

Stockage d'air comprimé en cavité saline

PROJET SACRE

Stockage par Air Comprimé
pour le Réseau Electrique

Pierre Bérest ; Ecole Polytechnique
berest@lms.polytechnique.fr

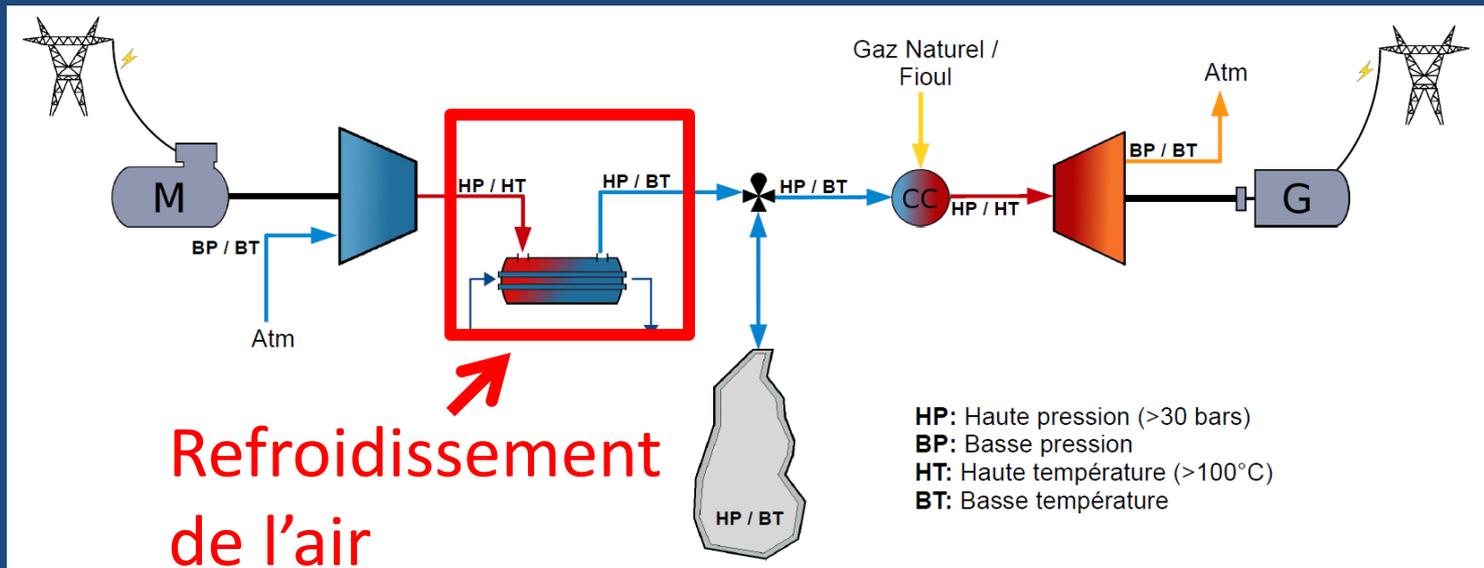


DEUX CAES EXISTANTS EN CAVITÉ SALINE

Huntorf (Allemagne) : depuis 1978. Deux cavernes,
310 000 m³ - Profondeur entre 650 et 800 m
Pression entre 43 et 70 bars
290 MW disponibles sur 3 heures
rendement global de 42 %

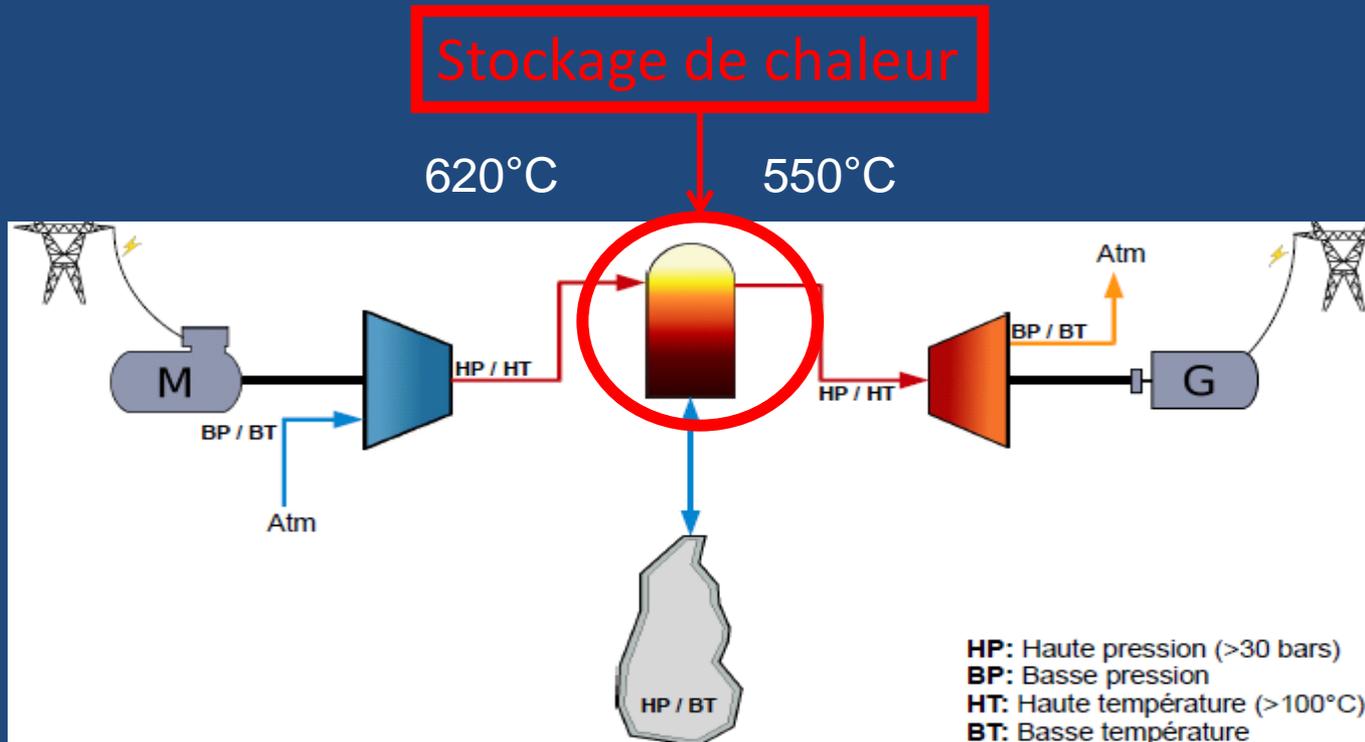
McIntosh (USA) : depuis 1991. Une caverne, 560 000
m³ - Profondeur entre 450 et 750 m
Pression entre 45 et 70 bars
110 MW disponibles sur 26 heures
rendement global de 49 %.

Concept CAES gaz 1^{ère} génération



- Technologie mature (Huntorf; Mc Intosh)
- Faible rendement (théorique 50%), émission NO_x, mais CO₂ divisé par 2-3 en comparaison d'une turbine à combustion classique

CONCEPT CAES gaz « adiabatique »



- Rendement élevé (65-70%), pas de CO₂ sauf réfractaires
- Coût plus élevé (système de stockage de chaleur)
- Manque d'expérience sur la maturité du système de stockage de chaleur (20-30, 40-50 bars ou plus) : sécurité, coûts de l'enceinte

ENJEUX / OBJECTIFS (EDF)



« SACRE »

- L'alternative la plus crédible aux STEP
 - Développement de nouveaux sites de STEP très limité

- Facilite l'intégration des énergies renouvelables intermittentes en adaptant l'offre à la demande
 - PV
 - Éolien

- Contribuer à la sécurité du réseau électrique
 - Limiter les investissements du réseau
 - Décongestionner certaines zones
 - Limiter les pertes du réseau

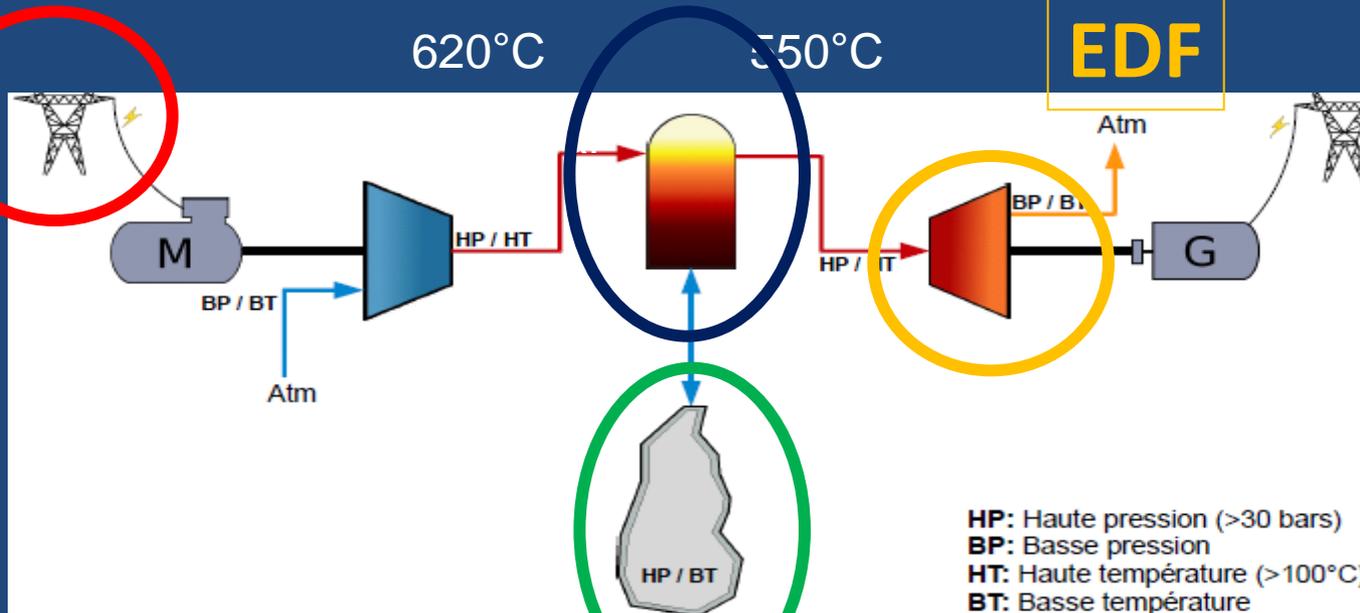
- Réduire directement les émissions de gaz à effets de serre

