

# Stockage d'énergie en cavités minées Etat de l'art et perspectives

Faouzi HADJ-HASSEN



PSL



Centre de Géosciences

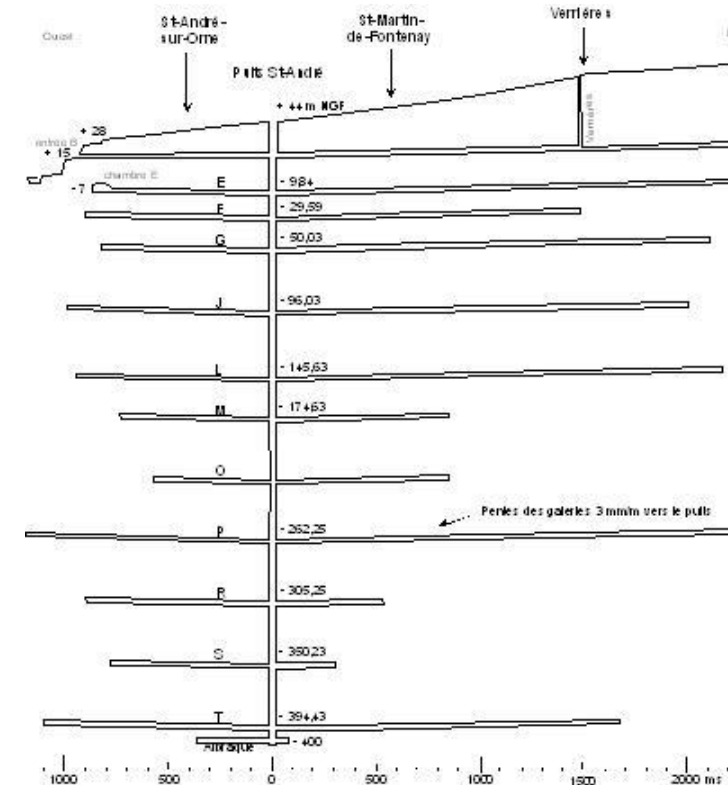
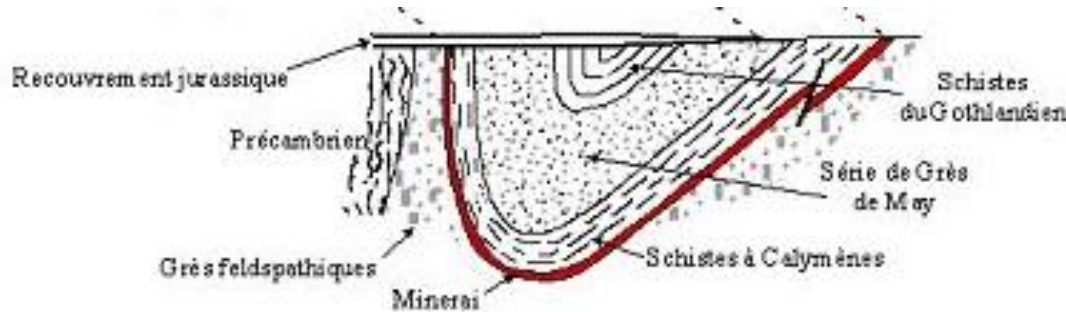
Nicolas GATELIER



- ❑ Premiers stockages en cavités minées (hydrocarbures liquides et liquéfiés)
- ❑ Stockage de produit gazeux
- ❑ Stockage cryogénique
- ❑ Stockage adiabatique de l'air comprimé
- ❑ Stockage d'hydrogène en cavités minées

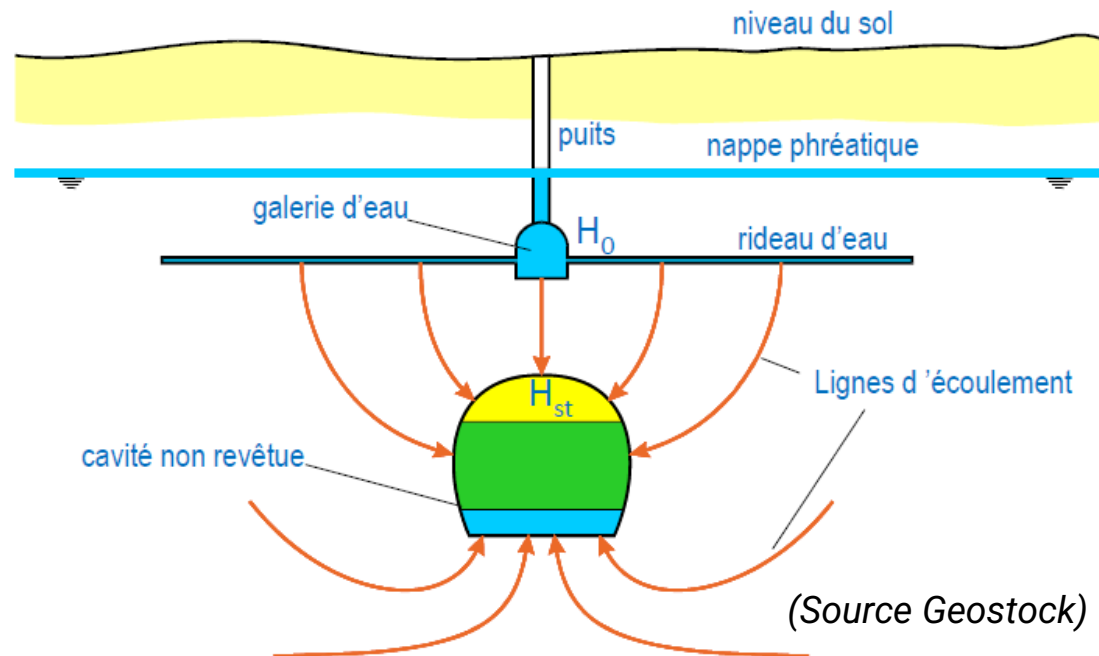
# 1. Premiers stockages en cavités minées

- ❖ Stockages d'hydrocarbures liquides ou faiblement pressurisés (GPL) aux USA dans les années 50
  - Schéma des cavités : chambres et piliers
  - Confinement assuré par l'étanchéité intrinsèque de la roche hôte
  - Stockage de 5 millions de m<sup>3</sup> de fioul dans l'ancienne mine de fer de May-sur-Orne, en Normandie (1968 à 1982).



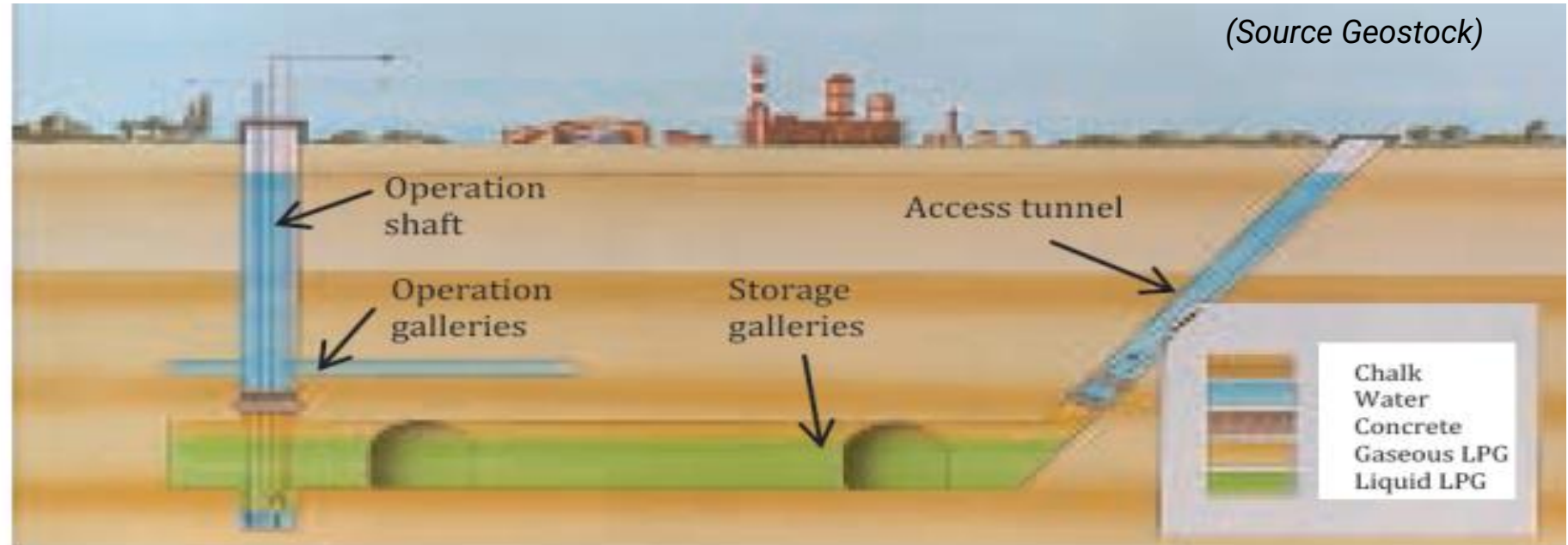
# 1. Concept du confinement hydrodynamique

