



Aspects thermodynamiques et géomécaniques liés au stockage de l'hydrogène en cavités salines

Faouzi HADJ-HASSEN

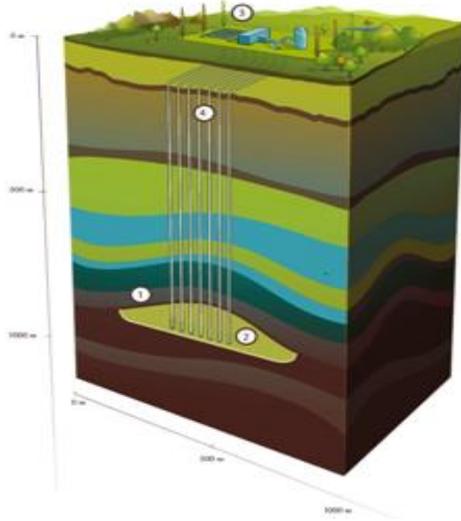


Centre de Géosciences
Centre Thermodynamique des Procédés

- ❑ Contexte et enjeux
- ❑ Stockage souterrain du gaz en général et dans les cavités salines en particulier
- ❑ Conception d'un stockage d'hydrogène en cavités salines
- ❑ Applications

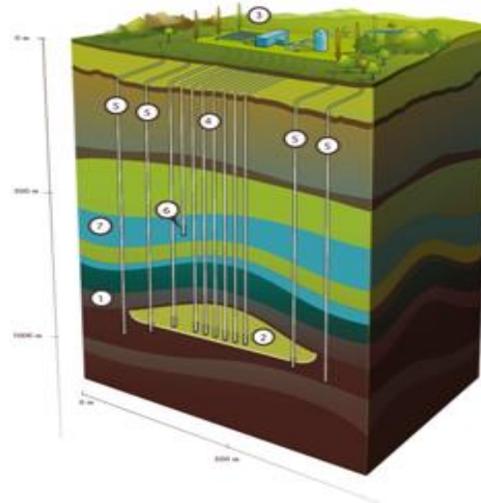
- ❑ Stockage souterrain des hydrocarbures gazeux et liquides : technologie mature (plus d'un siècle d'application)
 - Gaz naturel
 - Pétrole et GPL
- ❑ Part de plus en plus importante des énergies renouvelables dans le mix énergétique (caractère intermittent)
- ❑ Stockage de l'électricité produite par les énergies renouvelables
 - Air comprimé
 - Electrolyse-méthanation : H₂, O₂, CO₂ et CH₄ de synthèse
- ❑ Nouveaux modes de stockage : cycles rapides (quotidiens)
- ❑ Fortes sollicitations des cavités avec une prédominance des effets thermiques
- ❑ Nouvelle approche pour optimiser le stockage et garantir sa sécurité

Stockage en gisement déplété



Gaz naturel
CO₂
Air comprimé ??

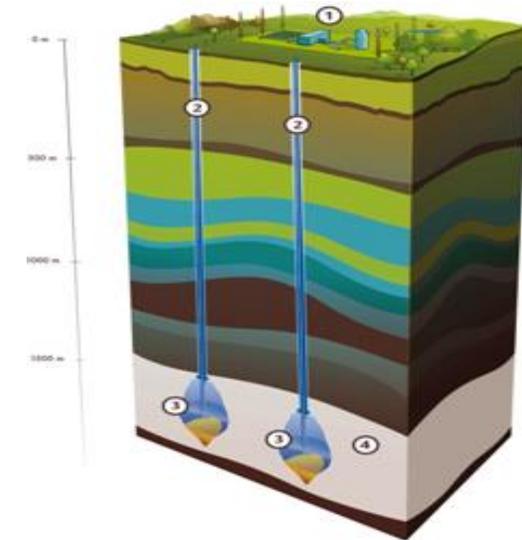
Stockage en nappe aquifère



Gaz naturel
CO₂
Air comprimé ??

(Storengy)

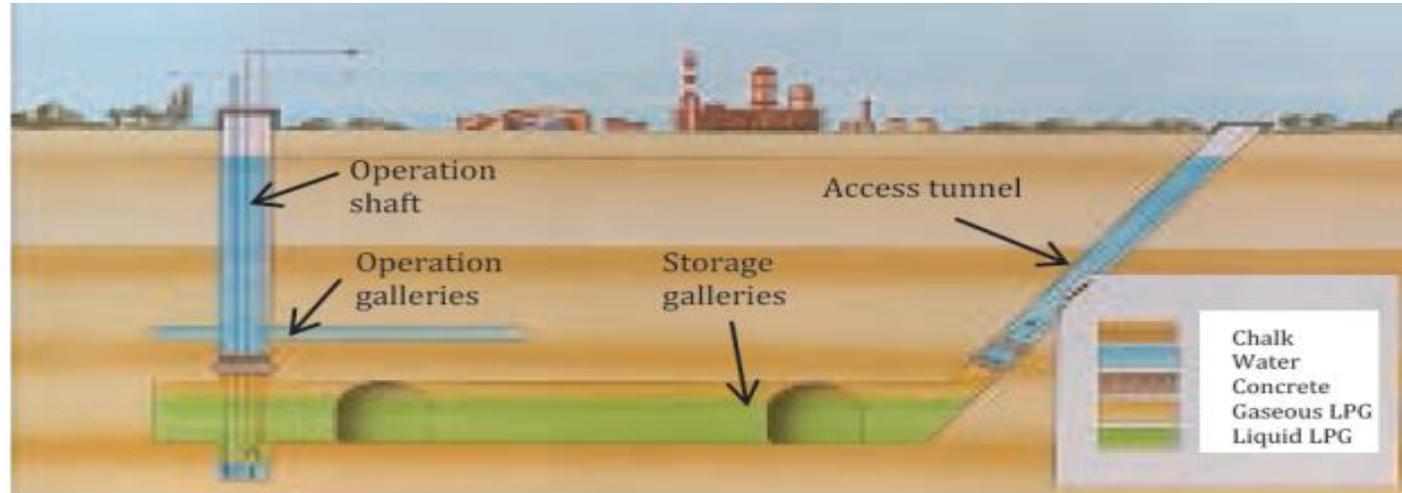
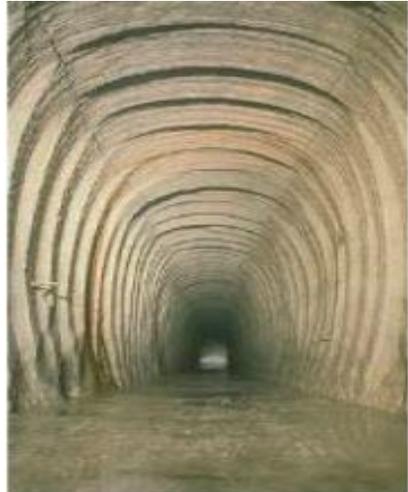
Stockage en cavités salines



