



AGSE - Colloque du cinquantaire – Géosciences

LE STOCKAGE SOUTERRAIN – LES TROIS TYPES DE STOCKAGE

- 1. LE STOCKAGE SOUTERRAIN : INTRODUCTION**
- 2. LES TROIS TYPES DE STOCKAGE SOUTERRAIN**
- 3. STOCKAGE EN CAVITE MINEE**
- 4. STOCKAGE EN CAVITE SALINE**
- 5. STOCKAGE EN AQUIFERE & MILIEU POREUX (CHAMP DEplete)**
- 6. PRINCIPALES REFERENCES**

1. LE STOCKAGE SOUTERRAIN : INTRODUCTION

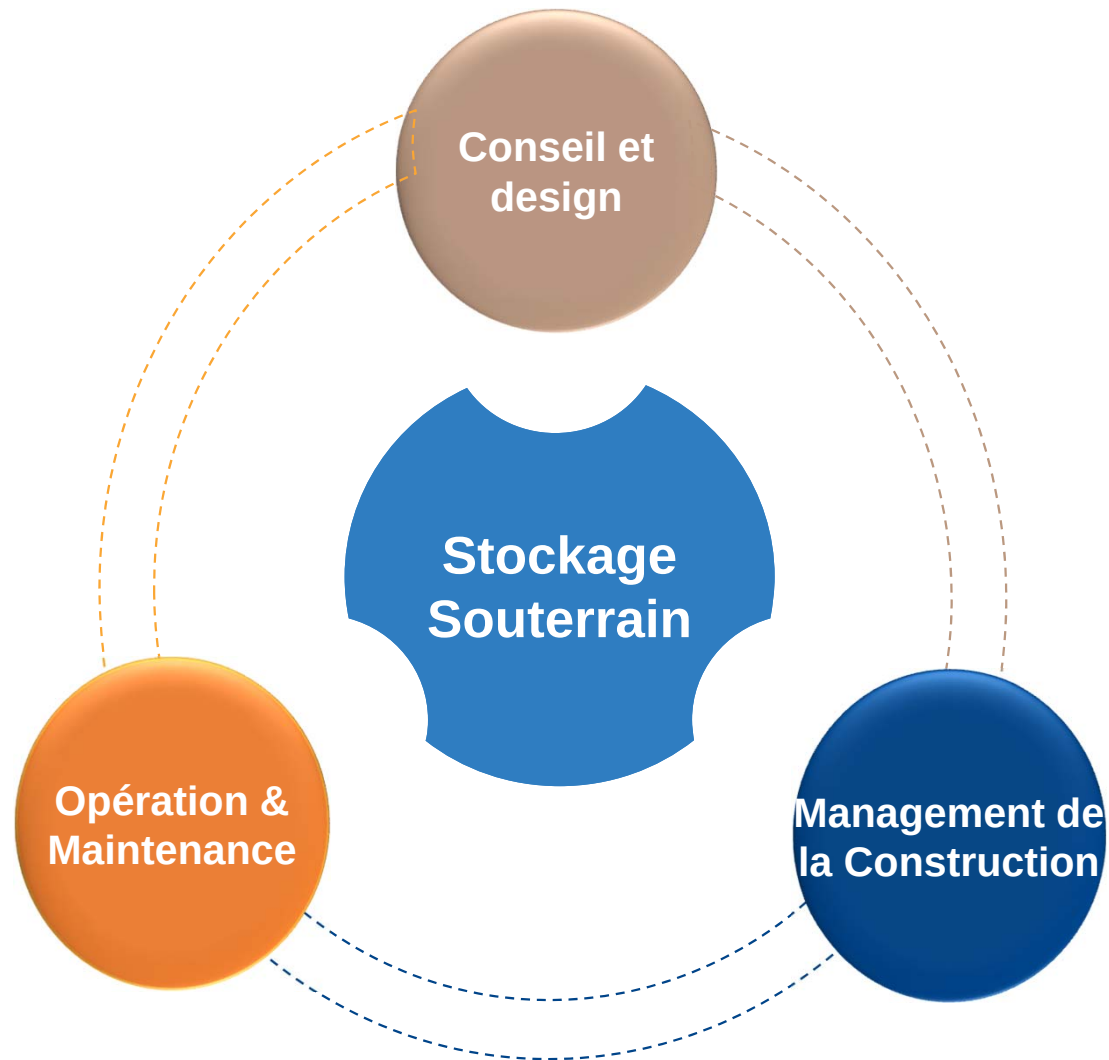
2. LES TROIS TYPES DE STOCKAGE SOUTERRAIN

3. STOCKAGE EN CAVITE MINEE

4. STOCKAGE EN CAVITE SALINE

5. STOCKAGE EN AQUIFERE & MILIEU POREUX (CHAMP DEplete)

6. PRINCIPALES REFERENCES



Hydrocarbures

- Liquides (Bruts et Produits raffinés)
- Liquéfiés (GPL & GNL)
- Gazeux (Gaz naturel)

Autres

- CO₂
- Air comprimé
- Hydrogène
- Autres

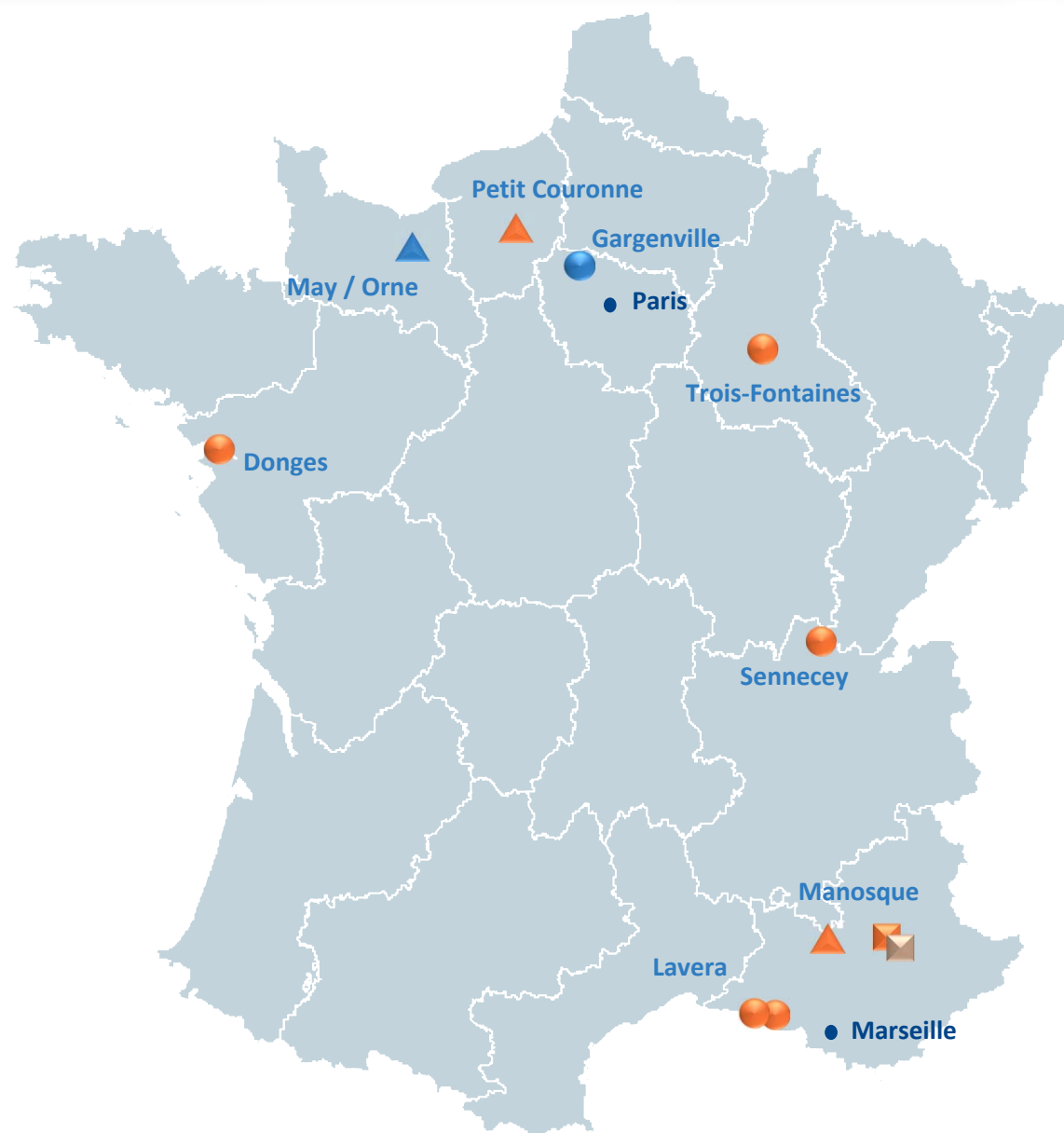
LE STOCKAGE SOUTERRAIN

GEOSTOCK : Principales références (*hors France et Allemagne*)



LE STOCKAGE SOUTERRAIN

GEOSTOCK : Expérience en France



- Stockage en exploitation
- Projets en cours
- Stockages fermés
- △ Hydrocarbures liquides
- Gaz naturel
- GPL

LE STOCKAGE SOUTERRAIN

1. LE STOCKAGE SOUTERRAIN : INTRODUCTION

2. LES TROIS TYPES DE STOCKAGE SOUTERRAIN

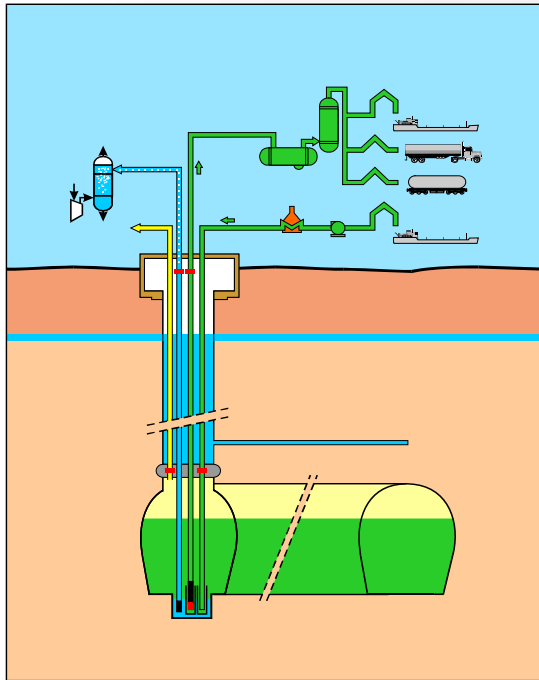
3. STOCKAGE EN CAVITE MINEE

4. STOCKAGE EN CAVITE SALINE

5. STOCKAGE EN AQUIFERE & MILIEU POREUX (CHAMP DEplete)

6. PRINCIPALES REFERENCES

LES TROIS TYPES DE STOCKAGE SOUTERRAIN



Cavité minée

Étanchéité hydrodynamique

Creusée (machines / explosifs)

GPL (butane, propane), pétrole brut

Peu profond (GPL 80 à 150 m, pétrole brut 150 à 250 m)

Développement horizontal

Hauteur : 20 à 25 m, longueur 100 à 1000 m, surface 50 à 650 m²

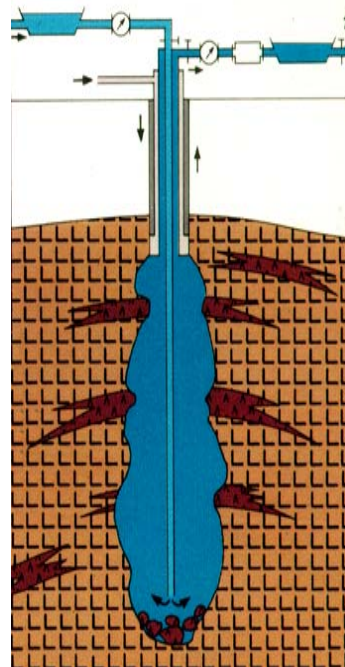
Volum : 100 000 à 500 000 m³ (10 000 – 1 000 000 m³)

Accès physique par tunnel / puits

Reconnaissance: forages & observations directes pendant le creusement

Exploitation: pompes fond, suivi rideau d'eau, suivi piézométrique

Cavité minée



Cavité saline

Étanchéité intrinsèque

Lessivée (eau douce -> saumures)

HC liquides (pétrole brut, naphta, GPL) & gaz

Profondeur variable (300 à 2000 m (sol))

Développement vertical

Hauteur : 30 à 70 m

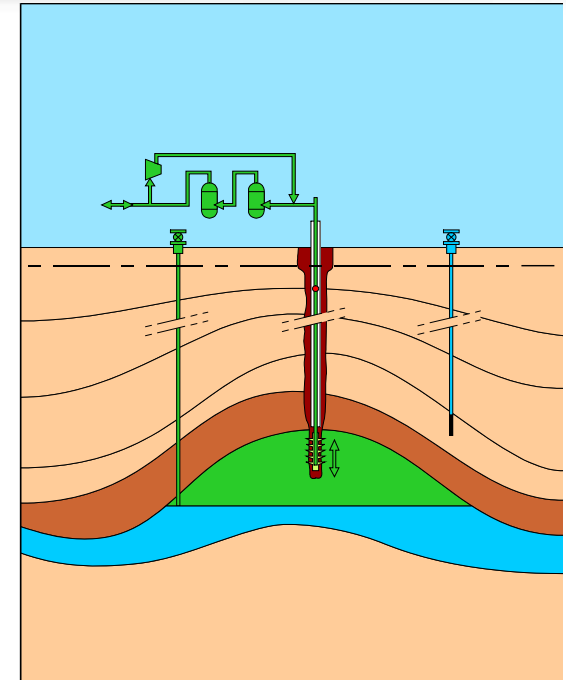
Volum : 100 000 à 650 000 m³

Seul accès le forage (lessivage & exploitation)

Reconnaissance: forages & méthodes indirectes (image 3D par sonars en lessivage)

Exploitation: pas d'équipement fond, suivi fluage, pièges, gestion saumures

Cavité saline



Stockage en aquifère & milieu poreux

Étanchéité intrinsèque couverture / bas eau

Vides naturels (réseau poreux / karst)

Gaz Nat. (forte pression: 30 bar à 200 bar)

Profondeur : 500 à 3000 m (selon géologie)

Structures fermées

Réservoirs naturels (similaire aux réservoirs naturels)

Volum : 100 000 à 1 000 000 m³ + gaz coussin

Plusieurs usages (exploration, exploitation & suivi)

