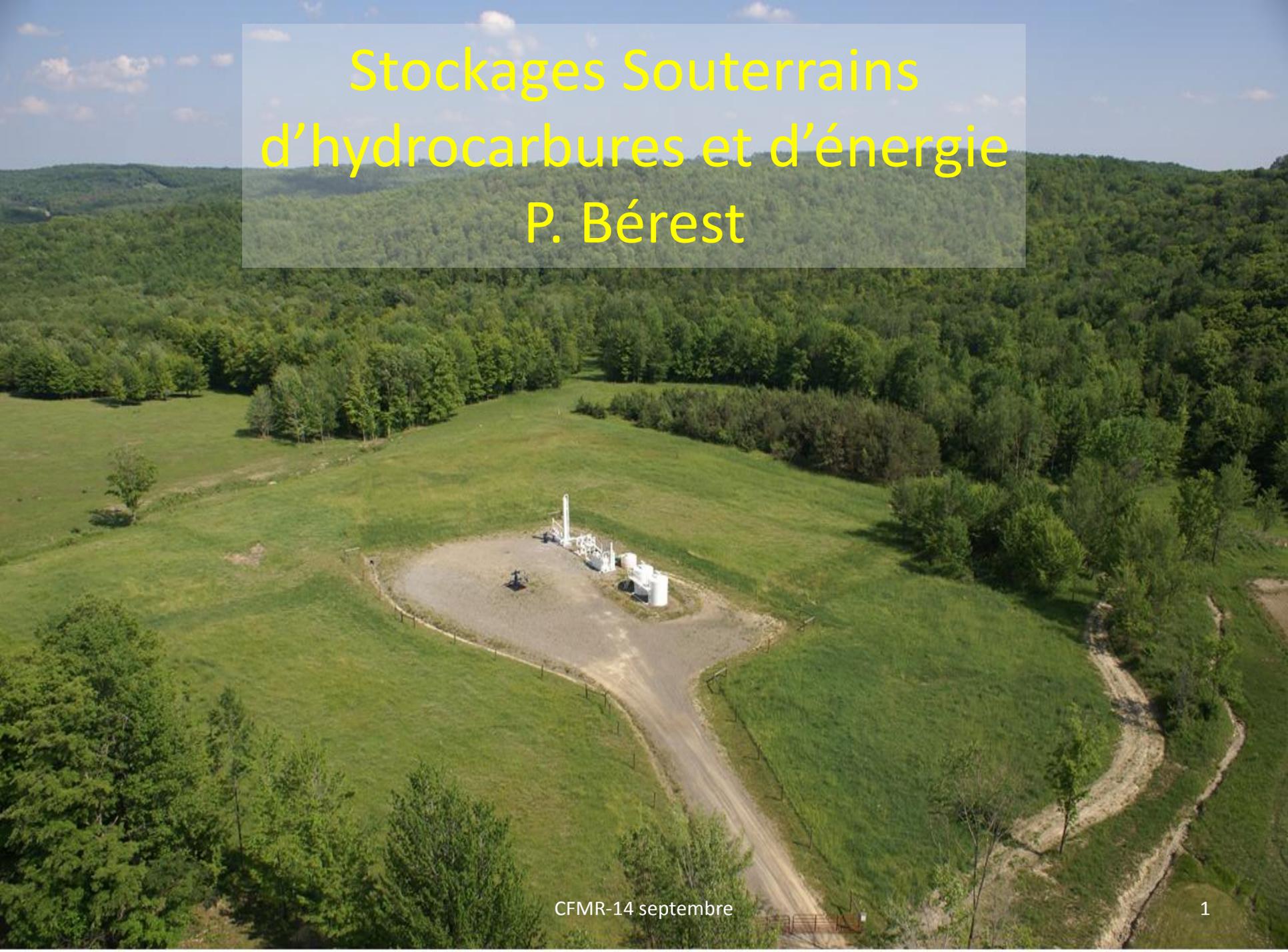


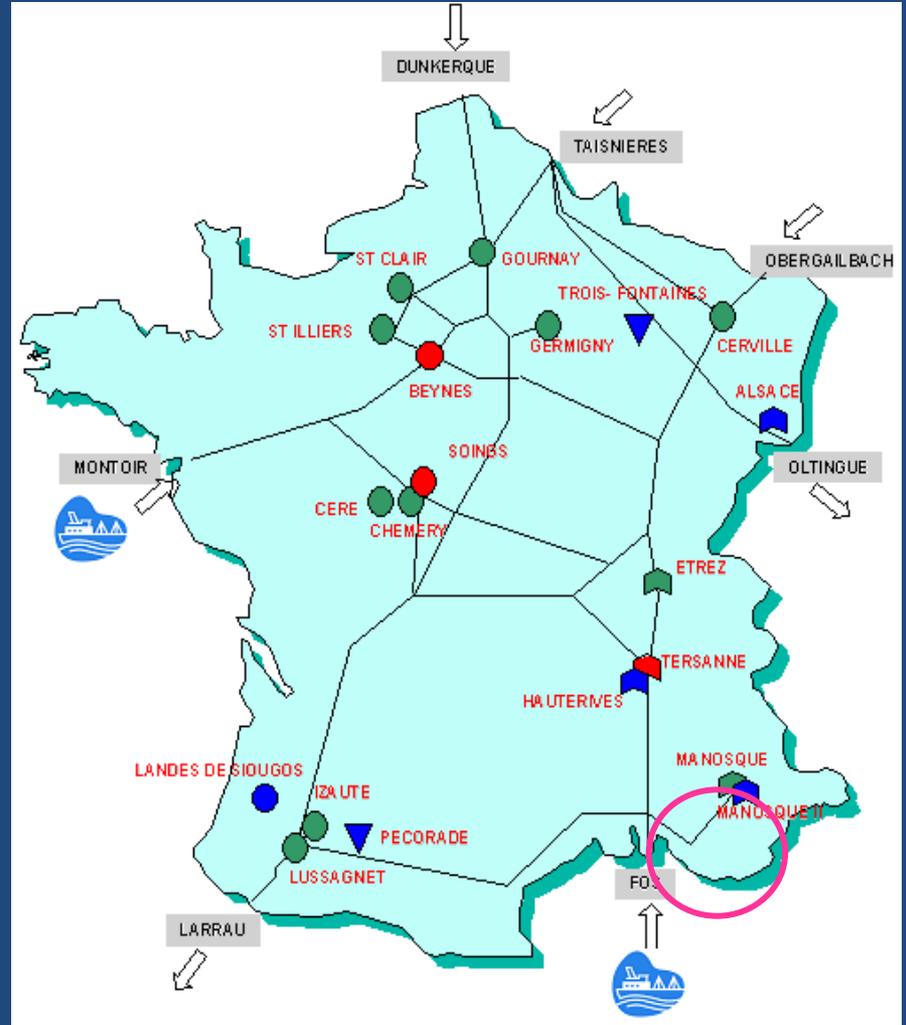
Stockages Souterrains d'hydrocarbures et d'énergie P. Bérest