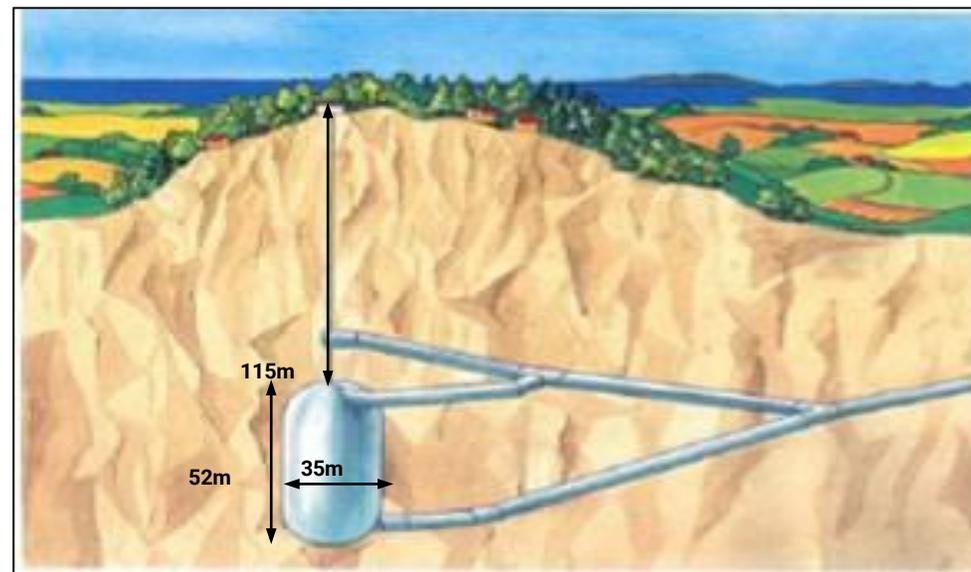
Tout type de stockage

2. Stockage souterrain du gaz

Stockage en cavités minées dans des roches compétentes



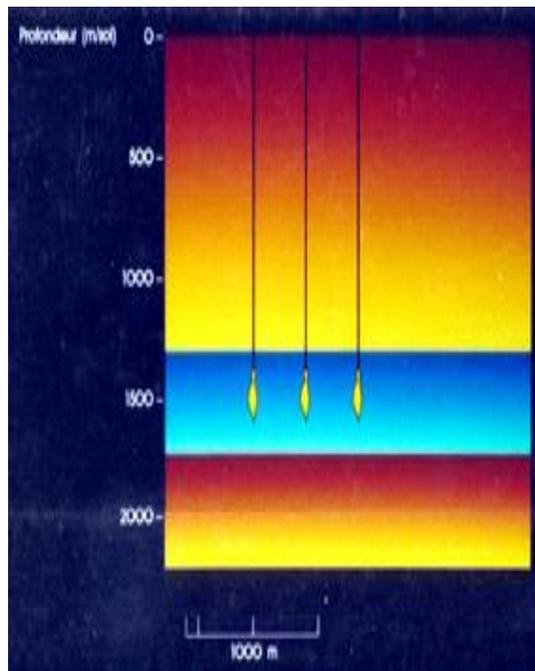
**Cavités minées sous
barrière hydraulique**
(Geostock)



Cavités minées revêtues
(Storengy)

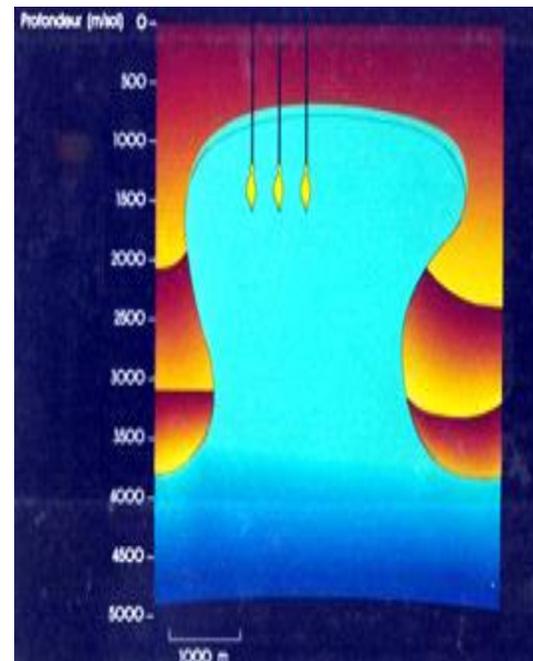
Stockage en cavités salines :

- Abondance des formations salines
- réservoir facilement réalisable : lessivage
- matériau étanche et inerte, mais particulier
- tout type de stockage gazeux ou liquide inerte
- hautes pressions, hauts débits, forte réactivité

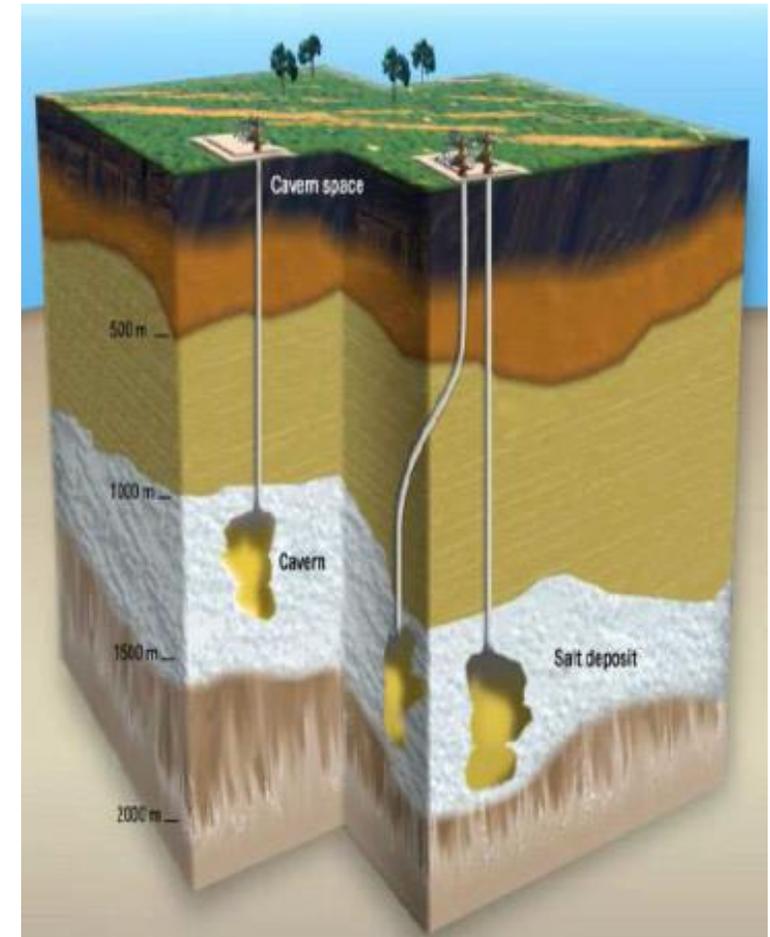


Sel en couche

(Storengy)

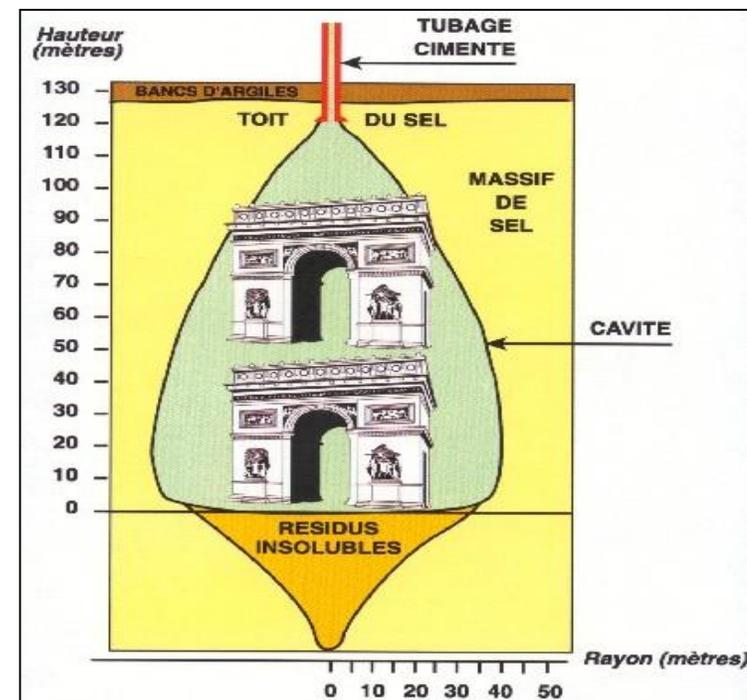
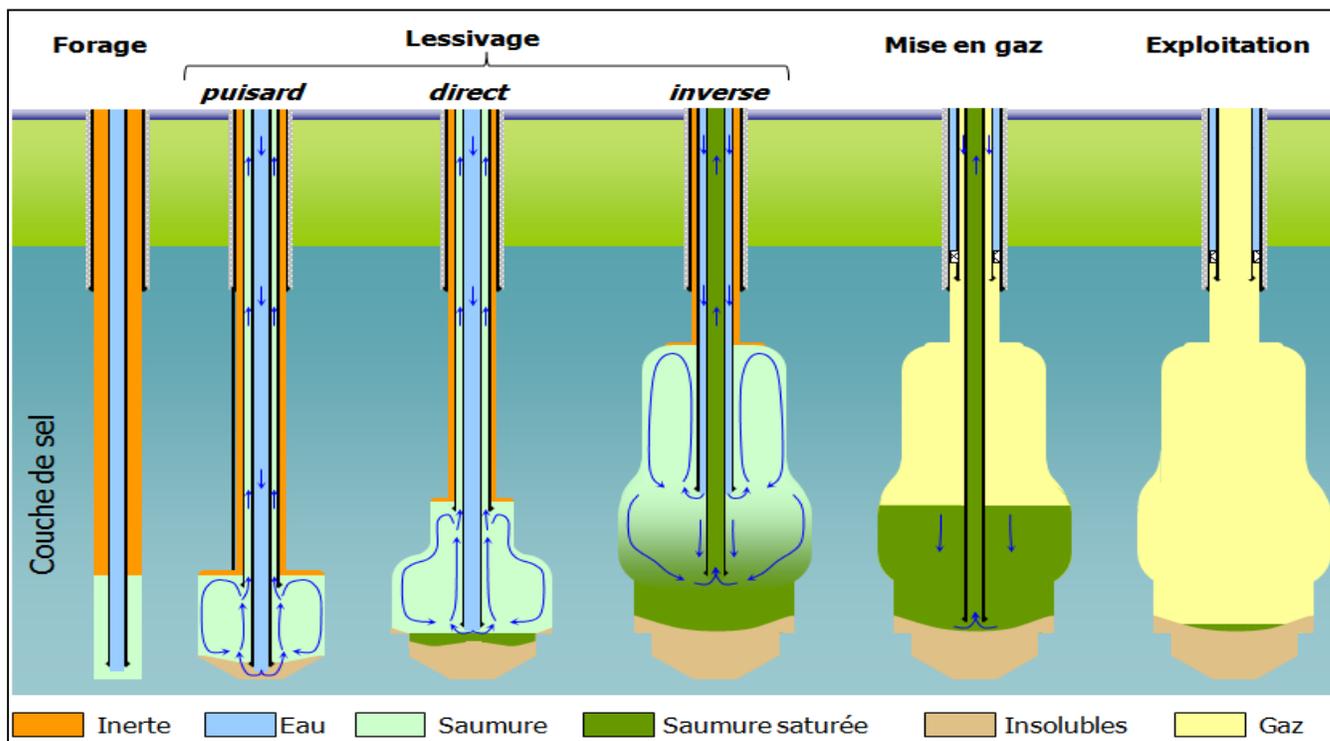


