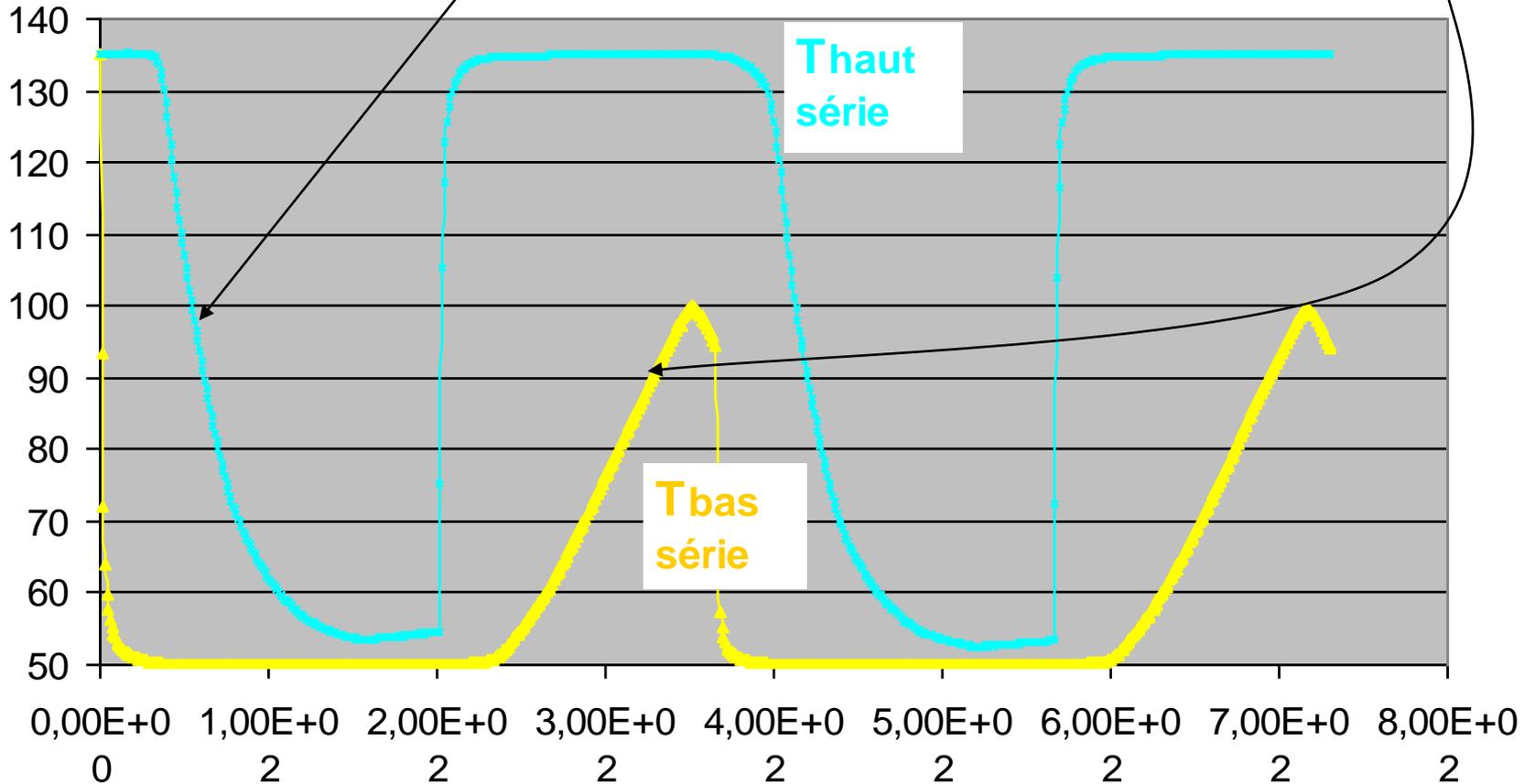
Pb de température de sorties d'eau au déstockage et au stockage

En cours de déstockage, en période de chauffe l'eau ne sort plus des séries de puits à 135°C mais à T inférieure

Cette chaleur est rendue utilisable car les chaudières peuvent en remonter la température à 135°C = T distribution

En fin période de stockage, l'eau ne sort plus des séries de puits à 50°C mais à T supérieure

Une perte potentielle de chaleur d'environ 20%



Synthèse des simulations Thermiques

On vide «presque complètement» les puits (à 98%)
grâce à un prélèvement accéléré de chaleur au déstockage

→ On ne les remplit qu'à 82%

→ On perd (peut être?) 20 % de la chaleur envoyée pour
être stockée. *(Cette chaleur est probablement récupérable en partie)*

**Le cycle « stockage- déstockage » se reproduit à l'identique
chaque année, ce qui est une propriété importante.**

Ce déficit d'efficacité n'est pas déterminant: **pourquoi?**

1 Pour la perte de chaleur, 10 à 20% de la capacité de stockage, cela représente $10\% * 16\% = 1,6\%$ de la chaleur totale
et ce n'est pas de la chaleur chère!