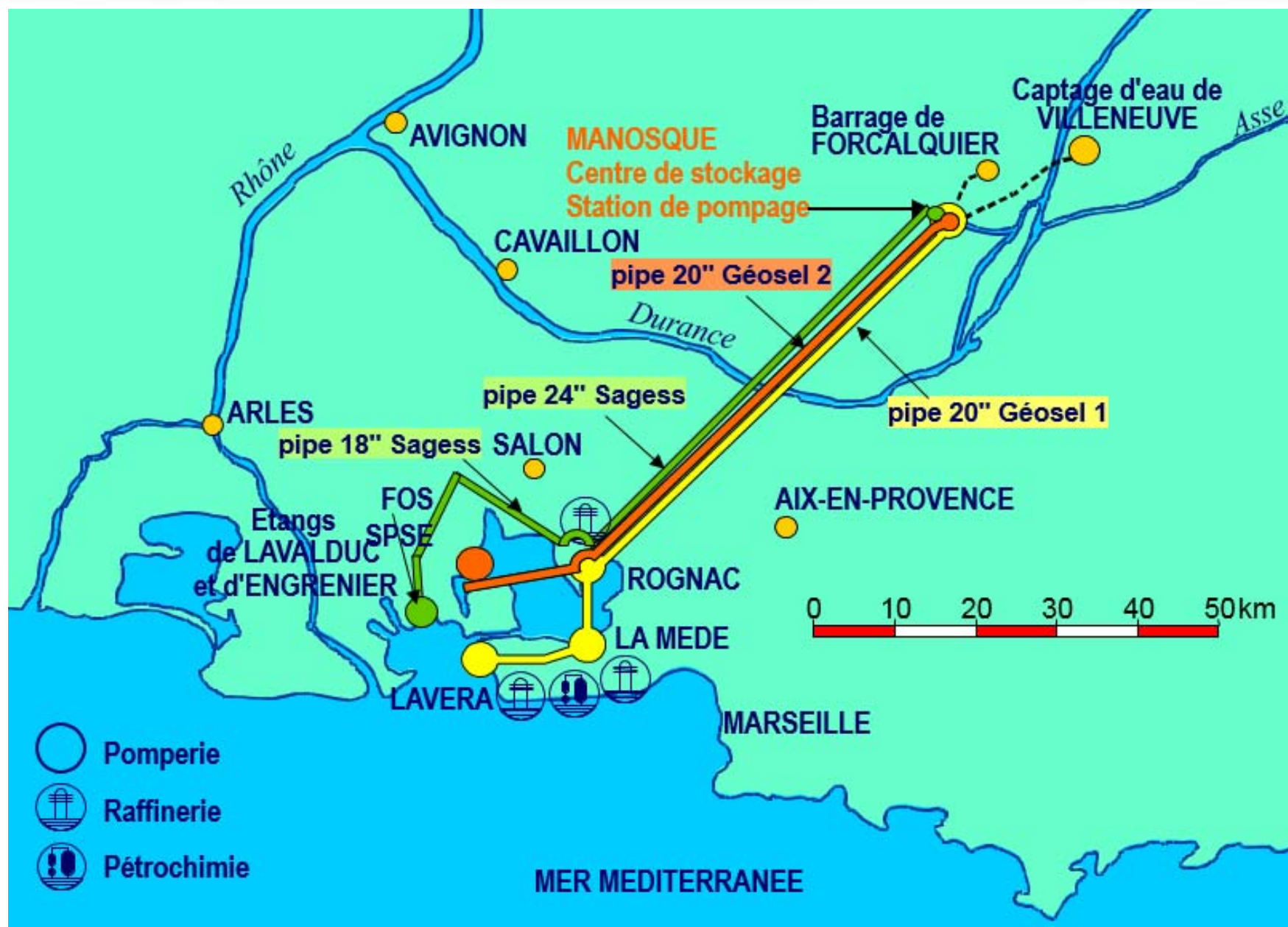
Reconnaissance: forages & méthodes indirectes, géophysique, logs, tests

Exploitation: pas d'équipement fond, suivi interfaces, contrôle périphérique

Aquifère & milieu poreux

LE STOCKAGE SOUTERRAIN

Stockages de Manosque et Lavéra + infrastructure

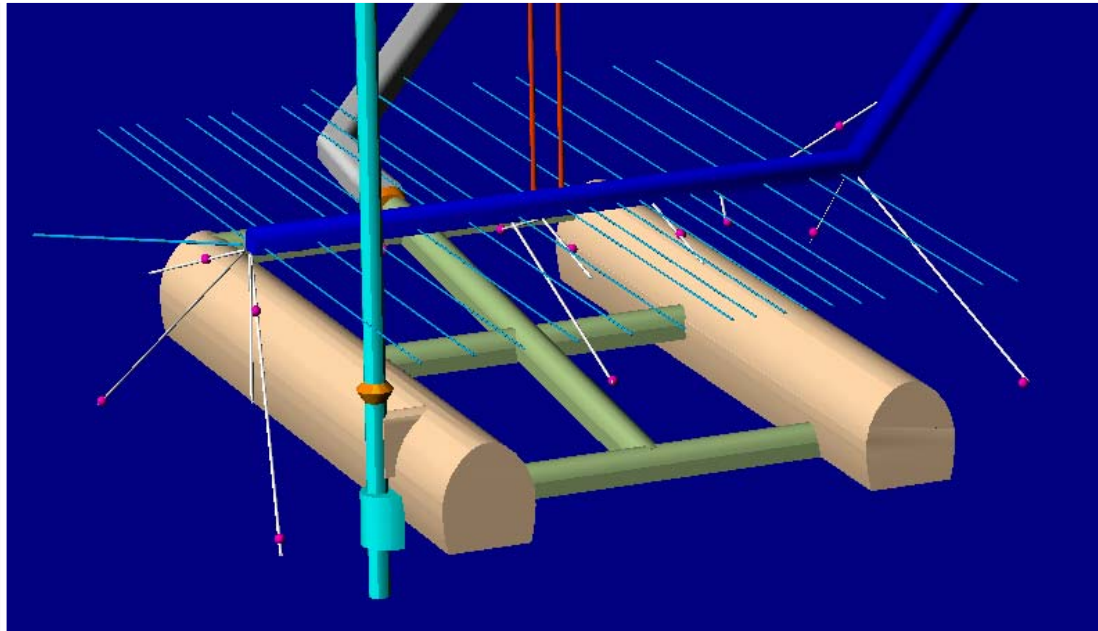
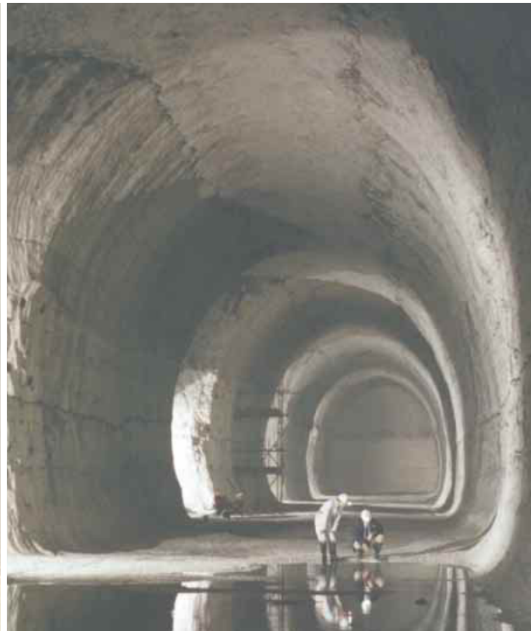
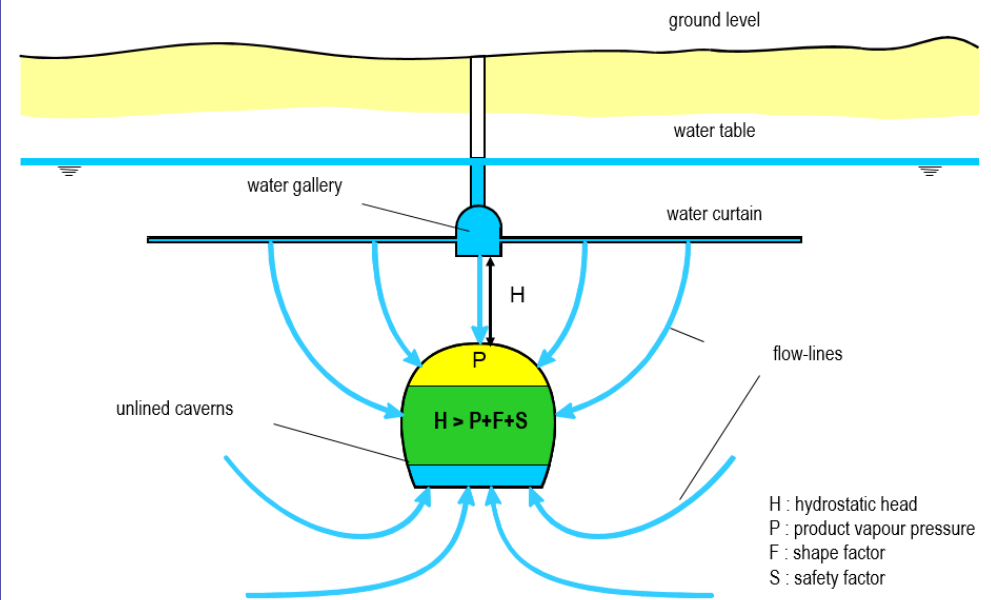
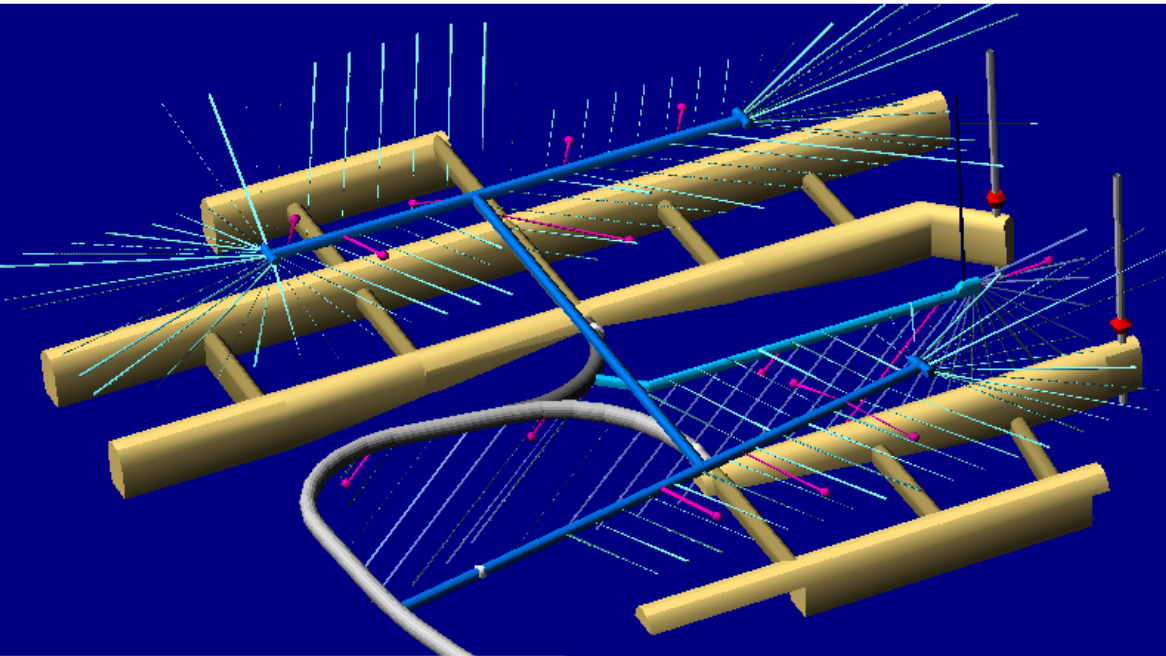


LE STOCKAGE SOUTERRAIN

1. LE STOCKAGE SOUTERRAIN : INTRODUCTION
2. LES TROIS TYPES DE STOCKAGE SOUTERRAIN
- 3. STOCKAGE EN CAVITE MINEE**
4. STOCKAGE EN CAVITE SALINE
5. STOCKAGE EN AQUIFERE & MILIEU POREUX (CHAMP DEPLETE)
6. PRINCIPALES REFERENCES

CAVITE MINEE

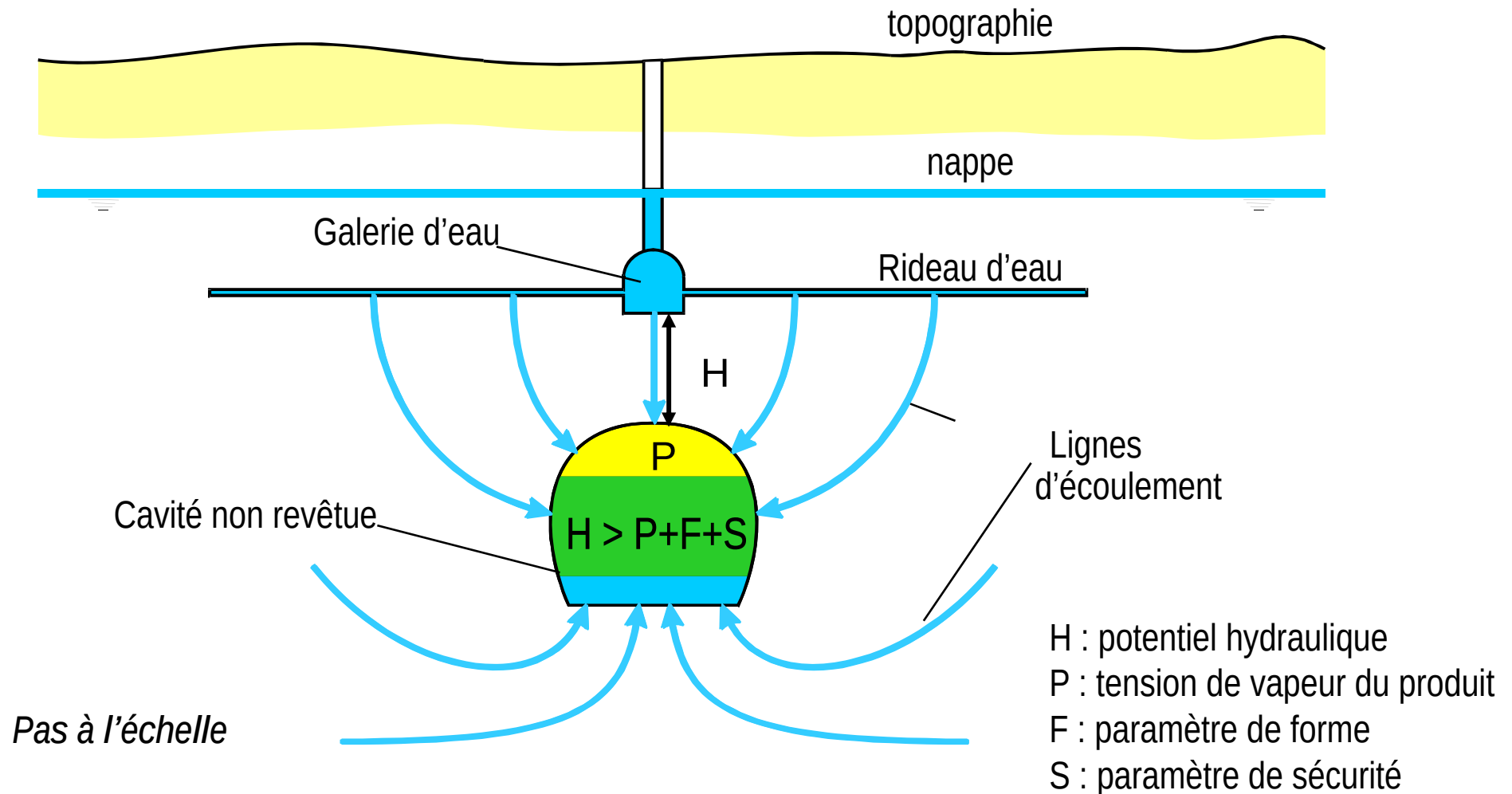
Etanchéité hydrodynamique



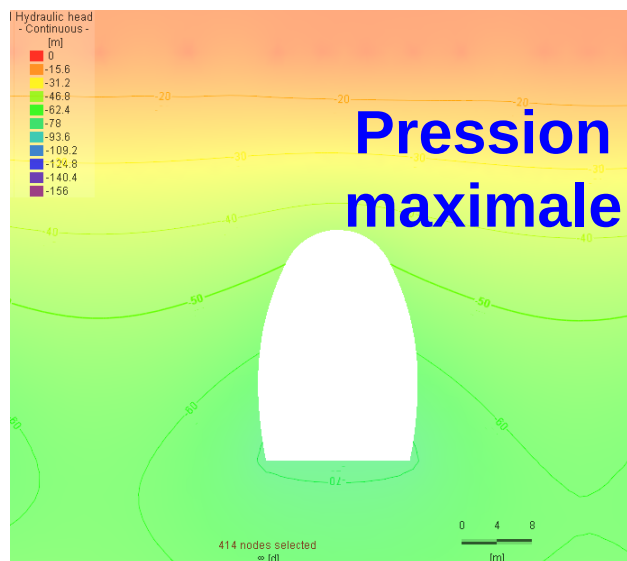
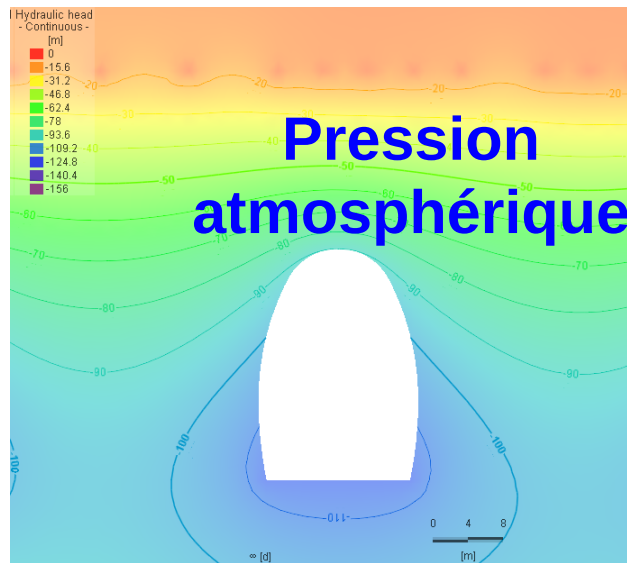
CAVITE MINEE