- ❖ Concept développé quelques décennies plus tard
  - Ecoulement naturel de l'eau vers la cavité empêchant toute migration et fuite du produit stocké
  - Conditions hydrogéologiques non suffisantes : création d'un rideau par injection d'eau afin de renforcer la pression hydraulique
  - Tournant dans l'utilisation des cavités minées pour le stockage d'hydrocarbures : grande variété de milieux géologiques y compris les roches fracturées



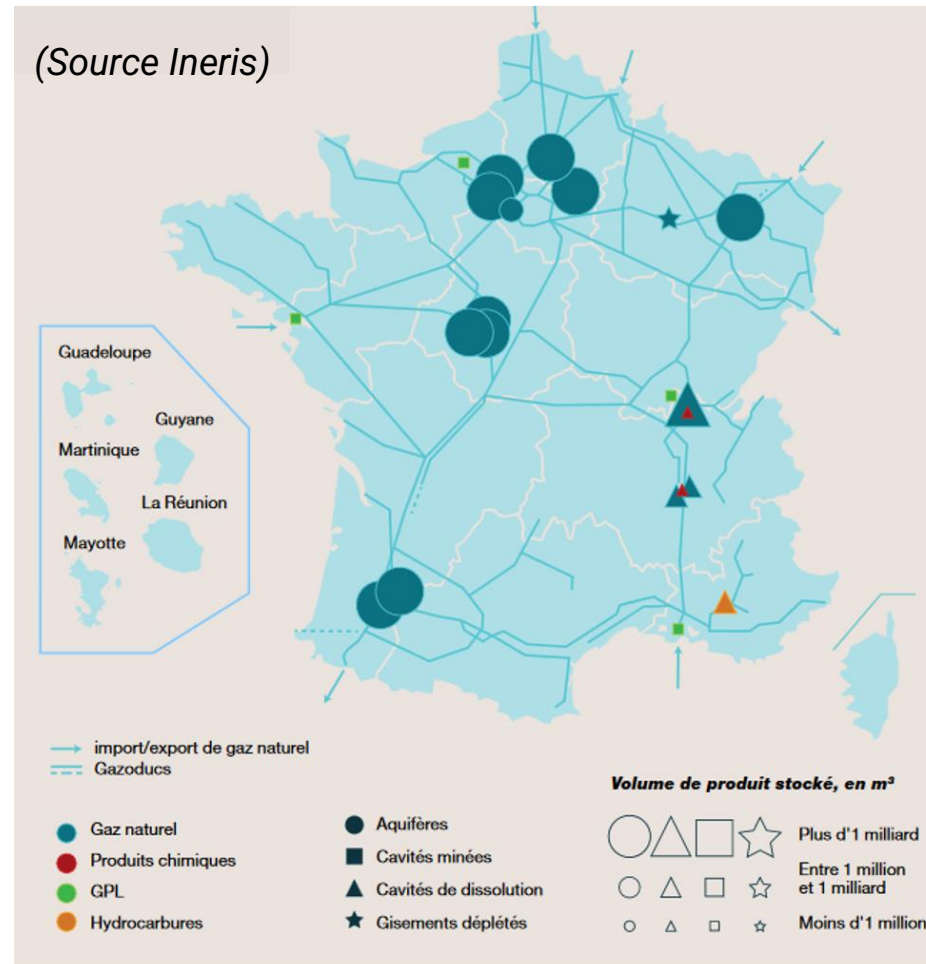
# 1. Concept du confinement hydrodynamique

- ❖ Développement des techniques d'excavation : stockage dans des grandes cavernes non revêtues avec des sections pouvant atteindre 600 m<sup>2</sup> sur plusieurs centaines de mètres
- ❖ Gamme de profondeur entre 70 et 200 m



# 1. Les stockages en cavités minées en France

- ❖ Il existe actuellement une centaine de stockages en cavités minées dans le monde
- ❖ La France dispose de 4 sites pour stocker du GPL (propane et butane), le plus ancien, situé à Petit-Couronne en Seine-Maritime, a été mis en service en 1966.





## Stockage de GPL de Petit Couronne : chambres et piliers



- Stockage de propane et de butane dans la craie
- Creusement entre 1964 et 1966
- Exploitation pendant 47 ans
- Profondeur : 144.5 m
- Pression maximale de stockage (propane) : 7 bar

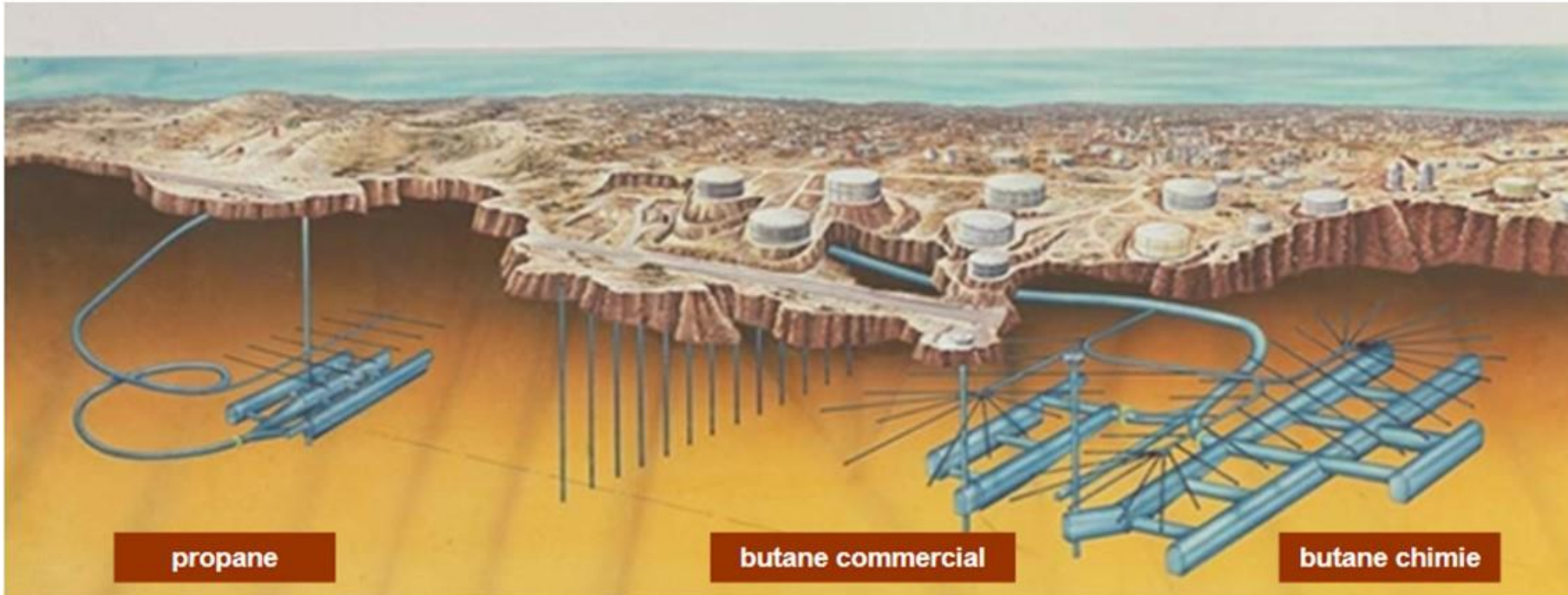
Stockage	Propane	Butane
Volume (m <sup>3</sup> )	53000	12500
Profondeur (m)	145	152
Section galerie (m <sup>2</sup> )	27 (hauteur 6 m, largeur 4m)	

- Stockage fermé récemment

(Source Shell)

# 1. Les stockages en cavités minées en France

## Stockage de GPL de Lavera de GEOGAZ : grandes galeries



- Stockage de propane et de butane (commercial et chimie) dans le calcaire
- Capacité : 303000 m<sup>3</sup> (1<sup>er</sup> terminal de stockage massif de GPL en Europe, 2011)
- Confinement avec un rideau d'eau horizontal
- Exploitation depuis 1971
- Profondeur : entre 60 et 120 m par rapport au niveau de la mer