CONCEPT CAES gaz « adiabatique »

HEI, EDF

PROMES, EDF

EDF

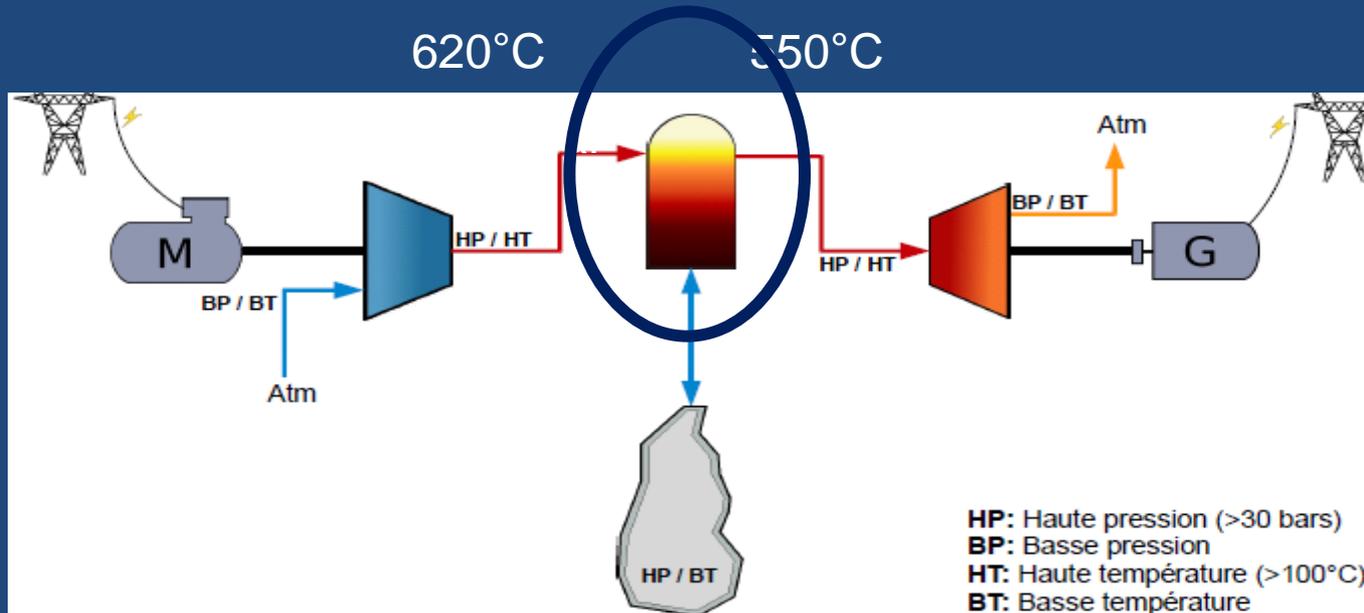


GEOSTOCK, LMS



CONCEPT CAES gaz « adiabatique »

PROMES, Edf



Les matériaux de stockage - Céramiques issues des traitements de déchets amiantés, ou des cendres volantes



Cendres volantes



Vitrification
par voie solaire



verre

Recuit dans
un four
(1100°C- 20h)



CFA

Materiau	Béton HT	Sels fondus	Céramiques HT	Céramiques déchets amiantés	Céramiques cendres volantes
kgm ⁻³	2750	900-2600	3500	3120	2975
Cp J/(kg K)	916	1500	866	800-1034	714-1222
$\rho \times C_p$ kJ/(m ³ K)	2519	1350-3900	3031	2496-3226	2124-3338
λ W/(m K)	1.0	0.15-2.0	1.35	2.1-1.4	1.16-1.59
CTE(10 ⁻⁶ /K)	9.3	---	11.8	8.8	8.7
€/tonne	80	750	4500-9000	8-10	10-1200

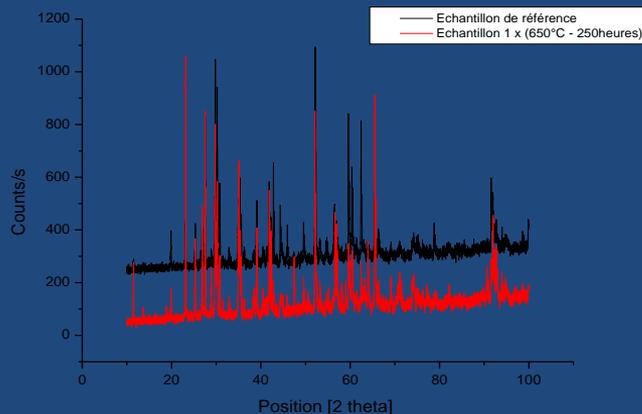
propriétés mesurées au laboratoire PROMES (les valeurs sont données à température ambiante et 1000° C).

Test de compatibilité des céramiques issues de déchets amiantés (ACW).

600°C – 30 bars



Après 250 h. Pas d'évolution de la structure des échantillons d'ACW.
Caractérisations après 500 et 750 h en cours d'acquisition.



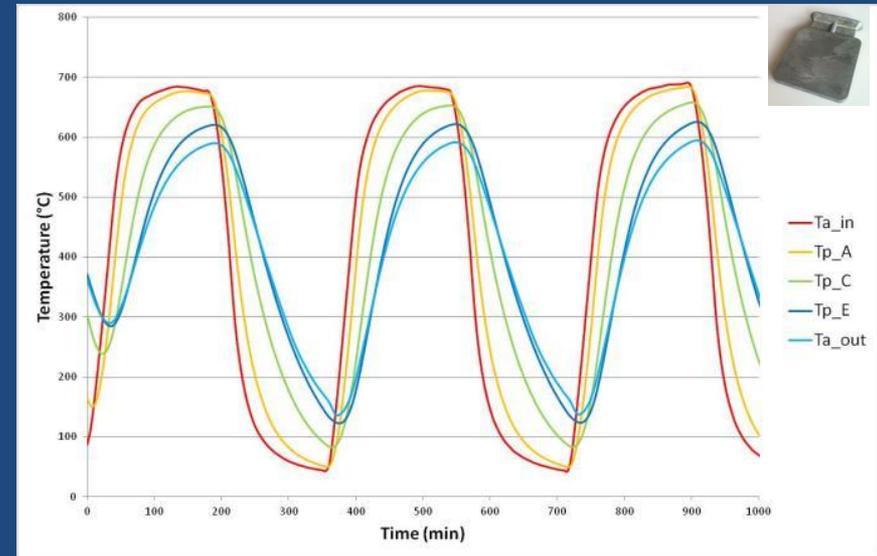
DIFFRACTOGRAMME

	Etat initial	Après 250 h
Charge maximale appliquée (mN) :	50	50
Réf. Échantillon 0 :	Phase uniforme	
Dureté H (GPa)	12,9577	12,6477
Ecartype H (GPa)	0,2103	0,5417
Module E (GPa) $\nu=0.25$	191,1009	176,1446
Ecartype E (GPa)	5,7298	0,2782
Réf. Échantillon 0 :	Phase lamellaire	
Dureté H (GPa)	7,7415	113,5208
Ecartype H (GPa)	0,5325	11,9179
Module E (GPa) $\nu=0.25$	136,7367	113,5208
Ecartype E (GPa)	8,0236	11,9179



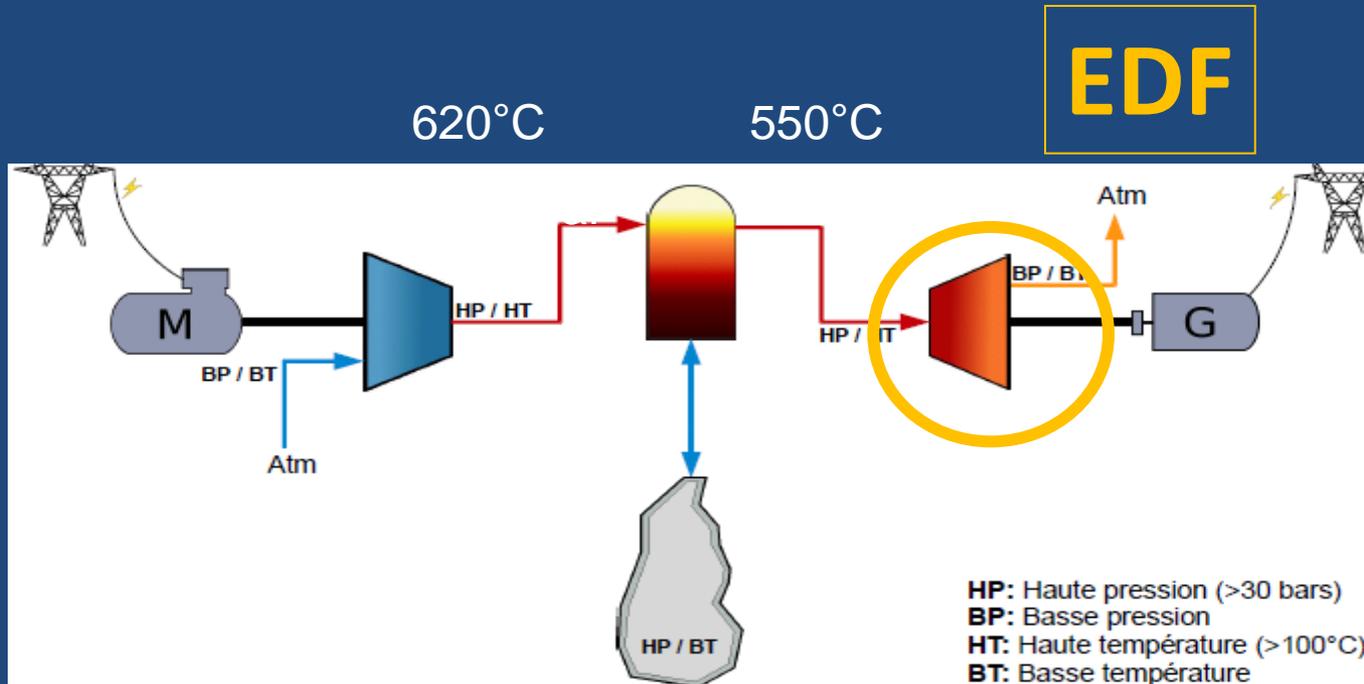
DURETÉ ET MODULE DES 2 PHASES AVANT ET APRÈS ESSAI

Un prototype de stockage en fonctionnement pour les essais de cyclage des ACW. $T_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}$ $30\text{Nm}^3/\text{h}$.



