



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



maîtriser le risque
pour un développement durable

LA SITUATION ET LES ENJEUX DU STOCKAGE SOUTERRAIN EN FRANCE

Stockage en cavité saline et maîtrise des risques liés à l'hydrogène

H. Baroudi & H. Djizanne

Sommaire

- 1. Situation et enjeux du stockage souterrain en France**
- 2. Le stockage souterrain en cavité saline**
- 3. La maîtrise des risques autour du stockage souterrain de l'hydrogène en cavité saline**

1. Situation et enjeux liés au stockage souterrain en France

Contexte favorable au développement des stockages souterrains en France

Objectifs ambitieux

- Réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 (-40% d'ici 2030 /1990, /4 d'ici 2050)
- Réduire la consommation énergétique (-20% d'ici 2030 /2012, 50% d'ici 2050) et d'énergies fossiles (-30% en 2030 /2012)
- Porter la part des énergies renouvelables à au moins 33% de la consommation d'énergie brute finale d'ici 2030
- Produire 10 Mt/an d'hydrogène vert d'ici 2030, alors que la production mondiale peine actuellement à atteindre 0,1 Mt/an; et la France s'engage à y participer à hauteur de **1 Mt/an** (soit une capacité de 6,5 GW d'électrolyseurs installés)



Contexte réglementaire dynamique en France et en Europe

- Loi énergie-climat, 2019; Le plan France Relance du 3 septembre 2020
- Le green deal; Stratégie Européenne H₂ via le plan REPower EU;
- Le PPE 2024-2028; ...

Source : REPower EU

Le milieu souterrain offre de nombreux avantages:

- **Le stockage souterrain constitue un élément majeur de la sécurité d'approvisionnement en gaz**
- **Enjeu de sécurité industriel** : séparation entre le carburant du comburant (le gaz naturel est séparé de l'oxygène de l'air par des centaines de mètre de roche)
- Accès à de **grands volumes** (stockage massif, plusieurs centaines de milliers de m³)
- Stockage sous **forte pression** (poids naturel des terrains ou confinement naturel du milieu souterrain, soit quelques centaines de bars)
- Certaines formations offrent une **étanchéité naturelle** remarquable → sûreté du stockage
- **Eloignement des produits/déchets par rapport aux enjeux** → sécurité accrue
- **Faible emprise** en surface → impact limité sur l'occupation du sol
- **Faible diffusivité thermique** des roches → possibilité d'y stocker de la chaleur
- **REX** de décennies de stockage de gaz et hydrocarbures (plus de 600 sites dans le monde)

Le stockage souterrain de gaz en France



Site de stockage souterrain de Storengy dans l'Ain. Source : Gaz d'aujourd'hui



138 TWh

de capacité
de stockage de gaz

L'équivalent de la production annuelle de :



x 6 réacteurs nucléaires

ou



x 9 000 éoliennes offshore



Ou des besoins d'énergies de :

x 20 000 000 véhicules électriques

Localisation et typologie des stockages souterrains en France

23 sites de stockage souterrain

12 sites de stockage en aquifères

- 2 sites en standby (Soings-en-Sologne, Saint-Clair-sur-Epte)

6 sites de stockage en cavité salines

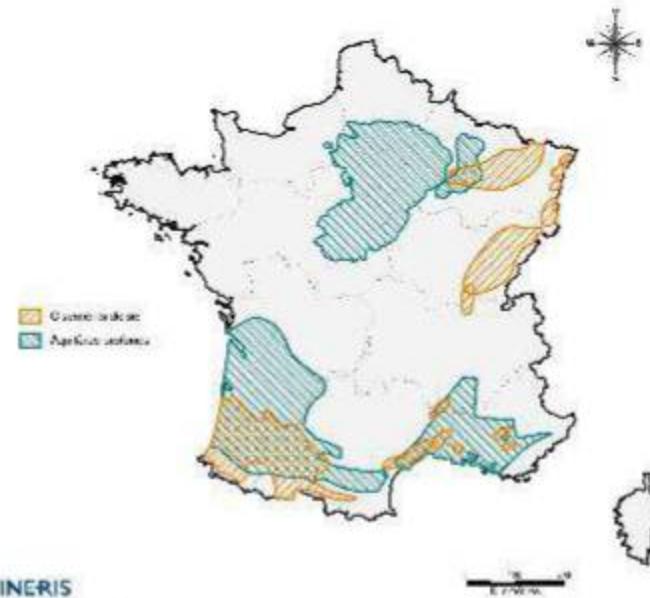
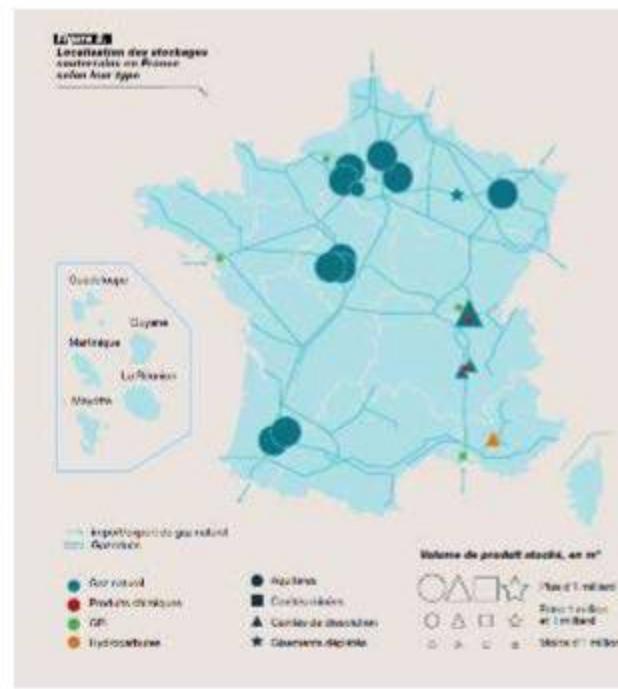
- 4 sites pour le gaz naturel
- 78 cavités salines

4 sites de stockage en cavité minées

- 9 cavités minées

1 site de stockage en gisement déplété

- Repris en fin de production, équipé et en standby pour le moment.



Quels types de produits ?

- Gaz naturel, biogaz et syngas

- 10% de la production annuelle mondiale, soit ~400 Mds de m³

- Hydrogène

- 4 sites opérationnels depuis 1972 (Sabic, Teeside, UK), 1983 (Conoco Philips, TX) , 2007 (Praxair, Moss Bluff, TX) et 2014 (Air Liquide, Spindeltop), et de nos jours plusieurs dizaines de pilotes recensés dans le monde pour des finalités énergétiques

- Air comprimé

- Huntorf en Allemagne, 290 MW depuis 1979 et Mc Intosh aux Etats-Unis, 110 MW depuis 1991.

