



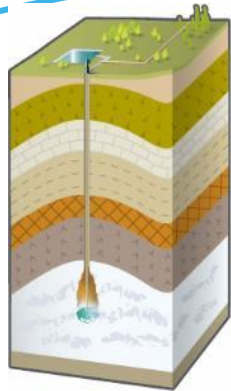
Le stockage souterrain d'énergie électrique : quelle solution technique pour quel usage ?

A. REVEILLERE, L. LONDE, D. WESOLY (GEOSTOCK)

- Les types de stockages souterrains
- Les techniques et expertises du stockage souterrain – exemple des cavités salines
- Quel stockage souterrain d'électricité pour quel usage ?
- Conclusion

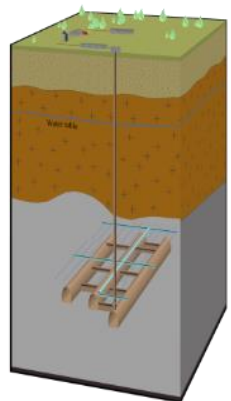
1

Les types de stockage souterrain



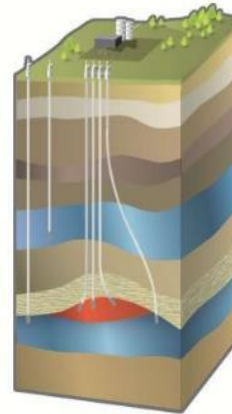
Cavités salines

- Gaz naturel
- Hydrocarbures liquides
- Hydrocarbures liquéfiés
- Air comprimé
- Hydrogène
- Effluents



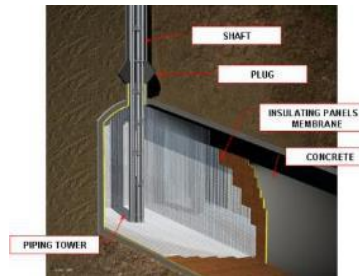
Cavités minées (non revêtues)

- Hydrocarbures liquides
- Hydrocarbures liquéfiés



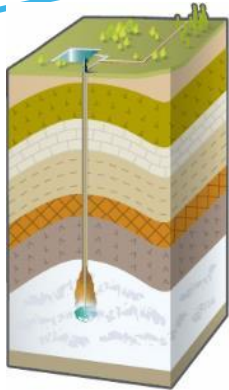
Champs déplétés & Aquifères

- Gaz naturel
- CO₂
- Effluents
- Hydrogène



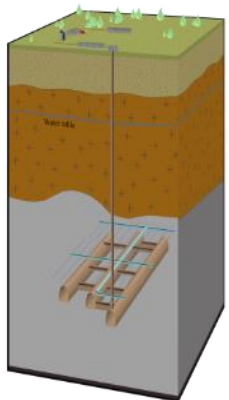
Cavités minées (revêtues)

- GNL (Gaz naturel liquéfié)
- GNC (Gaz naturel comprimé)



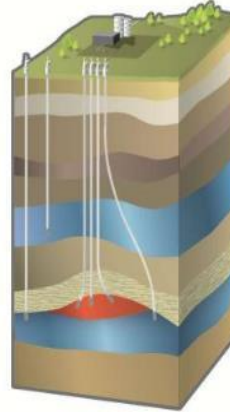
Cavités salines

- ~1940: hydrocarbures liquides, puis liquéfiés
- 1961: gaz naturel
- 1972: Hydrogène
- 1978: Air Comprimé



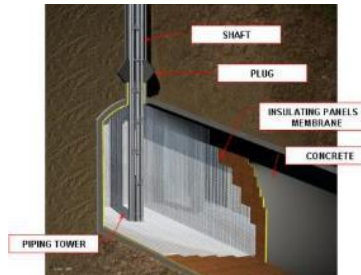
Cavités minées (non revêtues)

- 1950 ou avant: Hydrocarbures liquides
- 1953: Hydrocarbures liquéfiés



Champs déplétés & Aquifères

- 1915: 1^{ère} utilisation d'un champ déplété en stockage de gaz naturel
- 1916: 1^{ère} conversion d'un champs de gaz en stockage
- 1946: 1^{er} stockage de gaz naturel en aquifère



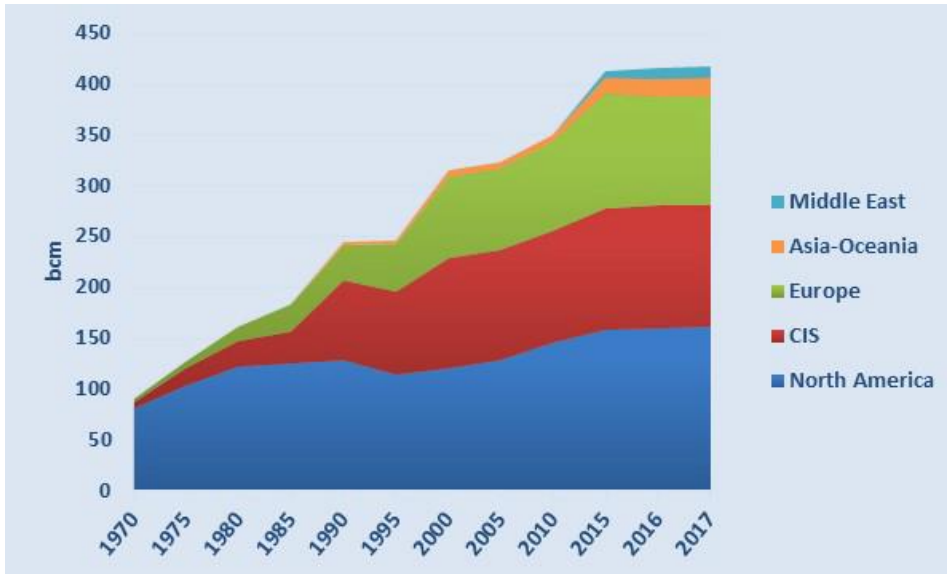
Cavités minées (revêtues)