Sel en dôme

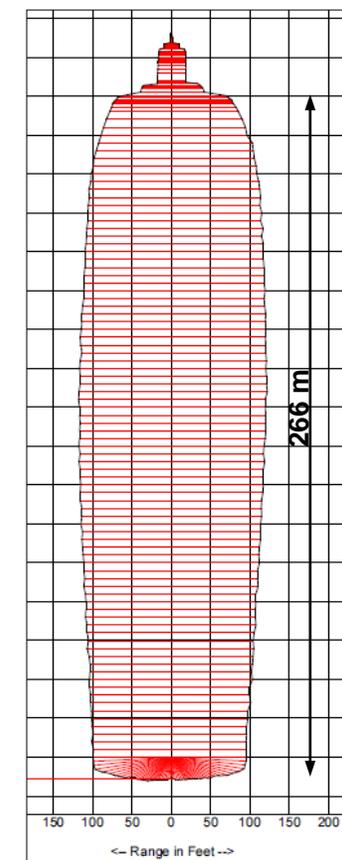


2. Stockage souterrain du gaz

Création de la cavité saline



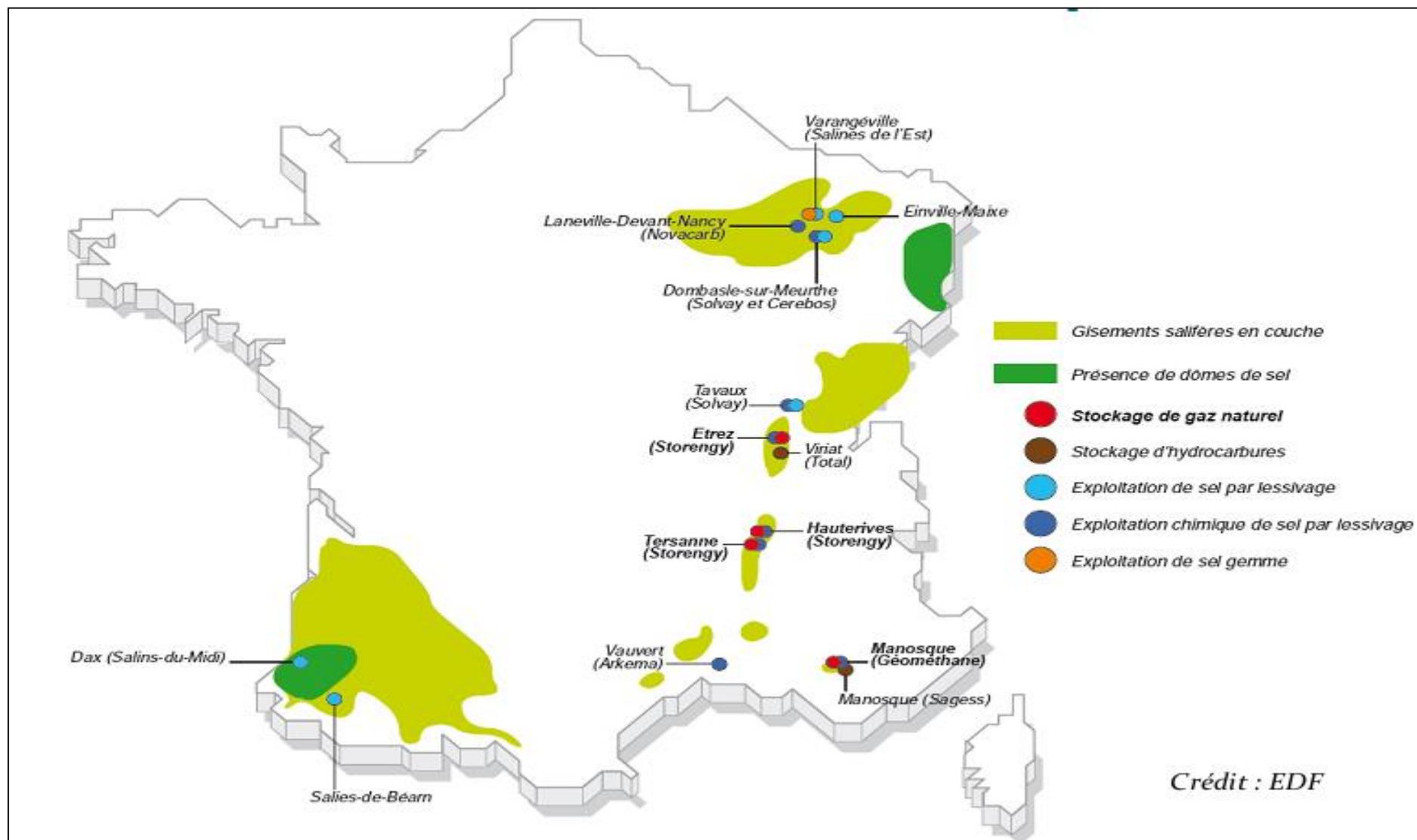
(Storengy)

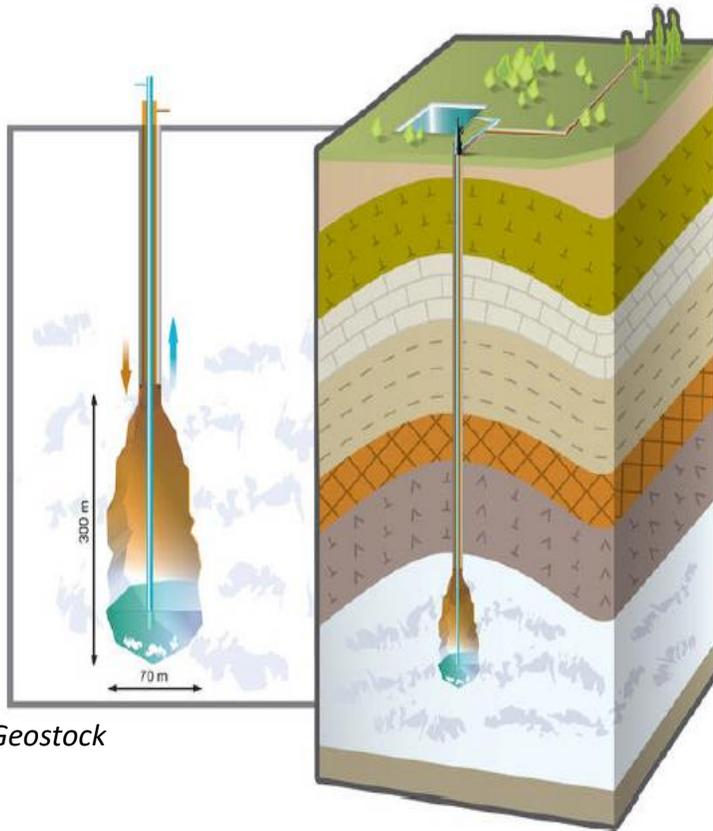


Cavité Spindletop (Air Liquide)