- Autres Gaz : Ethylène, propylène/propène, hélium, CO₂

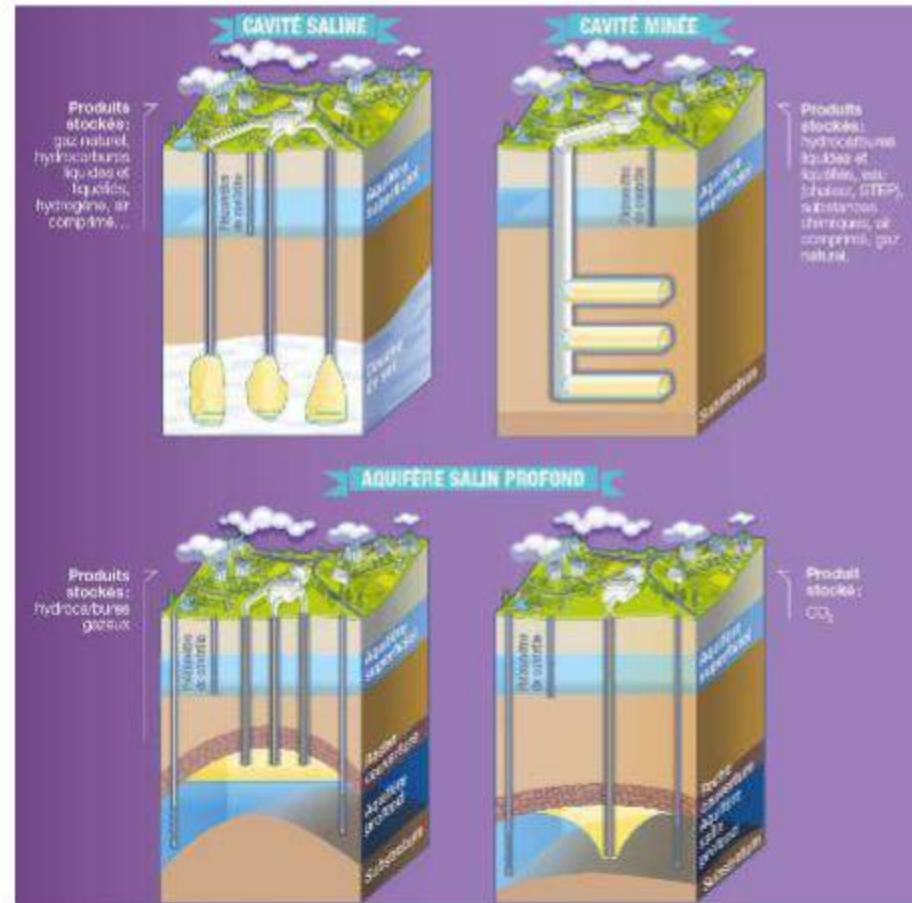
- Hydrocarbures liquides

- pétrole brut, diesel

- Hydrocarbures liquéfiés

- propane - C₃H₈, butane – C₄H₁₀)

- Eau (chaleur au Pays Bas, STEP): produits chimiques, etc....



Technologie de stockage souterrain et type de produits stockés

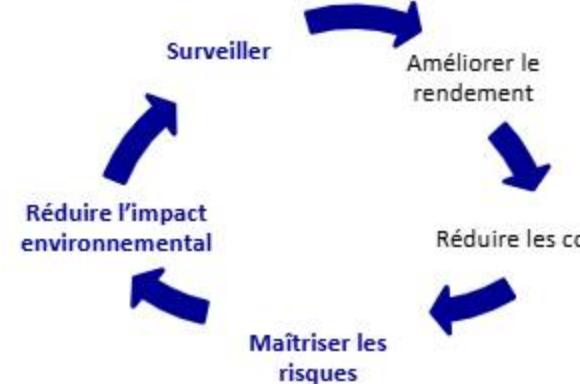
Le stockage souterrain en France

- Stock total** : 25,8 milliards de Nm³ soit 292 TWh
- Volume utile** : 11,7 milliards de Nm³ soit 132 TWh, représentant 26 % de la consommation annuelle française.
- Débit de pointe** : 200 millions de Nm³ /jour soit 2,3 TWh/jour



Répartition du volume des stockages en France

Challenges autour des sites de stockages



Sites de stockage souterrain en France

Perturbations du marché français et européen de l'énergie provoquées par l'invasion de l'Ukraine par la Russie

Enjeux et défis du stockage souterrain de gaz

Mines, carrières, marnières, caves, sapes de guerre, cavités naturelles, tunnels, stockage, ...

- Les contraintes géologiques
- Les risques et impacts sanitaires et environnementaux potentiels
- La prise en compte des attentes sociétales
- Les verrous économiques
- Les besoins en R&D

Le système de stockage de gaz est actuellement régi par le code de l'énergie, notamment les articles L. 421-1 à 421-16 créés en 2011 (ordonnance du 9 mai 2011) et les articles R. 421-1 à R 421-22 créés ou modifiés en 2014



2. Le stockage souterrain en cavités salines

Le stockage en cavités salines

Principe : créer des cavités par dissolution au sein d'un massif de sel

Etanchéité assurée par le sel (roche imperméable)

Produits stockés :

- Gaz naturel
- Hydrocarbures liquides ou liquéfiés (GPL)
- Produits chimiques (éthylène, propylène)
- Hydrogène, air comprimé

2^{ème} forme de stockage la plus utilisée dans le monde (26% en France)

Avantages :

- Tous types de produits inertes vis-à-vis du sel
- Grands volumes (jusqu'à 1 Mm³/cavité)
- Réactivité (adapté aux pics de demande)

Inconvénients :

- Gisements de sels pas présents partout
- Solubilité du sel en cas de communication avec des eaux souterraines (scénario accidentel)