- 2002: démonstrateur de Gaz naturel comprimé
- 2004: pilote de Gaz naturel liquéfié

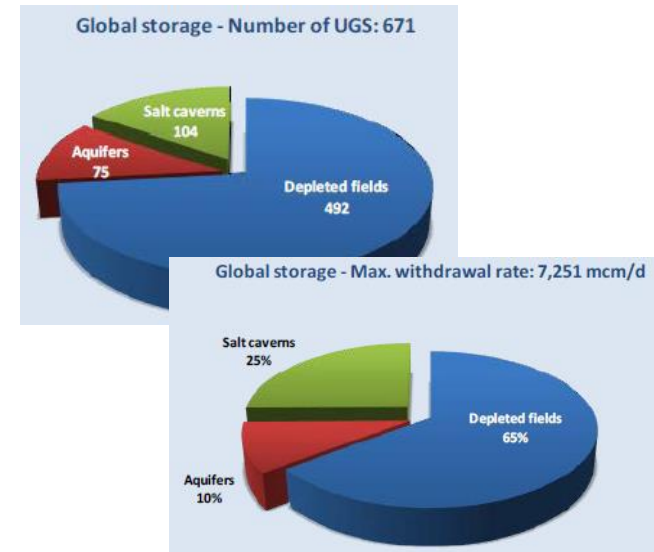
Quelle place ?

Exemple de l'industrie du stockage souterrain de gaz naturel

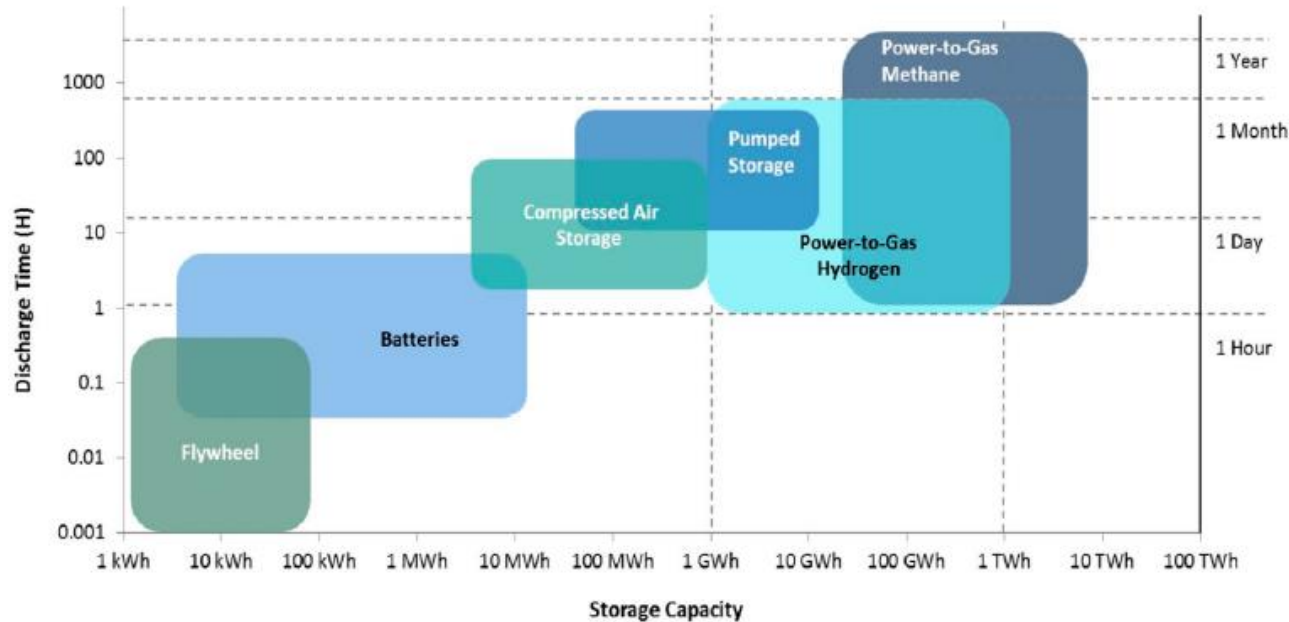
- Production de gaz naturel dans le monde:
 - record de atteint en 2018: 3 937 bcm (IEA, 2019)
- Capacité de stockage dans le monde (Cedigaz, 2018):



Répartition des types de stockage, par nombre et par débit de soutirage (Cedigaz, 2018)



Et pour le stockage centralisé d'énergie électrique ?



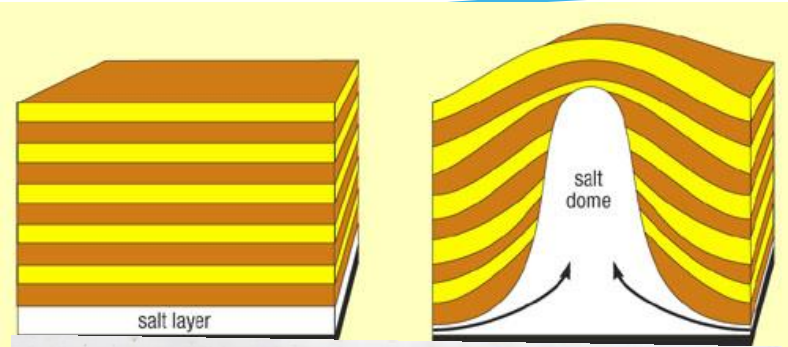
Moore &
Shabani, 2015

→ 2 technologies reposent sur le stockage souterrain de gaz, et peuvent profiter de décennies d'expérience industrielle et de connaissance géoscientifiques bâties autour du stockage souterrain, en particulier de gaz naturel en cavité saline