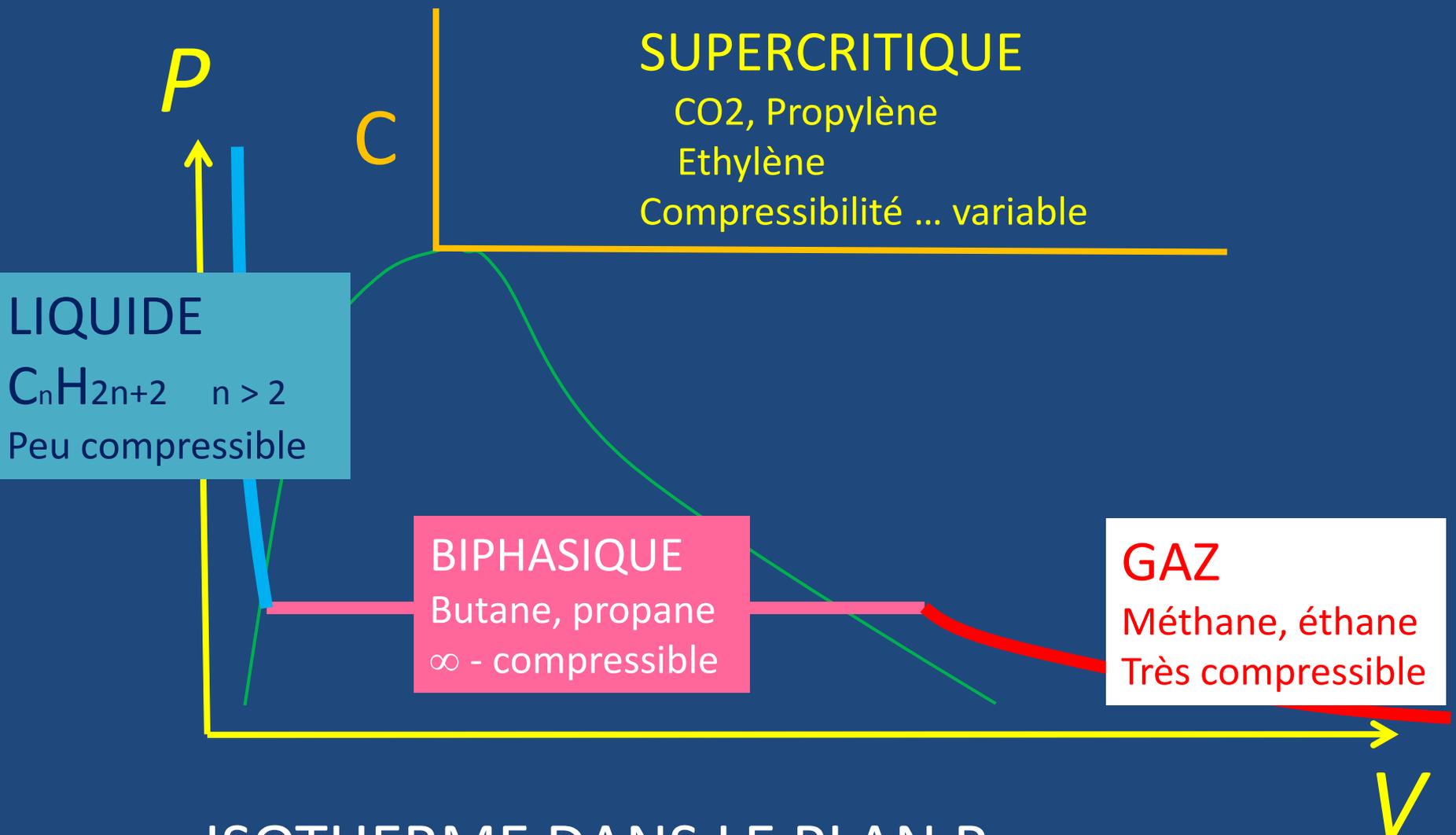
STOCKAGES FRANÇAIS, DIAGRAMME DE PHASES DES HYDROCARBURES , TECHNIQUES DE STOCKAGE



LIQUIDES (3 + 3 SITES)

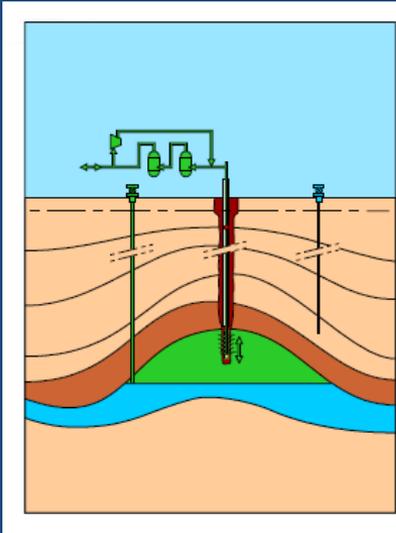


GAZ NATUREL (13 + 3 SITES)