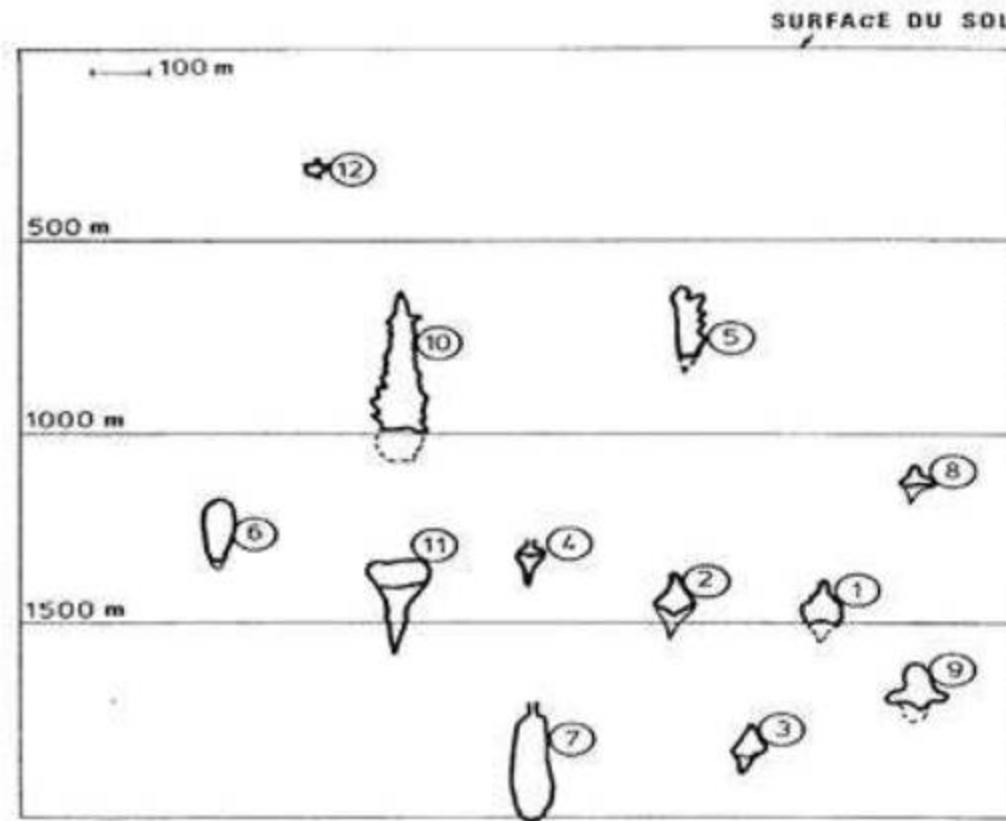
Exemple de forme géométrique de cavité

Profondeur : 200 à 2500 m

Diamètre < 100 m

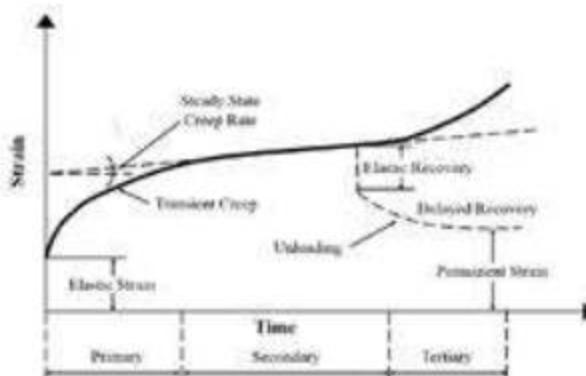
Volume : 10 000 m³ à 2 000 000 m³

1. Tersanne (France)
2. Etrez (France)
3. Atwick (Grande-Bretagne)
4. Kiel (Allemagne)
5. Huntof (Allemagne)
6. Epe (Allemagne)
7. Eminence (USA)
8. Melville (Canada)
9. Regina (Canada)
10. Manosque (France)
11. Hauterives (France)
12. Salines de Béarn (France)

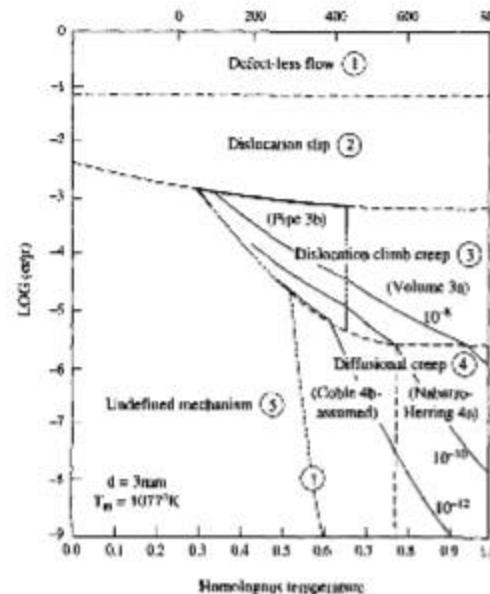


Comportement mécanique du sel gemme

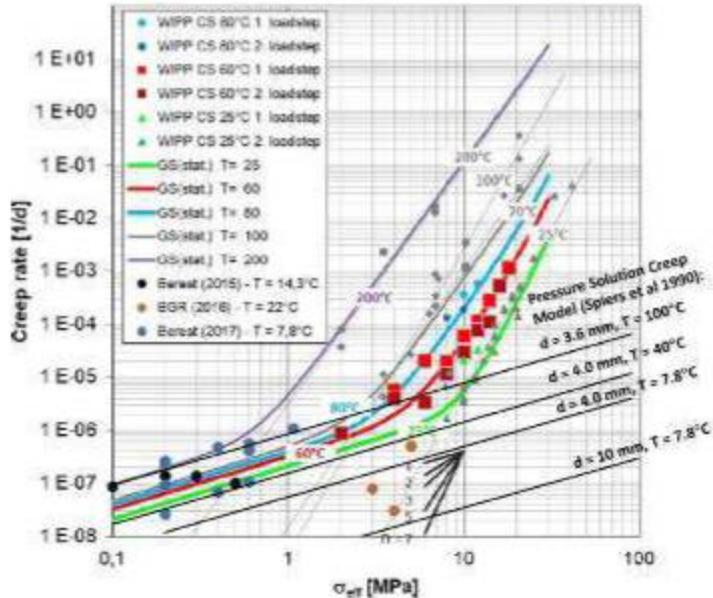
Le sel gemme a un comportement élasto-viscoplastique et est thermosensible



Résultat d'un essai de fluage sur le sel (Nair et Deere, 1969)



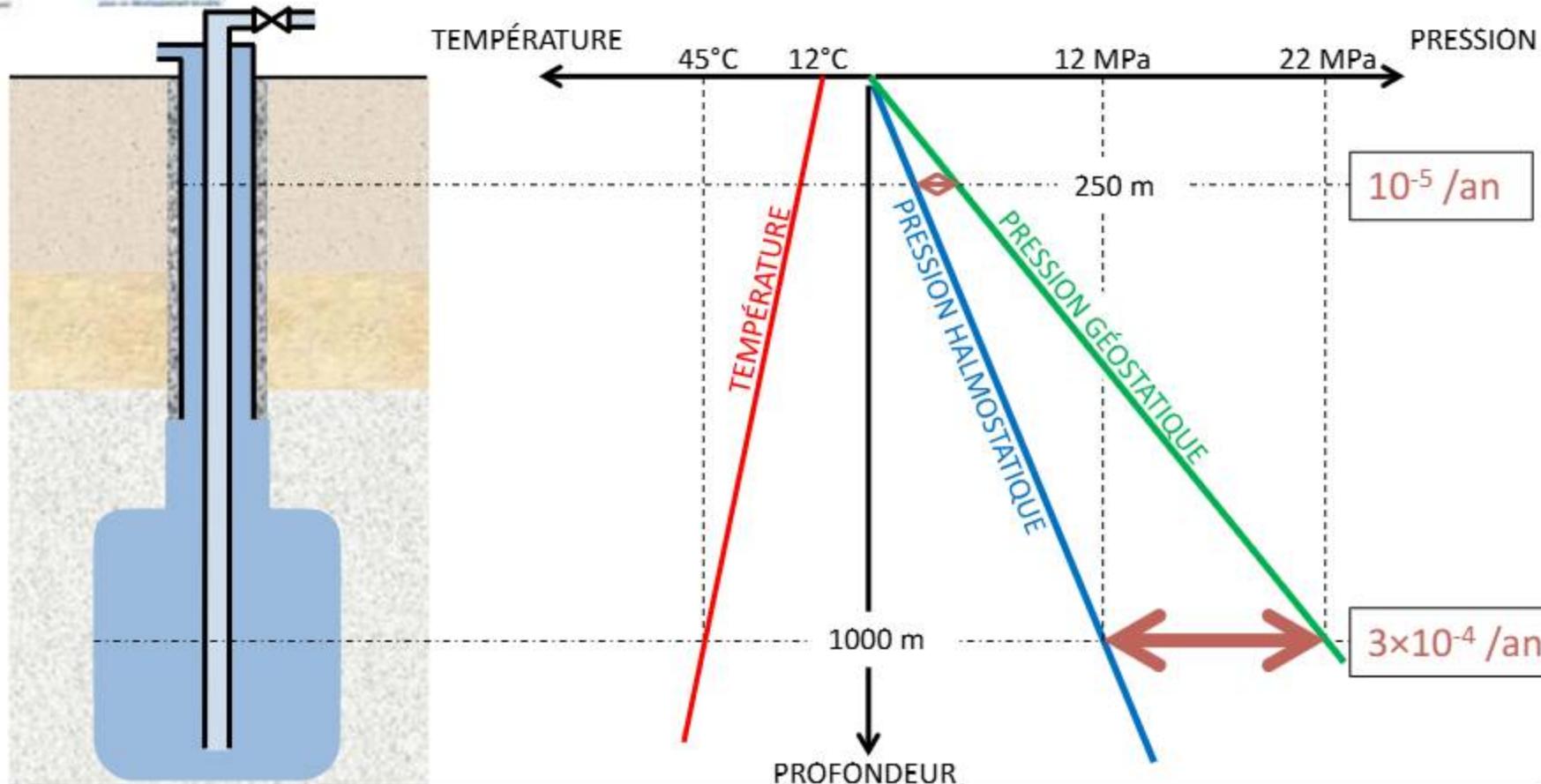
Carte des micro-mécanismes de déformation du sel (Munson et al., 1997)