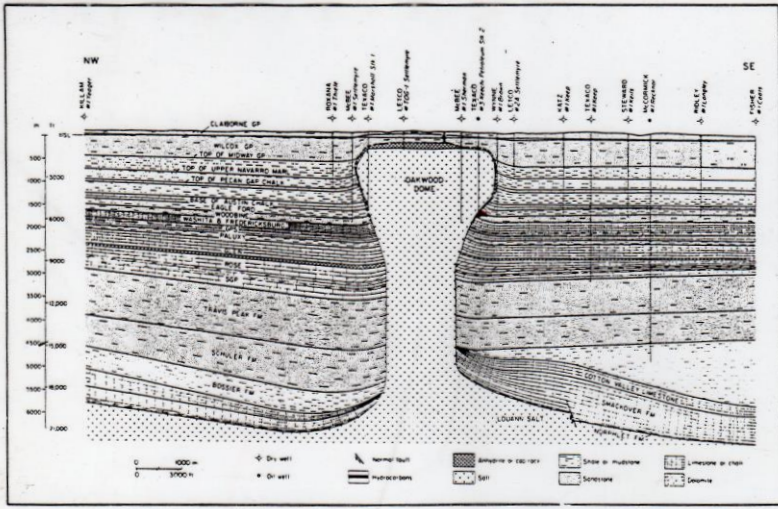
1

Les techniques et expertises du stockage souterrain – exemple des cavités salines

Une géologie du sel particulière

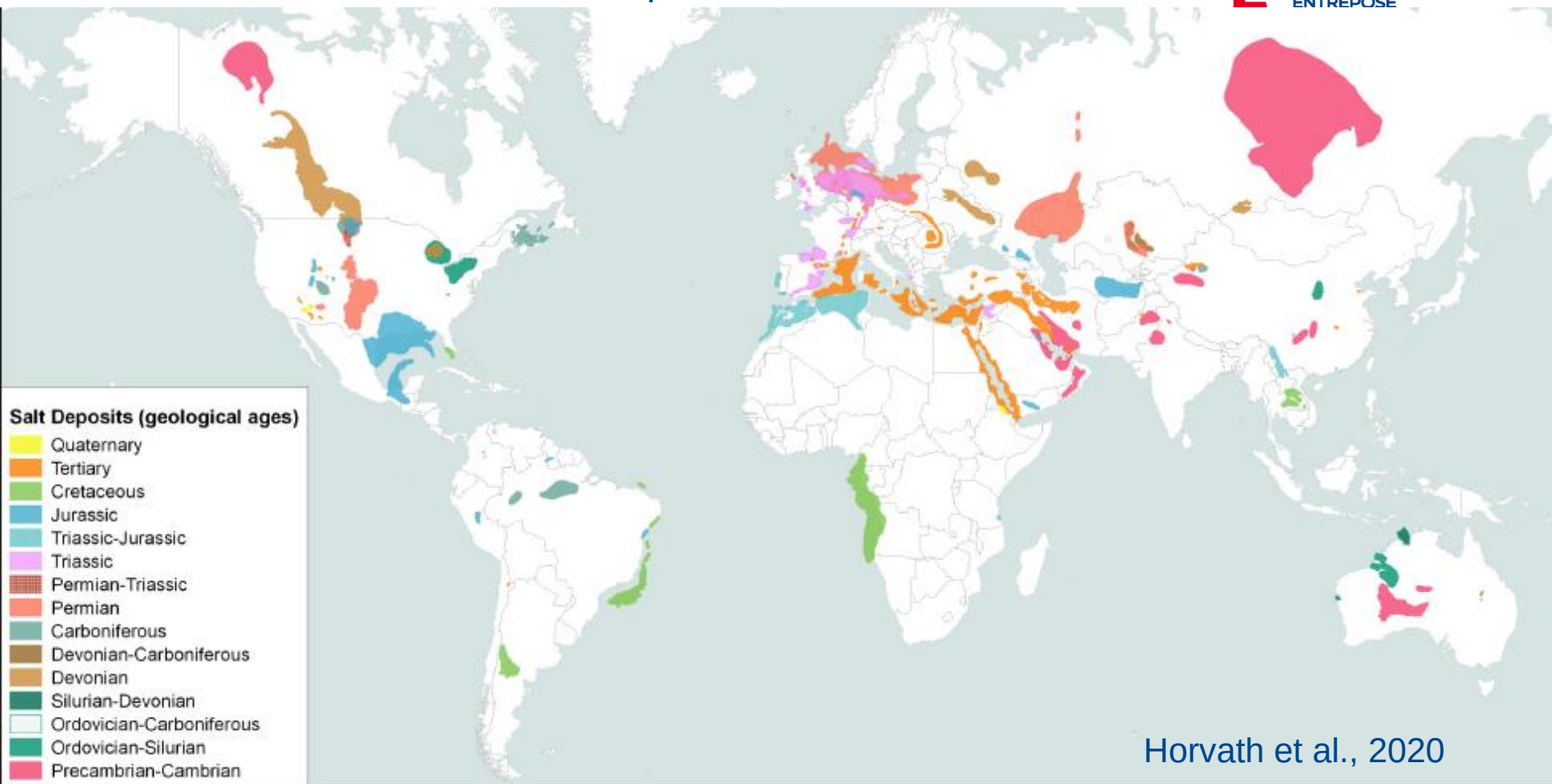


7000 m
(Oakwood dome, Texas)