Etanchéité hydrodynamique

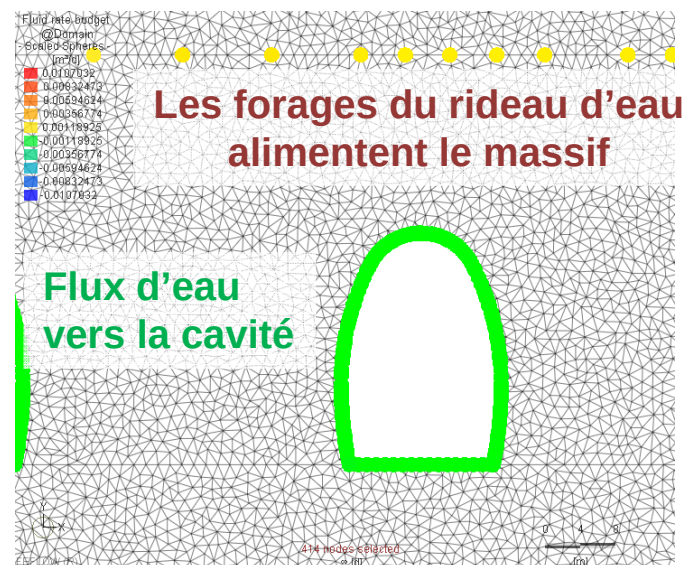
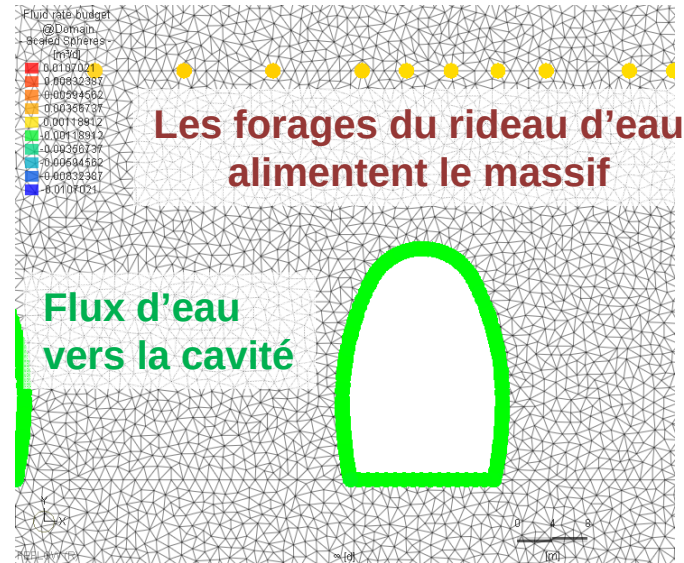
**Pas de revêtement
infiltration permanente d'eau**



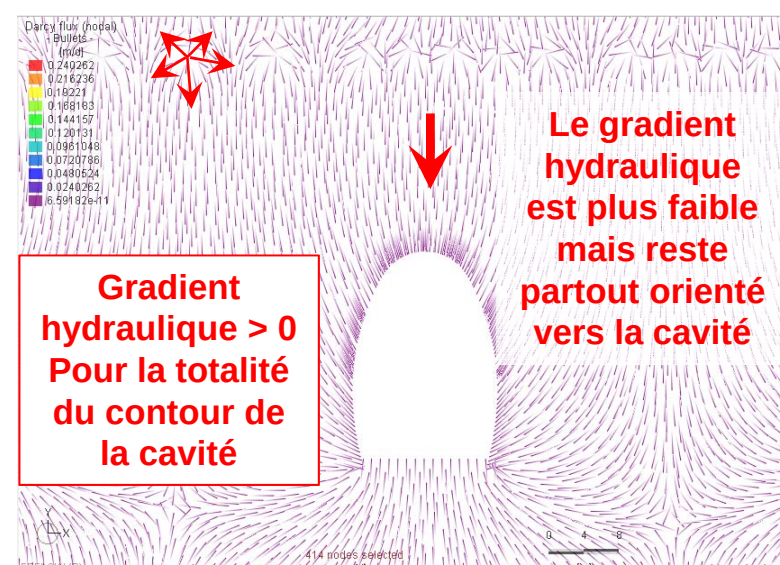
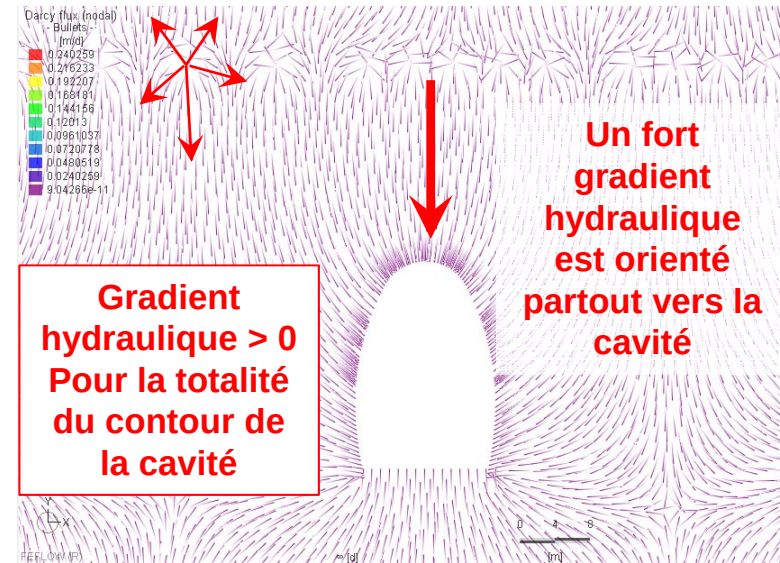
Lignes iso-potentielles



Direction du flux d'eau Pour les conditions limites

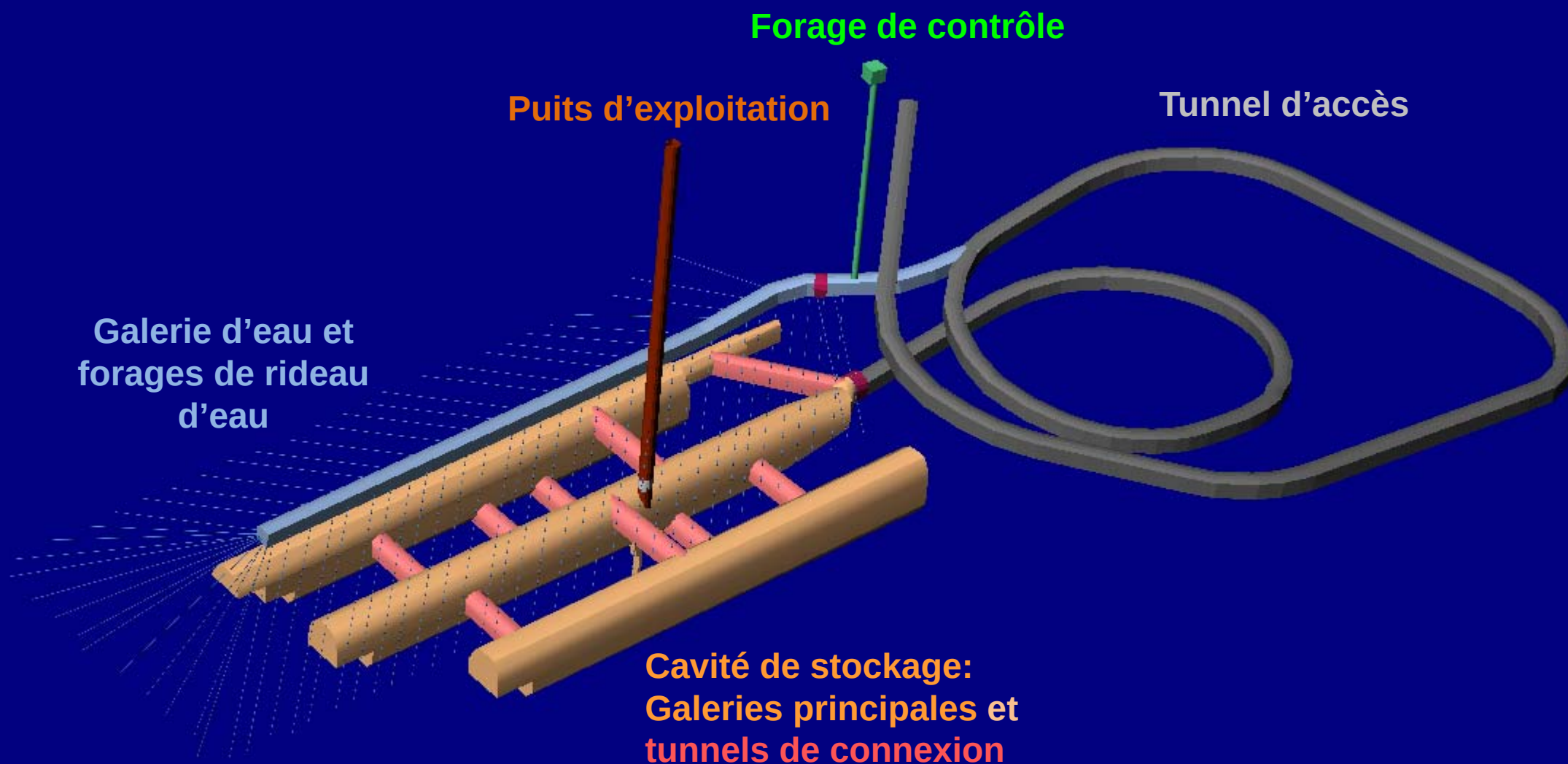


Direction des flux dans le massif



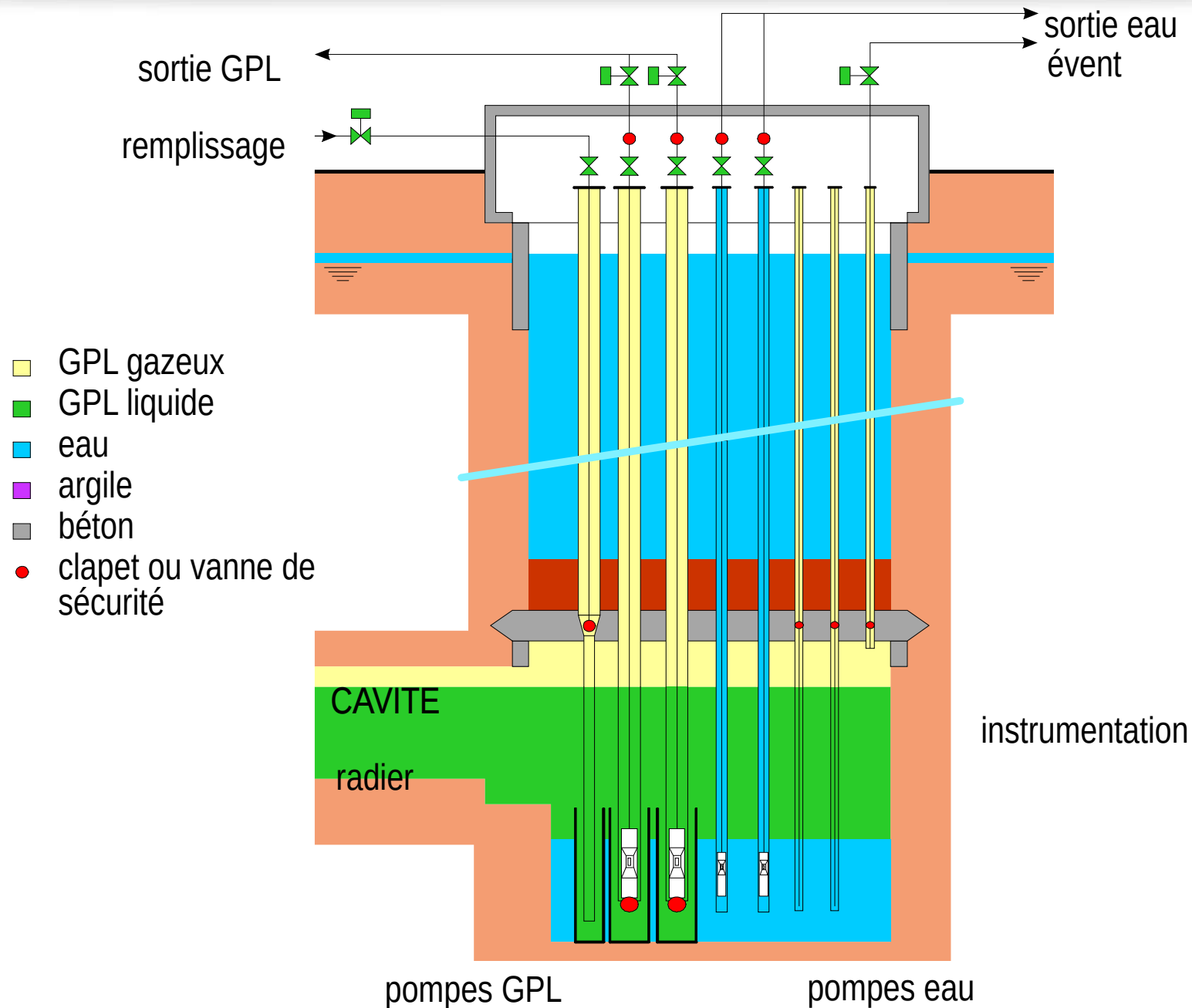
CAVITE MINEE

cavité, rideau d'eau et tunnel d'accès



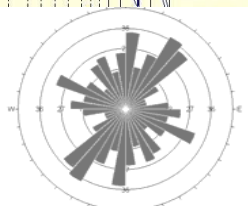
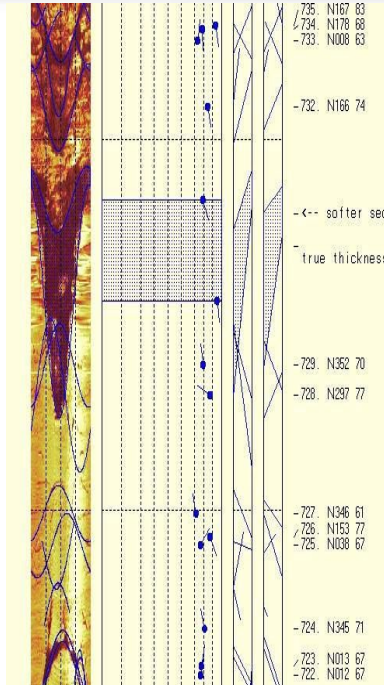
CAVITE MINEE

stockage de GPL – puits d'exploitation



CAVITE MINEE

Métiers de la Cavité Minée



Géologie

EXPLO carottes & in situ

Lithologie, stratification, texture

RQD, Joints, fractures, failles

Joints: orientation, fréquence, type de remplissage

Morphologie / profondeur rocher sain

Contexte structurale

=> Modèle géologique

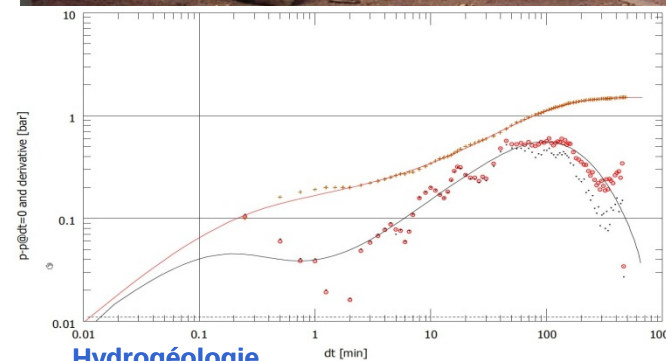
CONSTRUCTION

Cartographie tunnels

Orientations des joints et discontinuités

Relation entre les discontinuités (persistant ou pas)

Connaissance du massif



Hydrogéologie

EXPLO in situ

Distribution de la perméabilité & continuité

Interférence : Isotropie / anisotropie

Stabilité de la nappe

Qualité des eaux / conditions limites

=> Design profondeur cavité, rideau d'eau (distance & orientation), exhaure exploitation

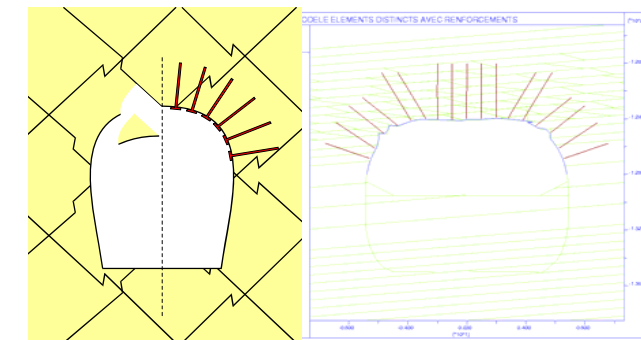
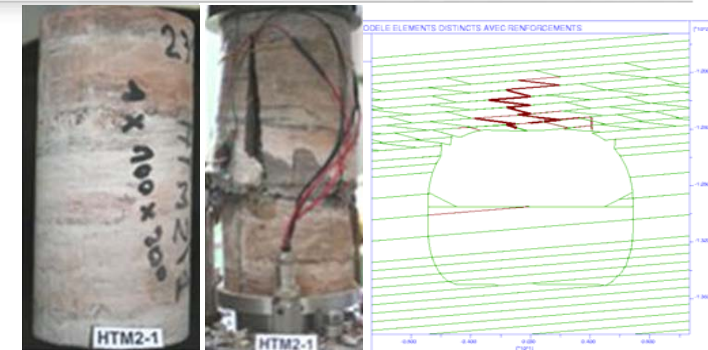
CONSTRUCTION

Débit d'exhaure en tunnels & cavité

Débit d'alimentation du rideau d'eau

Piézométrie / nappe / Interférences

Étanchéité de la cavité



Géotechnique

EXPLO in situ & labo

Q index & RMR sur carottes

Régime de contraintes dans le massif

En labo: caractéristiques mécaniques de la roche, des joints, ...