Fluage par dissolution sous pression comparé aux données récentes de fluage à faible contrainte sur le sel naturel (Spiers, 2023)

Comportement mécanique des cavités salines

- A très court terme, le comportement est élastique. Une chute de pression rapide peut entraîner un écaillage des parois, casser les hors-profil ...
- A long terme, le comportement est celui d'un liquide visqueux, non linéaire, sensible à la température : les cavités salines perdent du volume, et une subsidence est observée.
- La force motrice pour une caverne isolée est l'écart entre le poids des terrains (22 MPa à 1000 m) et la pression dans la caverne (12 MPa à 1000 m en saumure, moins en gaz à stock minimum).



Stabilité mécanique des cavités salines

Pas d'accident au sens propre dans les cavités de stockage, qui sont dimensionnées avec des marges

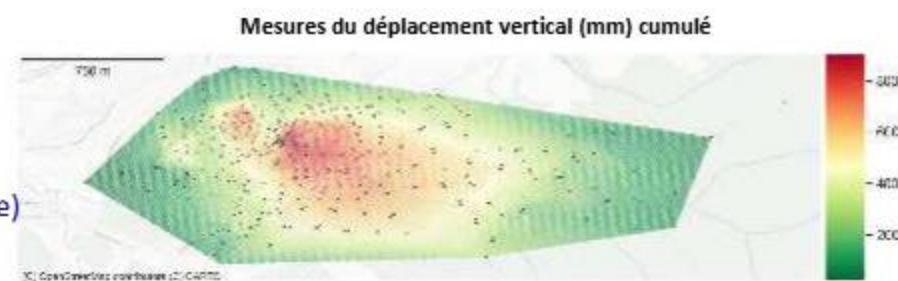
❖ Perte rapide de volume

- le sel se comporte comme un liquide visqueux, non linéaire, thermosensible
- problème uniquement pour les cavités profondes (>1000 m)
- quand la pression dans la cavité est faible (cavités en gaz)

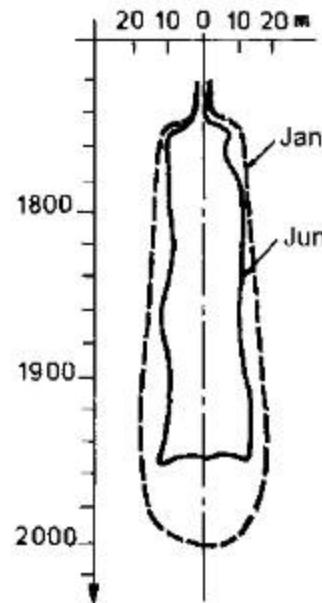
❖ Subsidence

- observées sur de nombreux sites
- peu ou pas de dommages observés en surface (pente faible)