Exemple de cyclage entre 100 et 700°C sur ACW plaques lisses. Profils de température en différents points de la veine d'air.

CONCEPT CAES gaz « adiabatique »



CAPACITÉ DES SYSTEMES CAES (EDF)

- Influence de la pression sur les performances des systèmes CAES
 - **CAES adiabatique** : travail de la turbine à pression glissante (de P_{\max} à P_{\min})
 - Optimum pour une pression maximale permettant d'atteindre 620°C en sortie compresseur : 35-40 bar
 - Capacité de l'installation en énergie stockée (MWh) :

$$Capacité = P_{\text{exp}} \cdot t_{\text{décharge}} = \frac{V \cdot (P_{\max} - P_{\min}) \cdot \gamma \cdot T_{\text{air_entrée_exp}}}{(\gamma - 1) \cdot T_{\text{air_cavité}}} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{\min}}{P_{\max}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

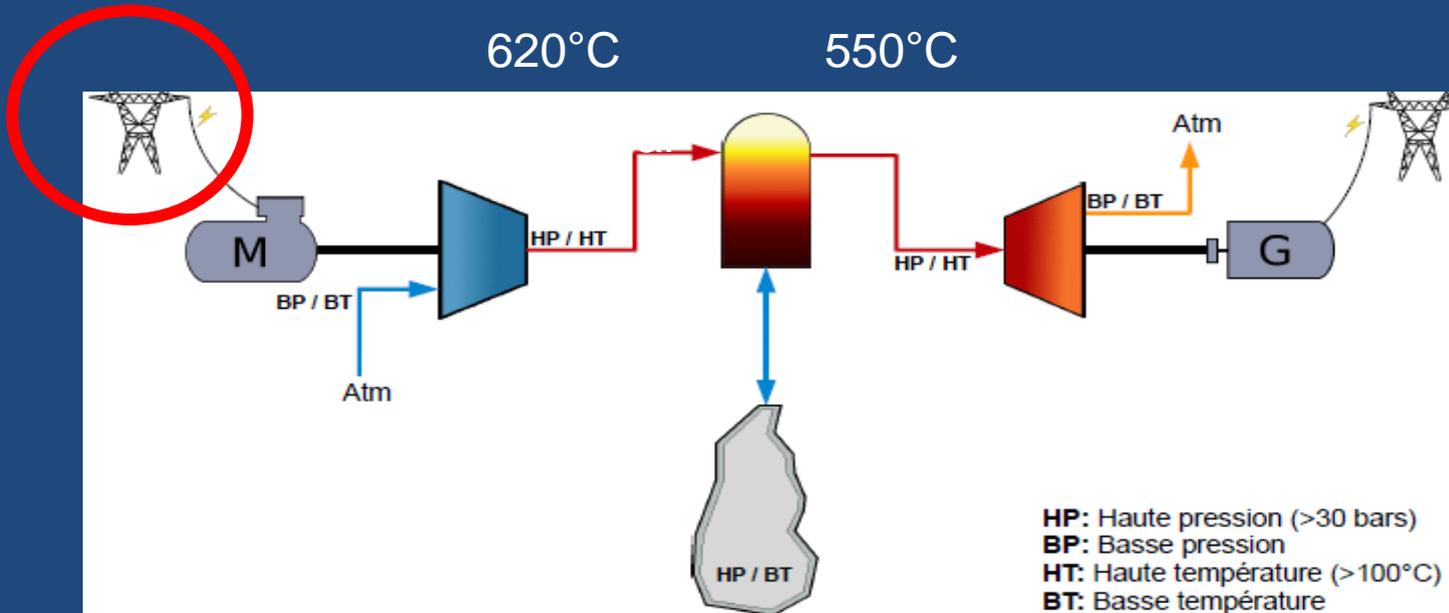
Faible écart de pression ($P_{\max} - P_{\min}$)

Pour augmenter la capacité :

- Grand volume de cavité
- Augmenter P_{\min} pour le même ($P_{\max} - P_{\min}$)

CONCEPT CAES gaz « adiabatique »

HEI, EDF



HEI : Usages et valorisation d'un CAES

- Apport d'un stockage de 15 à 300 MW au réseau 225/400 kV ;
localisation et dimensionnement
- Maximisation des services rendus et rentabilité

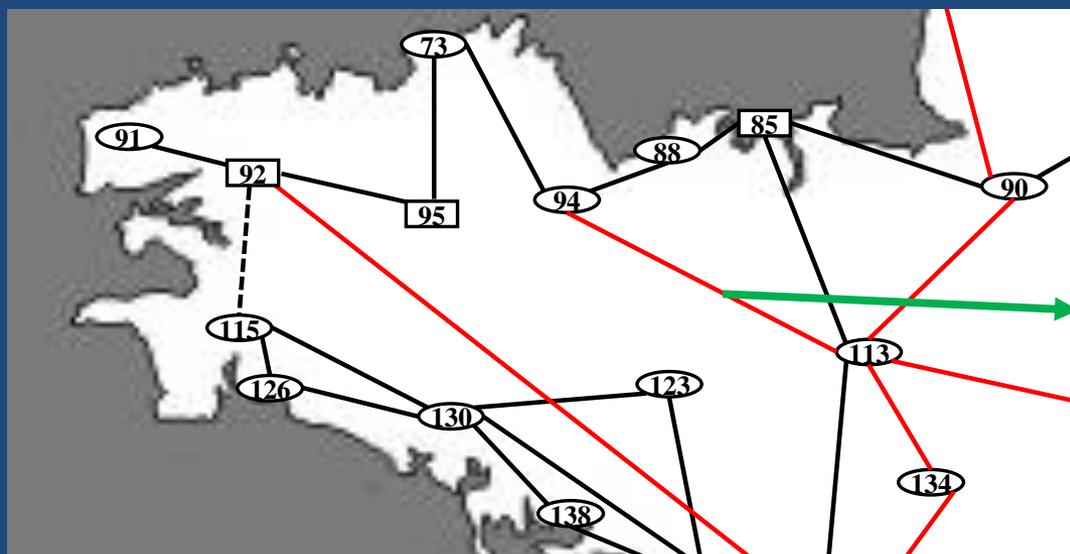


RÉSEAU 400 kV

Exemple de service: réduction des congestions (Local):

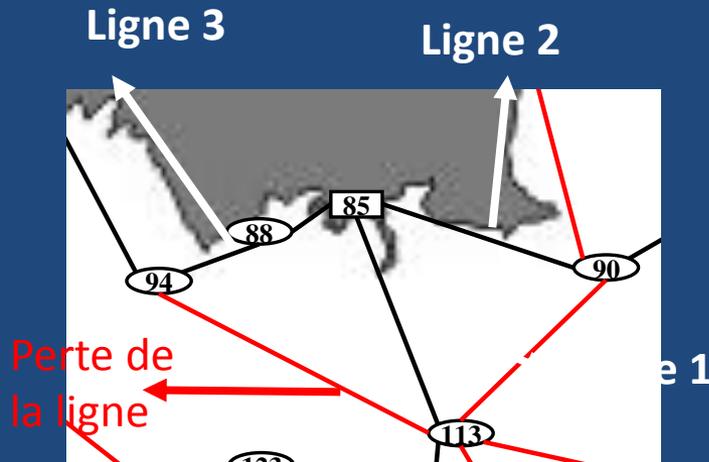
- A l'état « N », il n'y a pas de congestion dans aucun des scénarios.
- A l'état « N-1 » (perte d'un ouvrage : ligne, source ou poste transformateur) de nombreuses congestions apparaissent surtout localisées en Bretagne et en région PACA.

Pour les capacités de transport (Local) : Bretagne, 2002



Perte de
la ligne

Pour les capacités de transport (Local) : **Scénario 2020**



Surcharge pour différents scénarios

	Point de fonctionnement		
	Hiver 2002	Hiver 2020 : 100% Eol. + Sol.	Hiver 2020 : 20% Eol. + Sol.
ITC_1 [%]	115	125	178
ITC_2 [%]	125	138	180
ITC_3 [%]	130	160	205