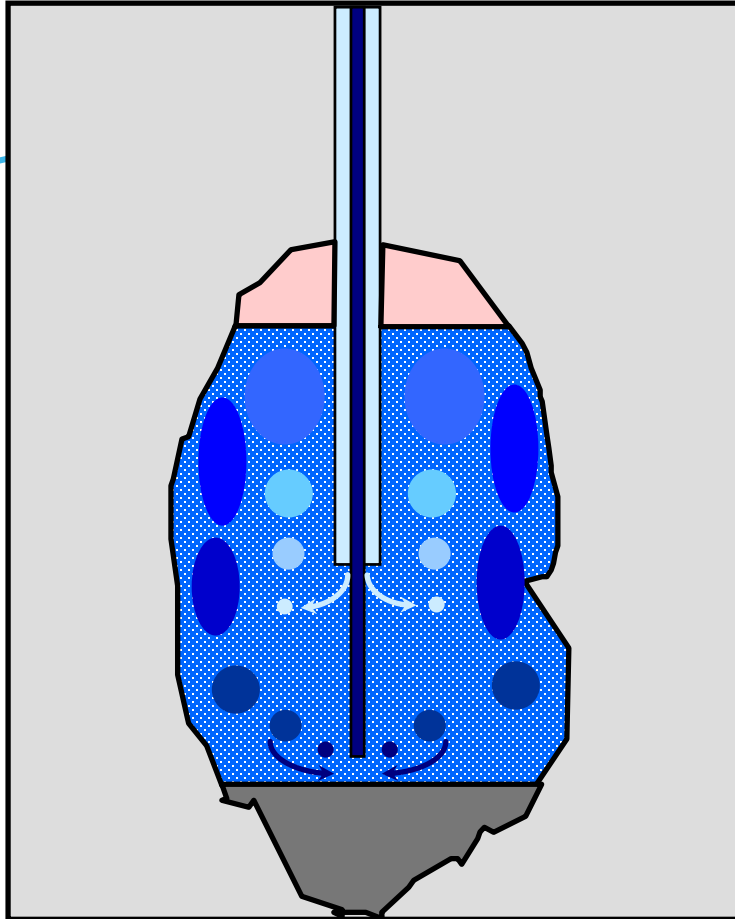


Jeremic et al.

Mais une ressource relativement présente mondialement

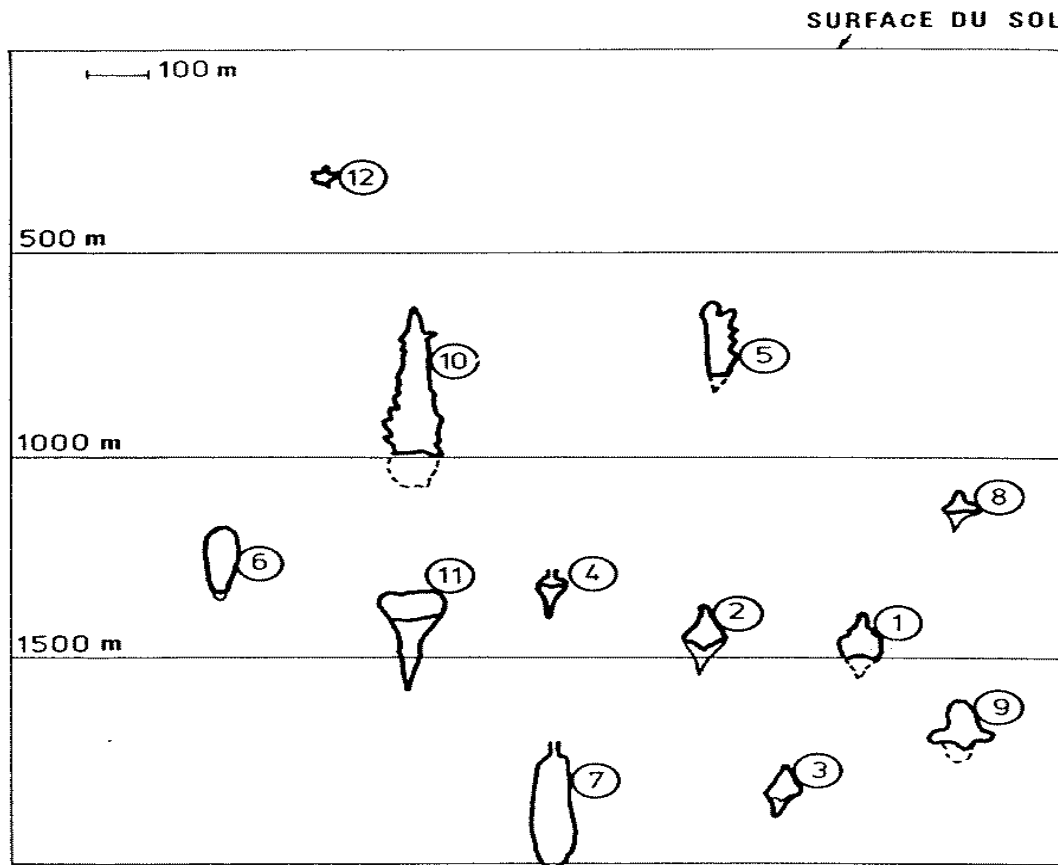


Une excavation facile, à l'eau



- Moins dense que la saumure, elle monte dans la caverne et se mélange avec la saumure qui l'entoure
- Cette saumure diluée atteint les parois de la caverne et dissout du sel. La saumure à nouveau concentrée, plus dense, descend au centre de la caverne
- Les minéraux insolubles, libérés par la dissolution de la matrice saline, tombent et s'accumulent au fond de la caverne
- Un fluide de garde limite le lessivage verticalement