❖ Effondrement brutal

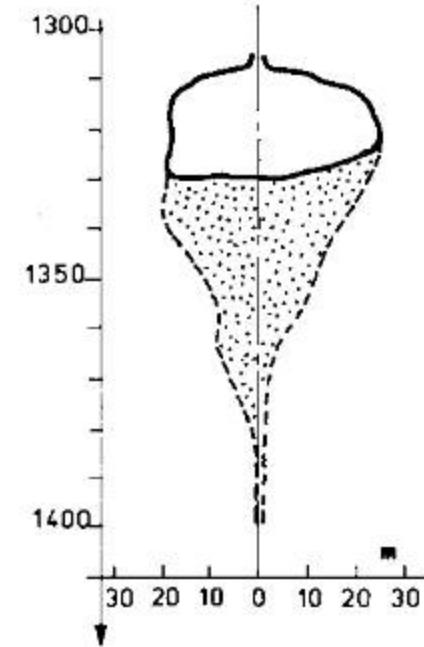


Pertes rapides de volume du au fluage du sel



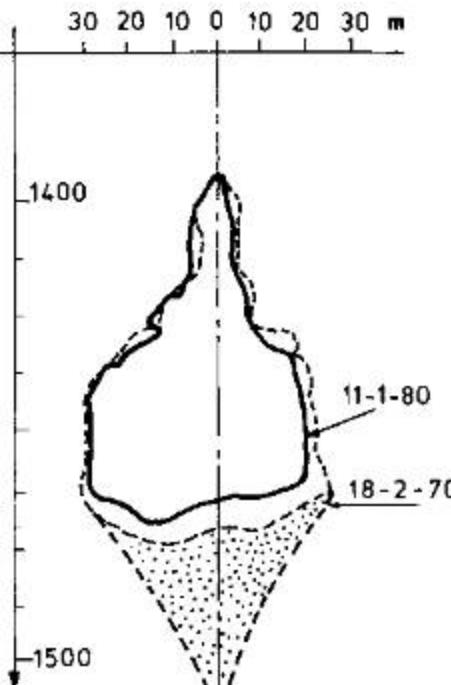
EMINENCE

-40%
en 2 ans



KIEL

-16%
en 6 mois

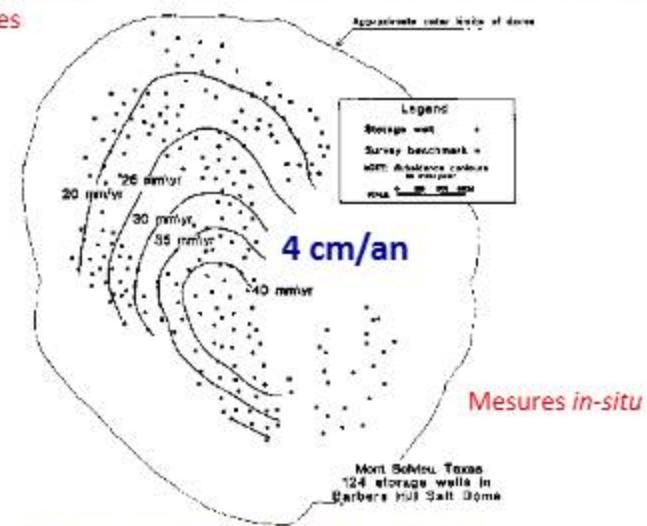
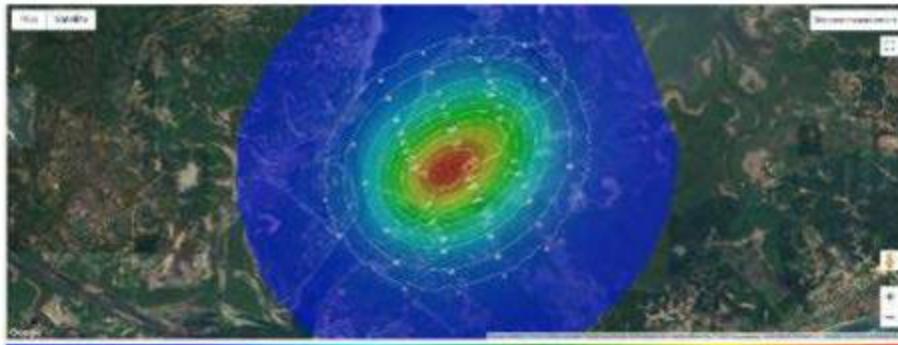


TERSANNE

-25%
en 10 ans

Subsidence

- **Inévitable**
- On admet en général pour chaque cavité :
 - Le volume de la cuvette de subsidence **est égal** au volume perdu par fluage des cavernes
 - L'angle d'influence est **45°**
 - La cuvette est assimilée à **un cône**
- Plusieurs méthodes de calculs et de nombreux logiciels disponibles



Subsidence à Mont-Belvieu (Texas),
le plus grand site de stockage des hydrocarbures aux Etats Unis, +100 cavités

Effondrement brutal ou aléa effondrement généralisé

L'effondrement généralisé caractérise un mouvement d'extension spatiale importante

- Il se manifeste par la **rupture** souvent dynamique de la cavité d'exploitation
- affectant ainsi la **stabilité des terrains de surface** sur des étendues pouvant atteindre **plusieurs hectares**
- Le phénomène redouté résulte de :
 - La rupture différée du **toit de la cavité** dont la taille a fini par dépasser une **valeur limite** assurant la stabilité de l'ouvrage.
 - Les dimensions critiques des cavités dans chaque faisceau (**diamètre maximal**)
 - Le rapport entre la **portée de la cavité** et l'**épaisseur de sel au toit** de celle-ci (**hauteur minimale de la garde du sel**)
 - La tenue mécanique des piliers entre cavités (**largeur minimale des piliers**)
- Plus l'extension de la cavité est grande et la garde de sel est petite, plus la stabilité de la cavité peut être compromise

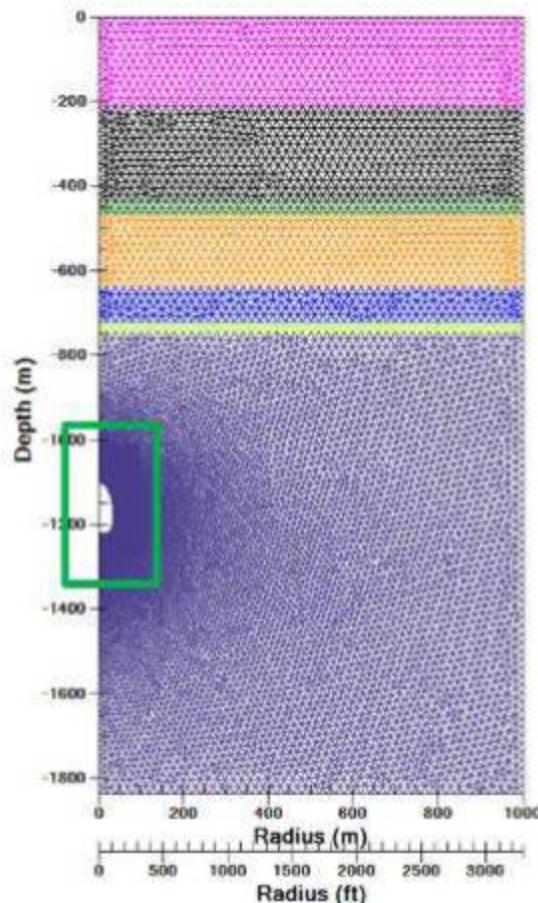
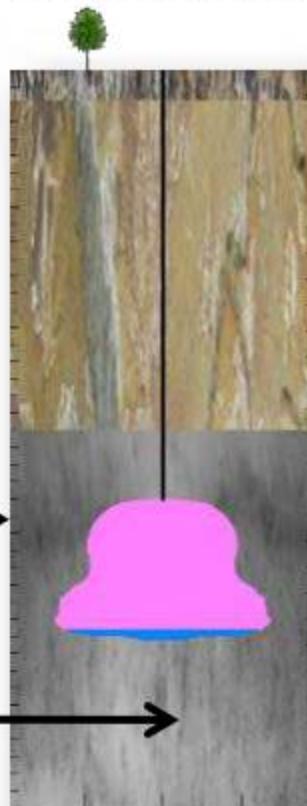
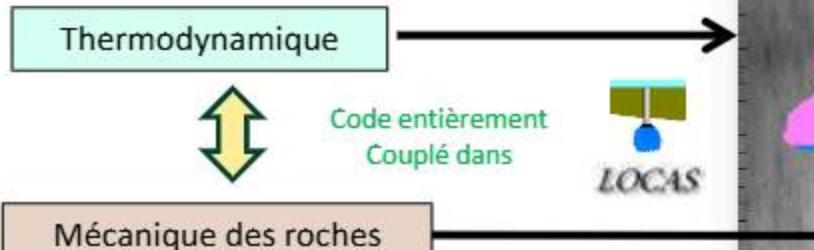


Source : Solvay

Evaluation de la stabilité mécanique des cavités salines avec LOCAS

Le couplage est essentiel pour des problèmes tels que :

- Abandon de la caverne
- Eruption d'une caverne de gaz
- Cycle rapide d'une caverne de gaz



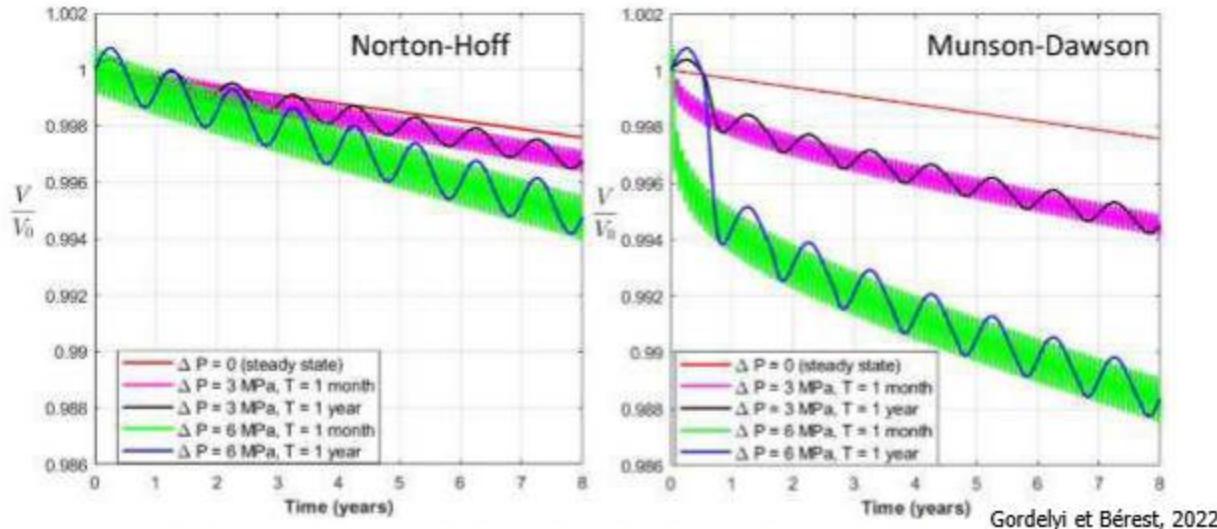
Exemple de maillage 2D réalisé sous LOCAS