2 Pour la capacité de stockage efficace à 80% ,ceci ne représente qu'une faible partie du cout global ,
Capacité théorique 1Puits: $43\text{MWh} = 100 * (3,3/2)^2 * 0,048$
→ Capacité utilisable 35MWh

Impact du cout du stockage sur le prix du MWh livré

Cout investissement par puits: **10000€** en ref avec prix puits de géothermie (6000€)
soit un coût annuel (amort.+fonct.) de $10000€ / 12 / 35 = 24 €/\text{MWh}$ stocké

Le stockage d'1 MWh utile revient donc à 24€

Il impacte donc le prix moyen du MWh livré de $4€/\text{MWh} = 0,16 * 24€$

V Coûts du MWh distribué

(pour une installation dimensionnée pour 500 000 habitants et consommant $3 \cdot 10^6$ MWh/an)

Coût Caloduc: (100 km)	300M€
Coût Réseau de chaleur:	300M€
Coût Stockage saisonnier:	150M€
<hr/>	
<i>Coût total investissement</i>	<i>750 M€</i>

Coût annuel *Amortissement sur 30 ans et fonctionnement.*

$$\mathbf{21 \text{ € / MWh produit}} = 750 \text{ E6} / 12 / 3 \text{E6}$$

$$\text{Coût chaleur : } 15 \text{ € / MWh} \cdot 70\% + 60 \text{ € / MWh} \cdot 30\% = \mathbf{28,5 \text{ € / MWh produit}}$$

Coût total /MWh produit et acheminé au consommateur

$$\mathbf{50 \text{ € / MWh produit}} \approx \mathbf{21 \text{ €} + 28,5 \text{ €}}$$
$$\mathbf{62 \text{ € / MWh net livré}} \text{ (pertes 20 \% déduites)}$$

Conclusions générales I

•Le SSC rend possible l'utilisation à 100 % de chaleurs fatales ou de cogénération à débit constant sur l'année. Son coût apparaît très raisonnable

Un SSC, intégré dans une installation de chauffage urbain alimentée par une source de chaleur distante à débit constant sur l'année via **un caloduc** et par des sources de chaleur conventionnelles de puissance modulable, était apte à répondre au cahier des charges d'une demande réaliste de réseau de chaleur

La faisabilité et l'opérabilité fonctionnelles d'un SSC ont été étudiées en détail dans un cadre réaliste

La conception du stockage saisonnier choisie est robuste et met en œuvre des technologies assez simples.

Nous pensons donc que cette étude lève le «verrou » de la faisabilité d'un SSC
→pour ce qui concerne la chaleur pour l'habitat et le tertiaire.

Cependant la technologie précise à employer pour la réalisation des puits reste à étudier avec des expérimentations pour en optimiser les performances, la robustesse, la fiabilité et la stabilité pour le domaine de température concerné (50 à 135 °C)

Conclusion II (Suite)

Le stockage SSC paraît pouvoir être réalisé dans des conditions économiques telles que la compétitivité du système global devient très favorable.

Le prix modique de la chaleur fatale ou de cogénération utilisée à 100% tout au long de l'année, est apte à compenser largement les coûts d'amortissement et de fonctionnement des équipements nécessaires :

- le transport de chaleur par caloduc ;
- le stockage saisonnier de chaleur ;
- le réseau de distribution de chaleur.

→ **le coût estimé du stockage saisonnier influe peu sur le prix de revient du MWh** distribué tandis qu'il minimise le coût du caloduc, et permet une utilisation optimale des Energies sans CO2 fatales ou de cogénération

→ Compte tenu du potentiel de nombreuses sources de chaleurs fatales ou de cogénération, de tels dispositifs pourraient, après expérimentation et optimisation, être envisagés **à grande échelle.**

→ **La réduction brute d'émissions de CO2** obtenue, avec ce schéma de production, stockage et distribution de chaleur, **est évaluée** à 6,7**

(* par rapport à un usage exclusif d'énergies fossiles (Gaz) pour la même production de chaleur, et si la moitié de l'énergie consommée par les chaudières est à base de biomasse. .)

Quelques chiffres pour un déploiement national

Les besoins actuels pour chauffage et ECS : ≈ 50 Mtep ou ≈ 500 TWh

70 % des besoins couverts par des Réseaux de chaleur

avec Chaleurs cogénération ou fatales + chaudières

70 % des besoins des réseaux couverts par des chaleurs fatales ou de cogénération

Besoins en chaleur de cogénération

$500\text{TWh} * 70\% * 70\% - 100$ TWh (Chaleurs fatales déchets + industrie) ≈ 150 TWh

Pertes de production d'électricité: ≈ 30 TWh électriques

$\approx 6\%$ de la production électrique totale [voir papier de H Safa (DS CEA)]