=> Design forme & section de la cavité, orientation galeries, soutènement

CONSTRUCTION

Déformations & convergence

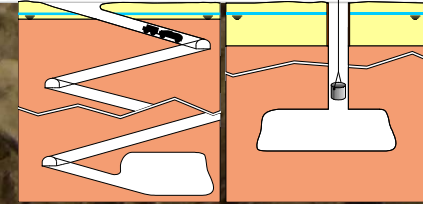
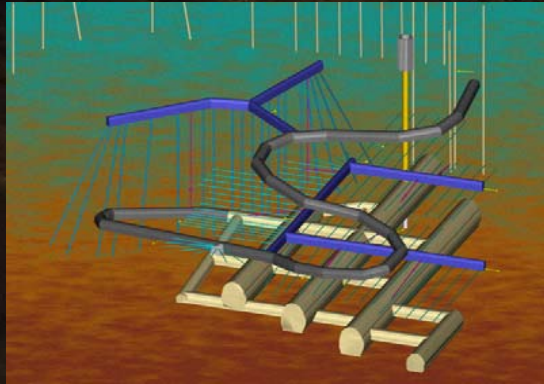
Q index & RMR in situ

Suivi qualité des soutènements mis en place

Stabilité de la cavité

CAVITE MINEE

Métiers de la Cavité Minée



Génie civil

Layout

Phasage des travaux

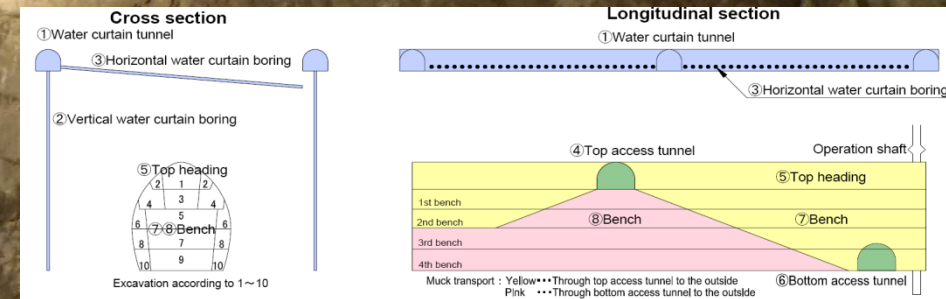
Matériel, équipements et méthodes mis en œuvre

Prévisions travaux d'injection (grouting)

Planning & Coûts

Évaluation technico-économique des offres des entreprises

Suivi qualité travaux réalisés pendant construction



**Planning
Moyens
Coûts**



CAVITE MINEE

Suivi pendant l'exploitation

Paramètres de l'ouvrage

La cavité de stockage

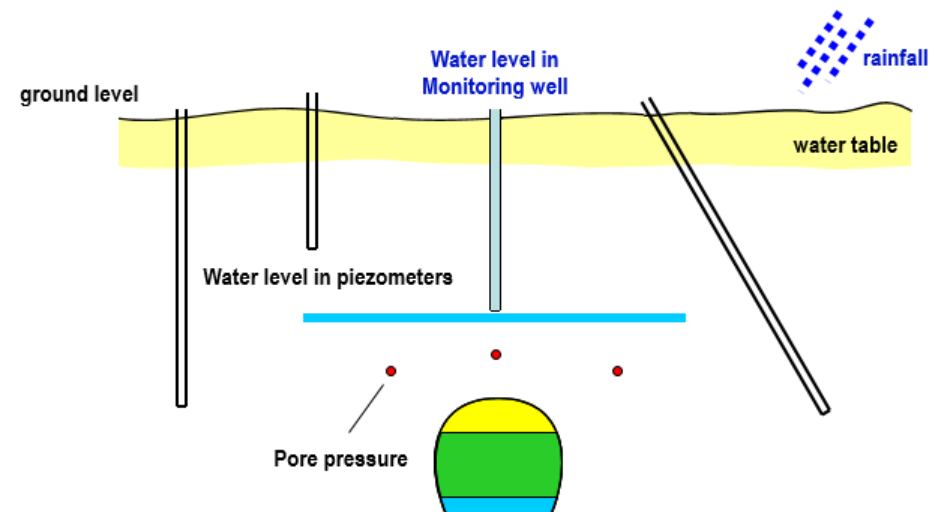
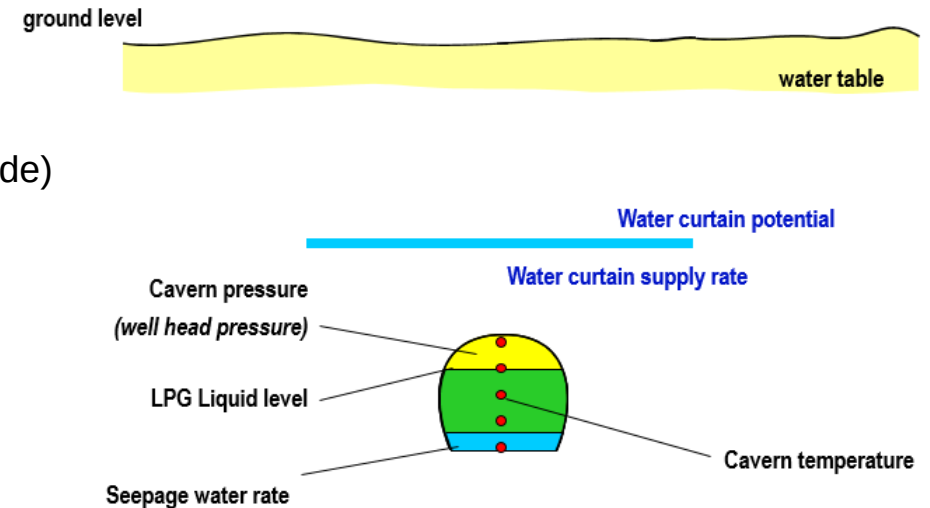
- Pression en cavité
- Niveau d'hydrocarbure liquide (interface vapeur/liquide)
- Température en cavité
- Débit d'exhaure

Rideau d'eau

- Potentiel hydraulique du rideau d'eau
- Débit d'alimentation du rideau d'eau

Paramètres de la formation

- Potentiel hydraulique pour les cellules de pression situées entre la cavité et le rideau d'eau
- Potentiel hydraulique pour les piézomètres situés au-delà du rideau d'eau
- Pluviométrie
- Effets de marée
- autres: pompages à proximité, travaux externes, ...

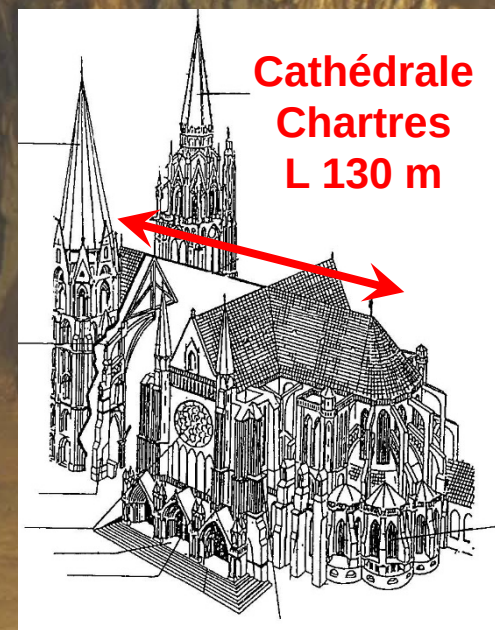
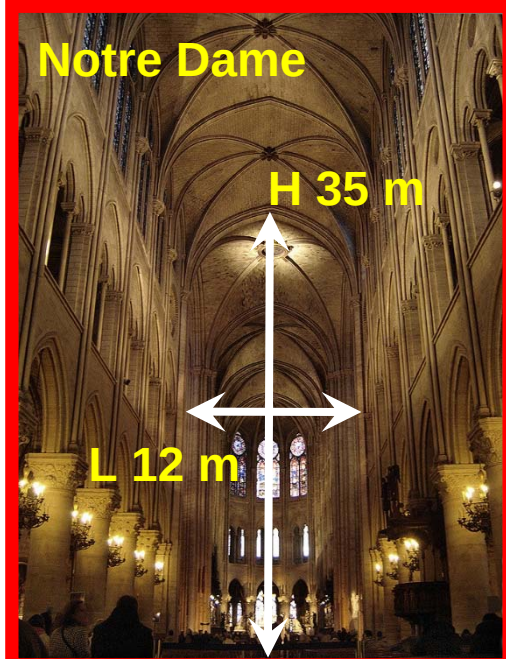


CALCAIRE

Section **200 m²**

Volume total **135 000 m³ butane chimie**
3 galeries de longueurs respectives
280 m, 330 m et 90 m

H 20 m
L 13 m



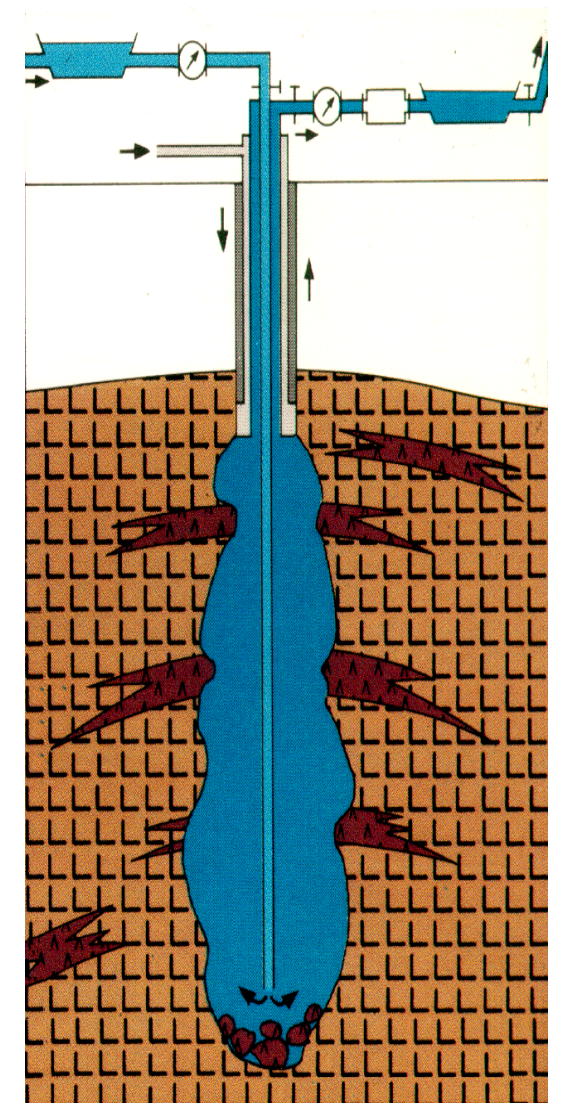
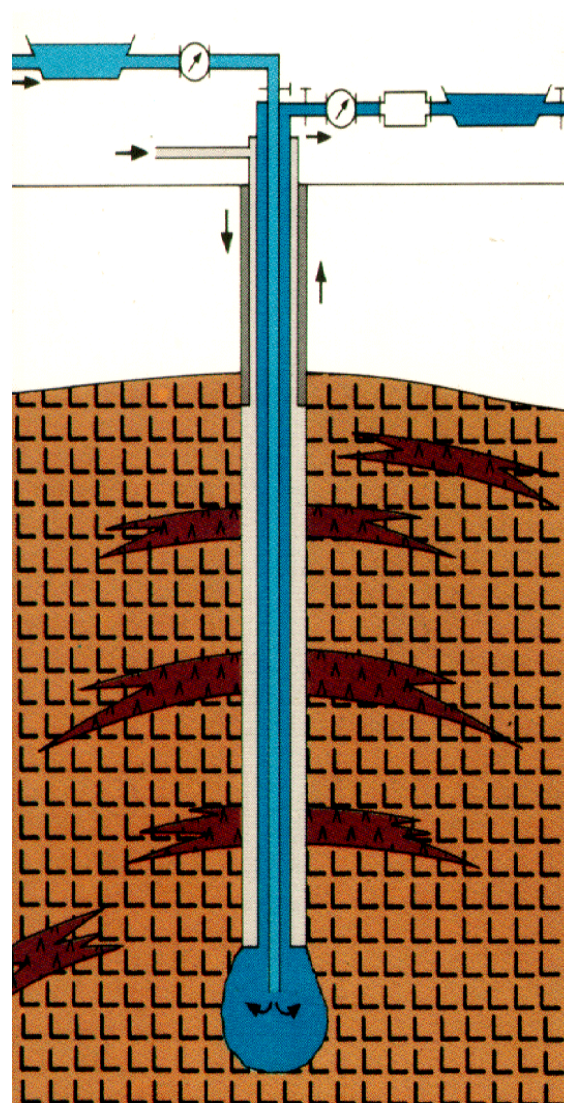
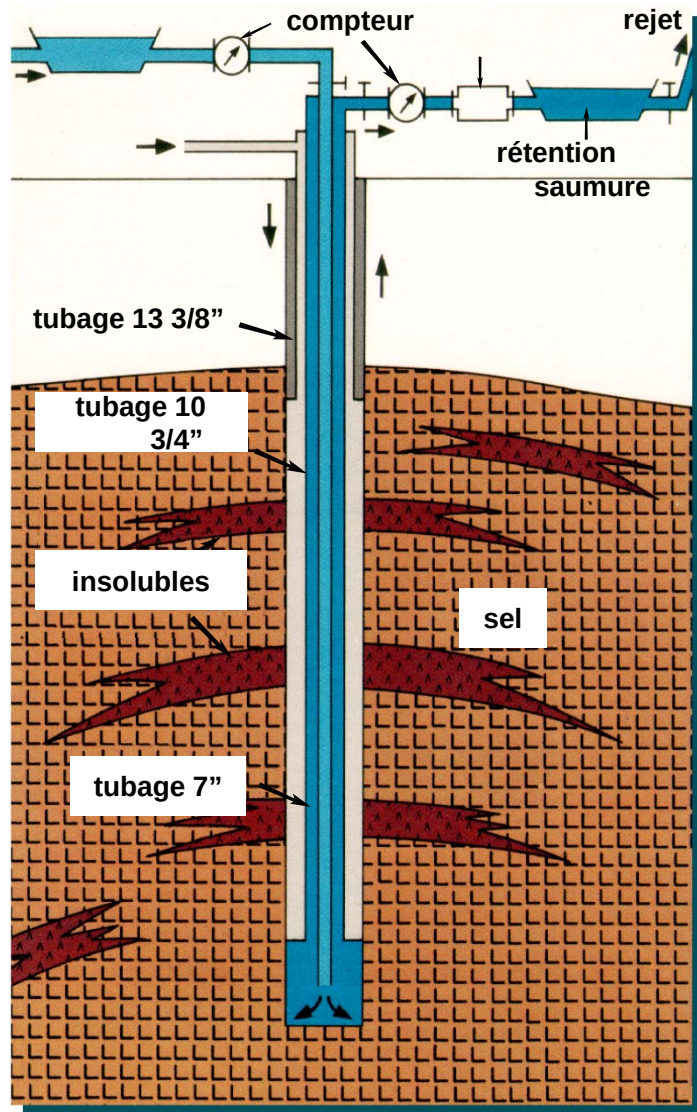
Pas de revêtement !