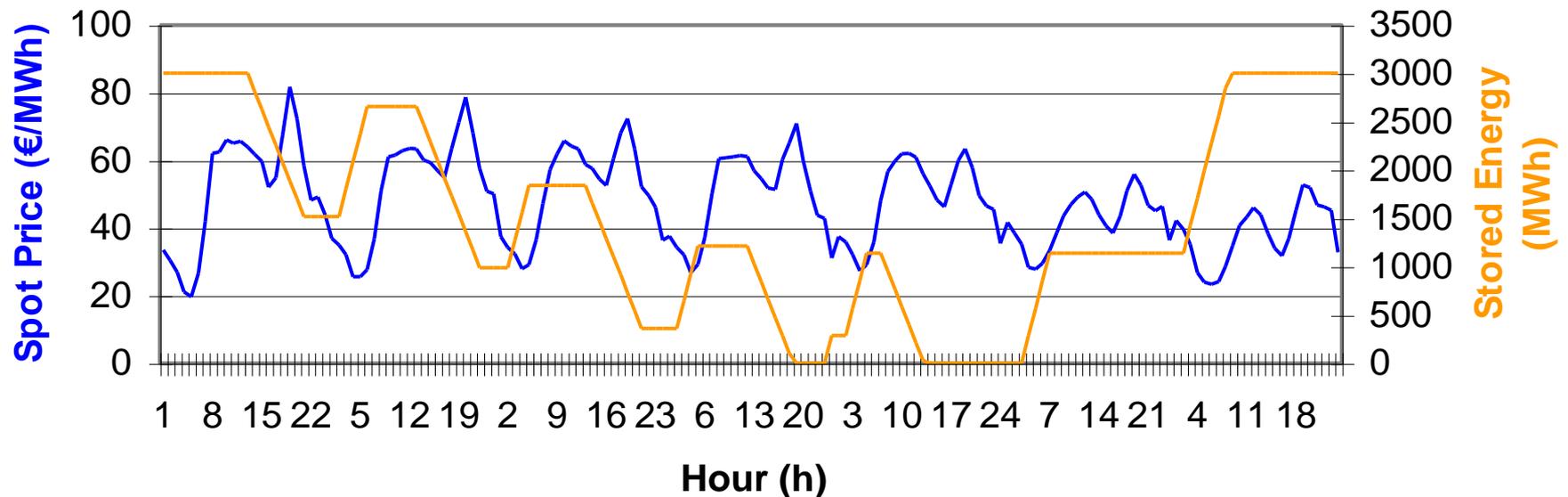
- Surcharge importante → Consommation importante en Bretagne.
- Surcharge plus faible lors d'une production renouvelable importante → Parc éolien de 500 MW connecté au nœud 94.
- **Le raccordement d'un stockage au nœud 88 évite les congestions.**

	Point de fonctionnement		
	Hiver 2002	Hiver 2020 : Eol. + Sol à 100%	Hiver 2020 : Eol. + Sol. À 20%
Puissance CAES SOUHAITABLE [MW]	250	480	850

CYCLAGE DES SYSTEMES CAES (EDF)

- Valorisation hors services réseau

3000 MWh - hiver 2009



- Une utilisation hebdomadaire : pleine charge le week-end + recharges partielles pendant les nuits en semaine / décalage de production hiver – été en fonction du pic de demande (10h – 18h en été / 15h – 22h en hiver)
- Courbe d'utilisation quasi identique pour les CAES adiabatique
- Optimal de capacité de stockage > 1500 MWh (340 GWh annuel)



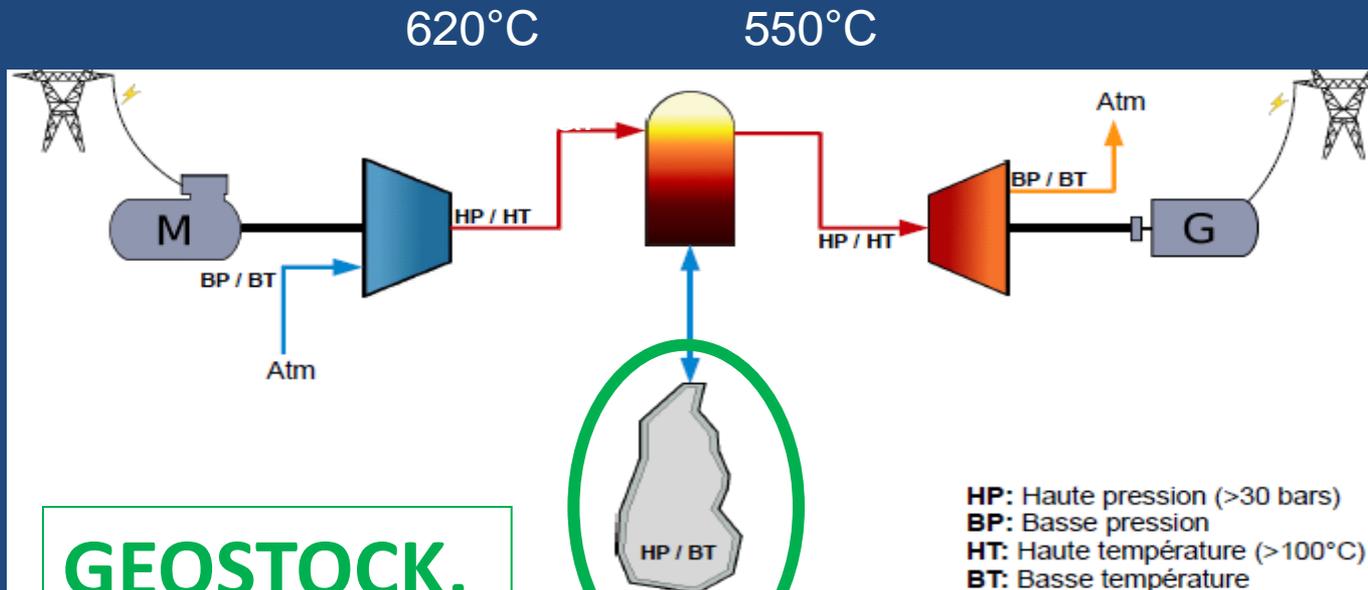
« SACRE »



L'ÉVALUATION DE L'INTÉRÊT ÉCONOMIQUE DU CAES RESTE FORTEMENT TRIBUTAIRE DE PARAMÈTRES TELS QUE :

- ESTIMATION DE L'ENSEMBLE DES VALORISATIONS
- PROXIMITÉ DU RÉSEAU HT
- LOCALISATION AU PLUS PRÈS DES BESOINS
- DISPONIBILITÉ DE CAVERNES EXISTANTES

CONCEPT CAES gaz « adiabatique »



**GESTOCK,
LMS, EDF**

Contraintes dans la sélection de site

- C'est l'optimum d'exploitation des turbines (faible $P_{max} - P_{min}$, valeurs discrètes de P_{av} , débit grand, donc très grand volume de caverne)
.... qui fixe les paramètres d'exploitation (P_{max} , P_{min} , Q_{inj} , Q_{sout}) de la caverne
- La géologie ne peut donner que ce qu'elle a ..
...et les cavités existantes sont ce qu'elles sont



« SACRE »

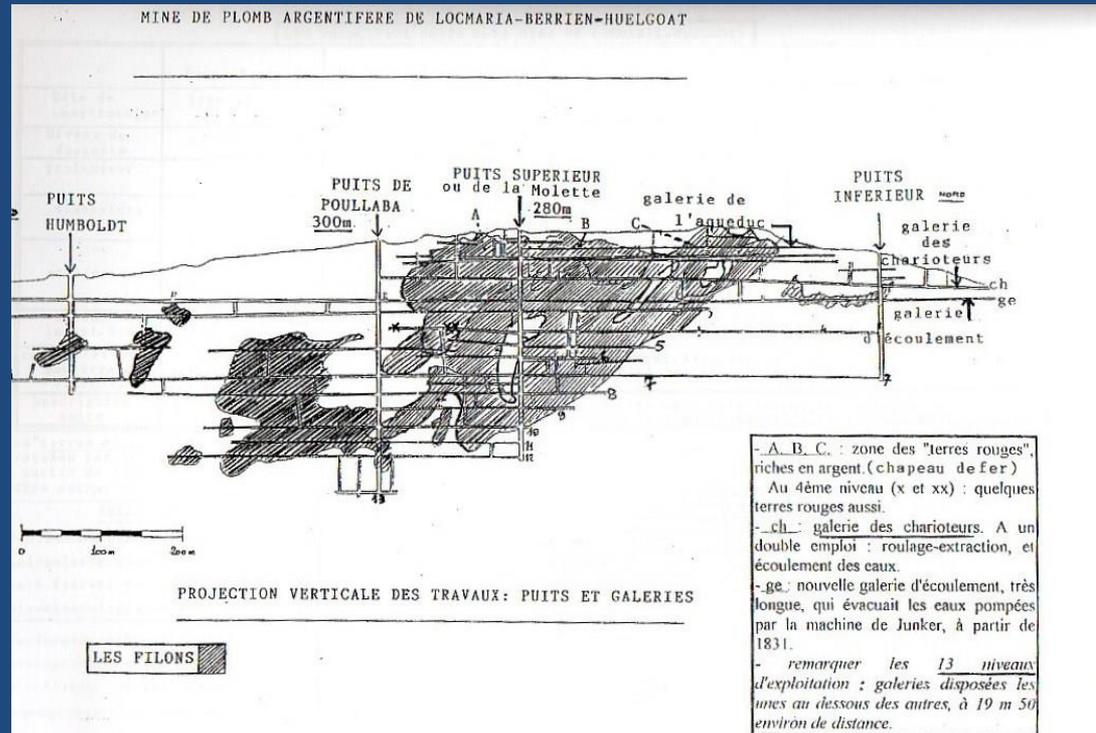


UNE REVUE SYSTÉMATIQUE DES 3 TYPES DE STOCKAGE

- Nappe aquifère
- Galerie non revêtue (ou ancienne mine)
- Cavité saline

Esquisse du fonctionnement, Localisations
(Géostock)

EXEMPLE D'ÉTUDE D'ANCIENNE MINE : HUELGOAT (près de BRENNILIS, Finistère)