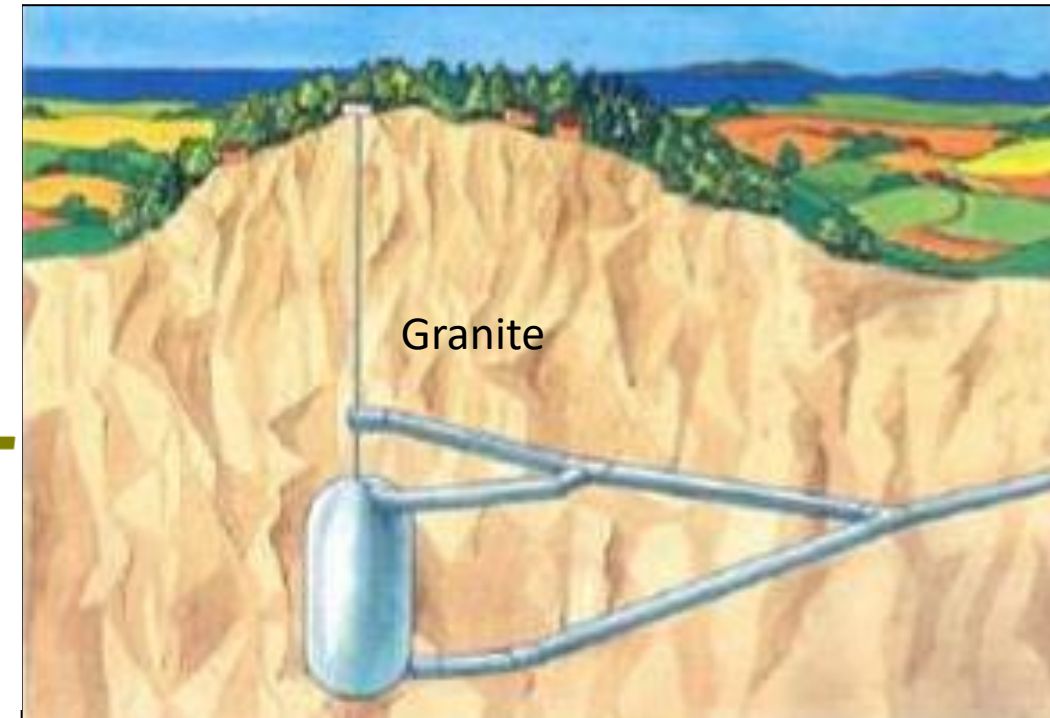
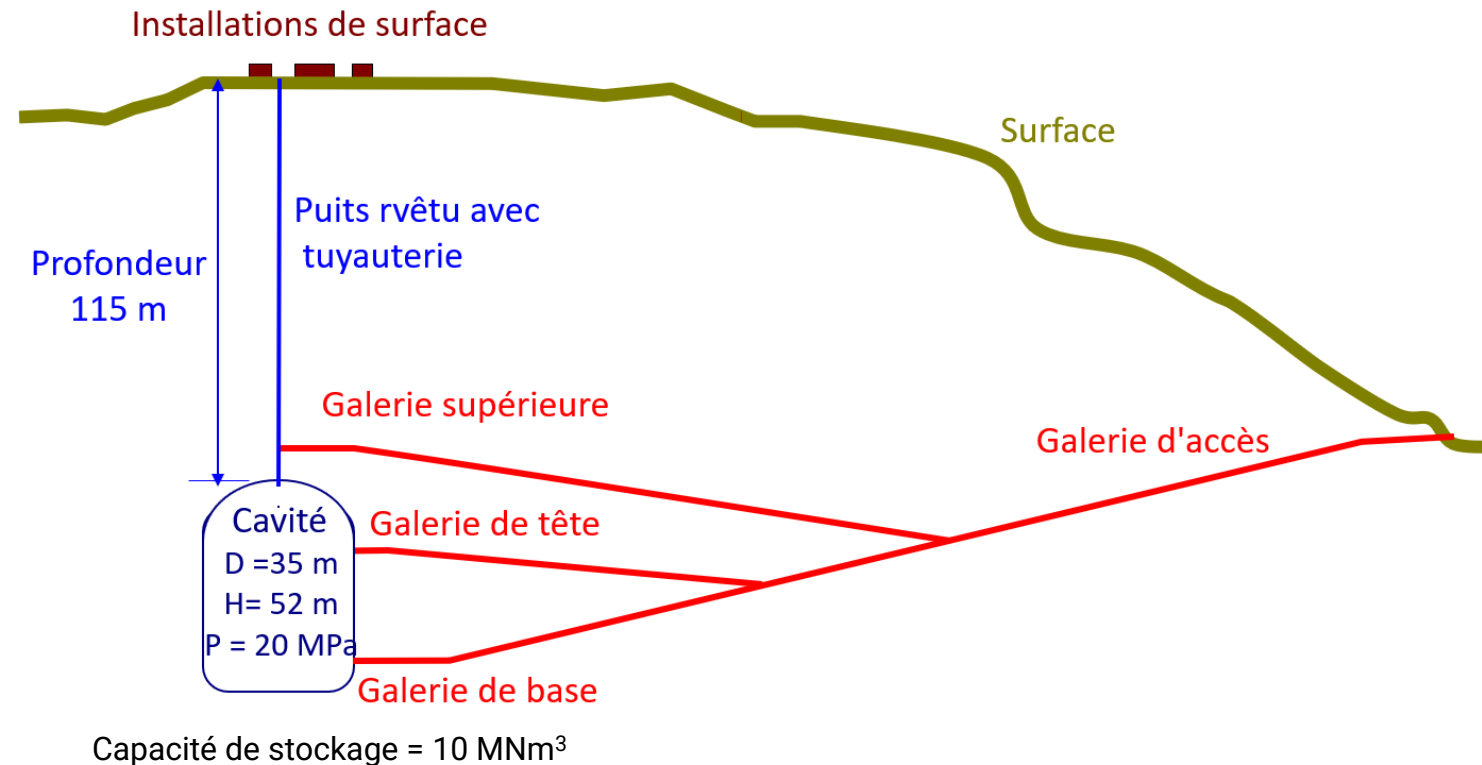


## 2. Stockage de produits gazeux

### Cavité minée revêtue : principe

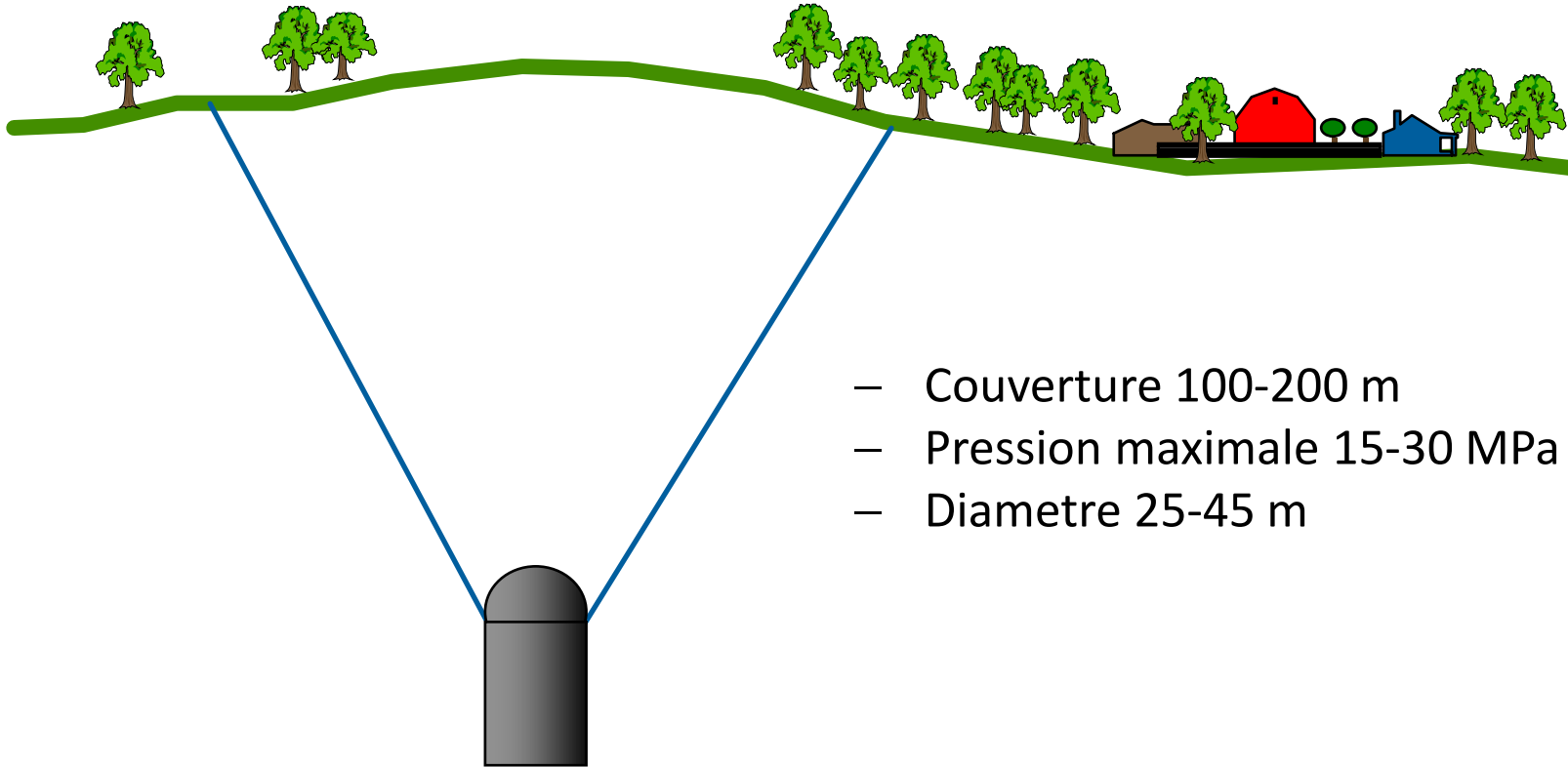
- Concept de la barrière hydraulique non adapté pour le stockage de produits gazeux → profondeurs prohibitives pour assurer le confinement du produit
- Mise en place d'un revêtement spécifique : cavité minée revêtue (LRC)

Cavité de Skallen pour le stockage de gaz naturel (Suède) – source Johansson J. 2003