LE STOCKAGE SOUTERRAIN

1. LE STOCKAGE SOUTERRAIN : INTRODUCTION
2. LES TROIS TYPES DE STOCKAGE SOUTERRAIN
3. STOCKAGE EN CAVITE MINEE
- 4. STOCKAGE EN CAVITE SALINE**
5. STOCKAGE EN AQUIFERE & MILIEU POREUX (CHAMP DEPLETE)
6. PRINCIPALES REFERENCES

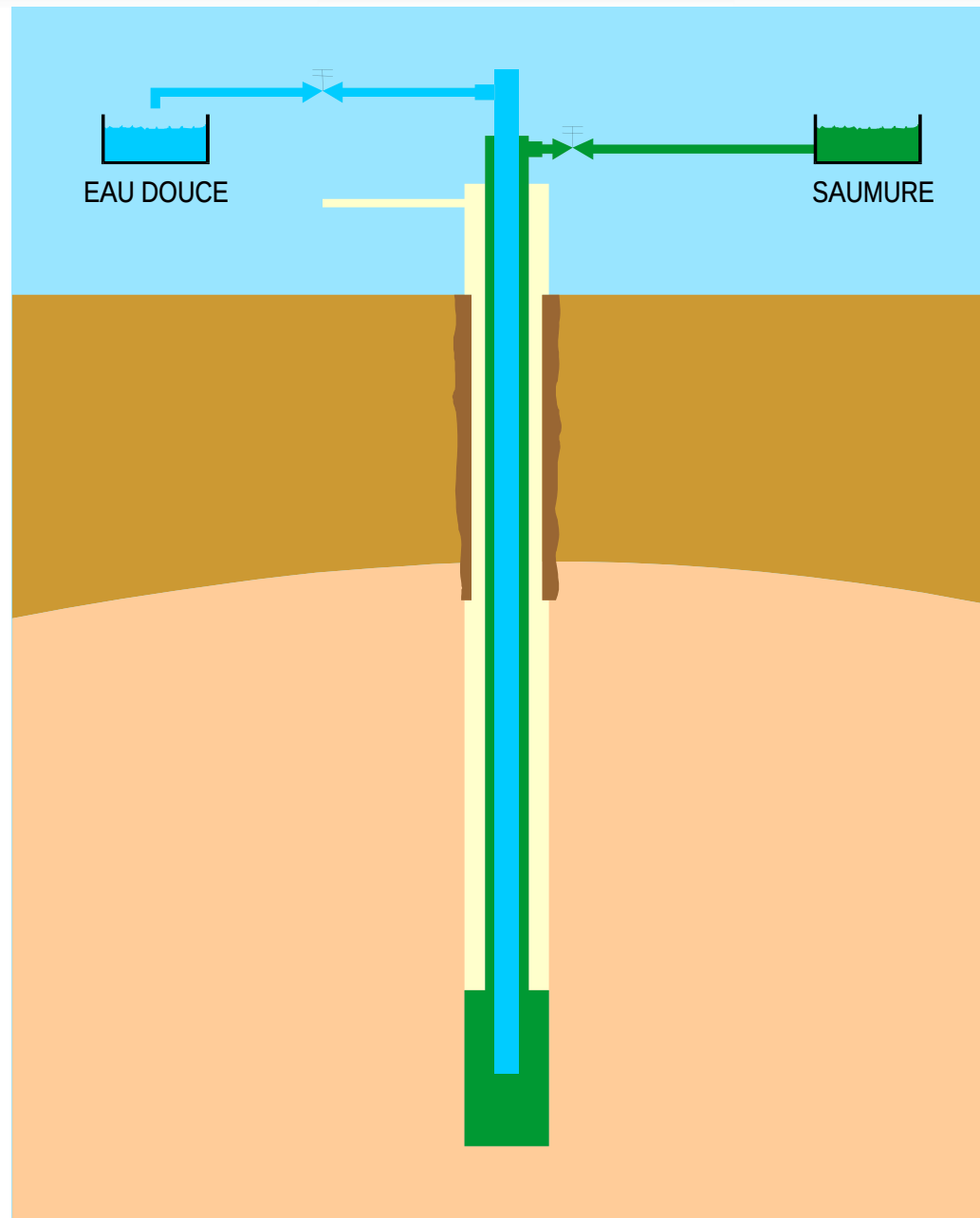
CAVITE SALINE

Création par lessivage



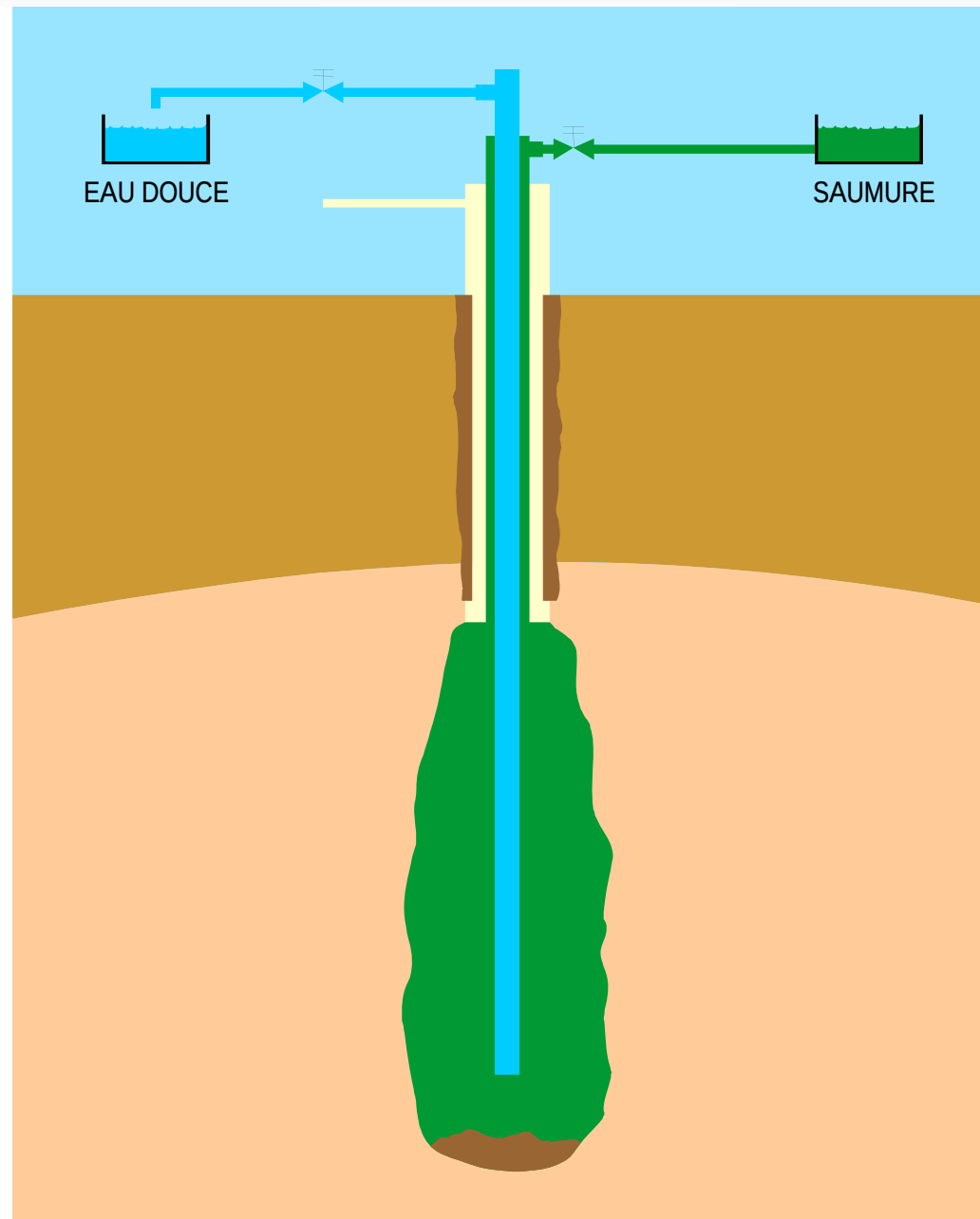
CAVITE SALINE

Lessivage d'une cavité



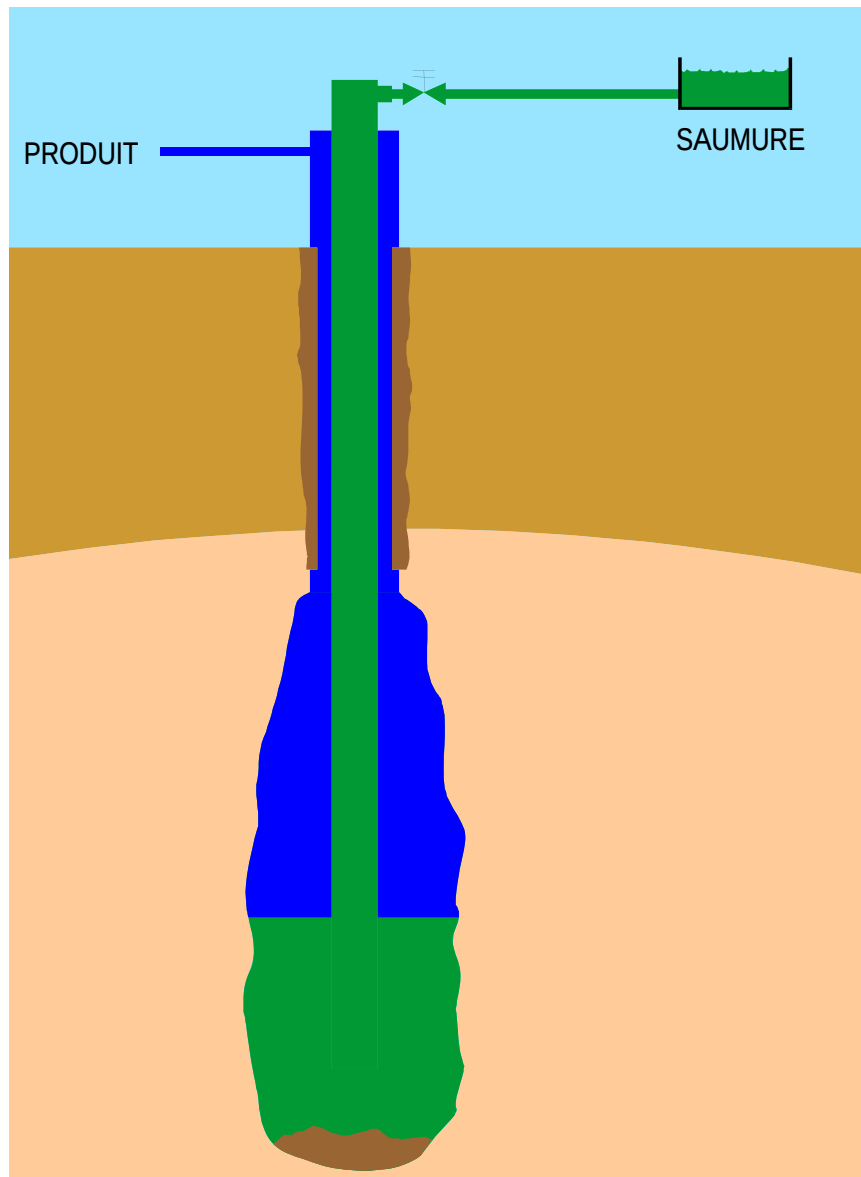
CAVITE SALINE

Lessivage d'une cavité

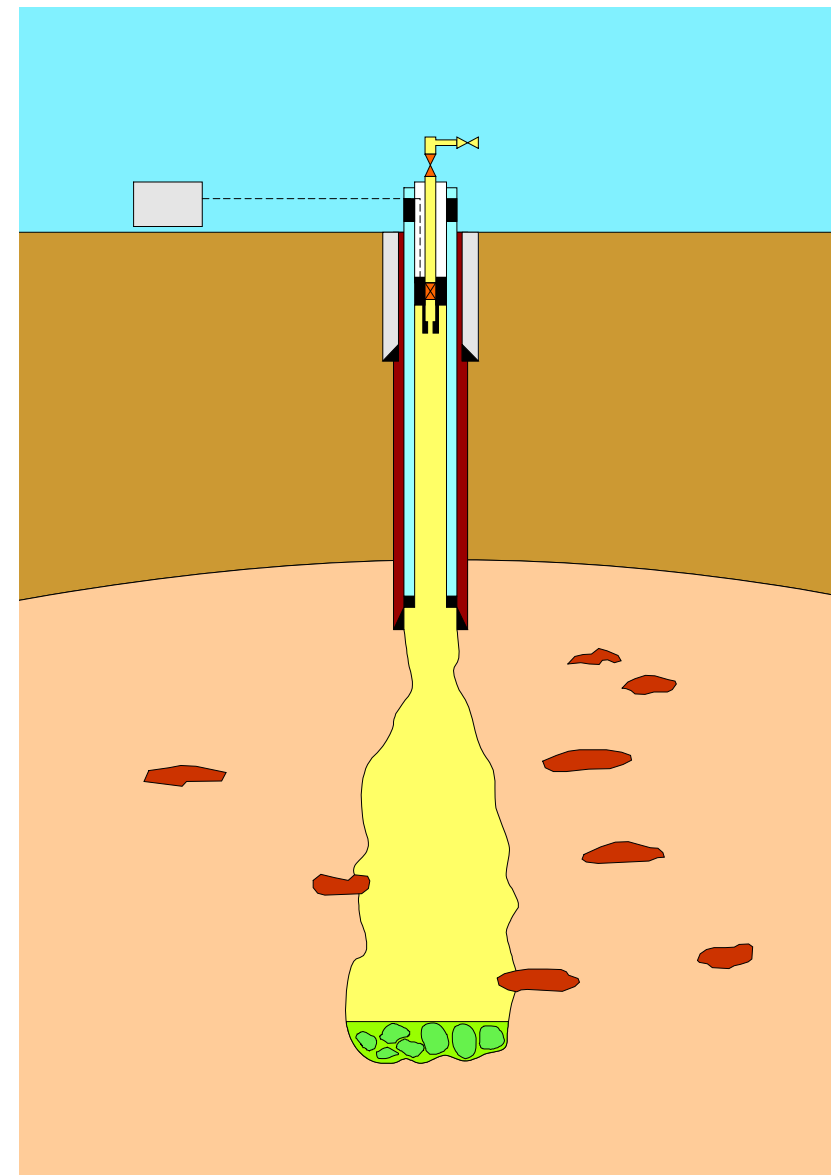


CAVITE SALINE exploitation

Hydrocarbures liquides

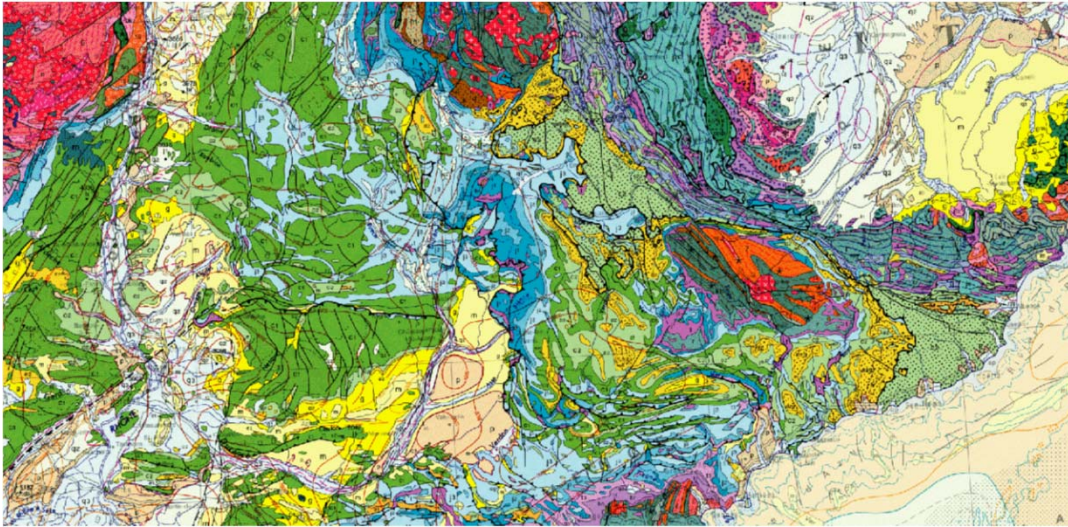


Hydrocarbures gazeux

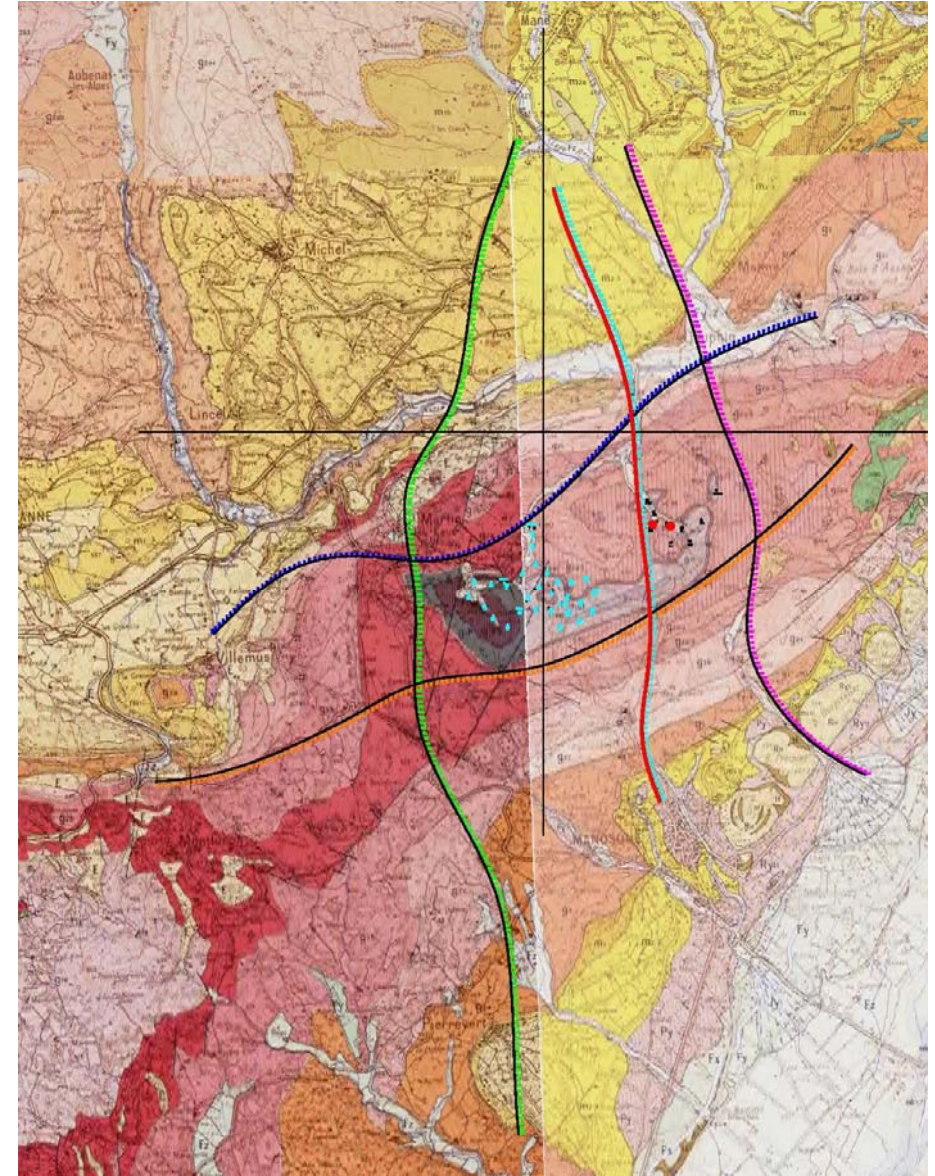


CAVITE SALINE

exploration : cartographie

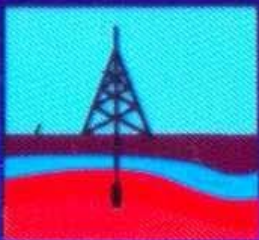
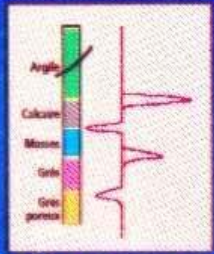
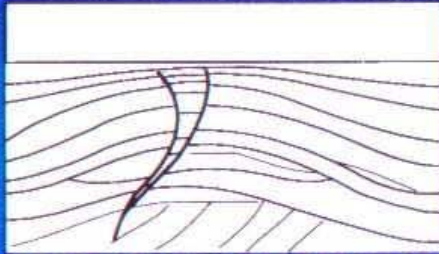
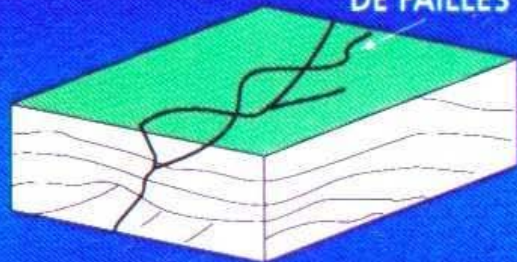
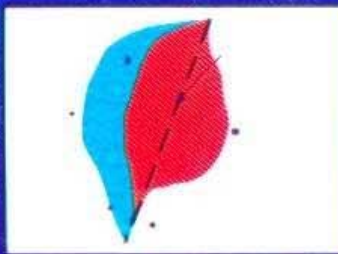


Le bassin sédimentaire de Manosque-Forcalquier, d'âge Oligocène est situé entre la nappe du Lubéron et la nappe provençale issues de la fermeture de la Thétys ligure au crétacé supérieur. L'anticlinal est orienté SO-NE