Mine Pb-Ag

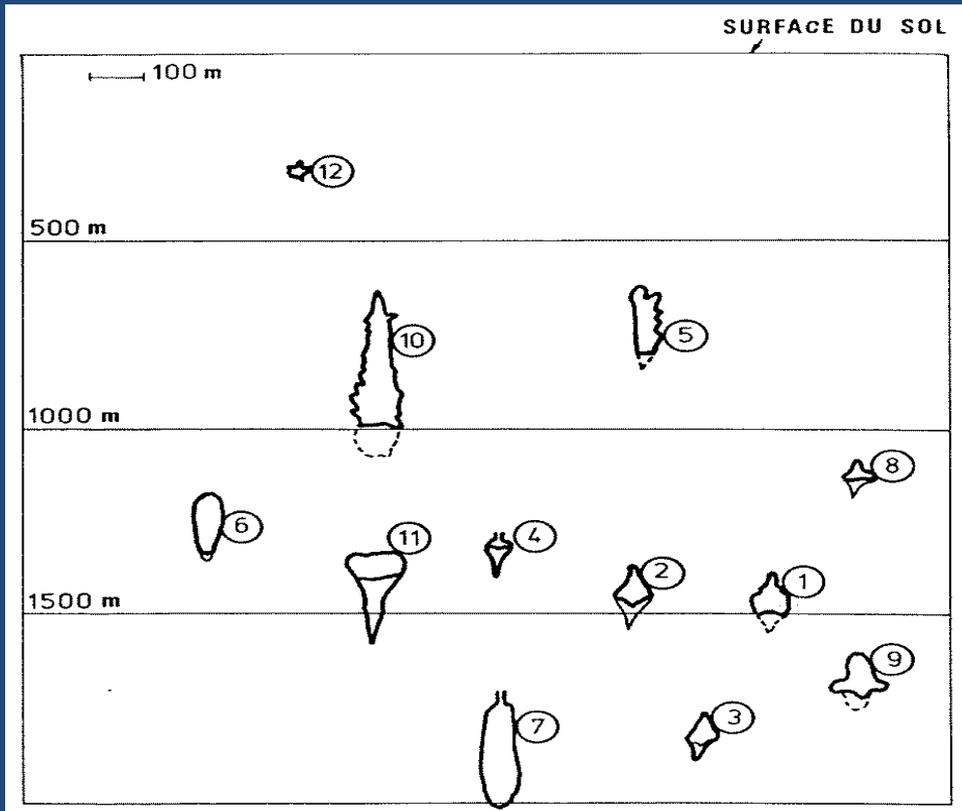
Localisation
exceptionnelle
(réseau et besoins)

Mais

- Volume limité
- Connaissance incomplète
- Trop d'ouvertures à fermer



CAVITÉS SALINES



H = 200 à 3 000 mètres

V = 5,000 à 5,000,000 m³

Soit production de saumure
(donc reconversion possible ...)

Soit stockage de : brut,
essence, naphta, kérosène, gaz
naturel, éthane, hydrogène ...
... et air

GISEMENTS DE SEL

Centaines de cavités
100,000 m³ à 1,000,000 m³
200 à 300 m

Pas de cavités
Potentiel intéressant

cavités

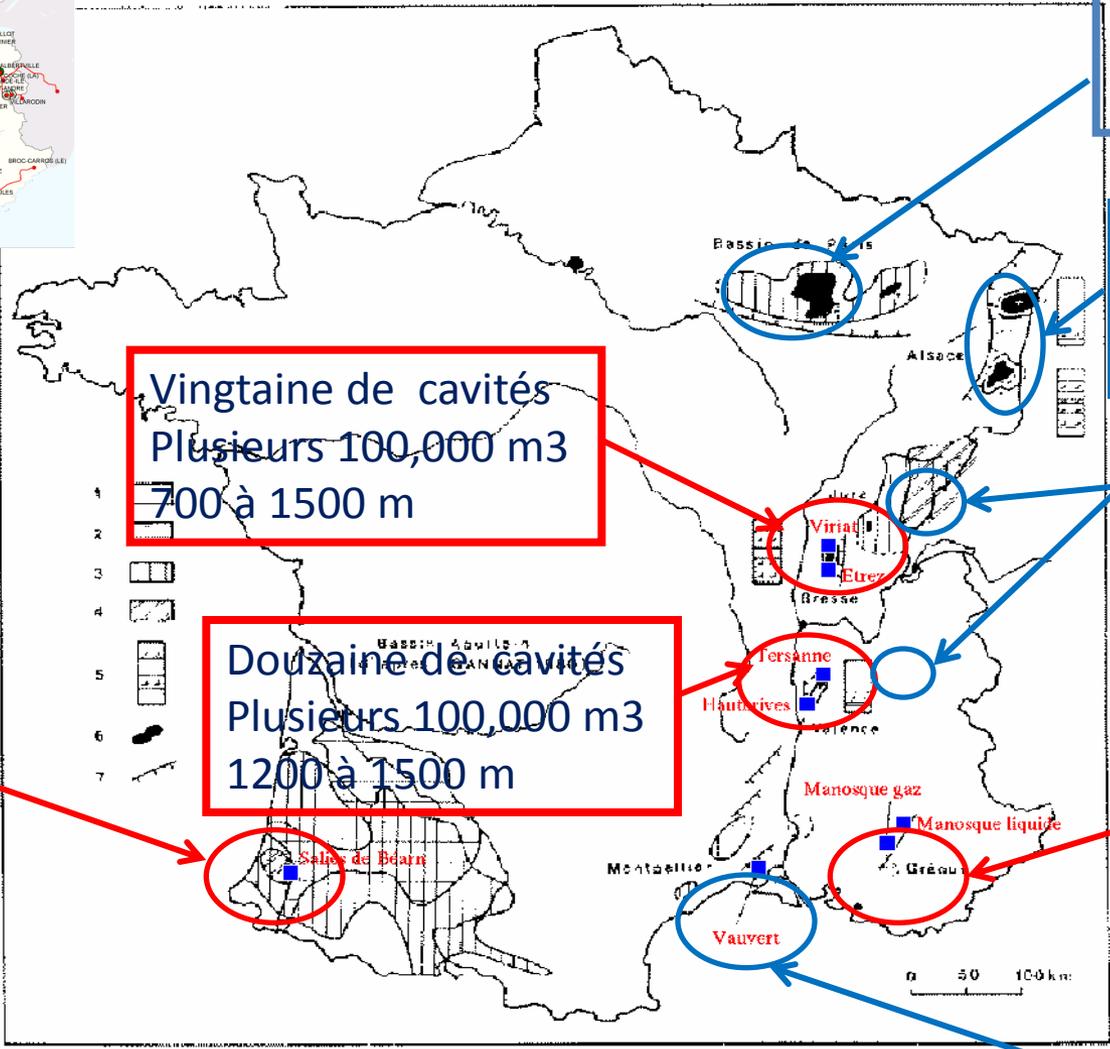
40 cavités
Plusieurs 100,000 m³
600 à 1300 m

Plusieurs cavités
Plusieurs 100,000 m³
Trop profond

Vingtaine de cavités
Plusieurs 100,000 m³
700 à 1500 m

Douzaine de cavités
Plusieurs 100,000 m³
1200 à 1500 m

4 cavités
Petit volume
350 à 700 m



— Les gisements de sel en France et les possibilités de stockages d'hydrocarbures.
1. bassins oligocènes; 2. bassins liasiques; 3. bassins d'âge keuper; 4. bassins d'âge muschelkalk; 5. niveaux salifères superposés; 6. zone favorable au stockage (épaisseur de sel supérieure à 100 m, profondeur supérieure à 1 600 m, pureté supérieure à 80 %); 7. taille majeure.

Fond de carte
D'après Friès, 1981
SACRE



« SACRE »



INSTALLATIONS SOUTERRAINES :

2 caractéristiques

- Grands volumes de caverne car petit $P_{max} - P_{min}$
- Grands diamètres de puits car grand débit

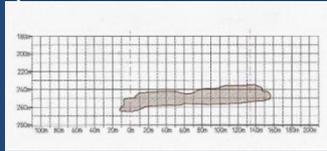
3 soucis

- Etanchéité (-)
- **Thermodynamique et thermomécanique (=)**
- Usure et corrosion des tubes (+)

VITESSE DE FERMETURE 30%/an

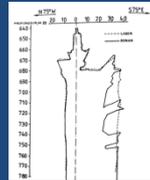
10⁻⁵/an

RETOUR D'EXPÉRIENCE CAES et STOCKAGES de GAZ NATUREL



Gellenoncourt

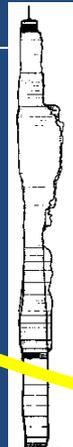
Huntorf



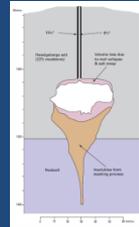
3 10⁻⁴/an



Etrez



Markham

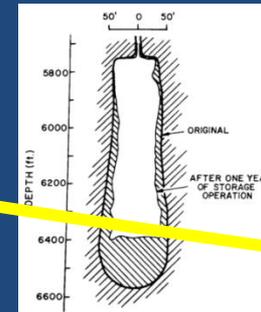


Kiel

Tersanne



Eminence



1 000 m

PROFONDEUR

2 000 m

SACRE

RETOUR d'EXPÉRIENCE (bilan)

- Les désordres en opération (perte de volume, écaillage) surviennent dans des cavernes profondes de stockage de gaz (> 1300 m)
- Les CAES sont *a priori* moins profonds et soumis à de faibles amplitudes de pression mais :
 - Variations journalières, détente rapide, refroidissement
 - Fatigue multi-cyclique



« SACRE »