2. Stockage souterrain du gaz

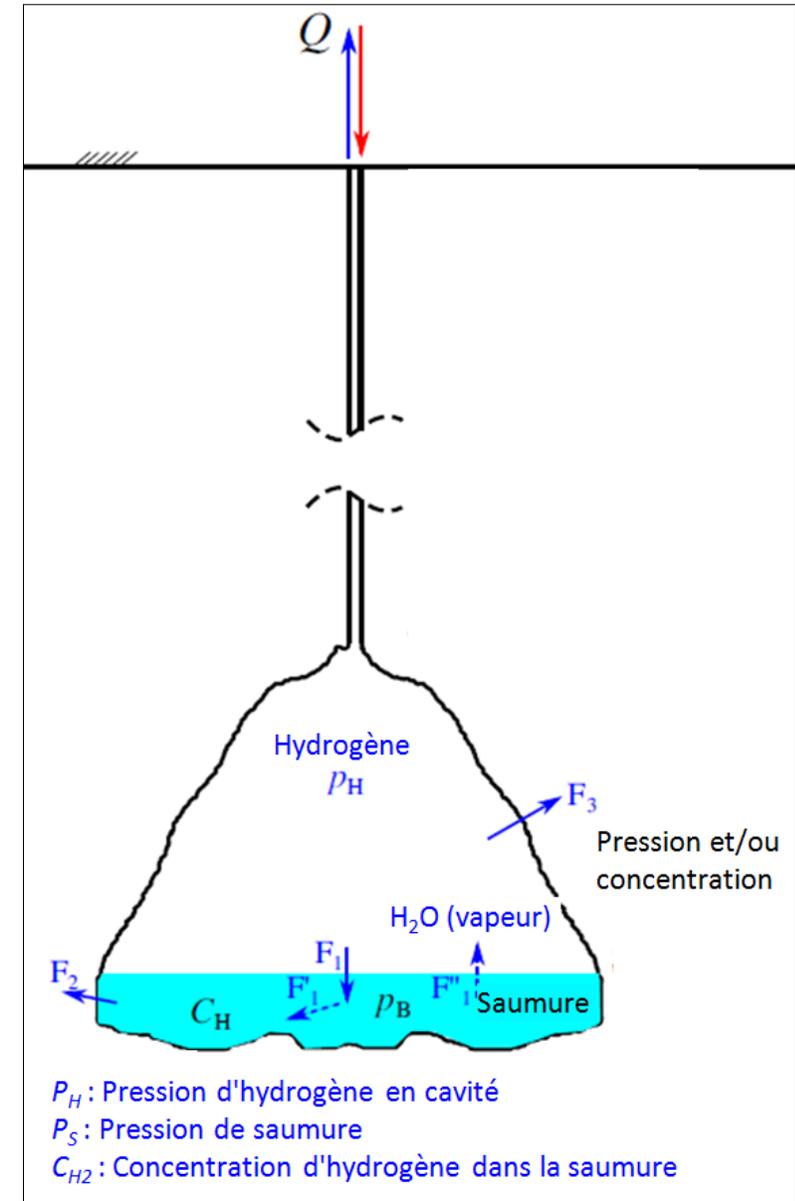
Sel en France





source : Geostock

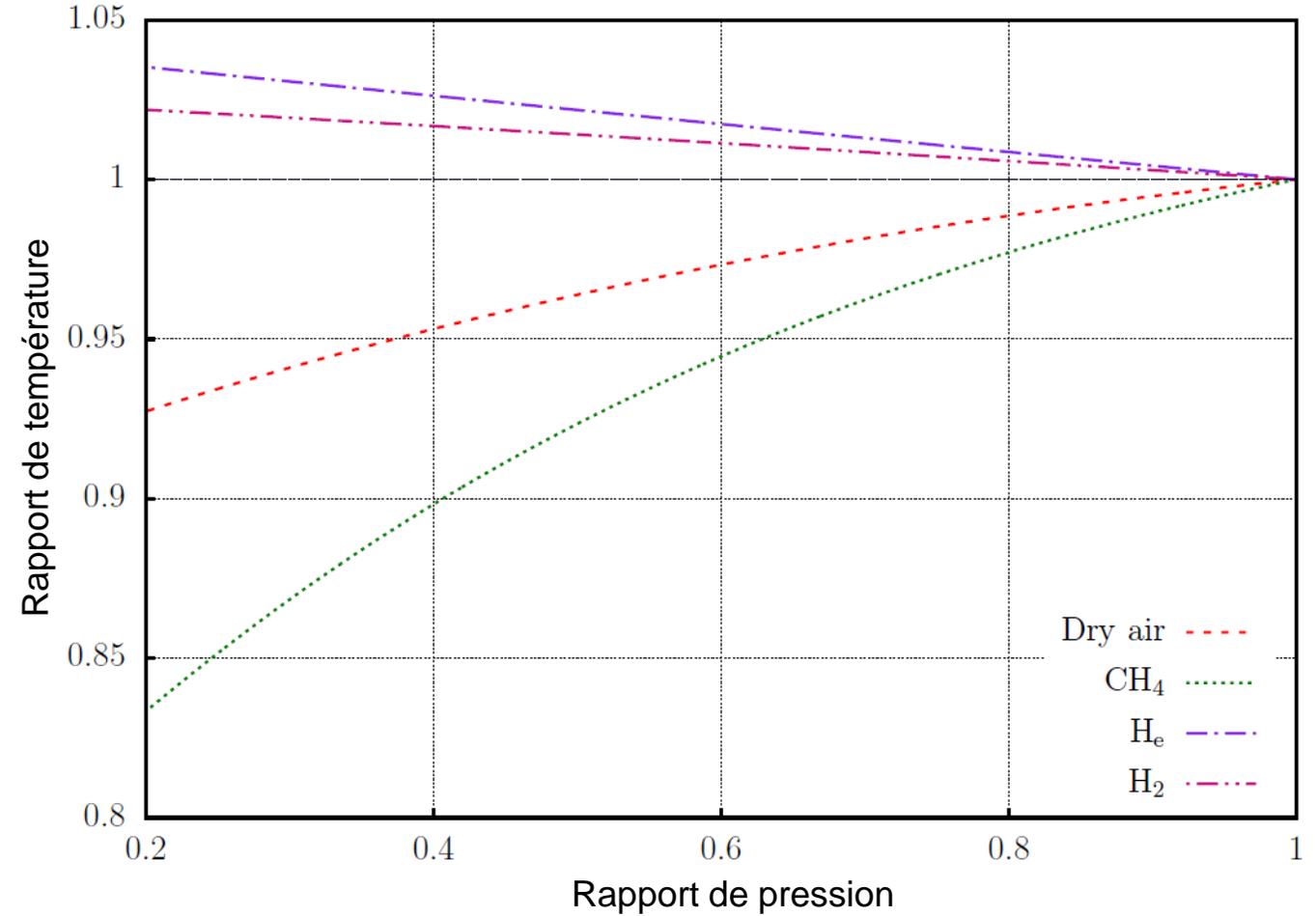
- Thermodynamique du gaz stocké (hydrogène)
- Comportement TM de la roche hôte (sel)
- Interactions du gaz stocké avec l'environnement du stockage
 - dissolution dans la saumure résiduelle
 - humidité du gaz
 - diffusion et perméation dans le sel (H2 en particulier, THM)