Carte géologique et lignes sismiques

Principales méthodes d'investigation

METHODE	PUITS  Forage	SISMIQUE 2D  "échographie 2D"	SISMIQUE 3D  "échographie 3D"
RESULTAT	 IMAGE 1D	 COUPE DES TERRAINS	RESEAU DE FAILLES  VOLUME DES TERRAINS
CARTOGRAPHIE	 • Ponctuel • Mesures précises verticalement → échantillon de roche	 • Discontinu : coupes • Grande extension • Faible précision verticale	 • Continu x, y, z (volume) • Grande extension • Faible précision verticale



**Données de puits :
caractéristiques pétrophysiques
58 puits sont récéncés sur le site
de Manosque**

Géologie de chantier :

- Analyse pétrographique des échantillons
- Prélèvement de carottes
- Analyse chimique par dissolution
- Rayons X
- Lames minces

Ces analyses permettent de déterminer les différents minéraux présents ainsi que leurs pourcentages qui seront confirmés par l'analyse des diagraphies.

CAVITE SALINE

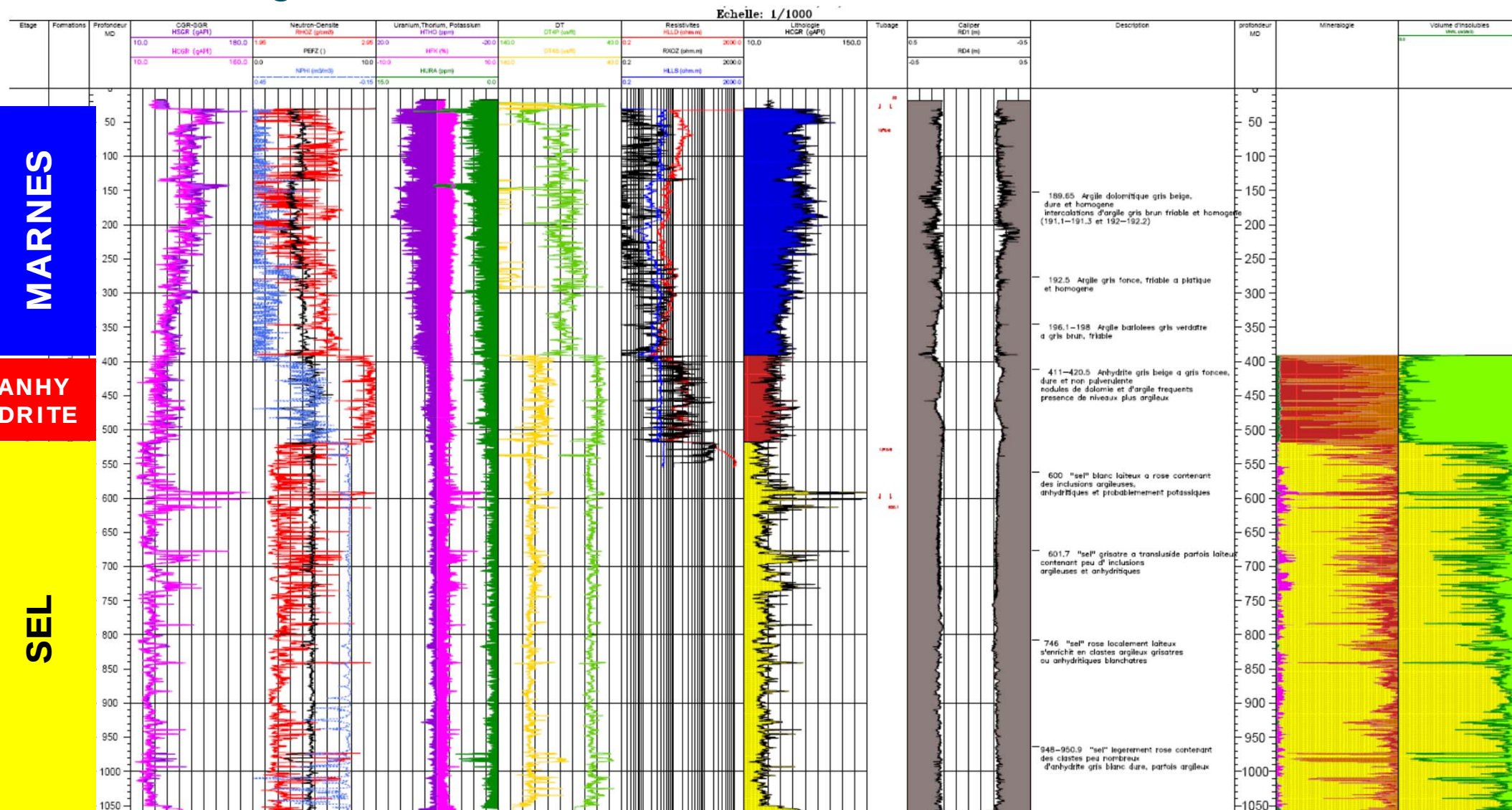
exploration : forage et échantillonnage

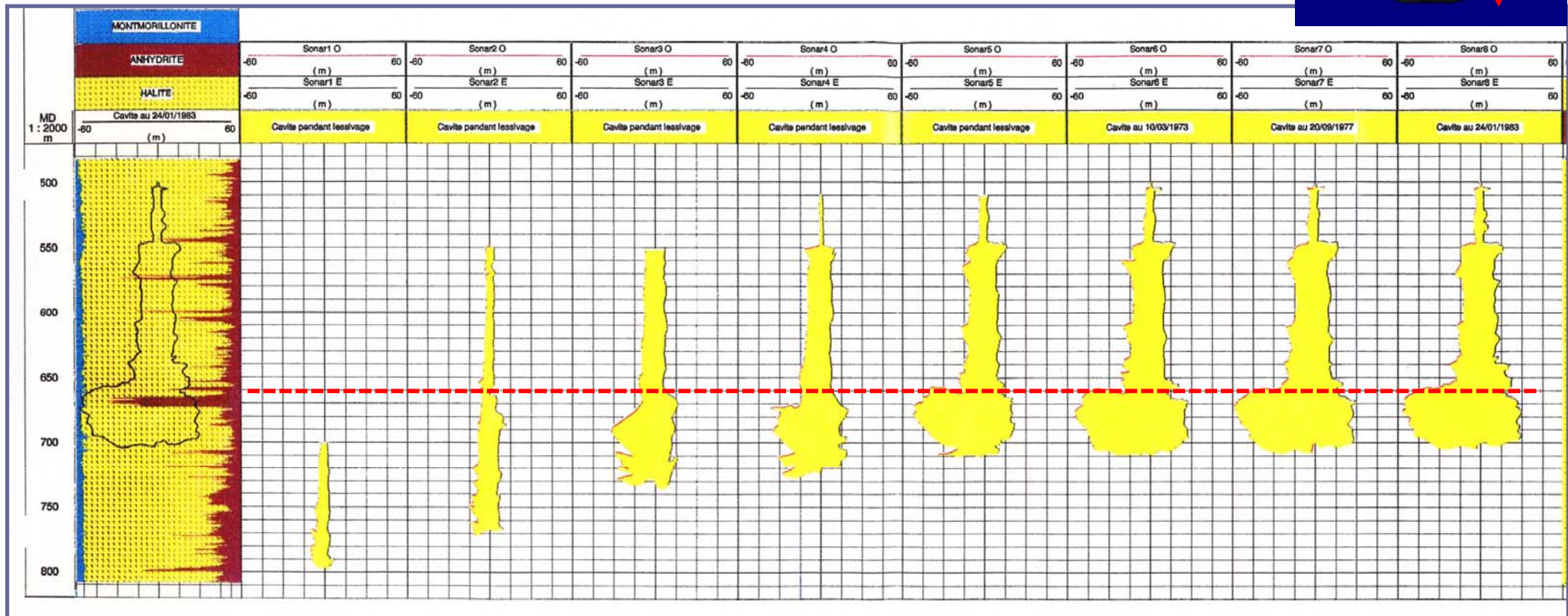
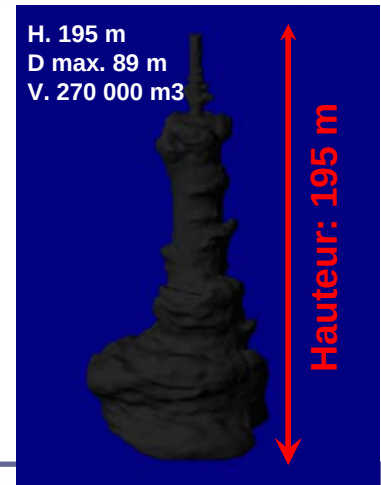