Besoins en chaleur issue des combustibles

pour la partie desservie par réseaux de chaleur: $150/70\% * 30\% \approx 64$ TWh

*Possibilité de fourniture de chaleur par des réacteurs à eau en fin de vie
et ne fournissant que de la chaleur à 135°C (réduction de la pression dans la cuve)*

Merci pour votre écoute

Toutes les questions ou questionnements
sont les bienvenus

Caractéristiques du réacteur 1300MWe NPP

Papier de H Safa CEA

Thot	Tcold	Wp	Qi	W _{HP}	W _{BP}	W _{gross}	η
°C	°C	MW	MW	MW	MW	MWeI	%
288	39	9	3920	-417	-936	1353	2562

Bilan avec extraction de chaleur à 135°C ou 120°C H. SAFA

$$W_{\text{chal}} = 3100\text{MW} \quad W_{\text{-el}} = 653 \text{ MW-el} = 1353\text{MW-el} - 700\text{MW-el}$$

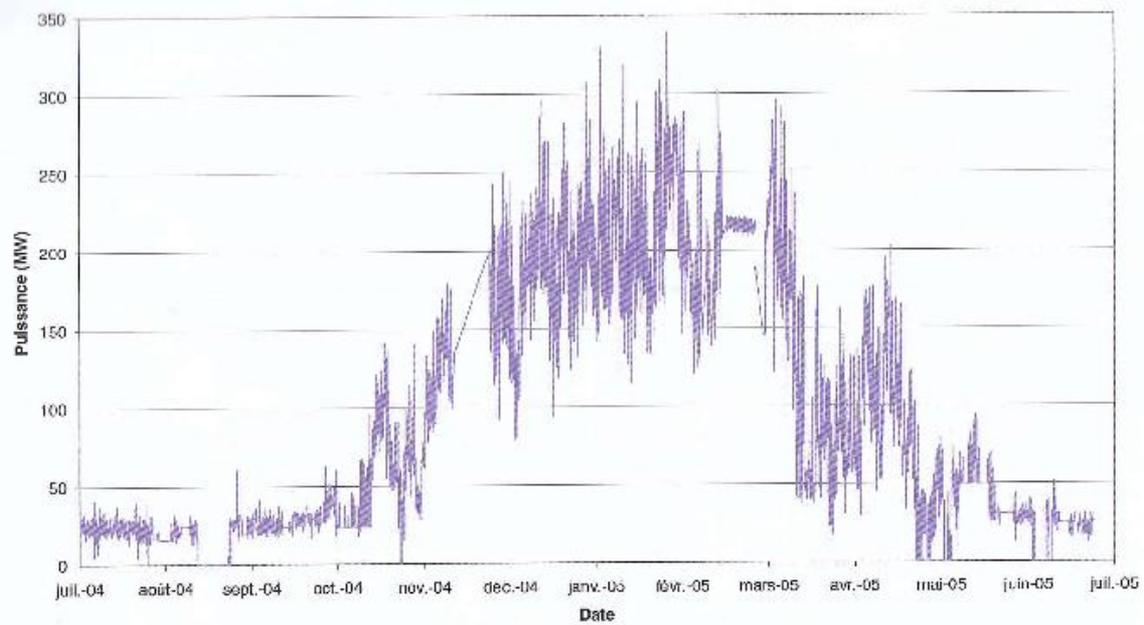
→ 4,43 MWh-chal pour 1MWhel avec extraction Chal. à 130°C

→ 5MWh-chal pour 1MWh-el avec extraction Chal. à 120°

Les pertes thermiques aux frontières du volume de stockage entre la 9ième et la 10ième année

- SSC pour 100000 hab: 5% par an
 - SSC pour 50000 hab 6 % par an
 - SSC pour 10000 hab 10 % par an
-
- Cela peut être un peu amélioré

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



Pertes de chaleur par stockage

Pertes par refroidissement

Pertes relatives de l'énergie stockée dues au refroidissement par les surfaces extérieures du volume de stockage dans un environnement primitivement à 13°C et pertes totales prenant en compte le premier réchauffement de ce stockage dans un sol devant passer de 13° à 50°.

(Entraxe des puits 3,31m)

Sans écrans thermiques.

ENERGIE Utile stockée en GWh :	100	50	10	5	3	1,5	0,8
Nb d'habitants desservis, consommant 6 MWh/hab	100000	50 000	10000	5 000	3 000	1500	800
Pertes relatives de la 9eme à la 10eme année	0,048	0,059	0,101	0,12 6	0,15 1	0,187	0,234
Pertes relatives de la 14eme à la 15eme année	0,04	0,05	0,08	0,10	0,12	0,15	0,19
Pertes dues au 1er remplissage de 13° à 50°	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Pertes totales relatives de t=0 à la 15eme année	1,63	1,90	2,88	3,49	4,08	4,95	6,07
Hauteur utile des puits (m)	100	100	60	48	40	34	24
Nombre de puits par série (pour forme cubique)	40	40	20	15	12	10	8