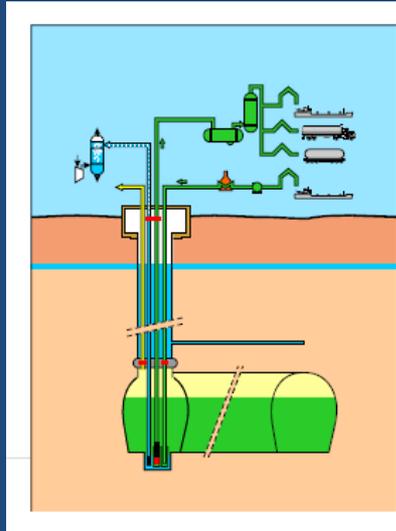
Nature du confinement

Couverture



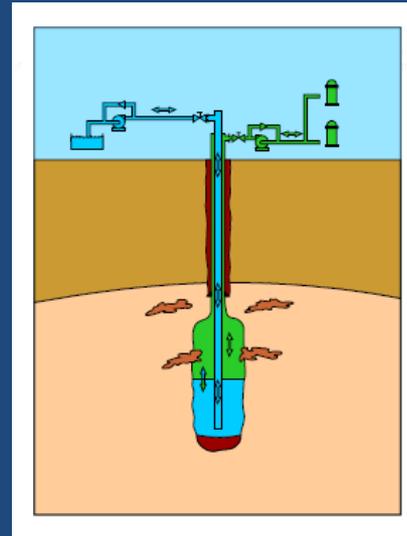
**MILIEU
POREUX**