Le carottage

Analyse des échantillons
Essais labo





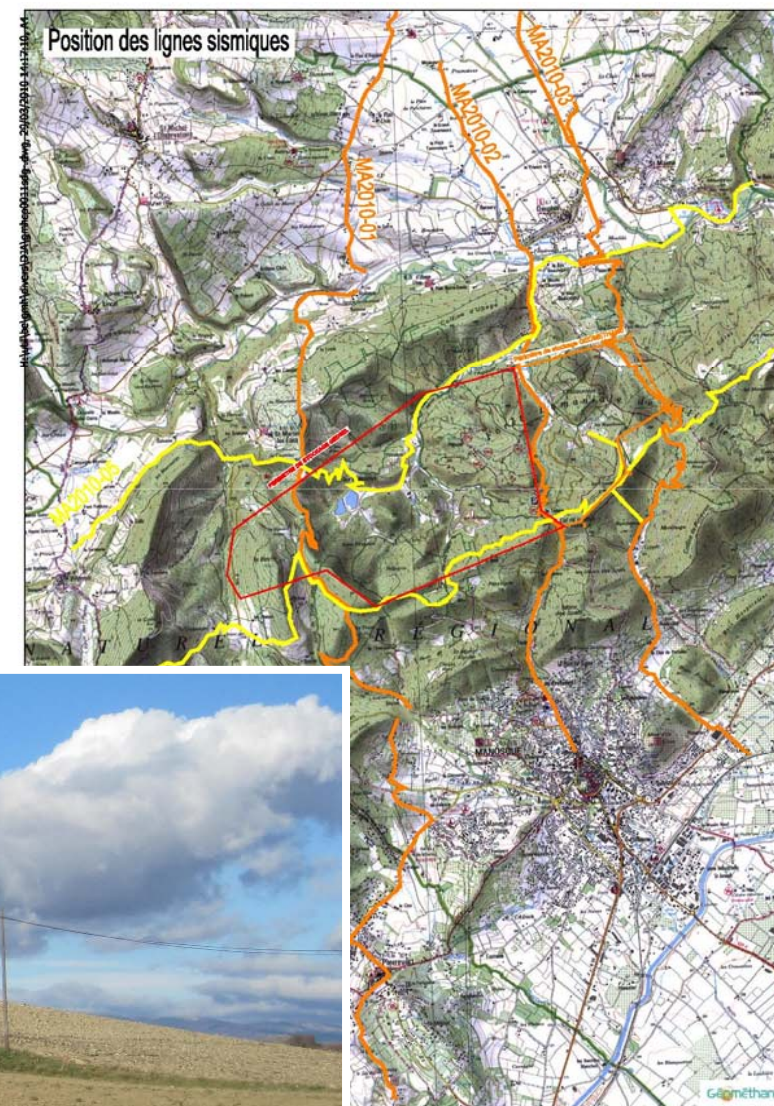
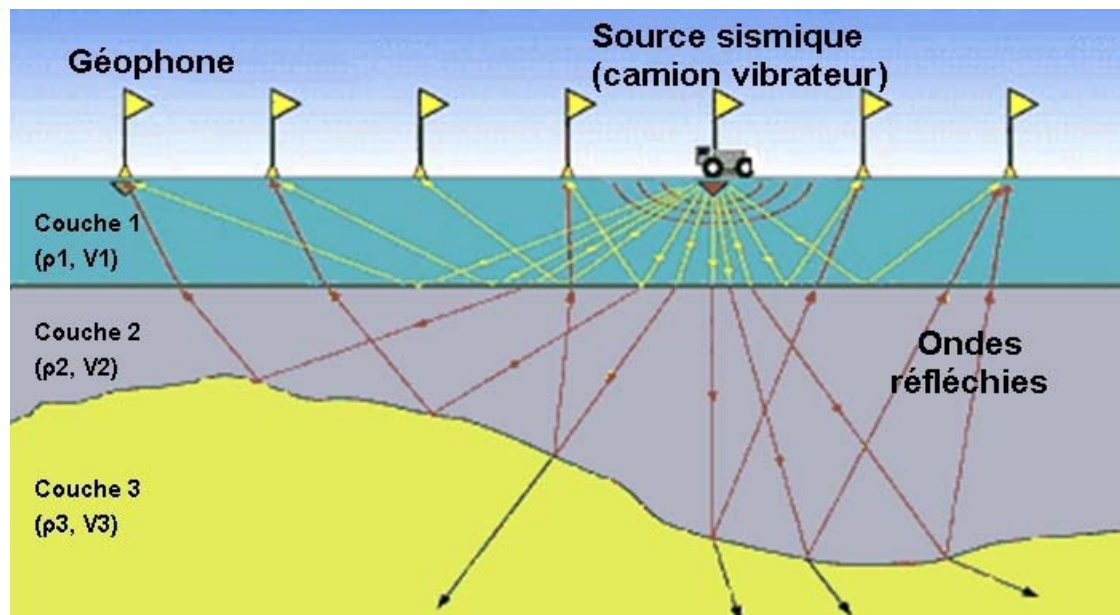


CAVITE SALINE

exploration : campagne sismique

Sismique de réflexion

Campagne 2010: 6 profils - longueur total environ 65 km



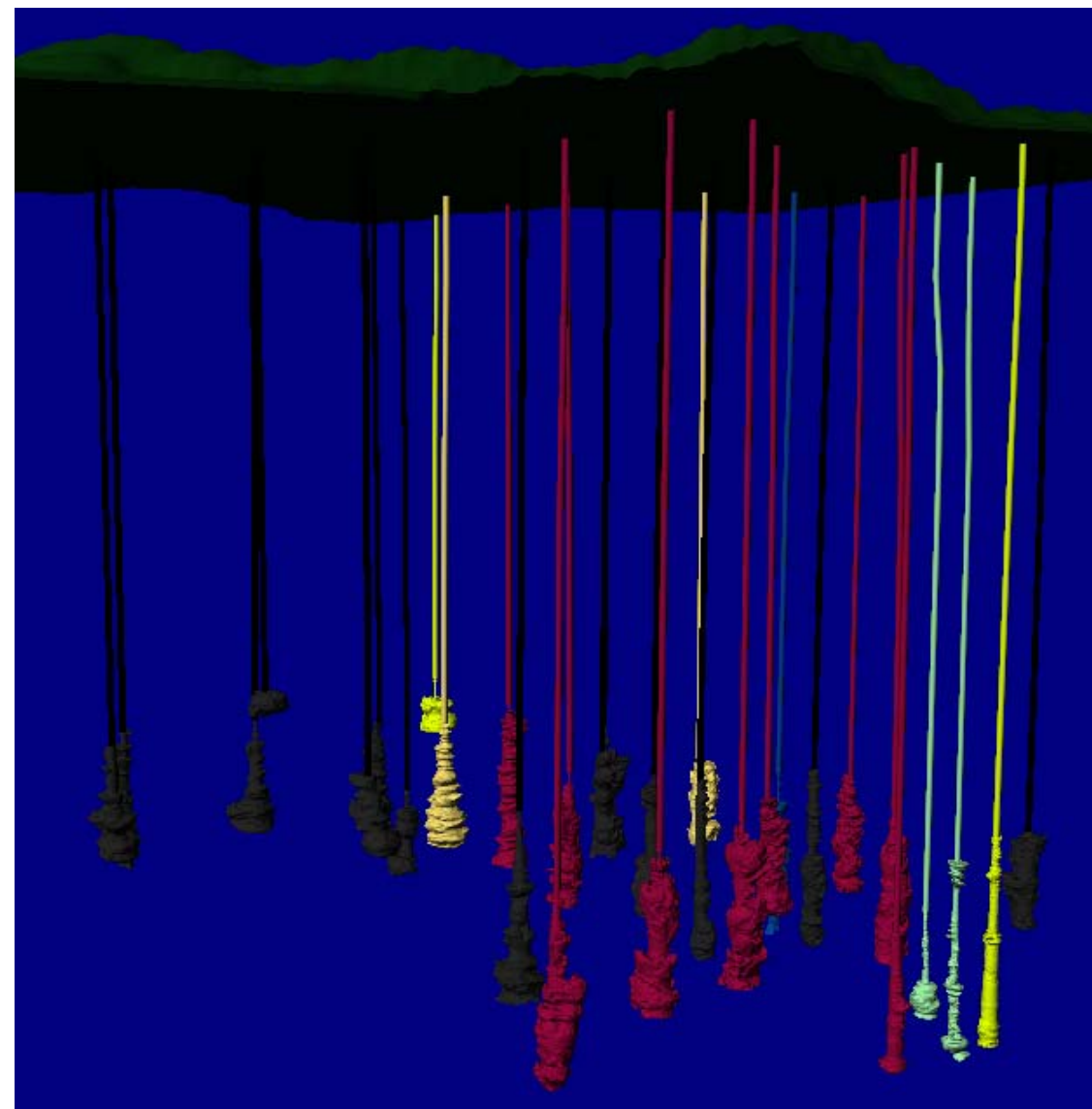
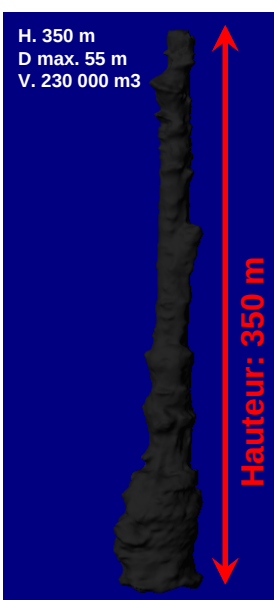
CAVITE SALINE

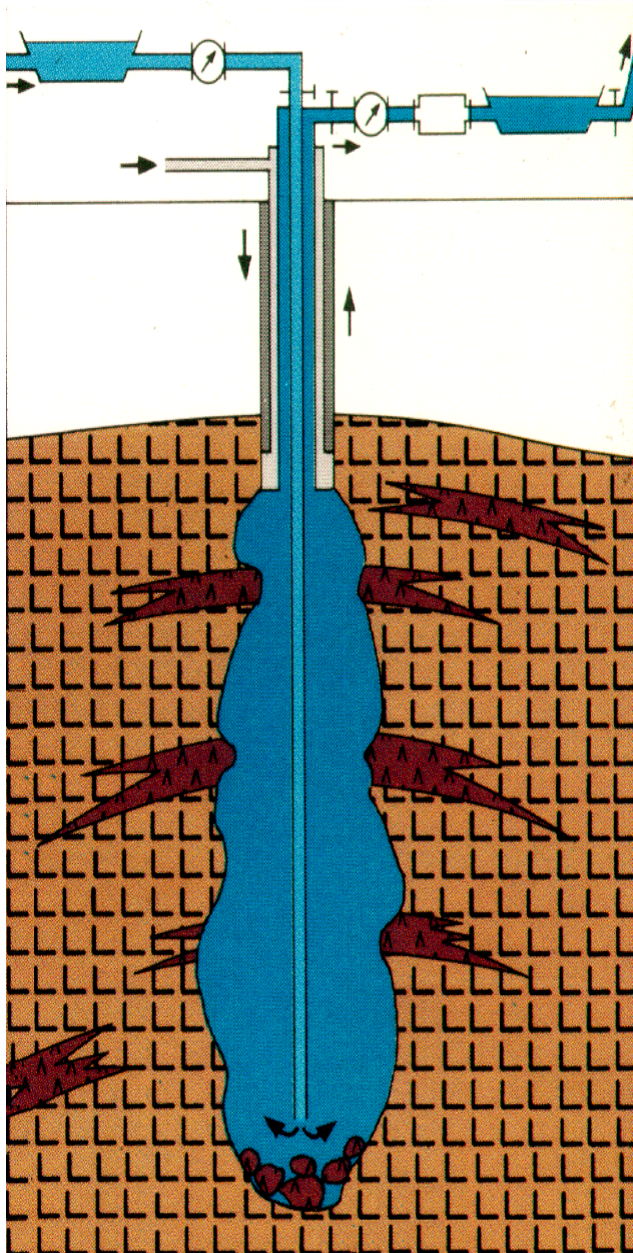
les cavités



CAVITE SALINE

les cavités: géométrie et volumétrie par SONAR





Cavité saline

Étanchéité intrinsèque

Lessivée (eau douce -> saumures)

HC liquides (pétrole brut, naphta, GPL) & gaz

Profondeur variable (300 à 2000 m/sol)

Développement vertical

Hauteur 100 à 300 m, diamètre 30 à 70 m

Volume 150 000 à 650 000 m³

Seul accès: le forage (lessivage & exploitation)

Reconnaissance: forages & méthodes indirectes (image 3D par sonars en phase lessivage)

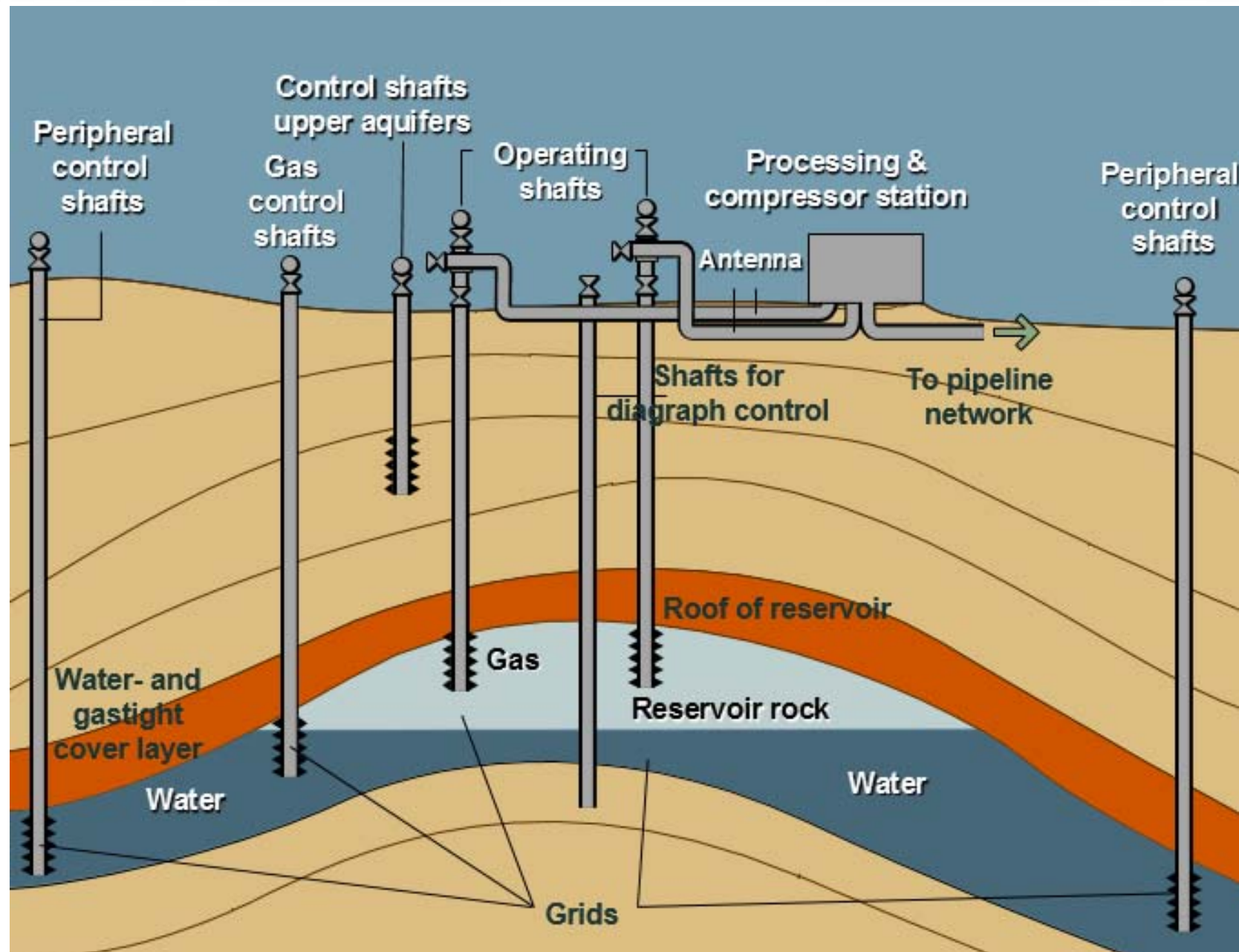
Exploitation: pas d'équipement fond, suivi fluage, pièges, gestion saumures

LE STOCKAGE SOUTERRAIN

1. LE STOCKAGE SOUTERRAIN : INTRODUCTION
2. LES TROIS TYPES DE STOCKAGE SOUTERRAIN
3. STOCKAGE EN CAVITE MINEE
4. STOCKAGE EN CAVITE SALINE
- 5. STOCKAGE EN AQUIFERE & MILIEU POREUX (CHAMP DEplete)**
6. PRINCIPALES REFERENCES