Stabilité mécanique : Prise en compte du comportement transitoire

Chargement cyclique

$$P_c^+(t) = P_c^{av} + \Delta P \sin(2\pi t / T)$$

$P_c^{av} = 11,9 \text{ MPa}$
 $P_\infty = 20,9 \text{ MPa}$



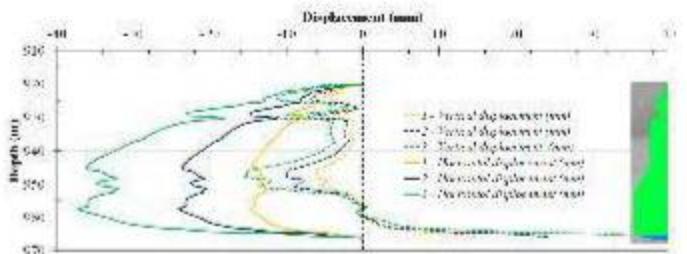
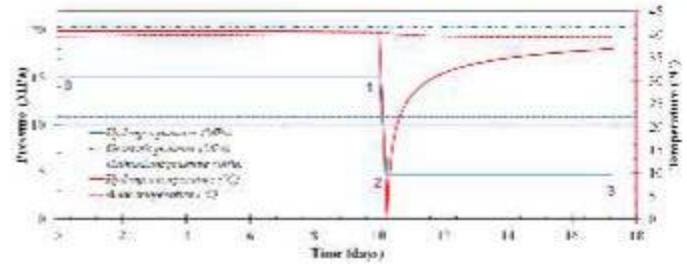
Gordelyi et Bérest, 2022

- Sous des cycles de pression, la perte de volume moyenne est beaucoup plus importante que la perte observée lorsque la pression moyenne est appliquée.
- La loi M-D prédit une perte de volume beaucoup plus importante que la loi N-H.
- La différence est une fonction de l'amplitude des cycles (l'influence de la période est moindre).

Zone d'endommagement par dilatance autour d'une cavité saline

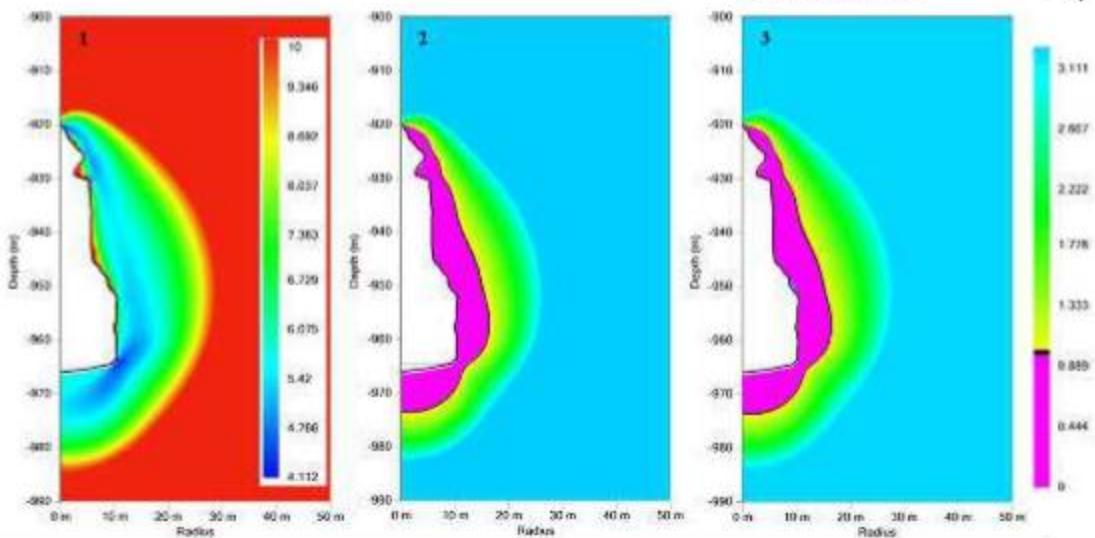
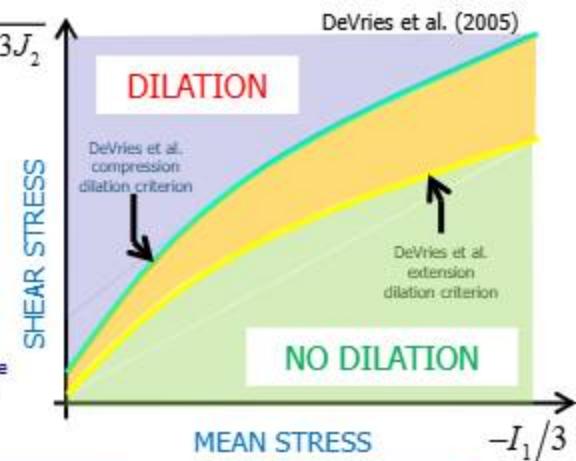
Une détente rapide d'hydrogène gazeux de P_{\max} à P_{\min} en 6 heures (2 MPa/h) dans une cavité saline de stockage

La dilatance marque l'apparition de l'endommagement dans le sel. Le sel s'endommage sans rompre véritablement lorsque l'état de contraintes entre dans un domaine dit « dilatant » à l'intérieur duquel une microfissuration se développe. Il s'en suit une augmentation de la perméabilité, perte de la résistance, micro-fissuration, endommagement de la roche



$$\sqrt{J_2} < \sqrt{J_{2,dil}} = \frac{D_1 \left(\operatorname{sgn}(I_1) k T_0 \right)^{\frac{1}{3}} + T_0}{\left(\sqrt{3} \cos \psi - D_1 \sin \psi \right)}$$

$$FOS = \frac{\sqrt{J_{2,dil}}}{\sqrt{J_2}}$$



3. La maîtrise des risques autour du stockage souterrain de l'hydrogène en cavité saline

L'Institut a +25 ans d'expérience sur la sécurité de l'H₂

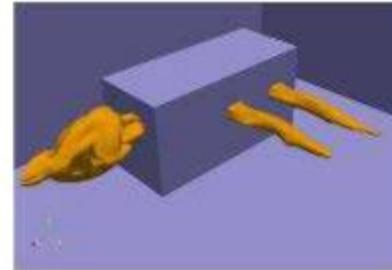
Compétences multidisciplinaires

- Analyse de risques
- Sécurité des procédés
- Mécanique
- Mécanique des fluides
- Chimie
- Modélisation numérique
- Ingénierie d'essais
- Géomécanique
- Economie
- Sociologie