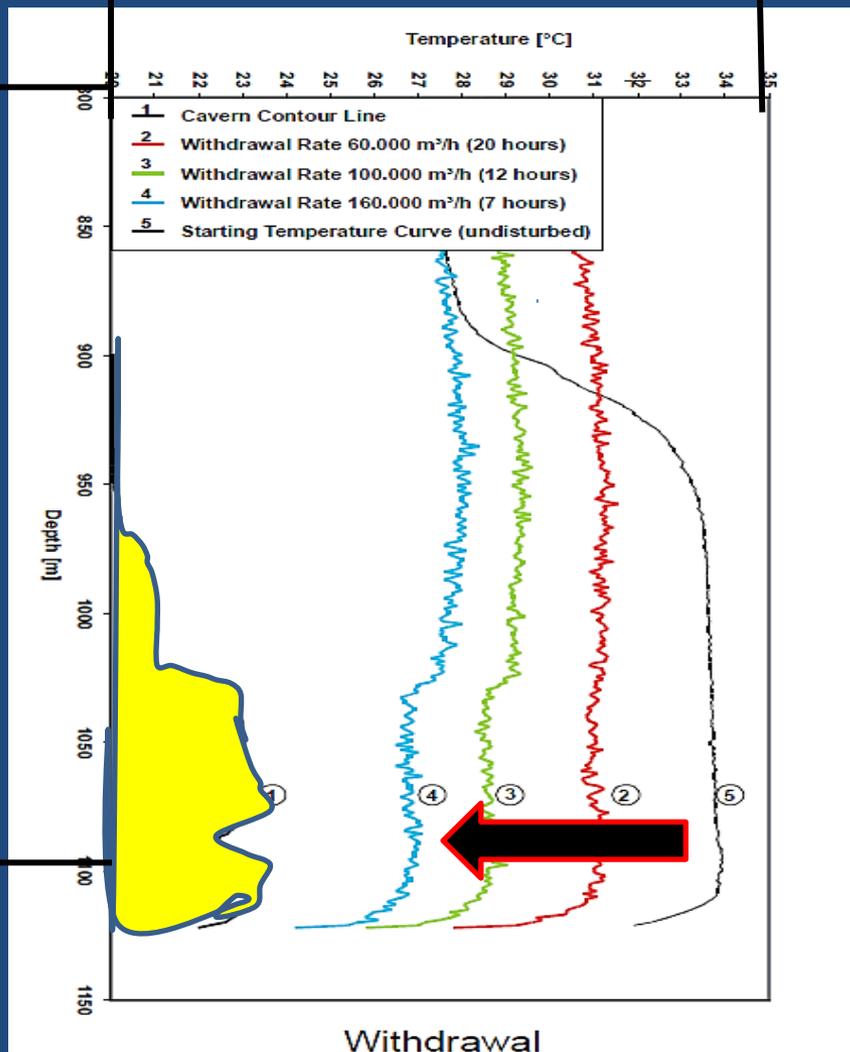


La détente s'accompagne d'un refroidissement

20°C

35°C

800 m



EFFETS DE TROIS
SOUTIRAGES
DE LA MÊME
MASSE DE GAZ
A 3 DÉBITS
DISTINCTS

Klafki & al, 2003

1100 m



géostock

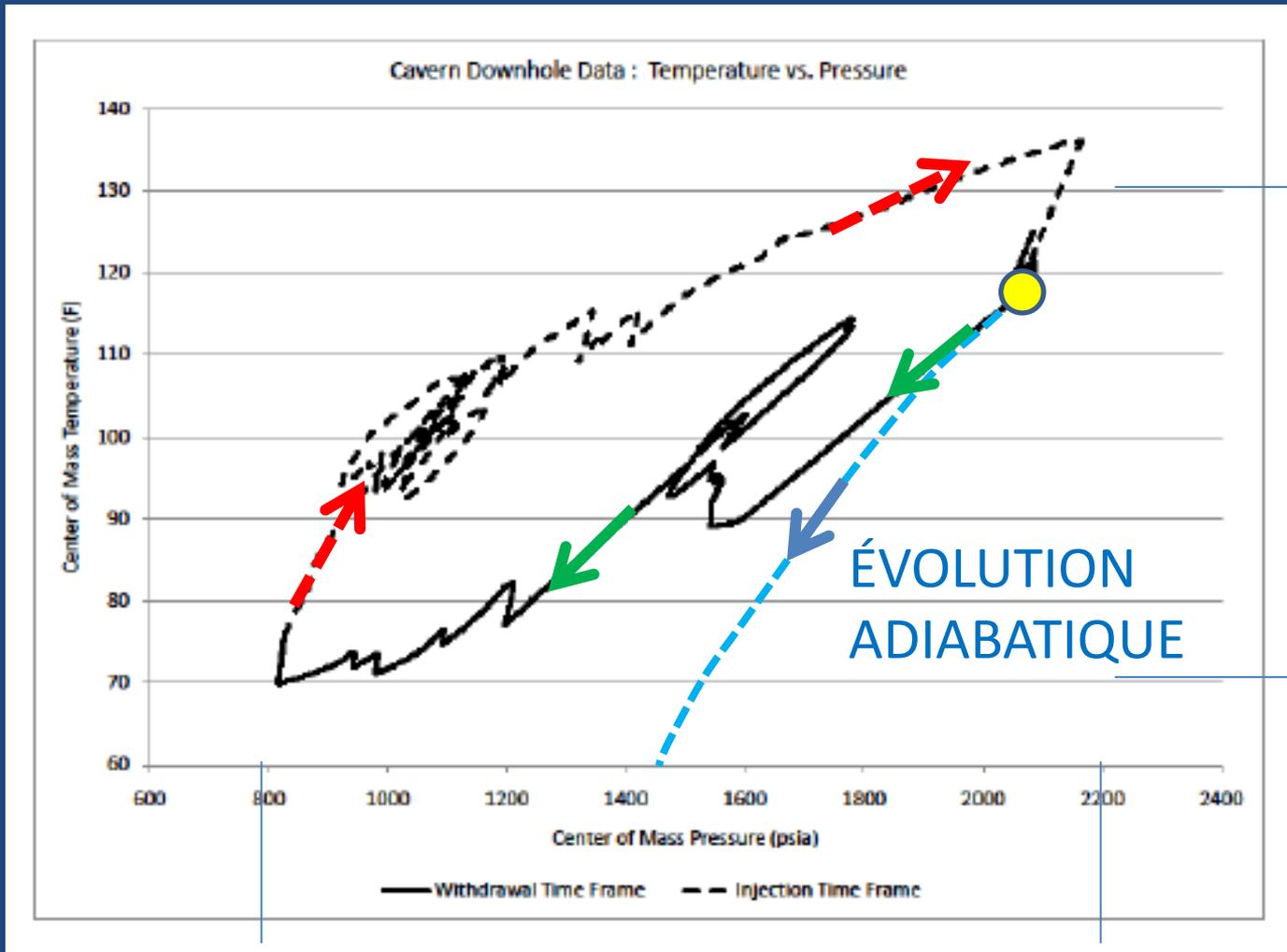


« SACRE »



La détente est-elle adiabatique ?

Pression-Température pendant un cycle, stockage de gaz naturel (Benefield, 2010)



130°F
(54.4°C)

70°F
(21.1°C)

800 psi
SACRE
(5.6 MPa)

2200 psi
asprom, 3 décembre 2012
(16.2 MPa)

Evolution de la température de l'air

$$mC_v \dot{T} - \dot{m}rT = K_R \int \frac{\partial T}{\partial n} dA + \langle \dot{m} \rangle C^P (T^{inj} - T)$$



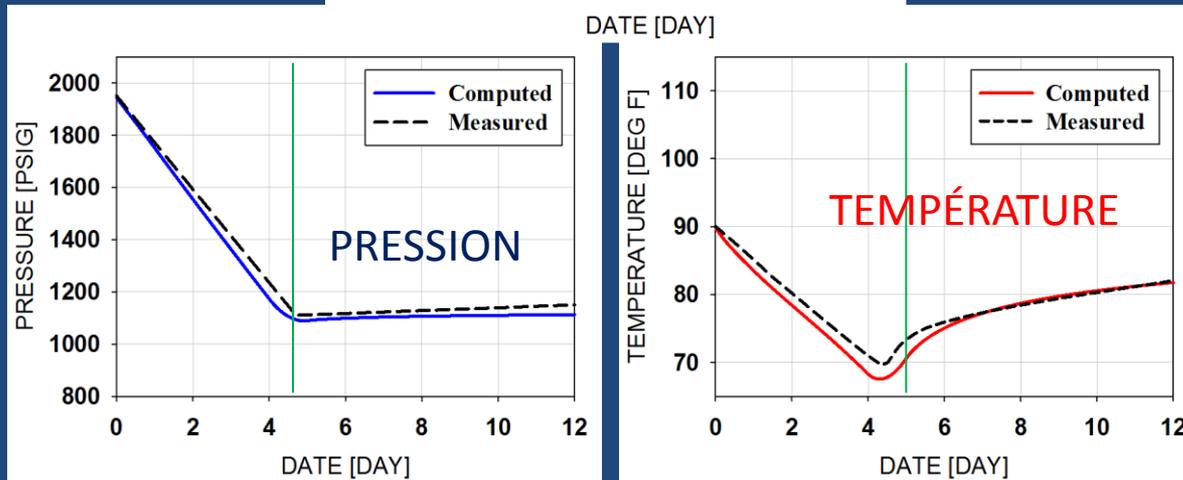
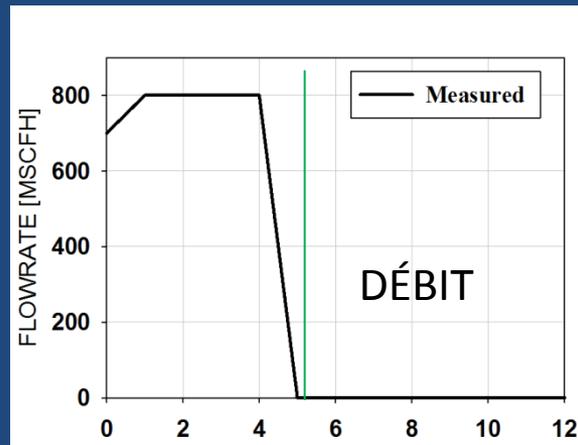
Energie interne
–
Puissance
Efforts extérieurs