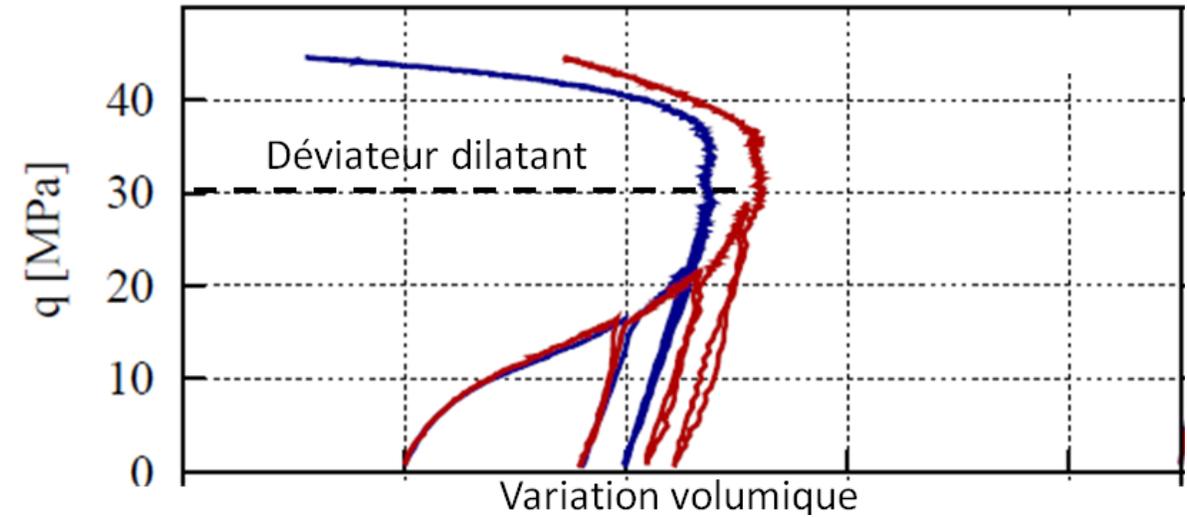
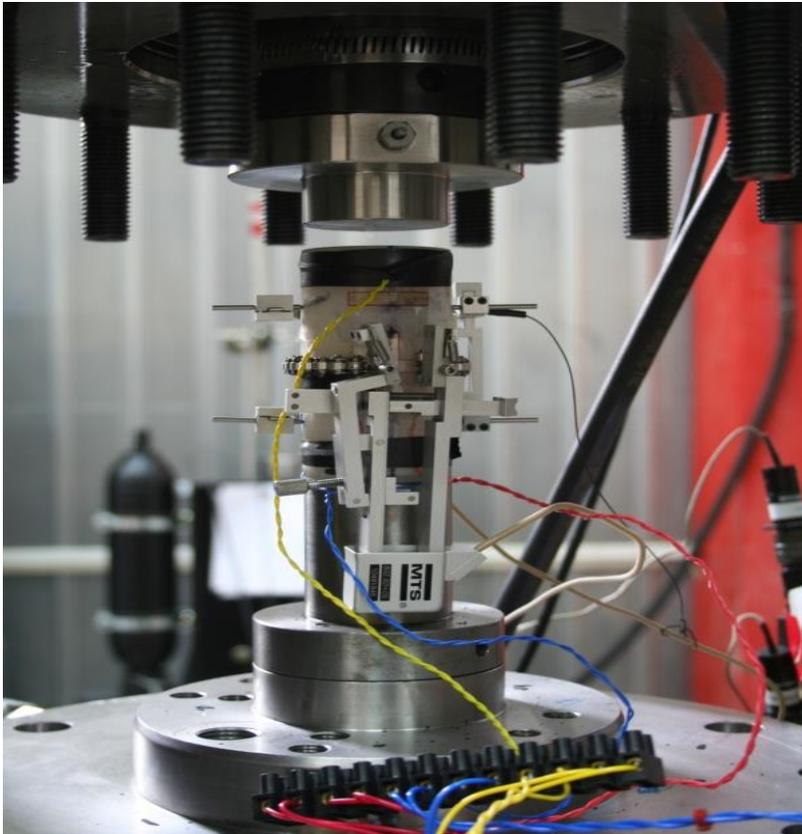
3. Conception du stockage d'hydrogène en cavité saline

Thermodynamique de l'hydrogène

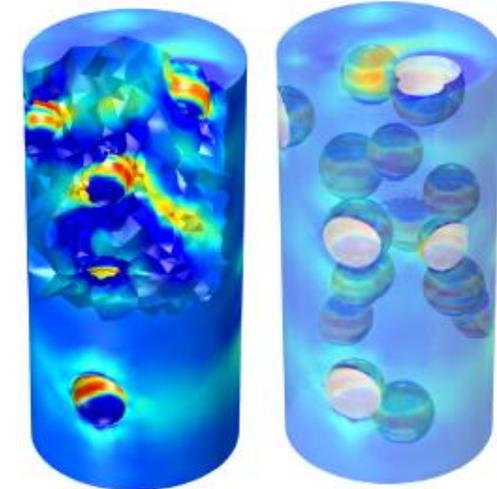
Variation de la température en fonction de la pression (P variant de $P_o=22$ MPa à $0.2P_o$, $T_o=40^\circ\text{C}$)



Rhéologie du sel

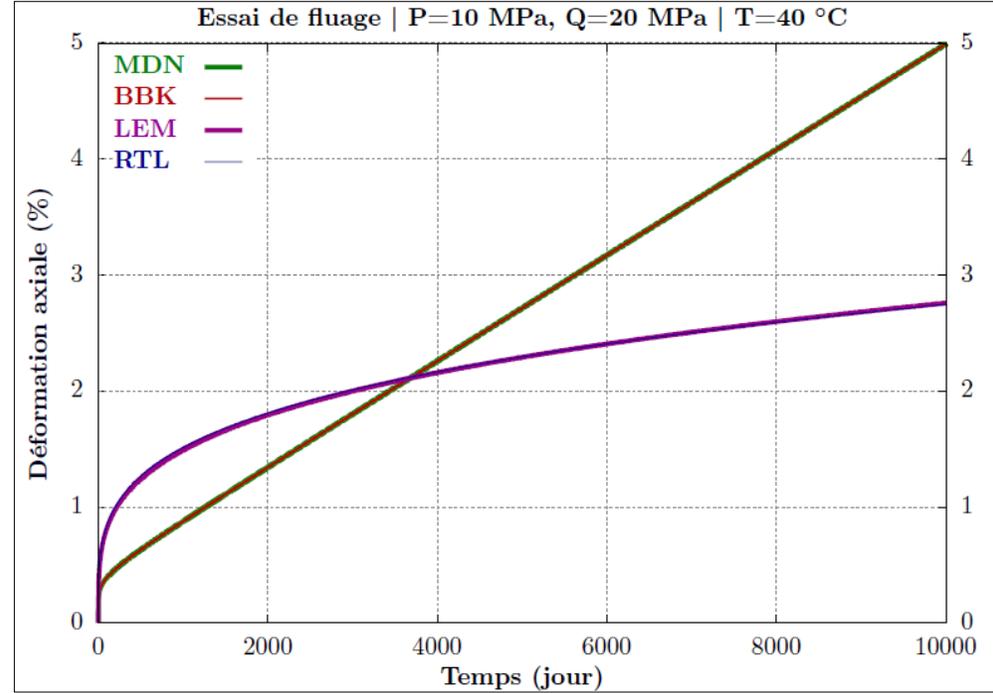
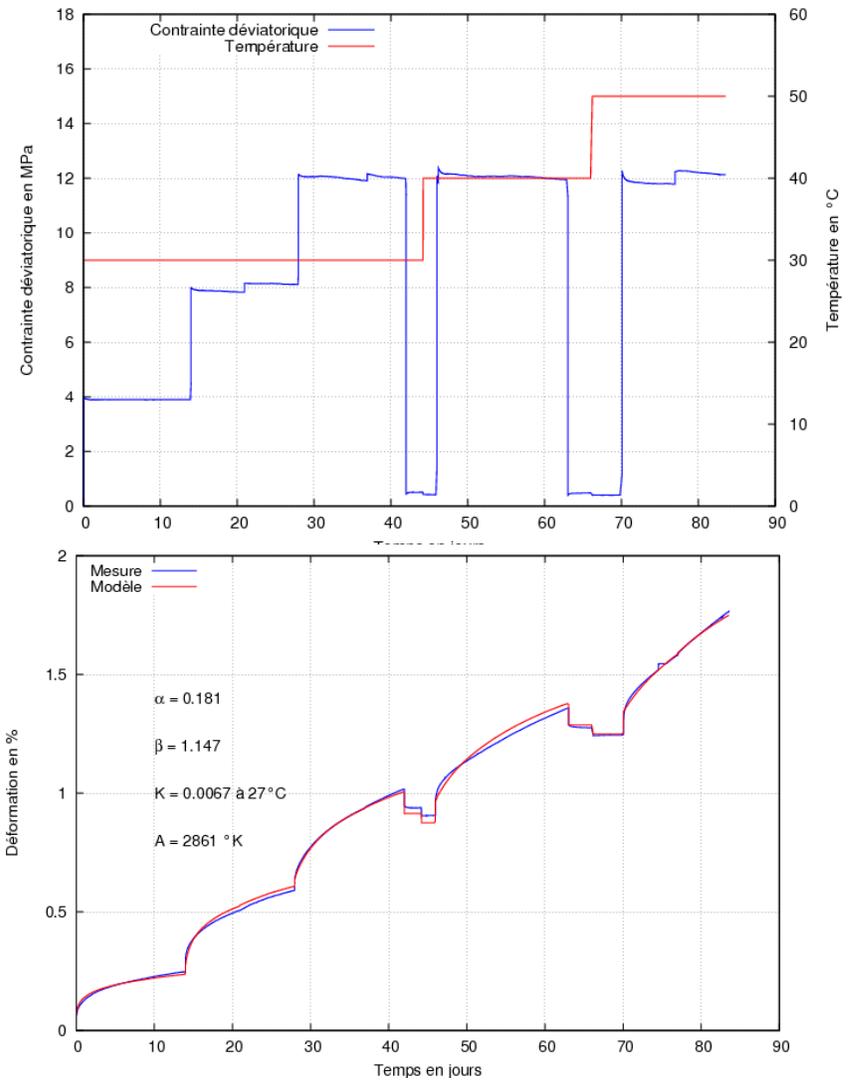