Qui donne des volumes de stockage divers et toujours spécifiques au site

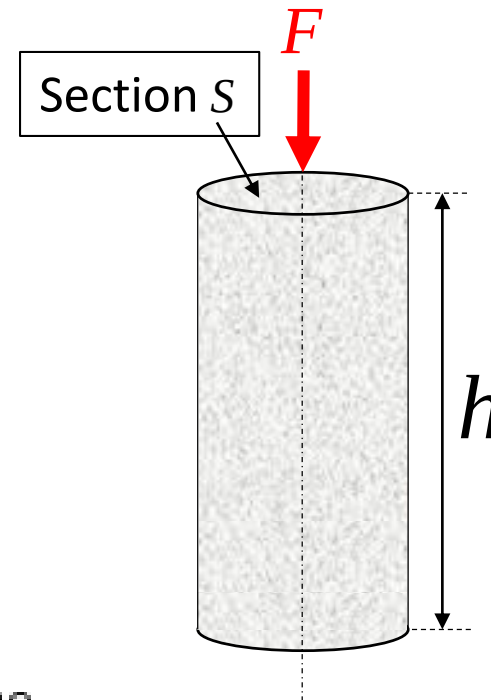
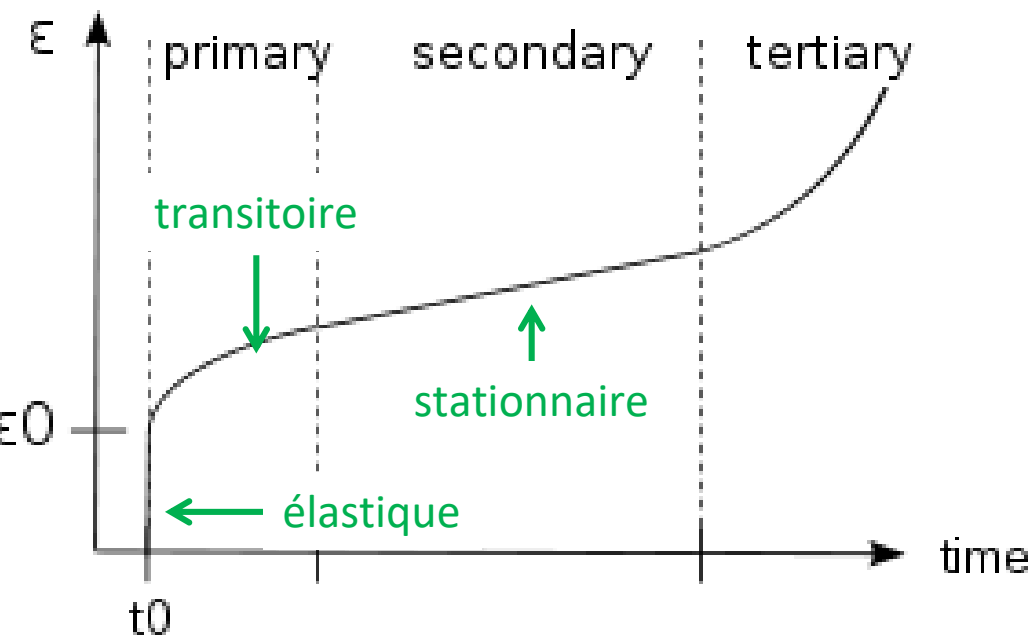


- 1. Tersanne (France)
- 2. Etrez (France)
- 3. Atwick (Grande-Bretagne)
- 4. Kiel (Allemagne)
- 5. Huntorf (Allemagne)
- 6. Epe (Allemagne)
- 7. Eminence (USA)
- 8. Melville (Canada)
- 9. Regina (Canada)
- 10. Manosque (France)
- 11. Hauterives (France)
- 12. Salies de Béarn (France)

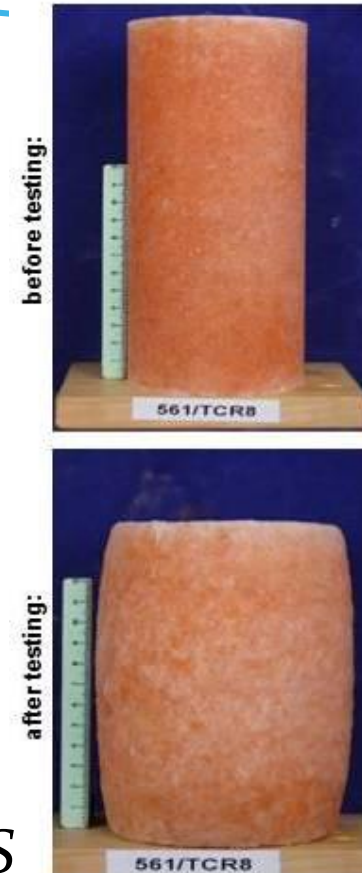
Bérest et al.

Une roche viscoplastique qui flue

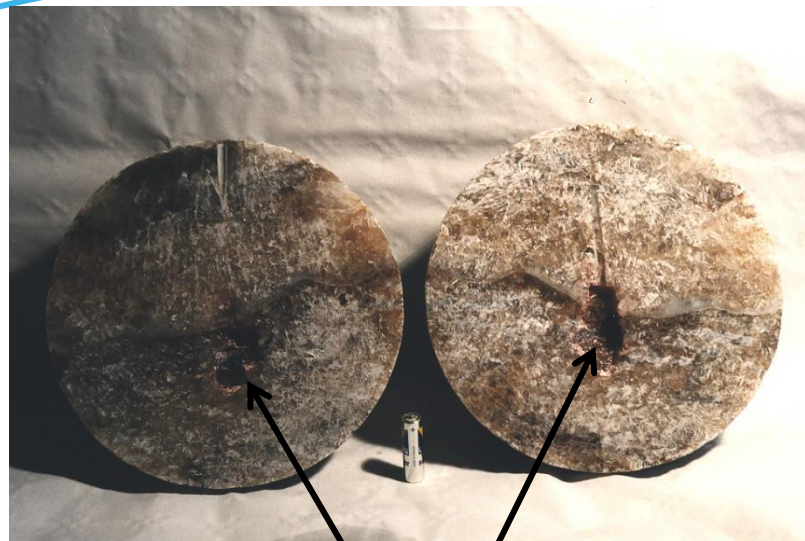
Déformation : $\varepsilon = \Delta h / h$