Apport de chaleur
du massif
par conduction

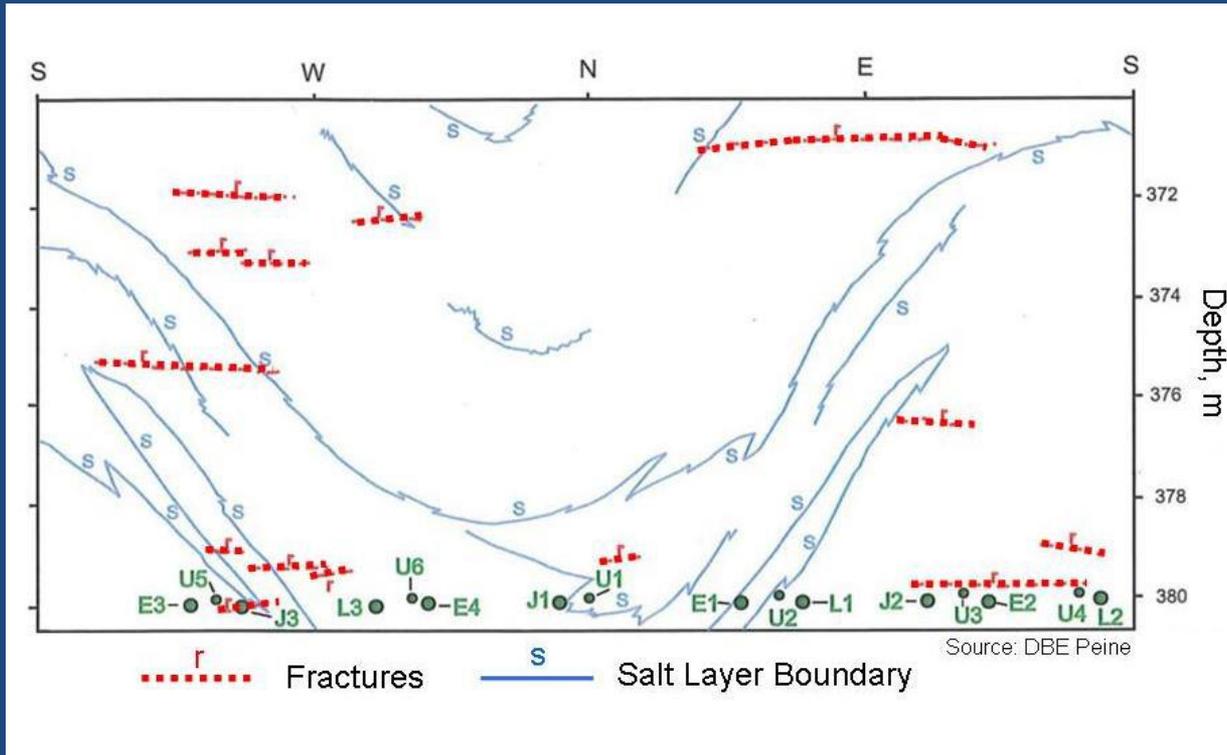


Apport d'enthalpie
par injection d'air

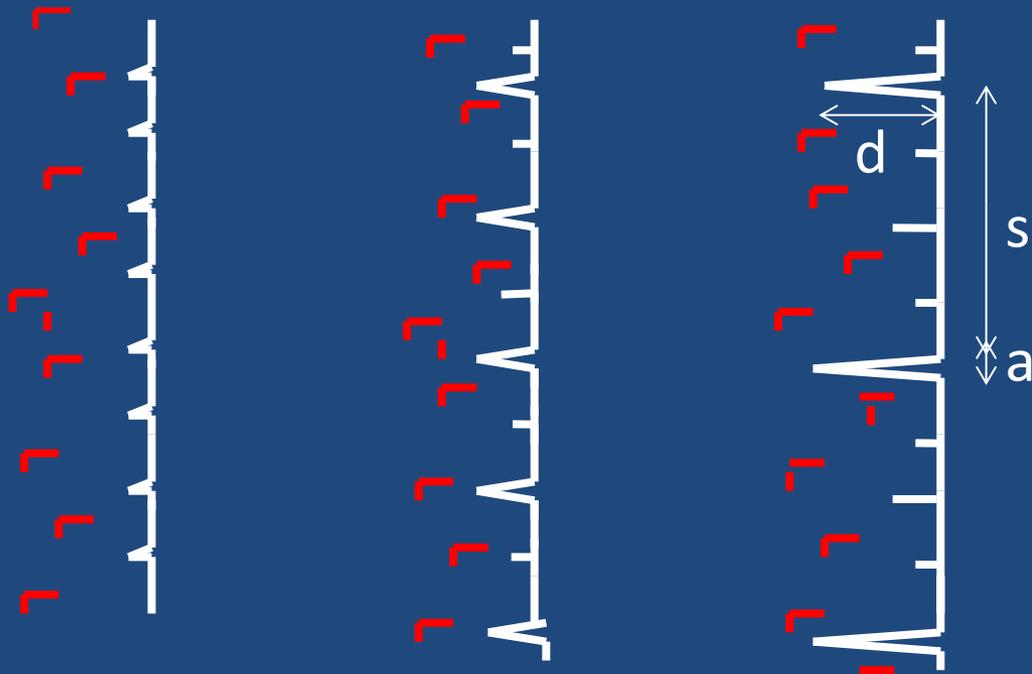


Caverne à Melville, Canada (Crossley, 1996).
Débit mesuré ; pression et température mesurées et observées

EFFETS MÉCANIQUES DU REFROIDISSEMENT



Puits de la mine de sel de Gorleben (Allemagne), -380 m
La température de l'air de ventilation
chute de 20°C pendant l'hiver,
engendrant un réseau de fractures verticales espacées de
2,8 m en moyenne (Zapf et al., 2012)



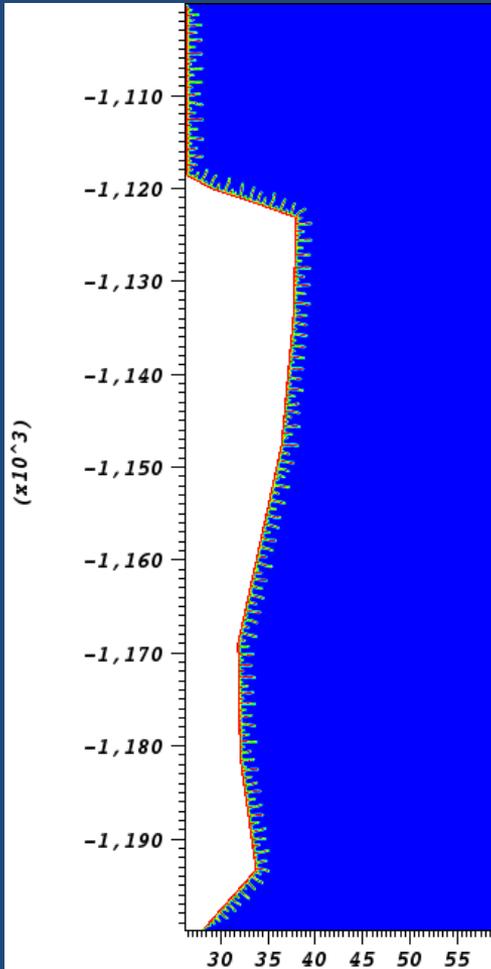
37

Quand le front
froid avance
plus profondément
dans le massif,

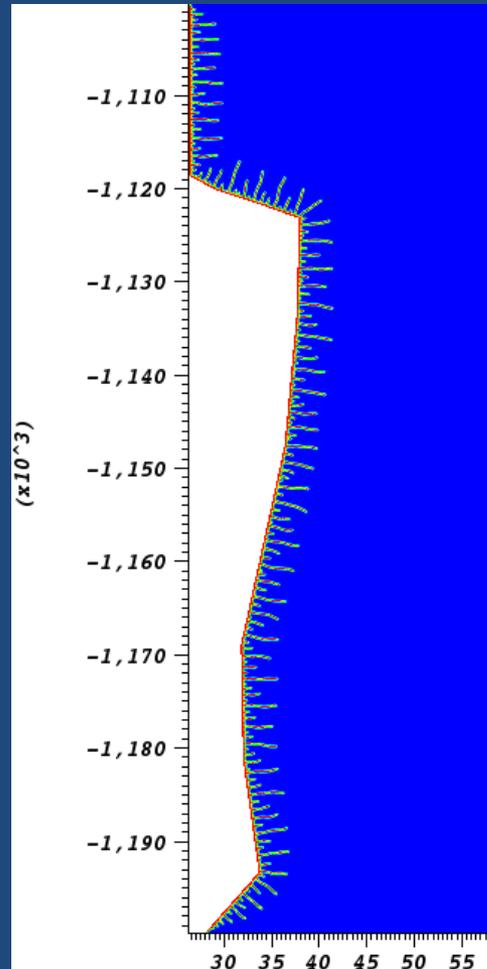
quelques fractures
s'approfondissent

d'autres s'arrêtent

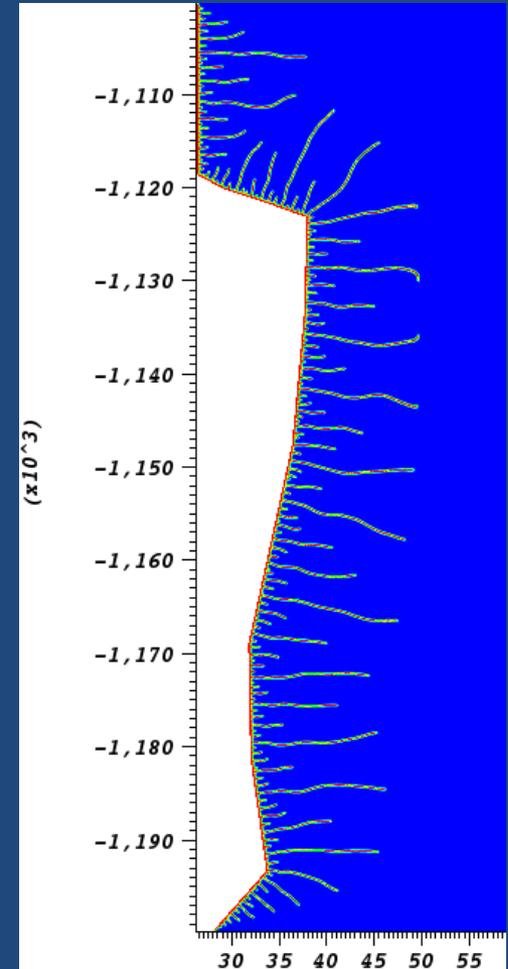
On peut estimer
 d , a/s , d/s
(Mécanique de la
Rupture)