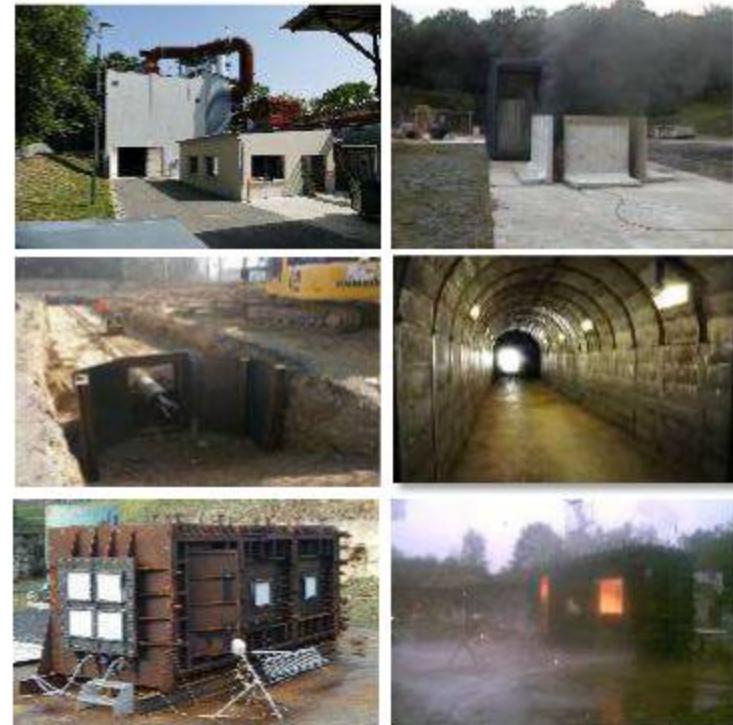
Laboratoires



Outils numériques



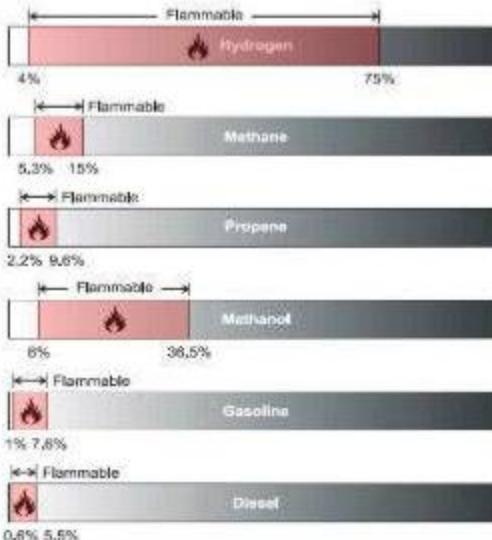
Plateformes d'essais en grand



Les propriétés de l'hydrogène

Favorables à la sécurité

- Non-toxique
- Léger – risque d'accumulation réduit
- Flamme peu rayonnante – risque de propagation limité



Défavorables à la sécurité

- Facilement inflammable
- large plage d'inflammabilité – entre 4% et 75% dans l'air
- faible énergie minimale d'inflammation – EMI = $17\mu\text{J}$
- Peut générer des explosions violentes
 - vitesse de flamme élevée → détonation
- Peut fuir facilement
 - molécule de petite taille
- Peut fragiliser les matériaux
 - très réactif → vieillissement prématûre si les matériaux ne sont pas adaptés
- Mise en œuvre à haute pression (jusqu'à 1000 bar)
 - faible densité d'énergie volumique
 - risque d'éclatement en cas de choc ou d'incendie
- Difficile à détecter
 - invisible, inodore
 - flamme peu visible à la lumière du jour – risque de traversée de flamme
- Flamme très chaude – 2045°C
- Effet Joule-Thomson inverse
 - H_2 s'échauffe à la détente – favorise l'inflammation

→ CES RISQUES PEUVENT ETRE MAITRISÉS

- Des décennies d'expérience dans l'industrie



Fissuration



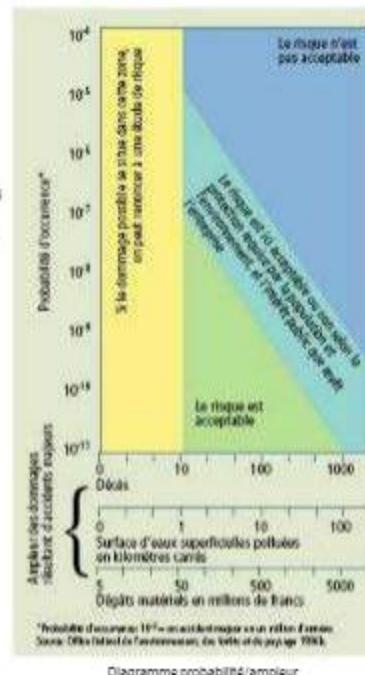
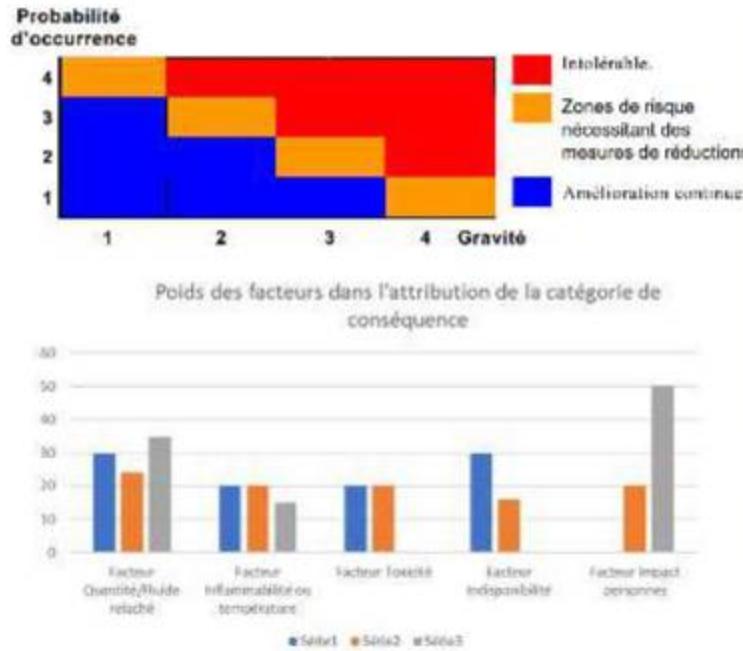
Cloquage

Les principaux enjeux du stockage H₂ en cavité saline

1. Etanchéité à court, moyen et long-terme des ouvrages (cavité, puits) et installations de surface liée aux caractéristiques spécifiques de l'H₂ (léger, mobile, très inflammable, réactif)
 - Résultats des essais MIT à l'hydrogène, normalisation et contrôles, ATEX, détection des fuites
2. Comportement mécanique du sel gemme et de la cavité saline
 - Intégrité mécanique à long-terme de la cavité et du puits sous l'effet de cyclages fréquents
 - Etudes de la fissuration induite avec les outils de la mécanique de la rupture
3. Le comportement de l'hydrogène stocké en cavité saline
 - Évaluation des possibles pertes d'hydrogène ou de sa pureté au contact de la saumure résiduelle et des impuretés; réactions chimiques? transformation biologique de l'hydrogène par les bactéries en aquifère? production de CH₄? d'H₂S?