Contrainte déviatorique : $\sigma = F/S$



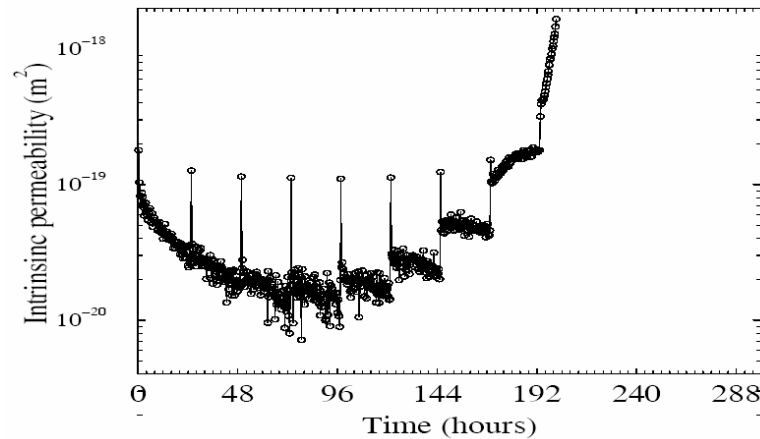
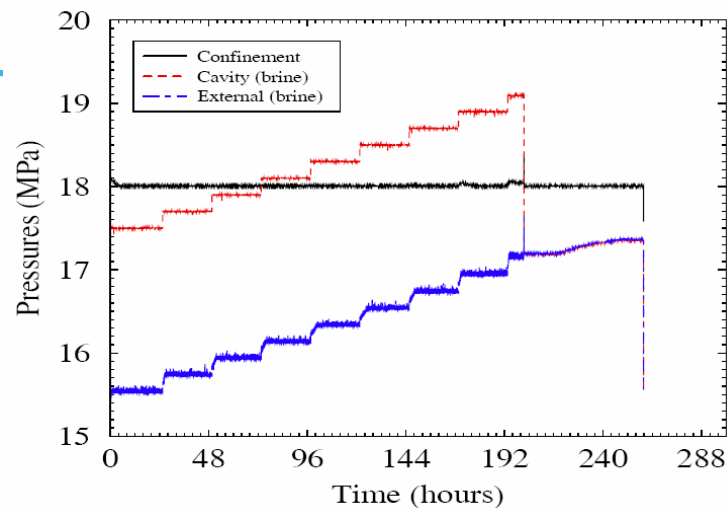
Et qui est étanche



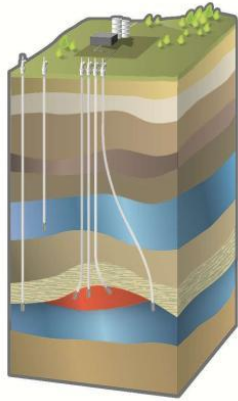
Travaux X-LMS

Mini caverne

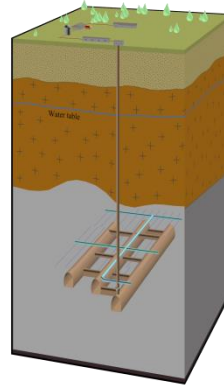
Slide initialement de B. Brouard et P. Bérest



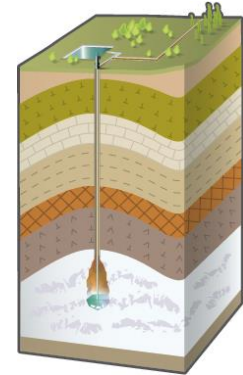
L'étanchéité est un prérequis indispensable pour le stockage souterrain. Peut-on la tester ? Précisément ?



- Pas à l'échelle du stockage
- L'étanchéité repose sur la sélection du site, le contrôle et la surveillance du puits, le contrôle de l'inventaire, la géophysique,,,