- Endommagement du sel par traction ou dilatance
- Effet des insolubles sur cet endommagement
- Actuellement : évaluation de ce risque en post-traitement
- Intégration de l'endommagement dans la modélisation



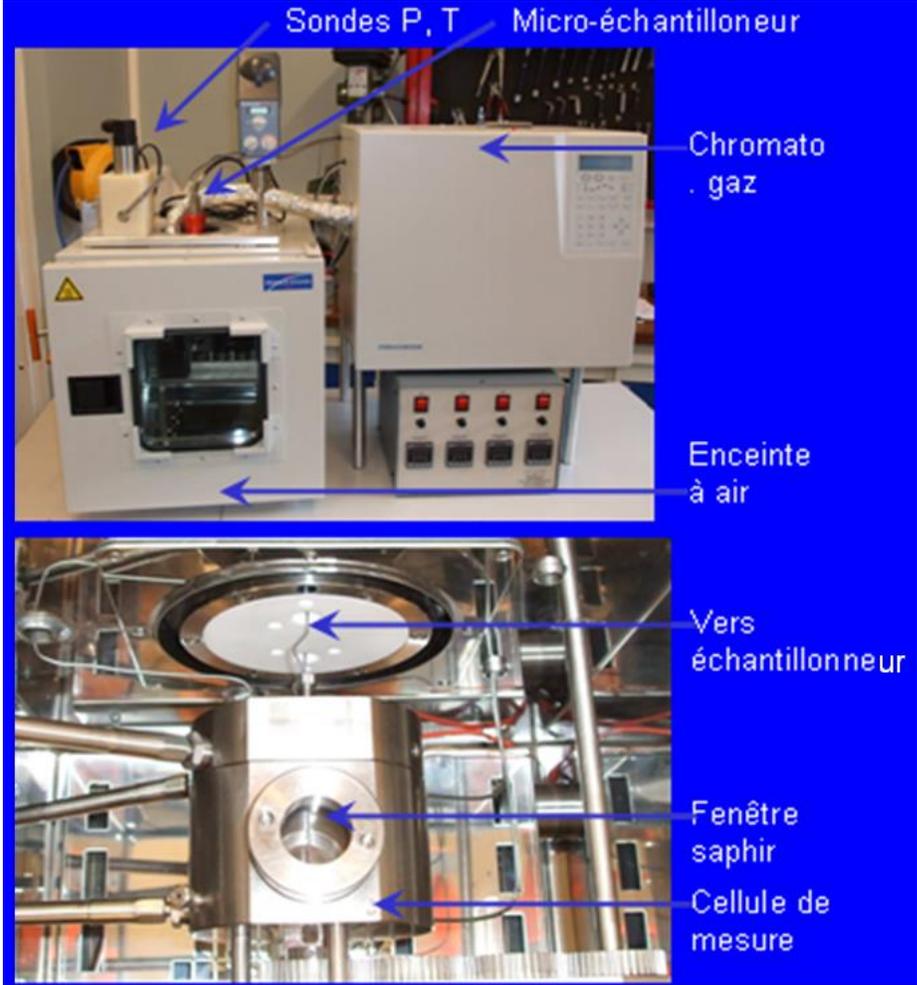
3. Conception du stockage d'hydrogène en cavité saline

Rhéologie du sel

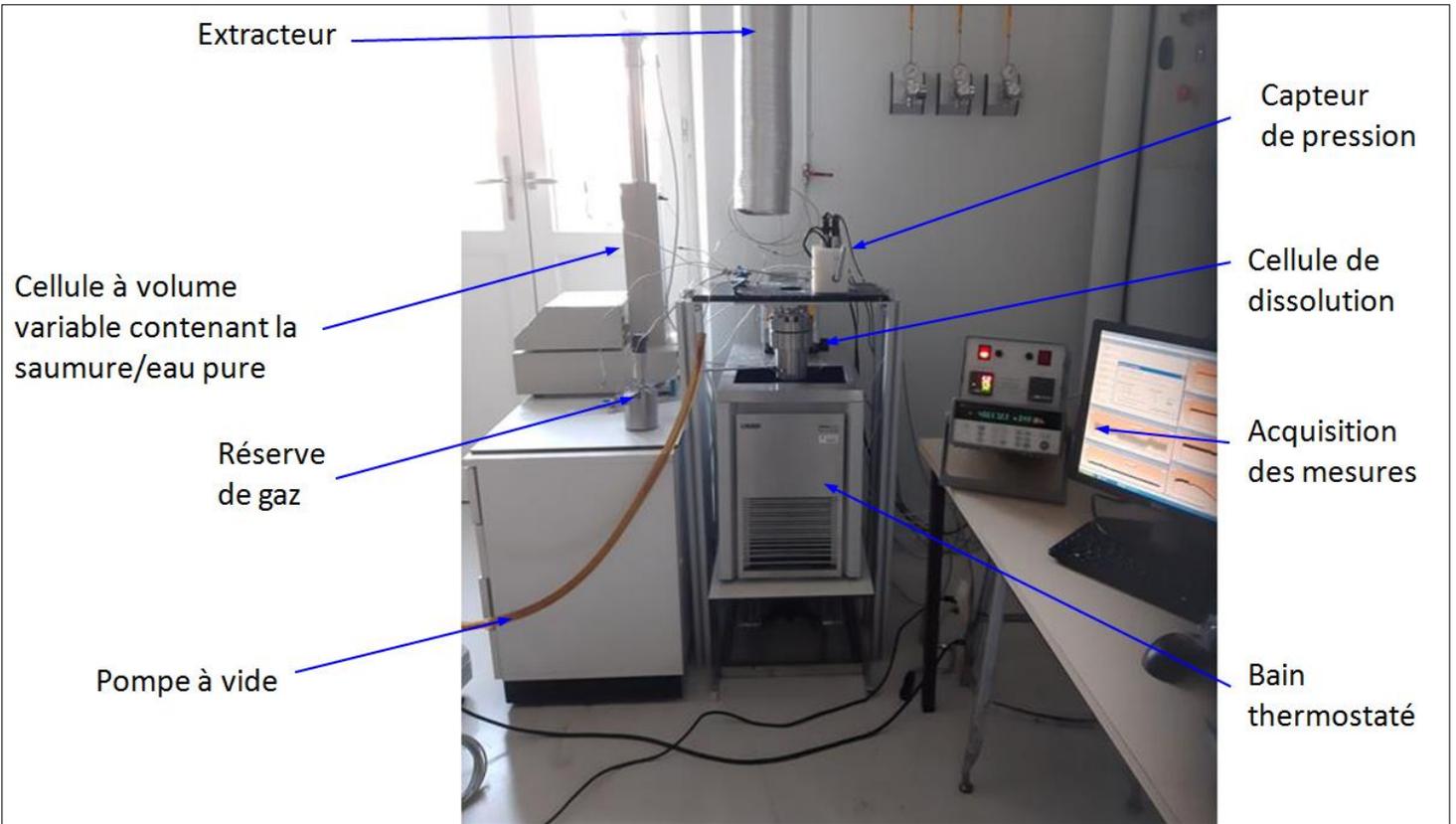


3. Conception du stockage d'hydrogène en cavité saline

Dissolution de l'hydrogène dans une solution aqueuse (laboratoire commun Géosciences-CTP)



Dissolution à l'équilibre



Cinétique de la dissolution

Pilote de stockage (laboratoire commun Géosciences-CTP)



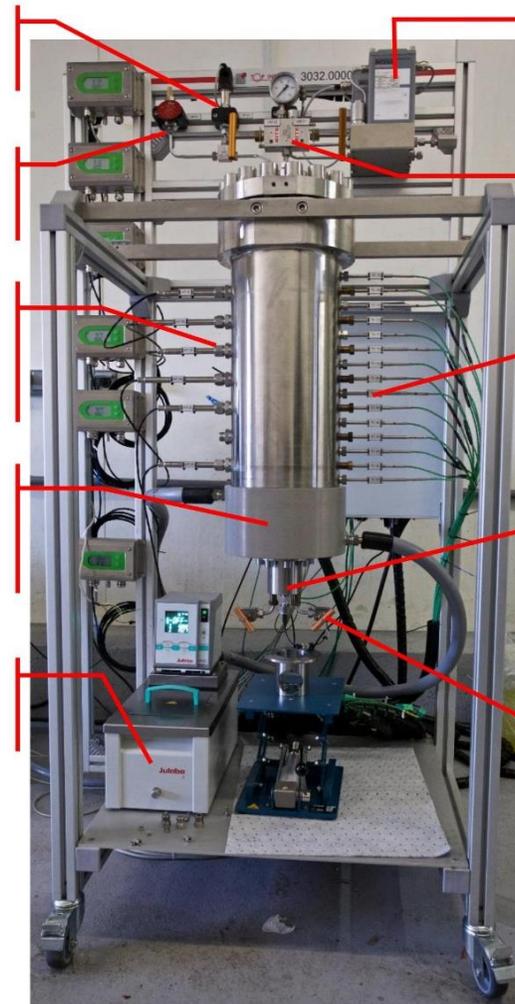
Capteur de pression
et manomètre

Support et disque de
rupture

7 sondes de mesure
d'humidité placées
dans les plans axial
et radial

Double enveloppe
pour circulation de
fluide caloporteur

Bain thermostat



Débitmètres
(remplissage,
soutirage)