STOCKAGE EN AQUIFERE & MILIEU POREUX

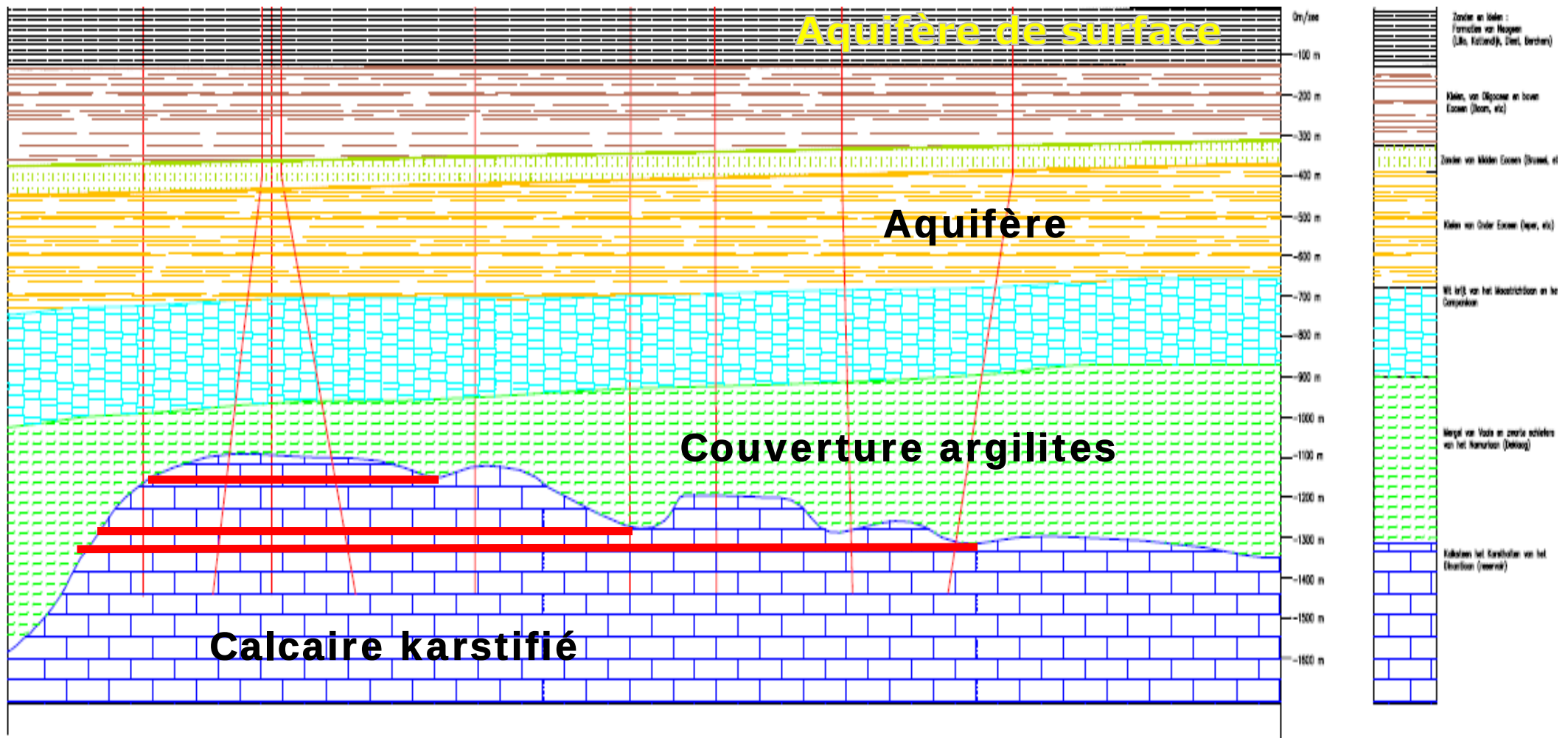
Suivi d'exploitation : contrôle



STOCKAGE EN AQUIFERE & MILIEU POREUX

Formation aquifère et couverture

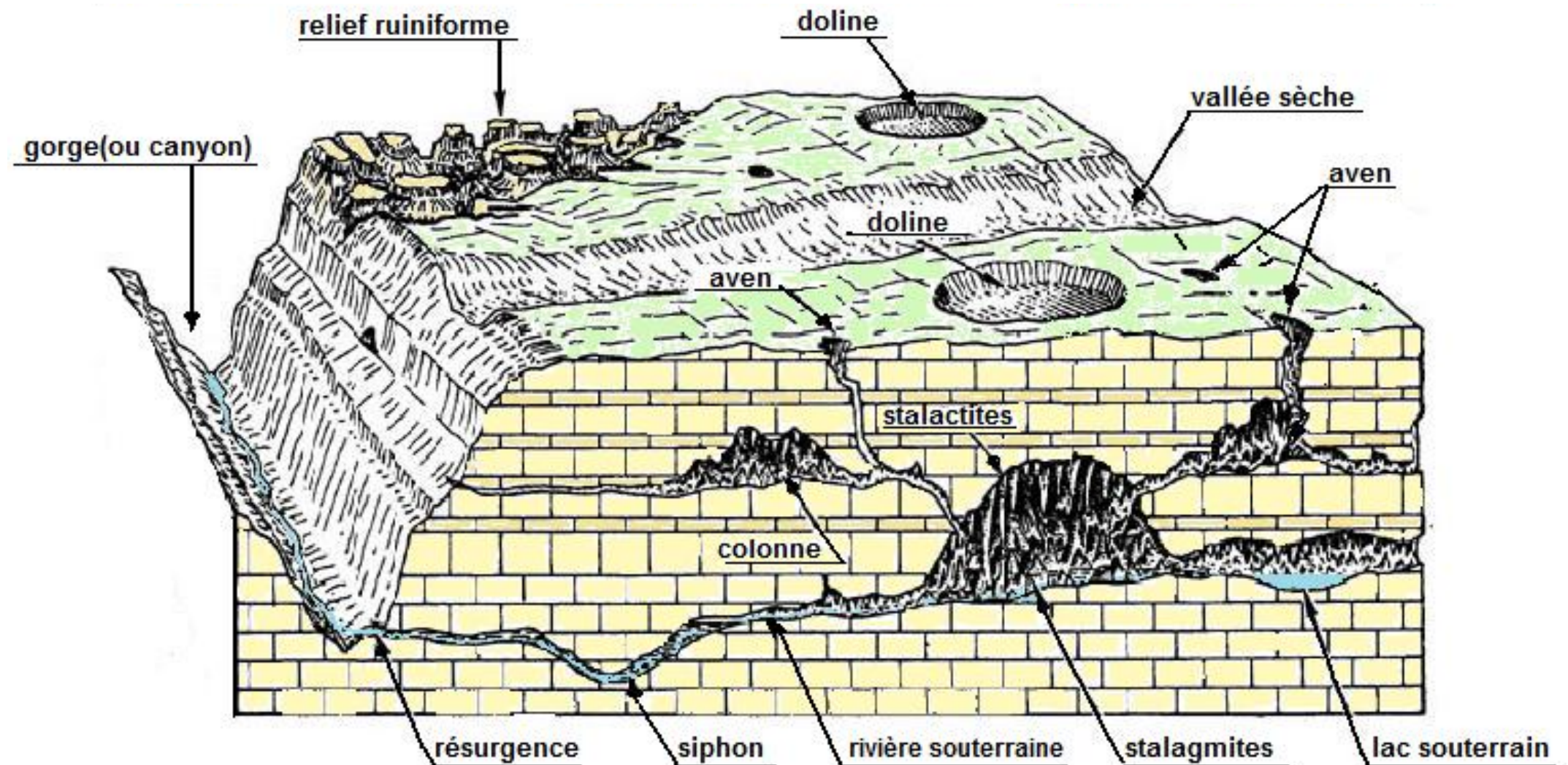
Cote de fermeture - Volume – Capacité réservoir



STOCKAGE EN AQUIFERE & MILIEU POREUX

Formation aquifère

Porosité - Perméabilité

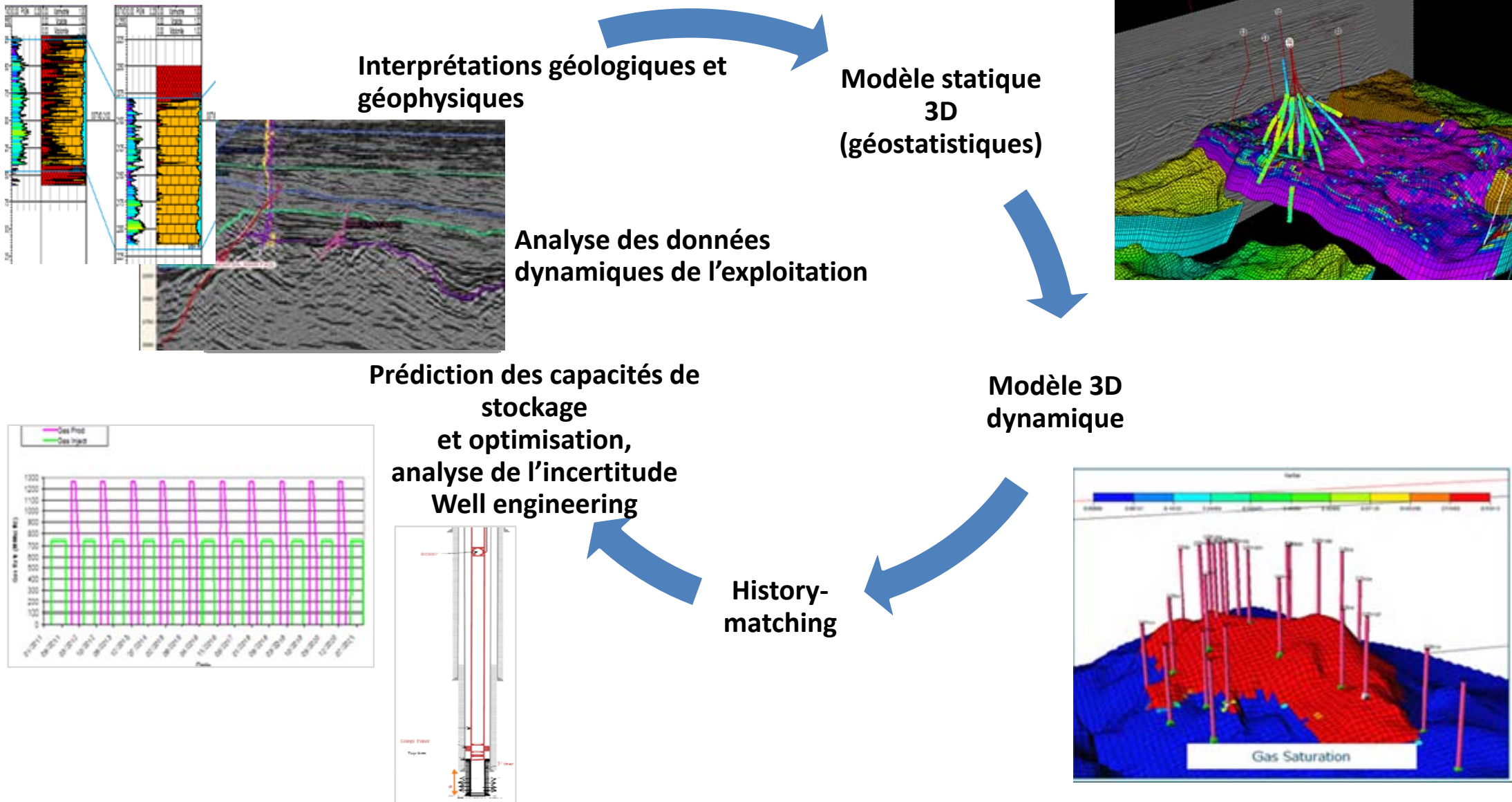


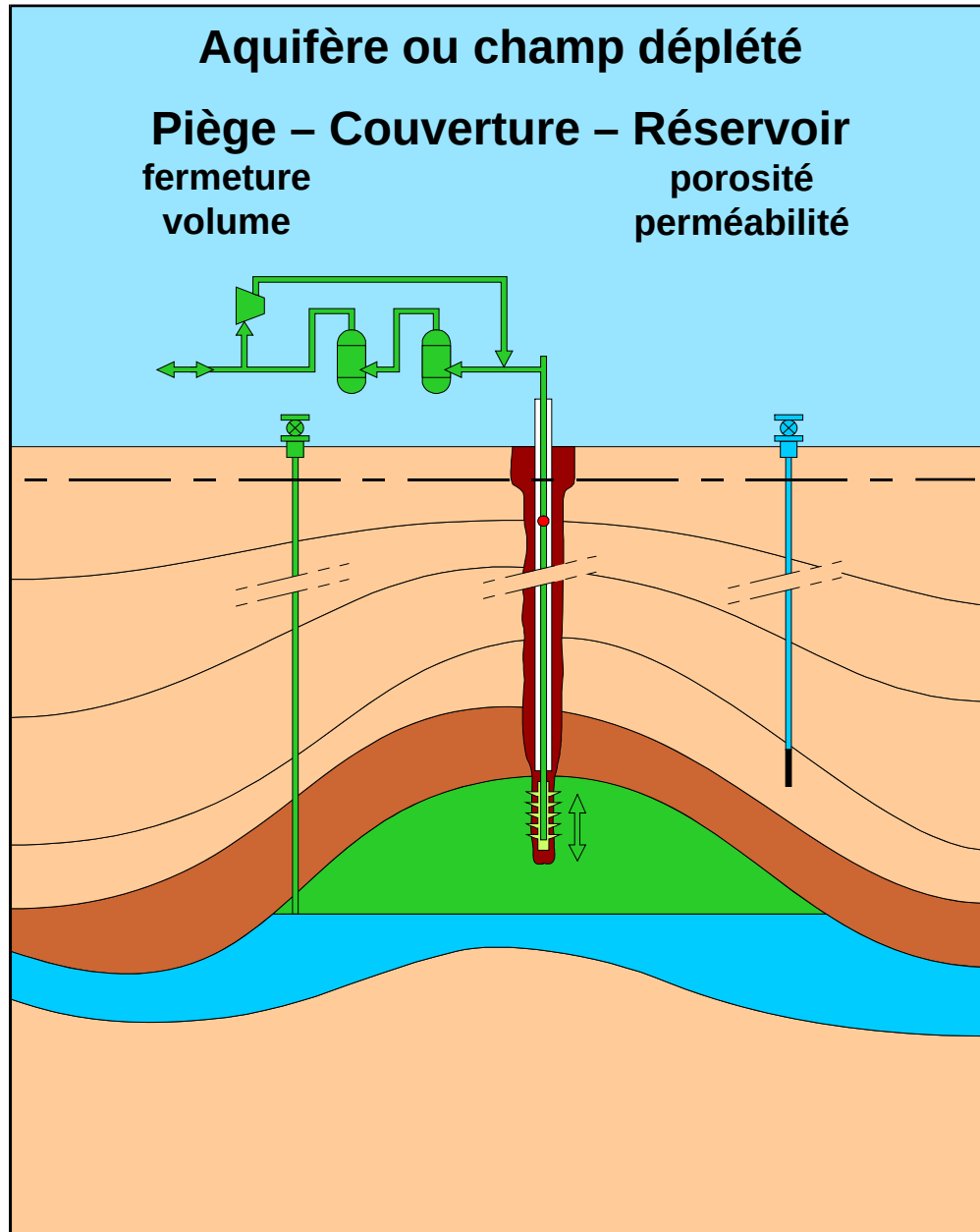


STOCKAGE EN AQUIFERE & MILIEU POREUX

Capacité de stockage – prédictions de fonctionnement

Modélisation 3D du réservoir base sur les interprétations géologiques, géophysiques et caractéristiques réservoir





Stockage en aquifère & milieu poreux

Étanchéité intrinsèque couverture / bas eau

Vides naturels (réseau poreux / karst)

Gaz Nat. (forte pression: 30 bar à 200 bar)

Profondeur : 500 à 3000 m/sol

Structures fermées en antiforme / cloche

Réseau naturel d'extension kilométrique (similaire aux réservoirs de HC naturels)

Volume utile 0.5 à 4 Milliard Nm³ + gaz coussin

Plusieurs forages (exploration, exploitation & suivi)

Reconnaissance: forages & méthodes indirectes, géophysique, logs, tests

Exploitation: pas d'équipement fond, suivi interfaces, contrôle périphérique

LE STOCKAGE SOUTERRAIN

1. LE STOCKAGE SOUTERRAIN : INTRODUCTION
2. LES TROIS TYPES DE STOCKAGE SOUTERRAIN
3. STOCKAGE EN CAVITE MINEE
4. STOCKAGE EN CAVITE SALINE
5. STOCKAGE EN AQUIFERE & MILIEU POREUX (CHAMP DEplete)
6. PRINCIPALES REFERENCES

STOCKAGE SOUTERRAIN

GEOSTOCK : Principales références

National oil companies



SINOPEC



Stockpiling agencies



Energy & infrastructure companies



Major oil & gas companies



Petrochemicals



Engineering & Contracting Companies