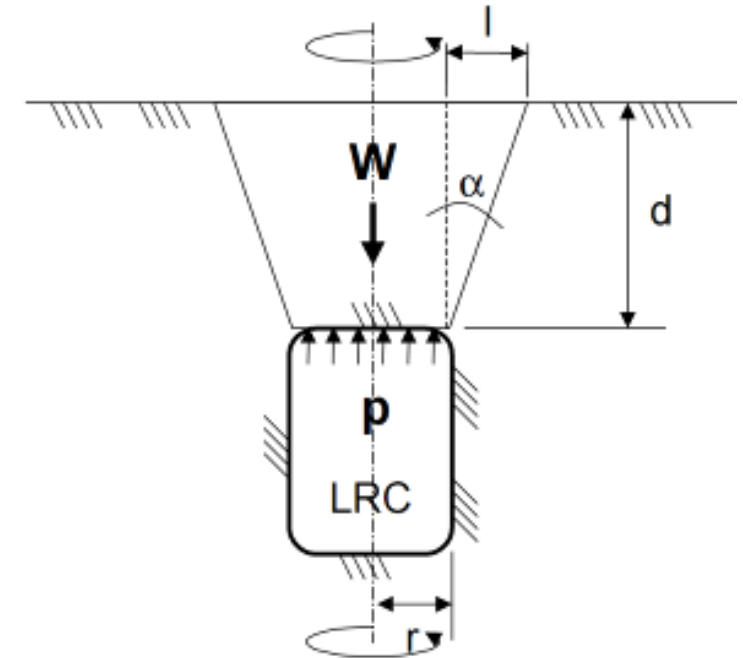


## 2. Stockage de produits gazeux

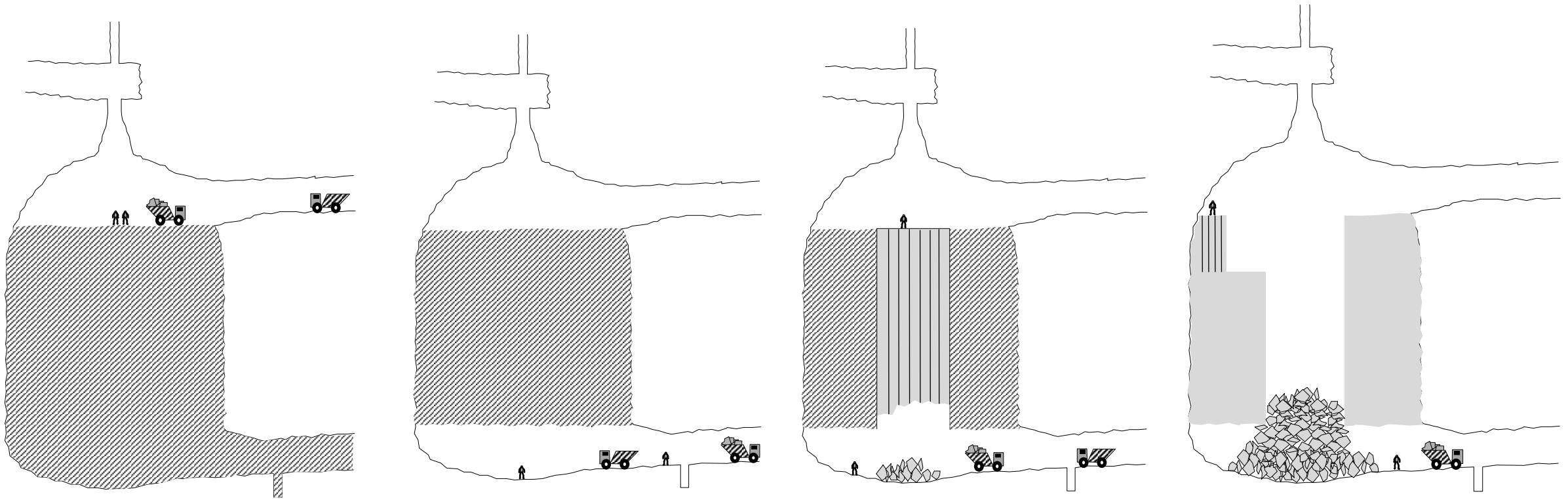
### Cavité minée revêtue : profondeur



- Couverture 100-200 m
- Pression maximale 15-30 MPa
- Diametre 25-45 m



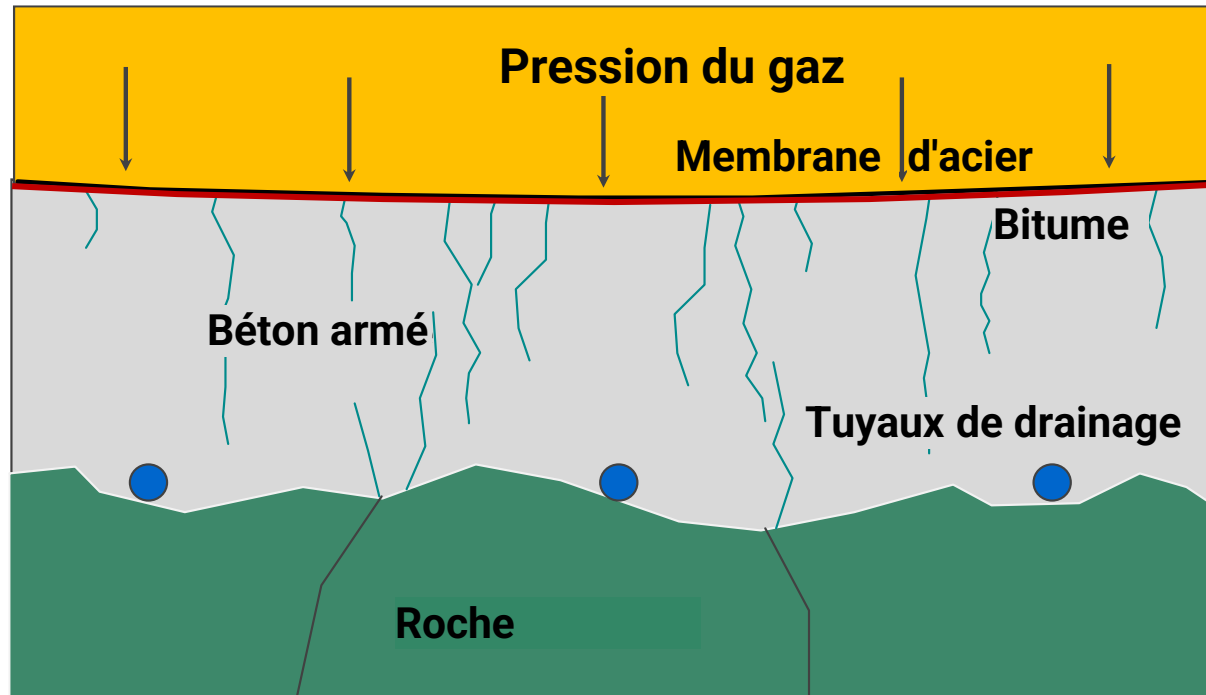
### Cavité minée revêtue : creusement



- Creusement du sommet et de la base de la cavité à partir des deux voies d'accès
- Réalisation d'une cheminée et abattage avec la méthode des longs trous (tolérance sur la paroi  $\pm 30$  cm)
- Traitement du parement à l'avancement : boulonnage + drainage (treillis de tuyaux percés)
- Mise en place d'un béton projeté pour combler les hors-profils et offrir une surface de travail lisse et régulière

## 2. Stockage de produits gazeux

### Cavité minée revêtue : structure du revêtement



(source Johansson J. 2003)