- A l'échelle du stockage

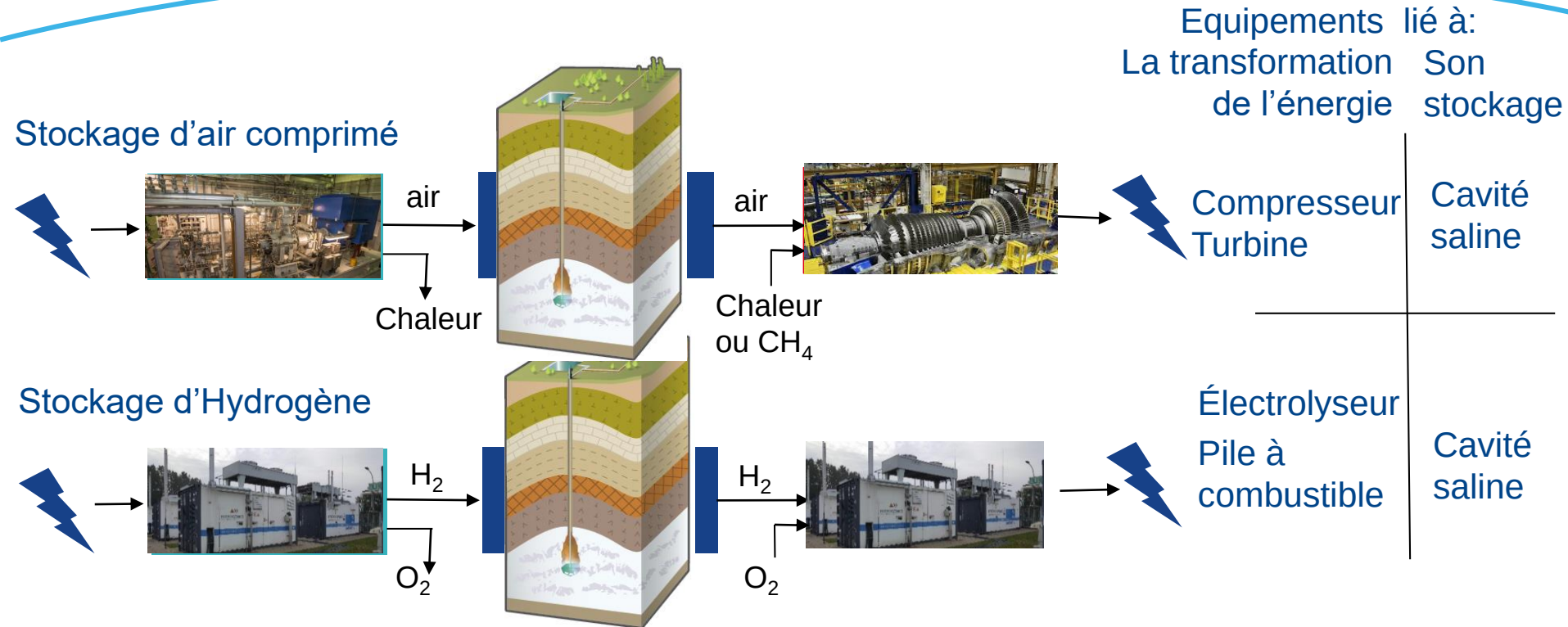


- A l'échelle du stockage
- En considérant le sel étanche, test possible sur un très petit volume autour du puits

**→ Test « MITs » très précis.
Aujourd'hui généralisés et
standardisés**

Quel stockage souterrain d'électricité pour quel usage ?

Principaux équipements des technologies de stockage souterrain d'énergie électrique



Quelle technologie pour quel usage ?

Demande de stockage		
Puissance	1 MW	1 MW
Cycles	12h/12h 365 fois par an	6 mois / 6 mois 1 fois par an
→ Besoin en capacité de stockage	12 MWh	4 380 MWh

STOCK
SE

Répartition du CAPEX

	« équipements de transformation »	« équipements de stockage »
Techno 1	1000 €/kW	100 €/kWh
Techno 2	5000 €/kW	10 €/kWh

→ Total CAPEX

2.2 M€



440 M€

5 M€

50 M€



Un outil utile: le « Levelised Cost Of Storage (LCOS) »

Le prix courant du service de stockage

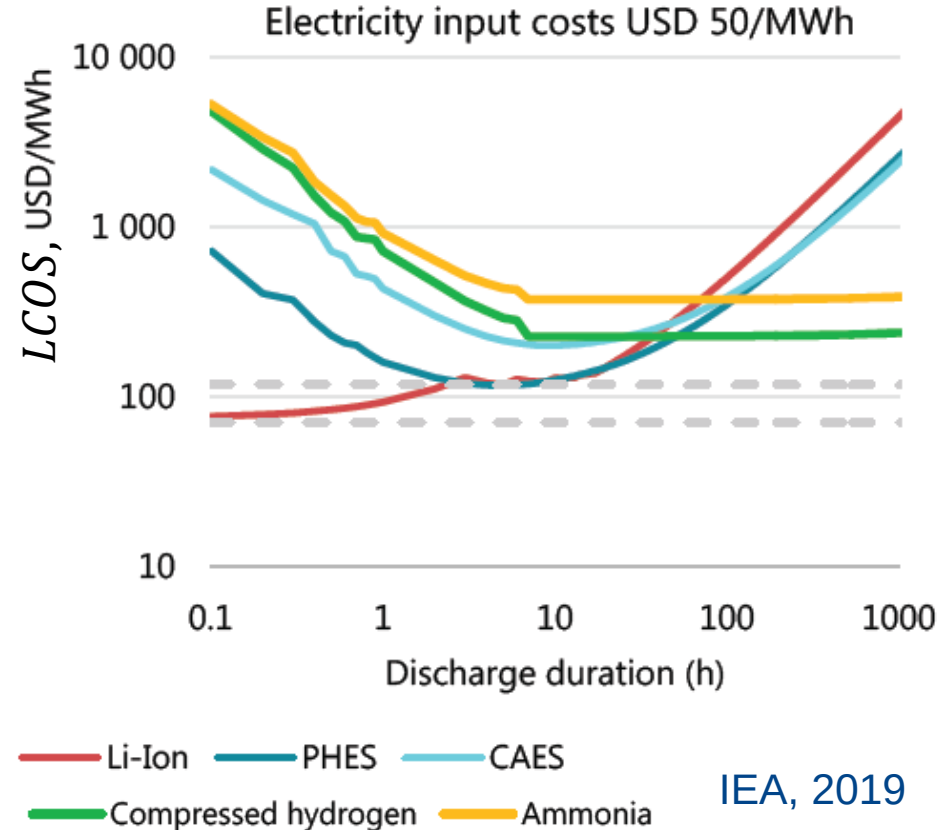
Lifetime of the facility (years) $\rightarrow N$

$CAPEX(n) + OPEX_{fixed} + OPEX_{variable} \times P_{out}(n)$ $\rightarrow Cost(n)$

MWh produced during year n $\rightarrow P_{out}(n)$

Weighted Average Cost of Capital $\rightarrow WACC$

$$LCOS = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{Cost(n)}{(1 + WACC)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{P_{out}(n)}{(1 + WACC)^n}}$$