Hydrodynamisme



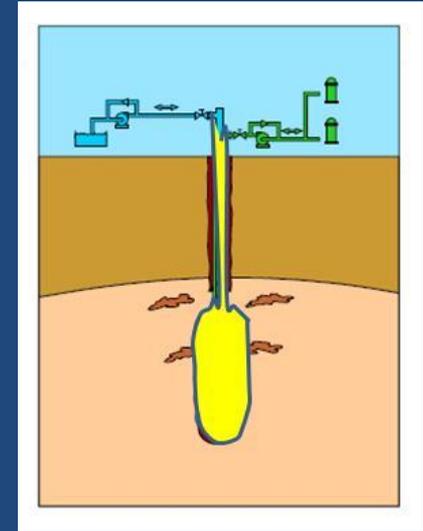
**GALERIE NON
REVÊTUE**

Sel



**CAVITÉ SALINE
LIQUIDE**

Sel



**CAVITÉ SALINE
GAZ**

Pression dans l'ouvrage

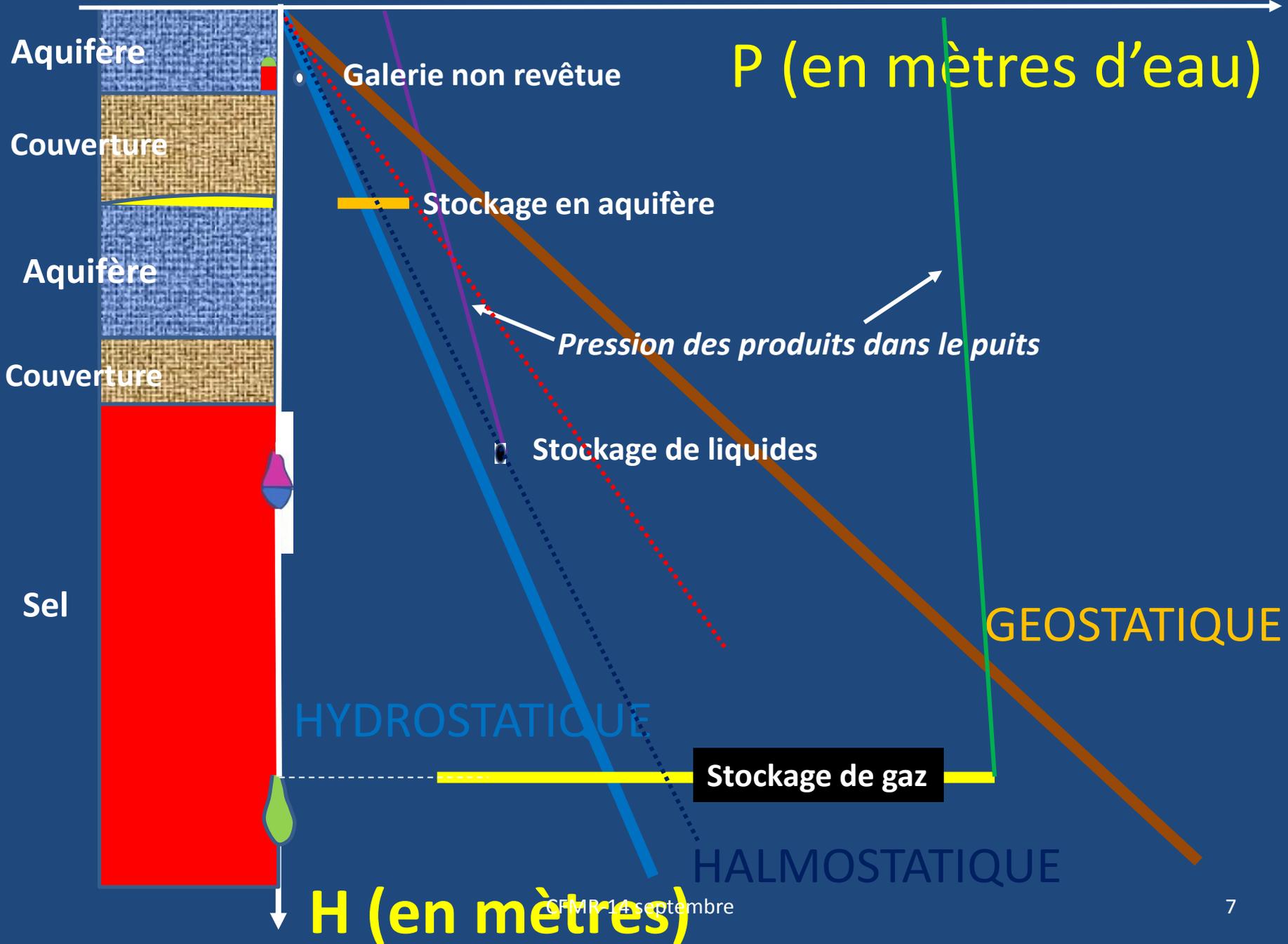
Variable

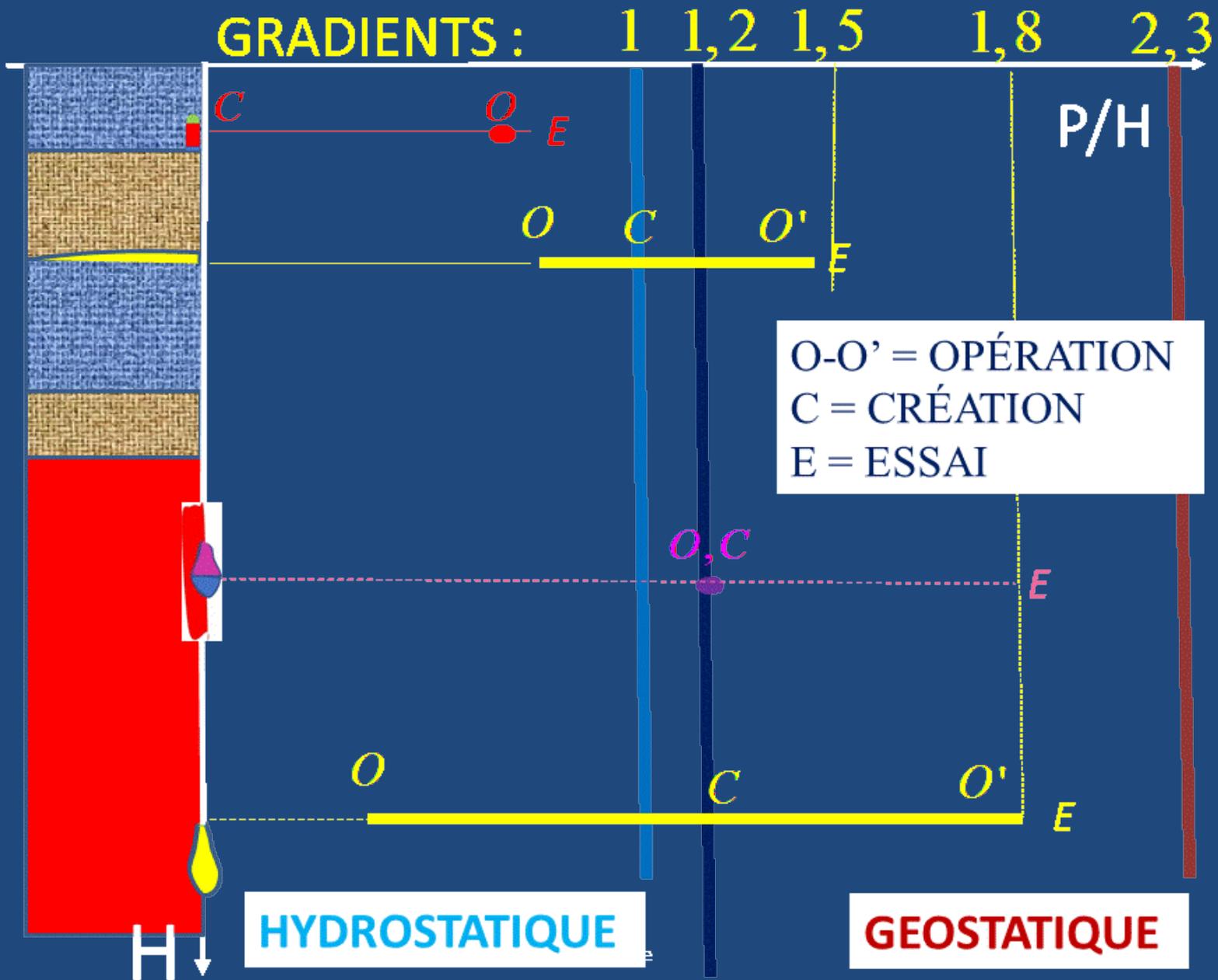