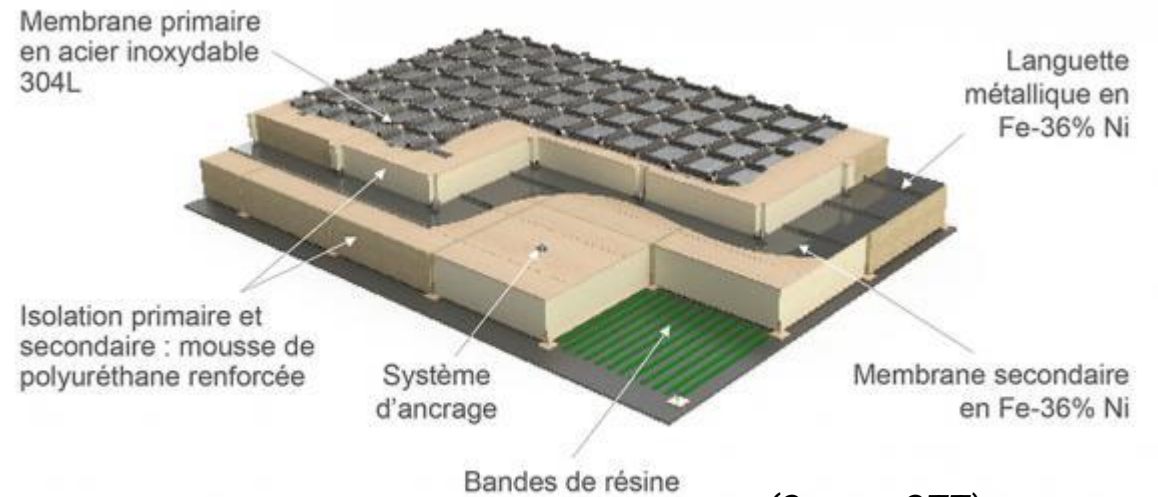
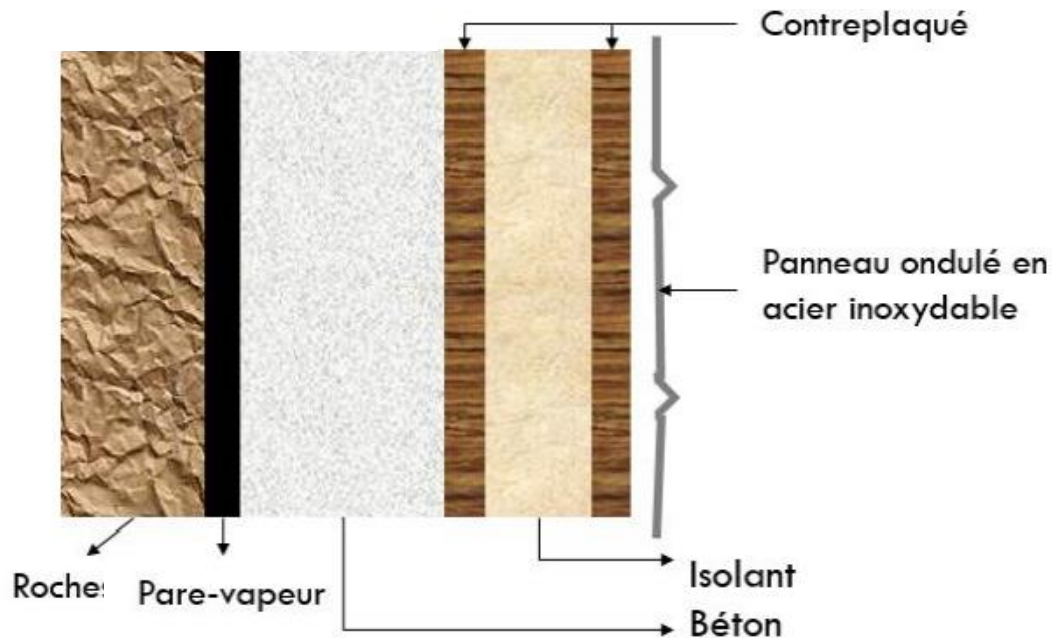
- Béton : transmet les contraintes mécaniques à la paroi
- Ferrailage : disperse les fissures et empêche que le liner puisse pénétrer dans des fissures trop importantes
- Bitume : autorise un mouvement relatif du liner par rapport au béton, indispensable pour que l'ensemble résiste aux déformations mécaniques
- Liner : assure l'étanchéité de l'installation (une dizaine de mm)



# 3. Stockage cryogénique

## Passage du gaz à la phase liquide : avantages

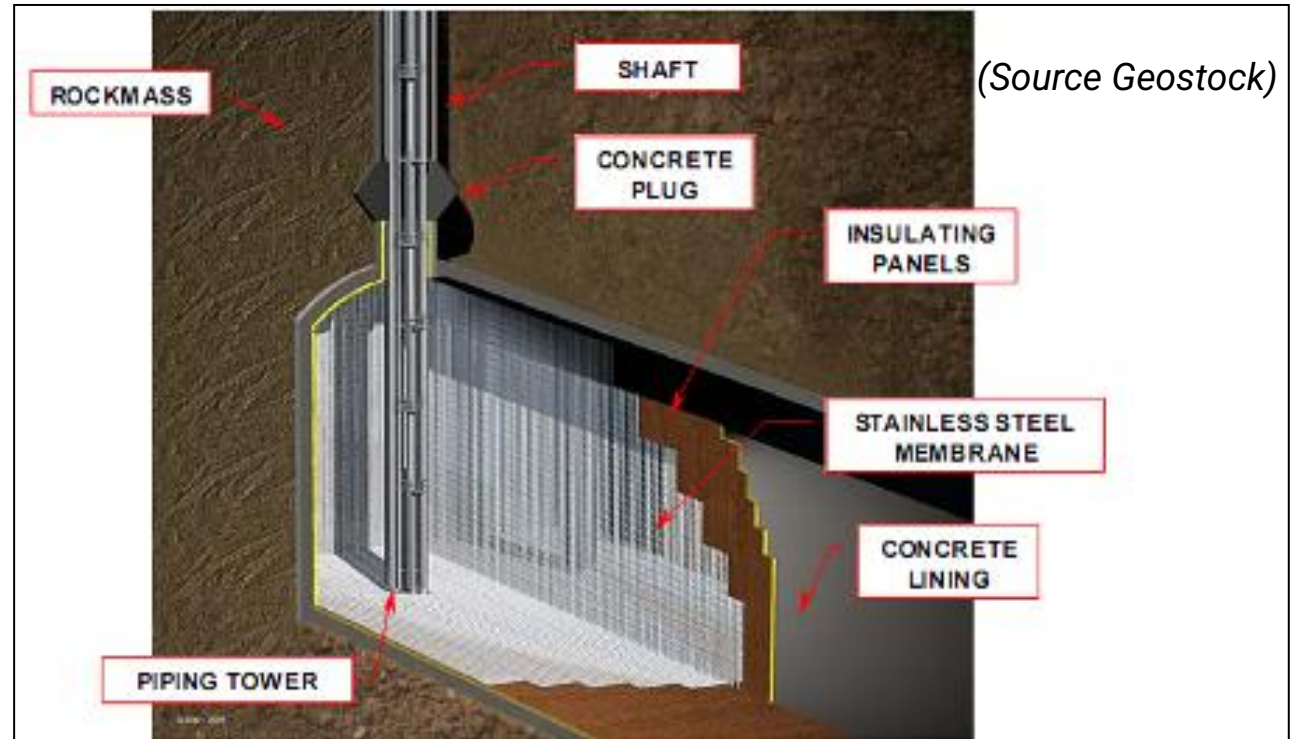
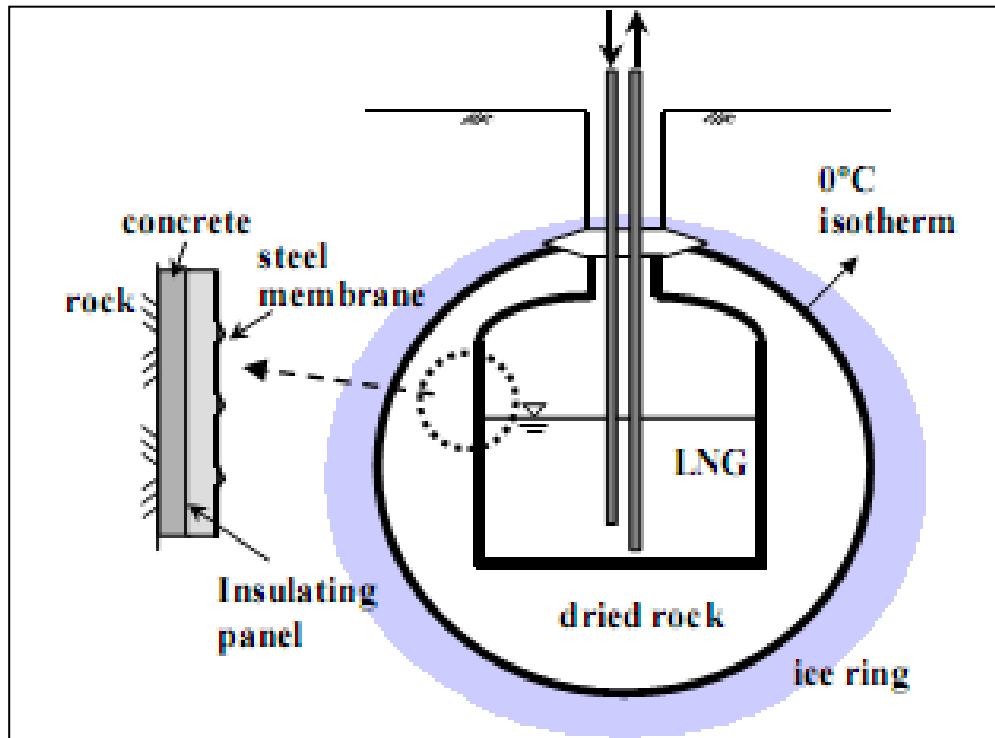
- Augmentation importante de la densité énergétique, donc volume réduit pour le transport et le stockage de la même masse
- Température très basse : GNL = -161 °C, LH2 : -253 °C
- Roche ne pouvant pas supporter une telle température : revêtement isolant
- Stockage à faible pression, donc à faible profondeur
- Procédé de liquéfaction très énergivore



(Source GTT)

## Gestion de la température dans la roche

- Température supportée par la roche : -80 °C
- Drainage nécessaire pour éviter la pression de glace derrière le revêtement
- Formation d'un anneau de glace jouant le rôle d'une seconde barrière
- Epaisseur de l'anneau de glace permettant de maintenir la pression interstitielle : 1 à 2 m
- Membrane métallique flexible : 1.2 mm