Vanne double : un
côté remplissage, un
côté soutirage

15 thermocouples
placés dans les plans
axial et radial

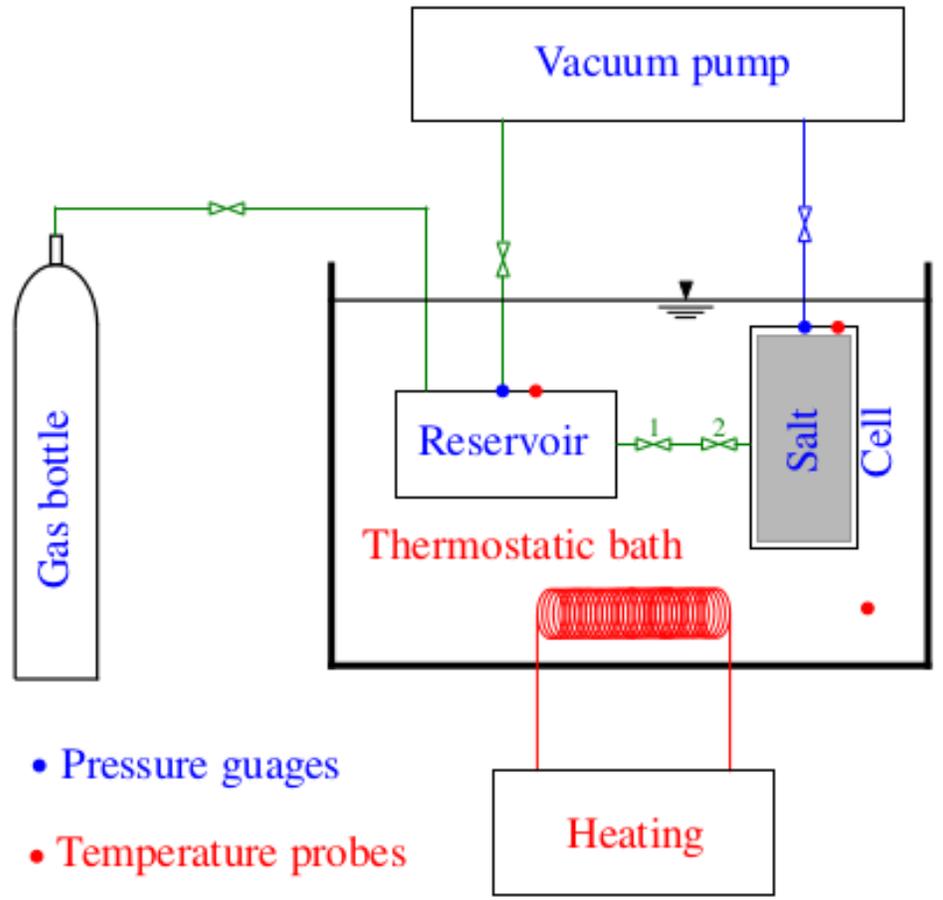
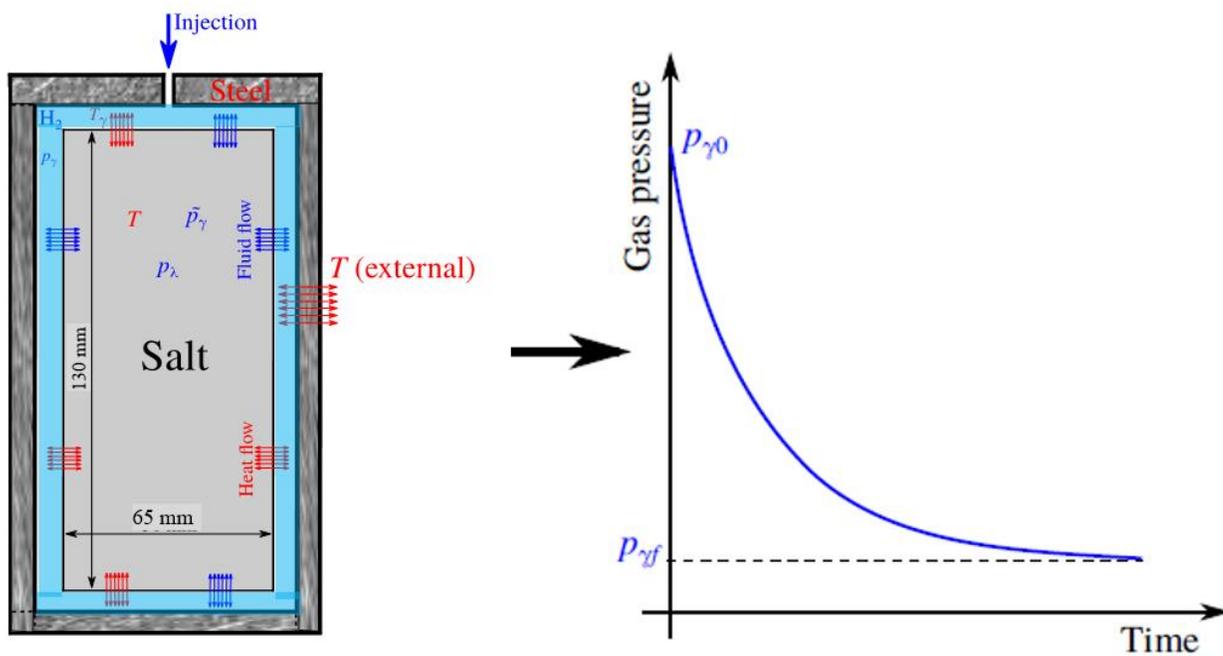
Système de mesure
de la masse de
saumure au cours du
temps

Vannes pour
l'alimentation en
saumure et vanne de
prélèvement liquide

- Cyclage : injection – soutirage – pause
- Répartition spatiale de la température et de l'humidité du gaz
- Dissolution du gaz au cours du cyclage

3. Conception du stockage d'hydrogène en cavité saline

Cellule de perméation de l'hydrogène dans le sel (laboratoire commun Géosciences-CTP)