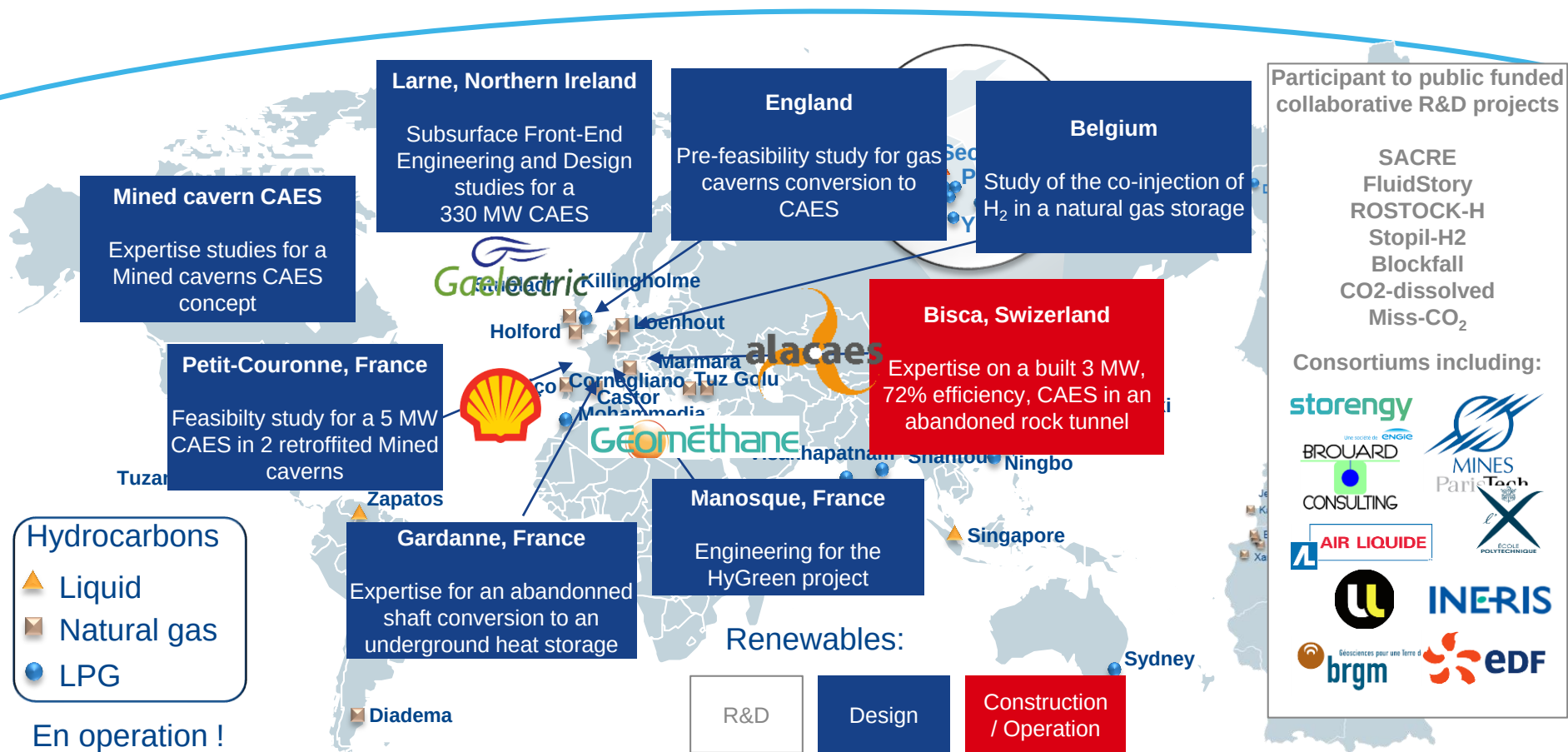
Une comparaison des technologies de stockage concurrentes doit être faite avec précaution. De nombreux paramètres entrent en jeu:

- Les couts d'investissement et d'opération des “équipements de puissance”
 - Élevés pour le power-to-gas-to-power, dont le stockage d'hydrogène
- Les couts d'investissement et d'opération des « équipements de stockage »
 - Faibles pour les cavités salines
- Le cout et la fréquence de remplacement
 - Élevé pour les batteries
- L'efficacité globale du système
 - 30% pour le stockage d'hydrogène; 95% pour les batteries Li-ion
- Les conditions de marché(s)
 - Aujourd'hui, le « marché de capacité » semble plus rémunérateur que le “marché de l'énergie”
- Enfin, les projets de stockage peuvent combiner différentes techniques
 - Par ex., le projet CEOG (*Centrale Électrique de l'Ouest Guyanais*) d'HDF combine 20 MWh de batteries et 120 MWh de stockage d'hydrogène.

Conclusion

- Le stockage est l'une des options permettant d'amener de la flexibilité au réseau électrique, nécessaire au déploiement des énergies renouvelables
- Le stockage souterrain propose, pour l'essentiel, deux technologies permettant le stockage d'énergie électrique: le stockage d'hydrogène ou d'air comprimé
- Ces technologies sont adaptées et compétitives pour des stockage centralisés resp. ~journaliers et ~saisonniers
- Elles font appel à un savoir faire et des compétences particulières, qui sont maîtrisées, et peuvent être transférées depuis le stockage d'hydrocarbures vers le stockage décarboné.

“Etude de cas Geostock”: Principales références pour les stockages d’hydrocarbures & stockage renouvelables (depuis 2015)



QUESTIONS ?

Remerciements: les travaux autour du cout des stockages sont partiellement issus du projet ANR FluidStory sur le stockage EMO

Cornot-Gandolphe, S., 2018. Underground gas storage in the world – 2018 Status. Cedigaz insights #31, Nov. 2018.

Horvath, P.L., Mirau, S., Bernhardt, H., Weiler, C., Bödeker, J., Wippich, M., Tangermann, T., Ratigan, J., 2018. Update of SMRI's Compilation of Worldwide Salt Deposits and Salt Cavern Fields. SMRI Research Report 2017-5, April 2018.

IEA, 2019, Future of Hydrogen. June 2019. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>