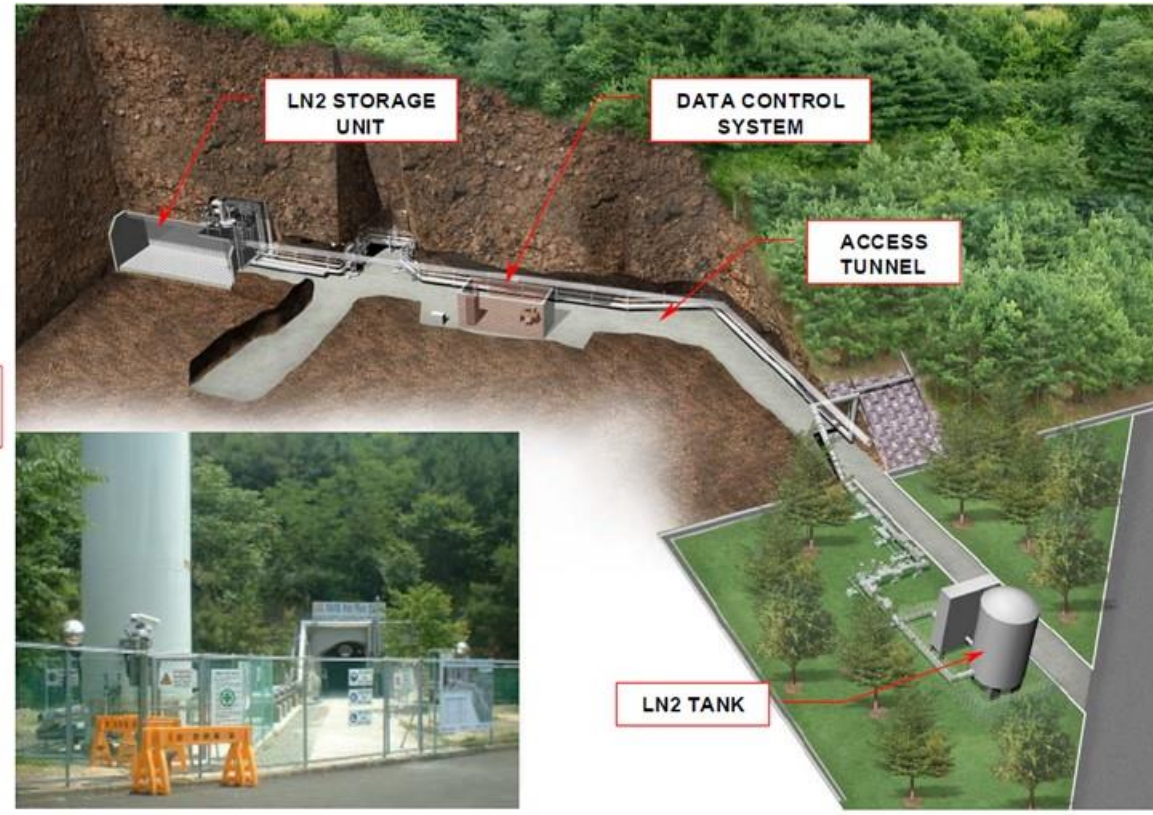
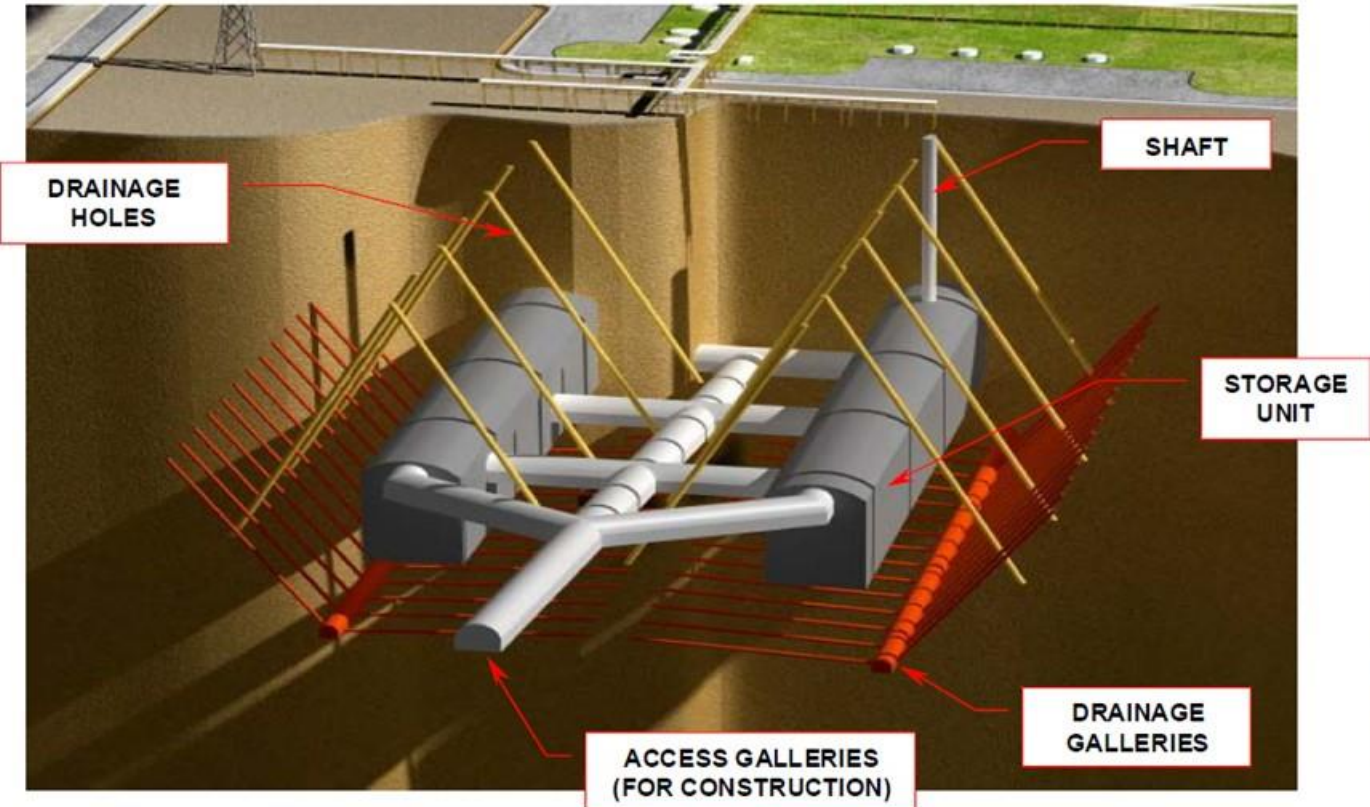




# 3. Stockage cryogénique

## Situation actuelle

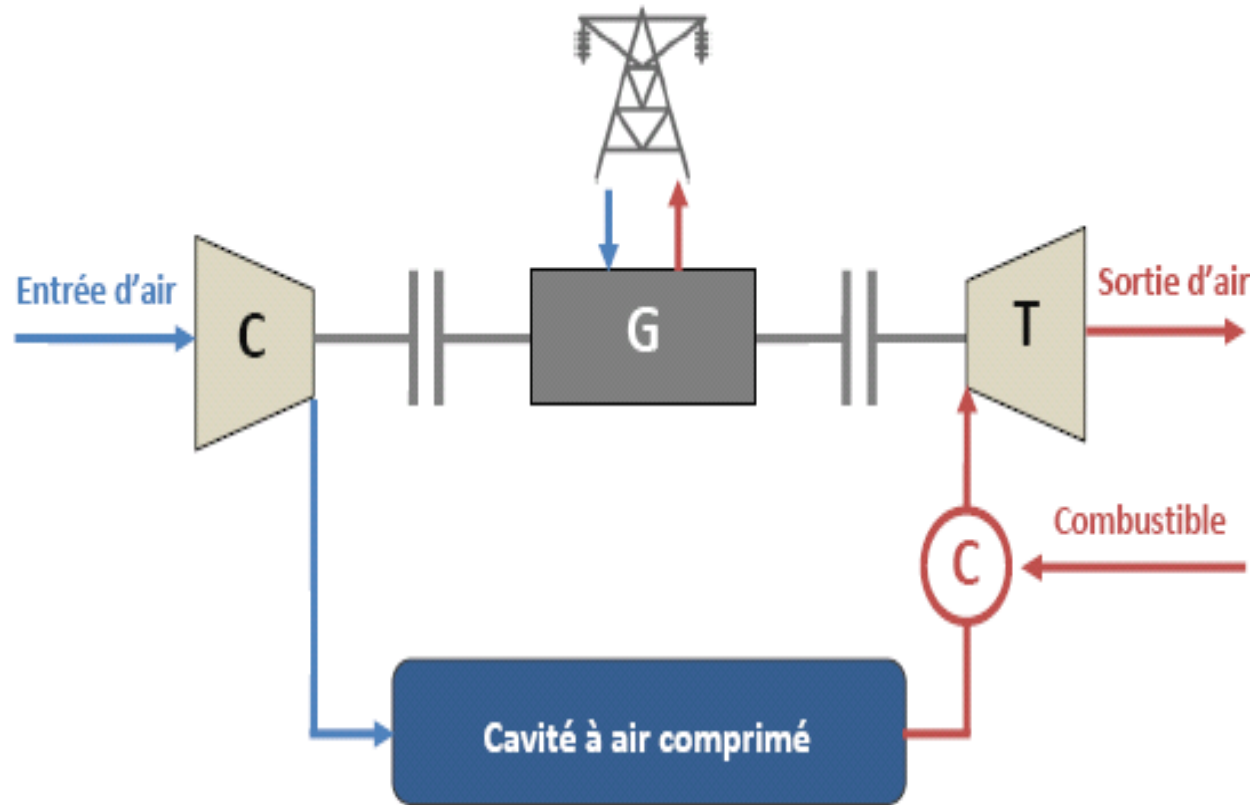
- Design proposé par Geostock pour un stockage cryogénique de GNL (brevet)
- Pilote réalisé en Corée du sud par Geostock/Saipem/SKEC pour le stockage d'azote liquide
- Faisabilité technique, mais actuellement, il n'existe aucun stockage opérationnel