3 jours, $\Delta = -40^\circ\text{C}$



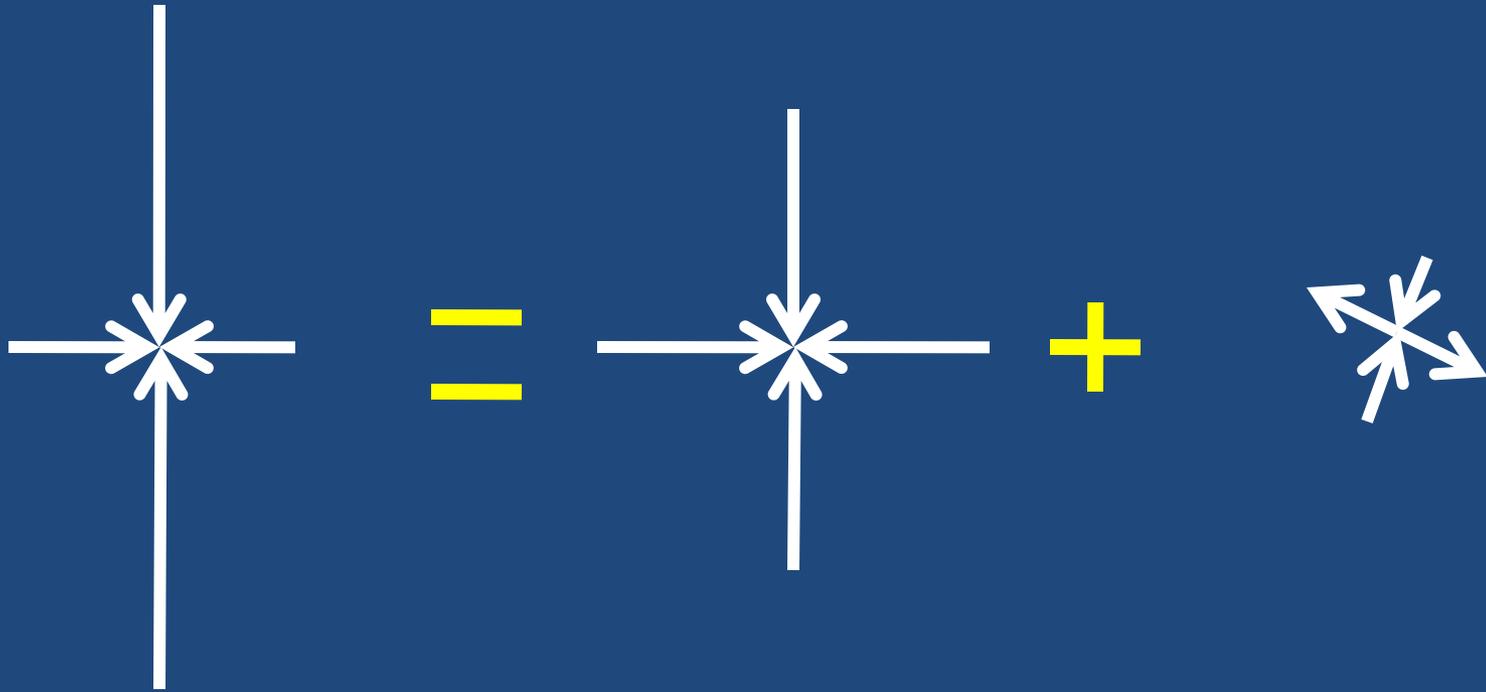
7 jours, $\Delta = -40^\circ\text{C}$



6 mois, $\Delta = -40^\circ\text{C}$

RETOUR d'EXPÉRIENCE (bilan)

- Les désordres en opération (perte de volume, écaillage) surviennent dans des cavernes profondes de stockage de gaz (> 1300 m)
- Les CAES sont *a priori* moins profonds et soumis à de faibles amplitudes de pression mais :
 - Variations journalières, détente rapide, refroidissement
 - **Fatigue multi-cyclique**



CONTRAINTE

=

CONTRAINTE
MOYENNE

+

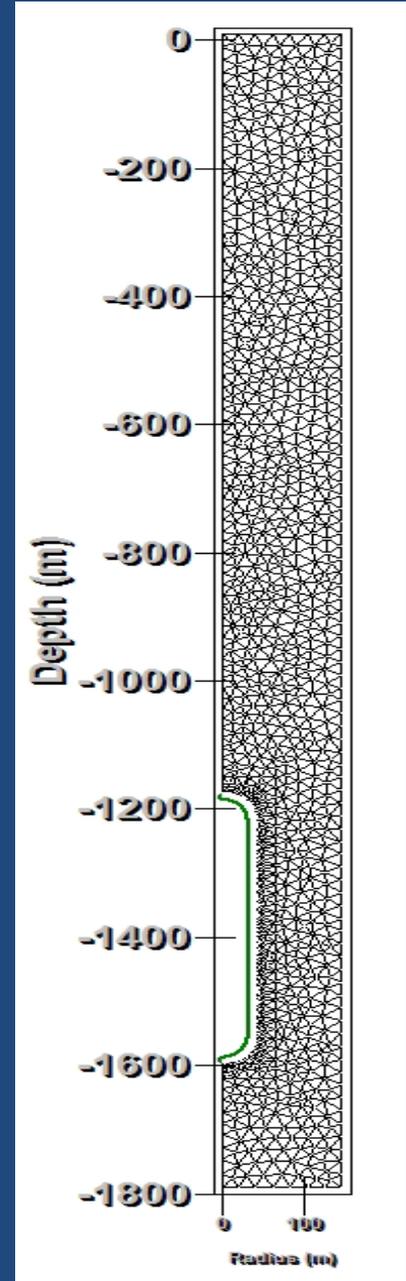
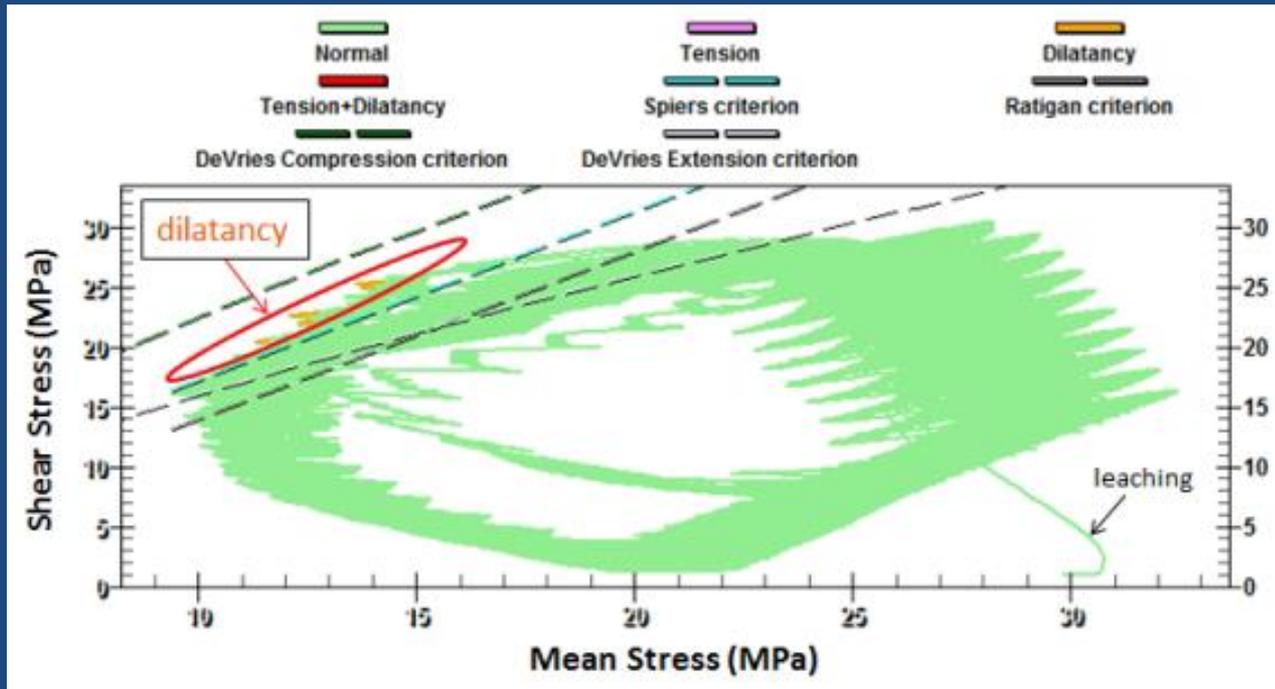
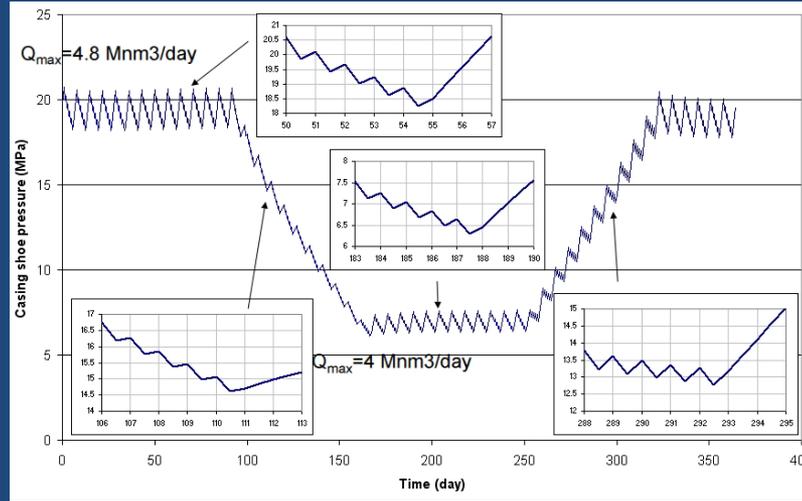
CONTRAINTE
DÉVIATORIQUE



SACRE

Karimi-Jafari et al.

Geostock-LMS



UN BILAN

MATURITÉ DE LA FILIÈRE

- Niveau de maturité des technologies mises en jeu

Technologies / TRL État mars 2010	CAES gaz 1ère génération	CAES gaz 2nde génération	CAES adiabatique (voie AA-CAES)
compresseur	8	8	5
Stockage d'air comprimé	8	8	8
Stockage de chaleur (TES)	NA	NA	3
Détente	8	6	6
Turbine à gaz	NA	9	NA
Échangeur Air-air	NA	6	NA
TRL filière juin 2010 <small>(TECHNOLOGY READINESS LEVEL)</small>	8	6	3
TRL filière 2015	8	8	6

TECHNOLOGY READINESS LEVEL (NOTE SUR 9)

**LE POINT CRITIQUE POUR LA MATURITÉ
DE LA TECHNIQUE EST LE STOCKAGE DE
CHALEUR HP-HT À LA SURFACE DU SOL**

PERSPECTIVE PROCHAINE

DESSIN D'UN CAES A MANOSQUE



« SACRE »