Évaluation des risques et de l'impact environnemental

Méthodologie et outils utilisés par l'Ineris



HAZOP Study Process

- Form a HAZOP team
- Identify the elements of the system
- Consider variations in operating parameters
- Identify any hazards or failure points

By Graphic Products Staff

Zoom sur la modélisation des phénomènes dangereux en surface

- **Incendie** : Feu de nappe, Feu de solide, Feu torche
- **Explosion** : Explosion de gaz, Explosion de poussières, BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion), Éclatement pneumatique
- **Phénomènes de type boule de feu** : Boil-over, Pressurisation de bac
- **Dispersion d'un nuage toxique** : Jets, évaporation de flaques, fumées d'incendies, ruine de capacité...
- **Pollution**



Scénario catastrophique pour une cavité de gaz

Une éruption se produit lorsqu'il y a une défaillance soudaine au niveau de la tête de puits et/ou de la vanne de sécurité qui génère un écoulement incontrôlé à travers le tubage de production de tout le gaz contenu dans la caverne.



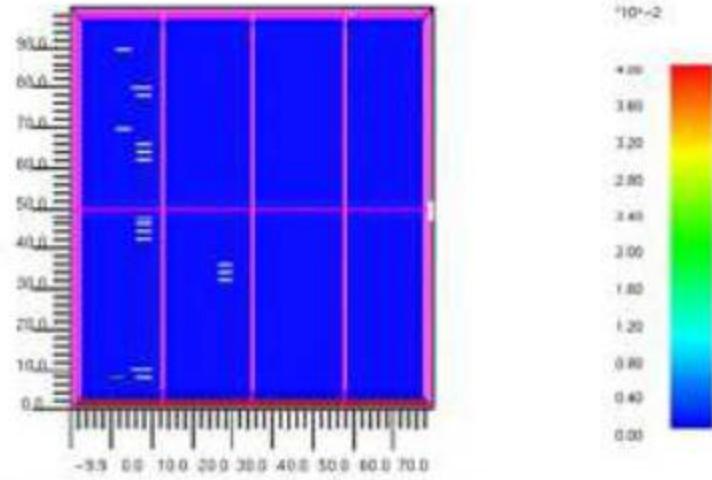
(Moss Bluff blowout, TX, USA, 2004)



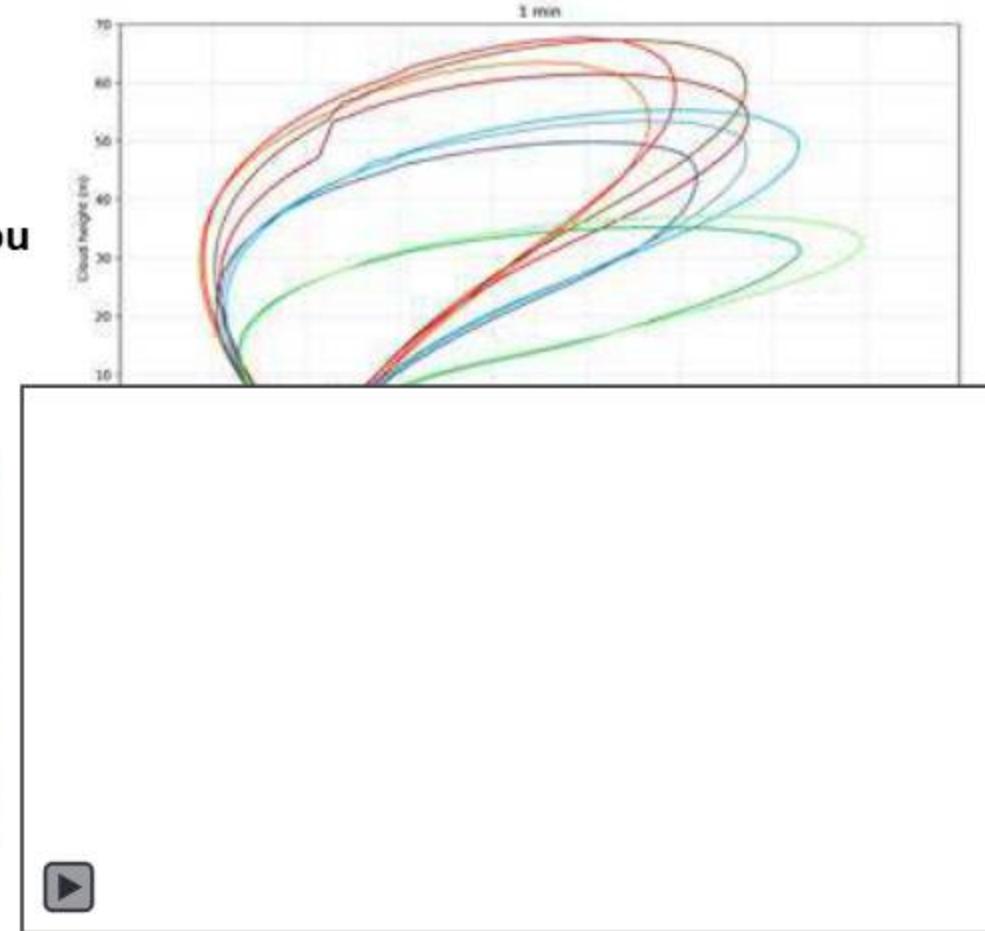
(Prud'homme blowout, Canada, 2014)

Dispersion atmosphérique et distances d'effets en cas de feu de jet, feu de torche ou d'explosion (UVCE)

SectReview 6.2.2 - Nov 8 2015



Frame: 1
Time: 2.0



Next: 1

Conclusion

La stratégie énergétique française et européenne est favorable, pour des raisons diverses et variées, au stockage souterrain de gaz naturel, et en particulier, d'hydrogène.

Il y a plus d'avantages que d'inconvénients à stocker du gaz dans le sous-sol : possibilité de stocker de très grands volumes et meilleure sécurité par rapport à un stockage en surface.

Pour toute technologie de stockage souterrain mature, les challenges tournent autour de l'amélioration du rendement, de la réduction du coût, de la maîtrise des risques (hydrogène), de la réduction de l'impact environnemental (eaux souterraines) et de la surveillance (stockage, ouvrages d'accès, milieu, ressources).

Le choix d'une filière (hydrogène, air comprimé, thermique, STEP) dépend de plusieurs facteurs: territoire/ressources, échelle concernée, demande énergétique, nature du sous-sol (sel, aquifères, cavités).

L'Ineris participe à des projets de R&D en recherche partenariale sur le stockage souterrain de l'hydrogène, avec une contribution importante sur l'analyse des risques, la modélisation des phénomènes dangereux, les essais d'étanchéité, le dimensionnement des ouvrages souterrains et la réduction de l'impact environnemental des démonstrateurs (TRL 5 à TRL9).