(Source Geostock)

# 4. Stockage adiabatique de l'air comprimé

## CAES - Compressed Air Energy Storage : état de l'art



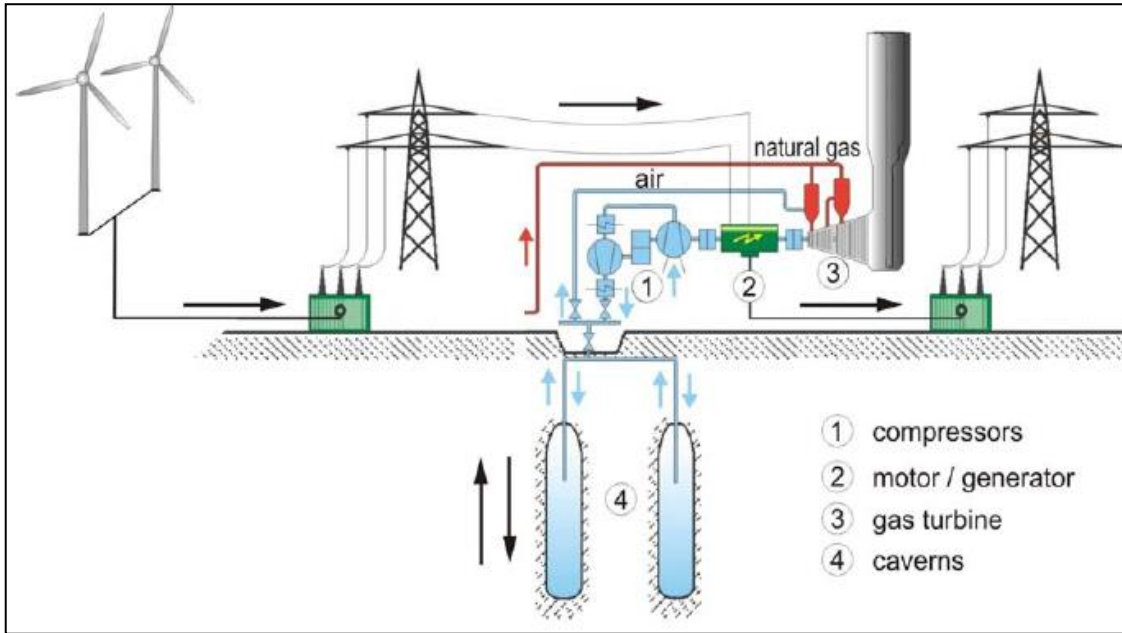
- Chaleur de compression perdue
- Apport d'énergie thermique nécessaire lors de la détente (production de CO<sub>2</sub>)
- Rendement électrique faible : ~ 50 %
- Air refroidi pour réduire les contraintes thermiques



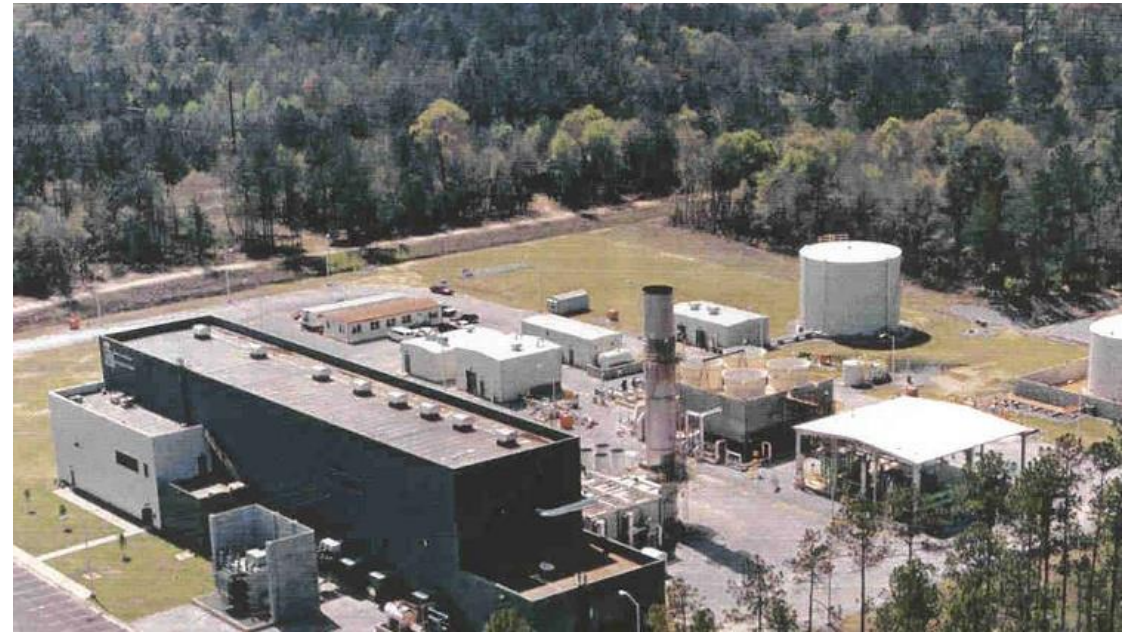
# 4. Stockage adiabatique de l'air comprimé

## CAES - Compressed Air Energy Storage : état de l'art

2 installations commerciales existantes : stockage en cavités salines



Huntorf (RFA, 1978, 290 MW)



McIntosh (USA, 1991, 110 MW)

- Huntorf : 2 cavités de 310 000 m<sup>3</sup>, pression entre 4.8 et 6.6 MPa, 3 h de soutirage
- McIntosh : une cavité saline de 560 000 m<sup>3</sup>, pression entre 4.5 et 7.4 MPa, 26 h de soutirage



# 4. Stockage adiabatique de l'air comprimé



## AA-CAES - Projet SEARCH : Stockage d'Electricité sous forme d'Air comprimé avec Récupération de la CHaleur de compression