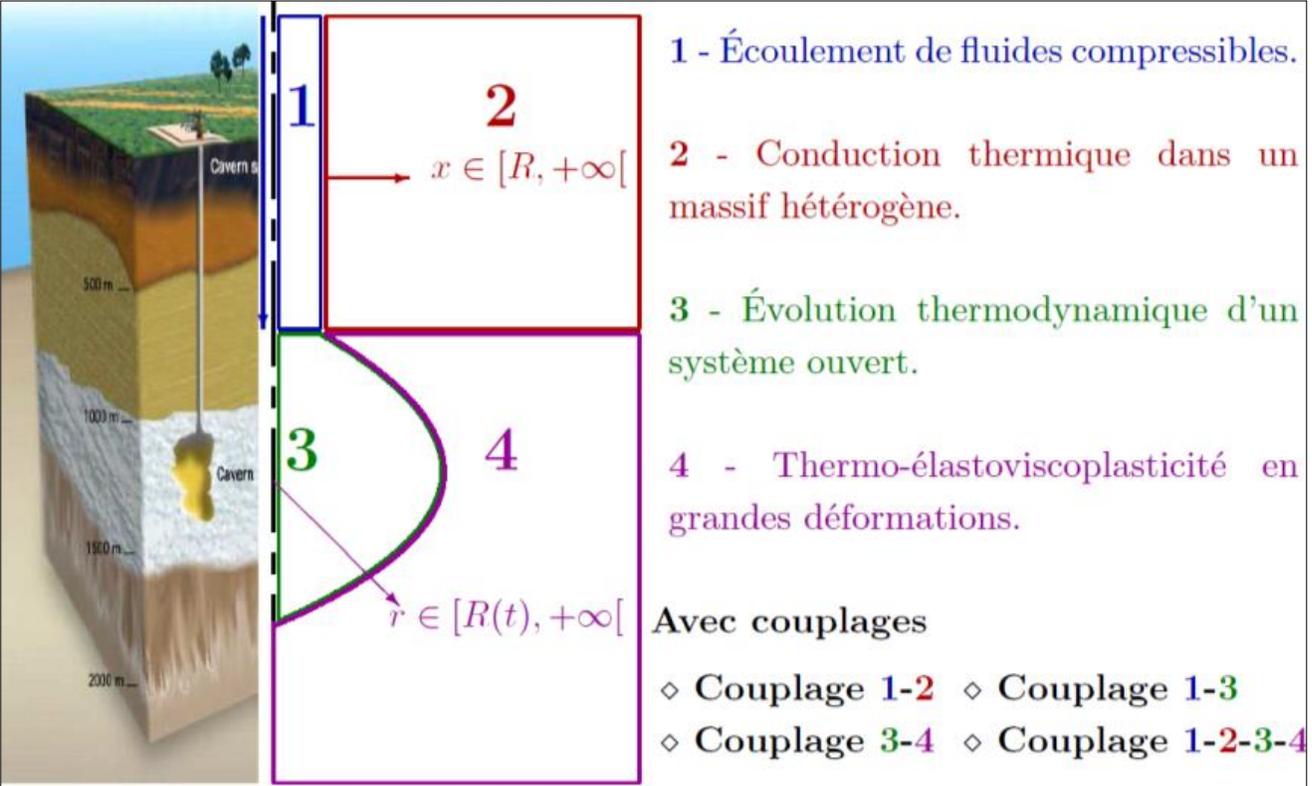


- Sel : roche de faibles porosité et perméabilité
- Nouvelle méthode de mesure du transfert de masse entre le gaz et la roche
- Sel intact ou endommagé à un niveau de dilatance donné
- Effet des insolubles dans ce transfert

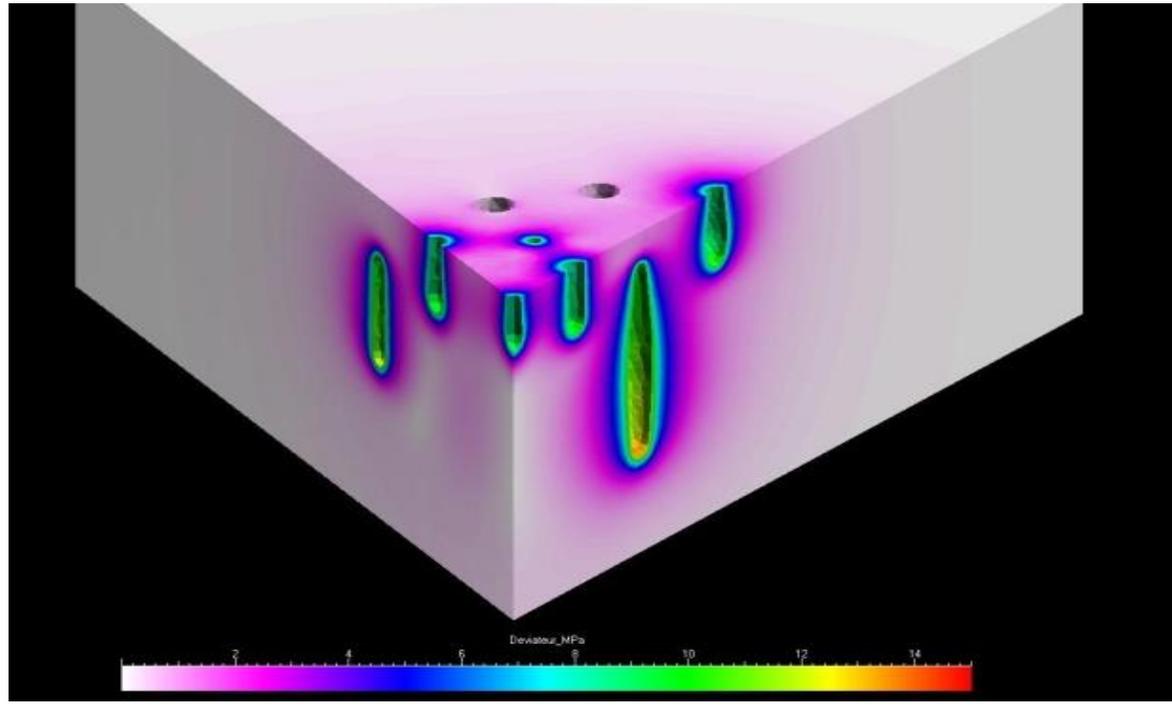
- Pressure gauges
- Temperature probes

Modélisation numérique du stockage

Logiciel DEMETHER



Logiciel PHYMEF

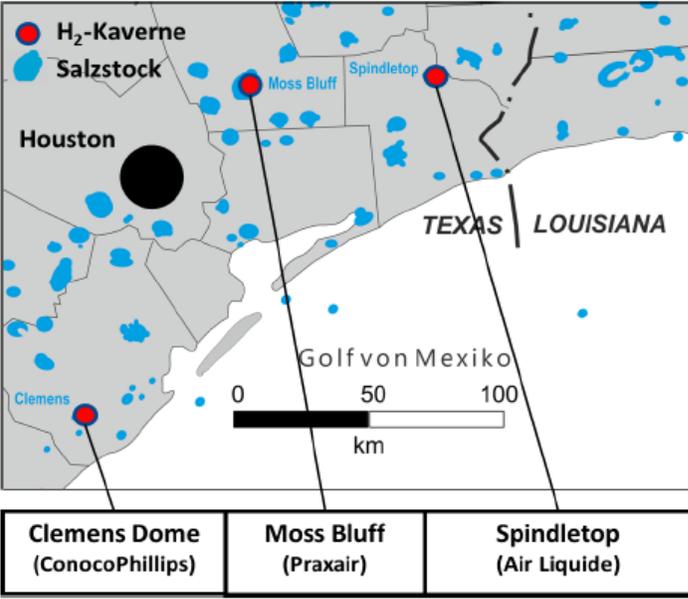


Prise en compte de tous les phénomènes décrits précédemment

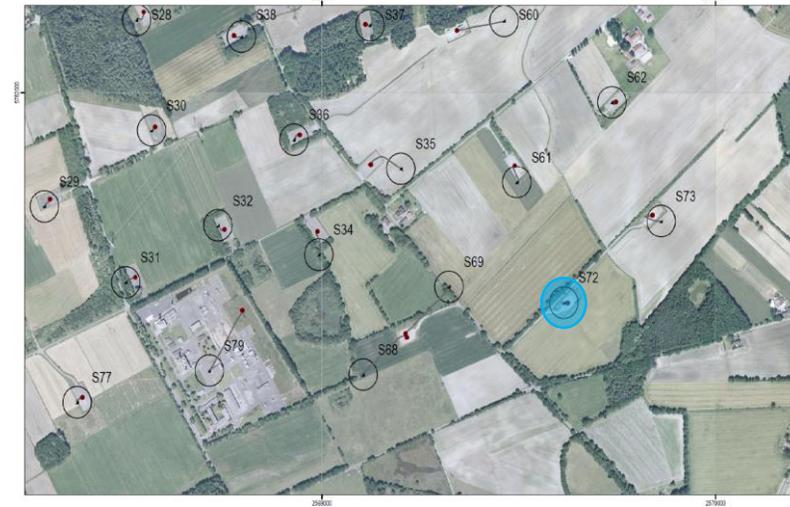
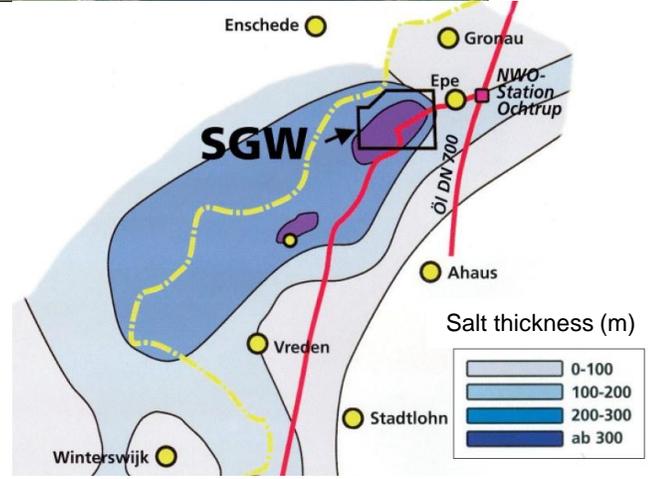
4. Applications

Sites de stockage étudiés

Stockage d'hydrogène de Spindletop (Texas, Air Liquide)



Stockage d'hélium d'Epe (Allemagne; Air Liquide)



Sites de stockage étudiés

Pilote de stockage d'hydrogène en France
(projets Stopil-H2 et Hypster, cavité EZ53, Etrez, Storengy)