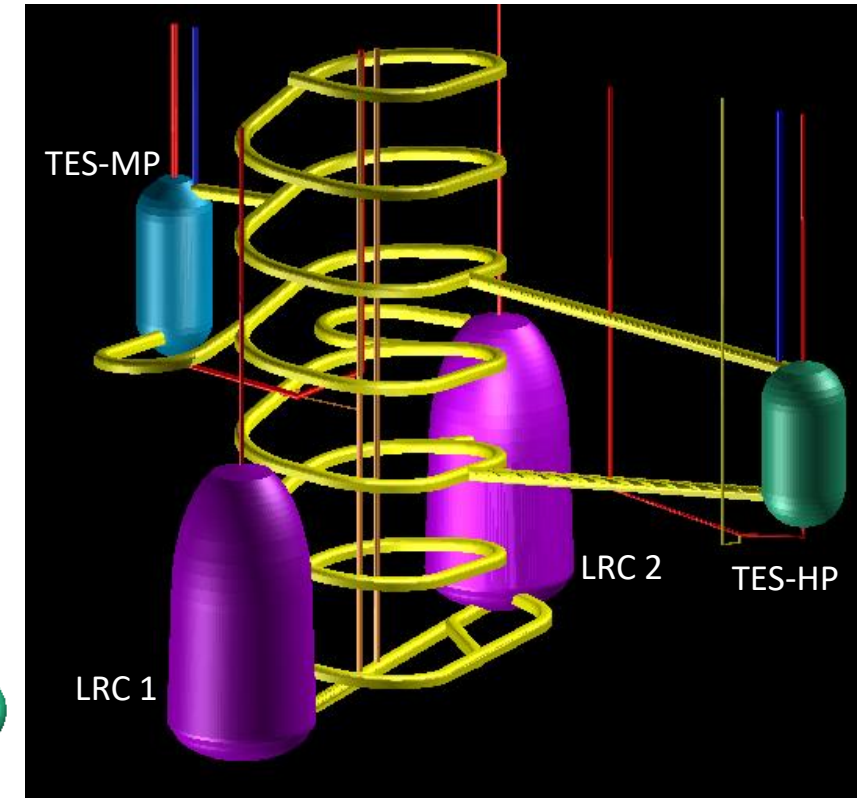
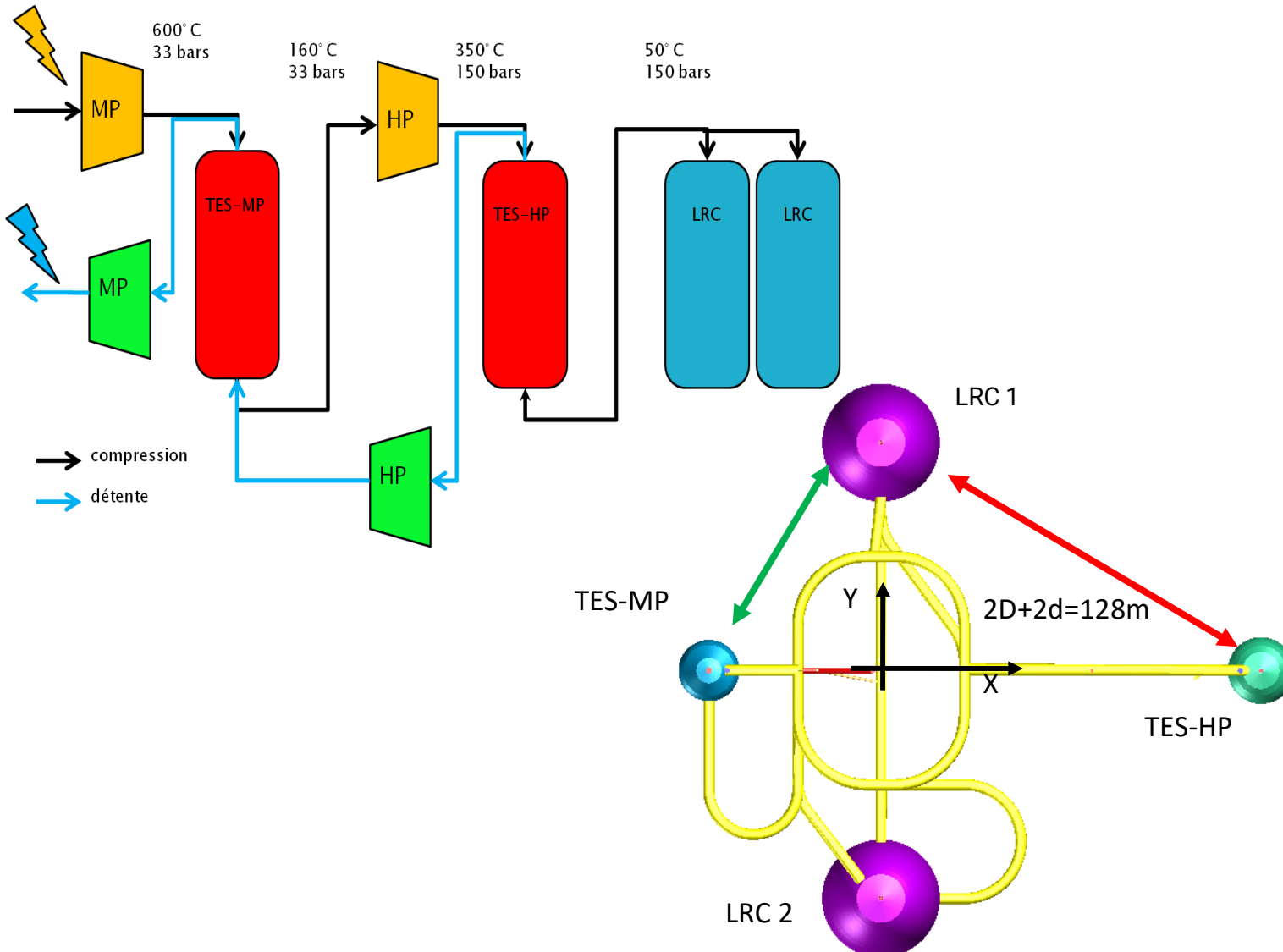
### Objectif

- CAES adiabatique sur cavités minées revêtues avec stockage de chaleur enterré
- Taille 100-400 MW
- Dimensionnement des ouvrages
- Validations expérimentales: Cyclage T des céramiques ( $5\text{m}^3$ ), Pilote de TES sous pression
- Planning 2009-2013



# 4. Stockage adiabatique de l'air comprimé

## AA-CAES en cavités minées revêtues : configuration de référence (200 MW)

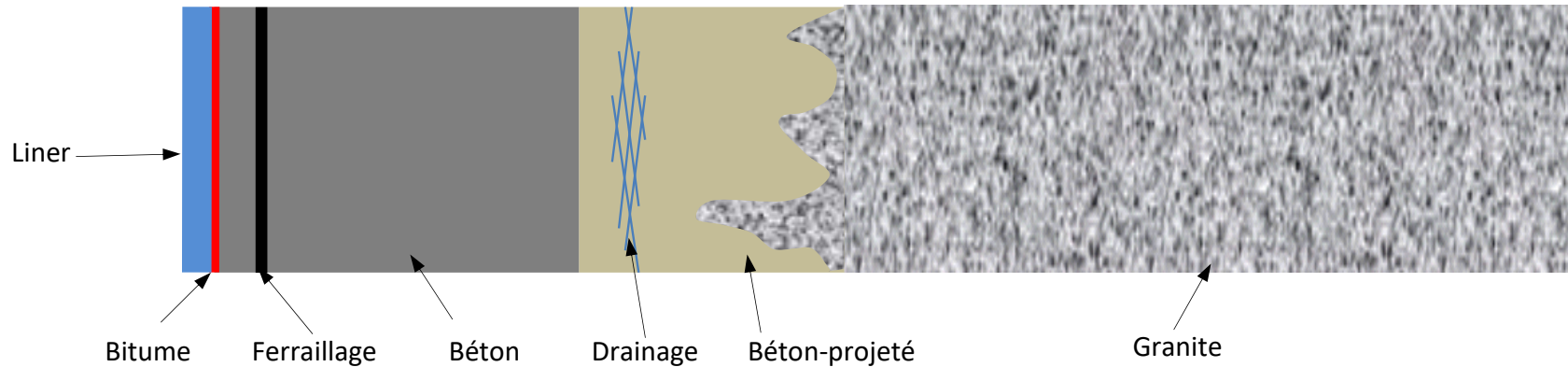




# 4. Stockage adiabatique de l'air comprimé

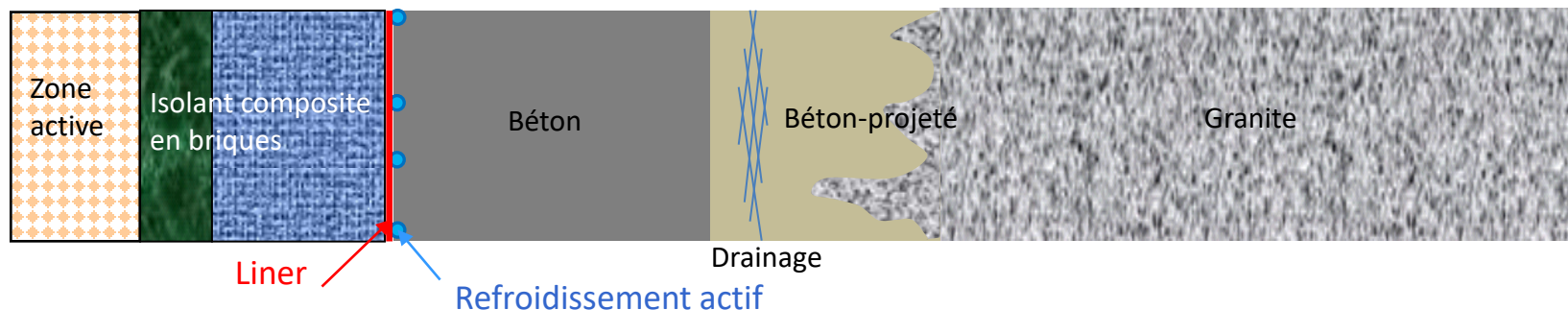
## AA-CAES en cavités minées revêtues : revêtement des ouvrages

### Revêtement des cavités du stockage à température modérée (système Skallen)



### Revêtement des cavités de stockage de la chaleur TES

- Revêtement Skallen non viable pour les TES en raison des contraintes thermiques
- Nouveau revêtement doit intégrer isolation avec une perte > 1% et un refroidissement actif



# 4. Stockage adiabatique de l'air comprimé

## AA-CAES en cavités minées revêtues : situation actuelle

- Pilote d'un TES réalisé au CEA
- Faisabilité technique démontrée, mais pas d'installation industrielle à ce jour



# 5. Stockage d'hydrogène en cavités minées

## Etat de l'art et perspectives

### Stockage en cavités salines

- 4 sites de stockage en exploitation

Location	Clemens Dome	Moss Bluff	Spindletop	Teeside (UK)
Operator	Conoco Philips	Praxair	Air Liquide	Sabic
Start up	1983	2007	2014	1972
Geo Volume k(m <sup>3</sup> )	580	566	906	3 * 70
P Range (bar)	70 – 137	55 – 152	68 - 202	45
Capacity (GWh)	81	123	274	27

- Pilote de stockage européen à Etrez (Storengy),
- Autres projets en cours en Europe
- Appel à projet européen pour un stockage industriel (TRL 8)

### Stockage en cavités minées revêtues (développement en cours)

- Principe général : stockage gazeux de type Skallen, mais comportement du liner métallique face à l'hydrogène
- Projet HYBRIT en Suède : [https://www.hybritdevelopment.se/..](https://www.hybritdevelopment.se/)
- Projet GEOGAZ à Lavera : <https://vigny.france-hydrogene.org/projets/geogaz/>