Constante

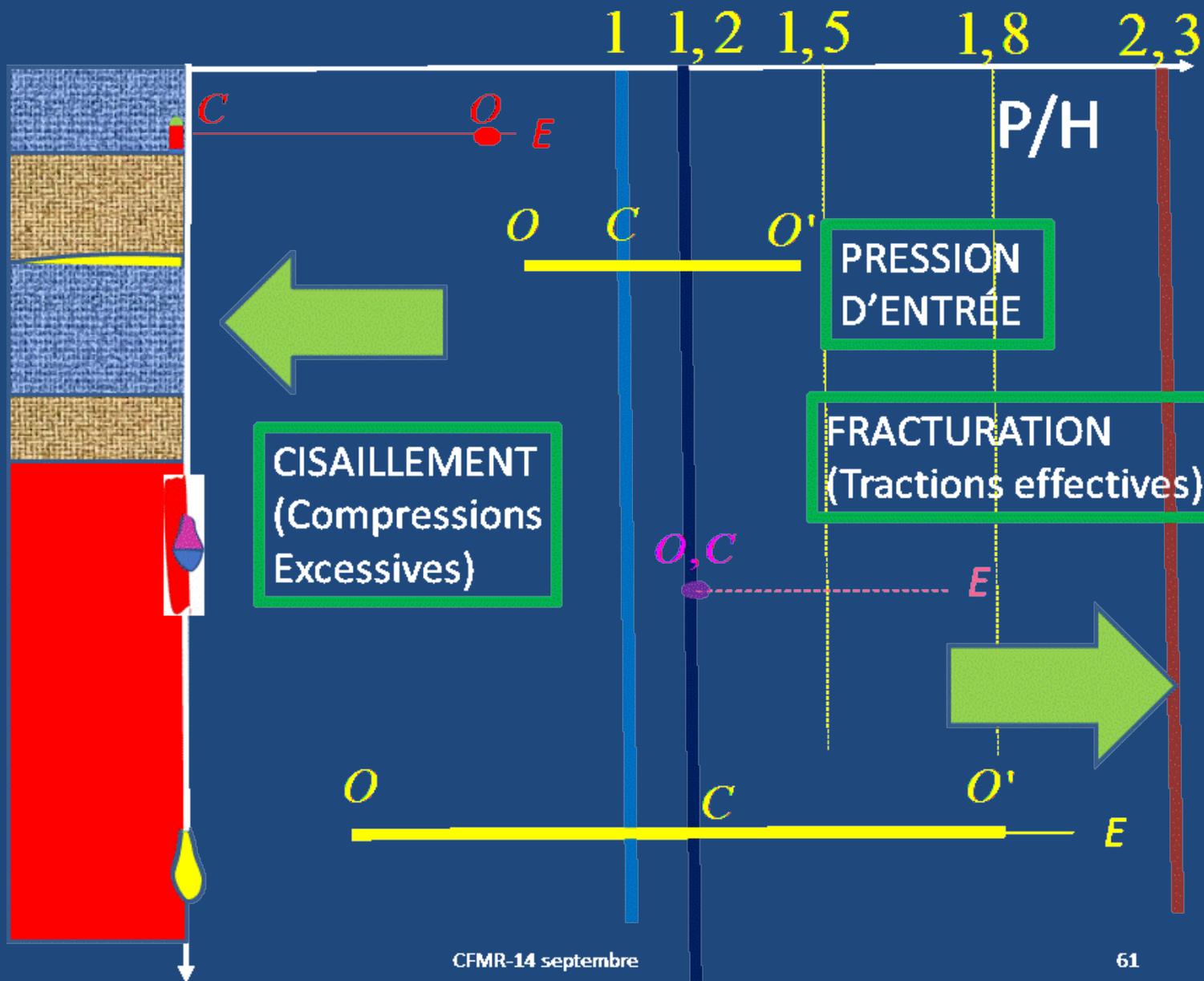
Constante

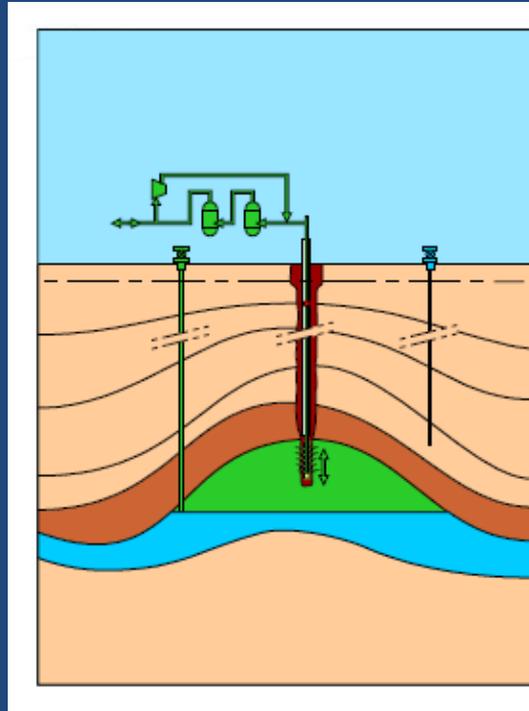
Variable

LES PRESSIONS



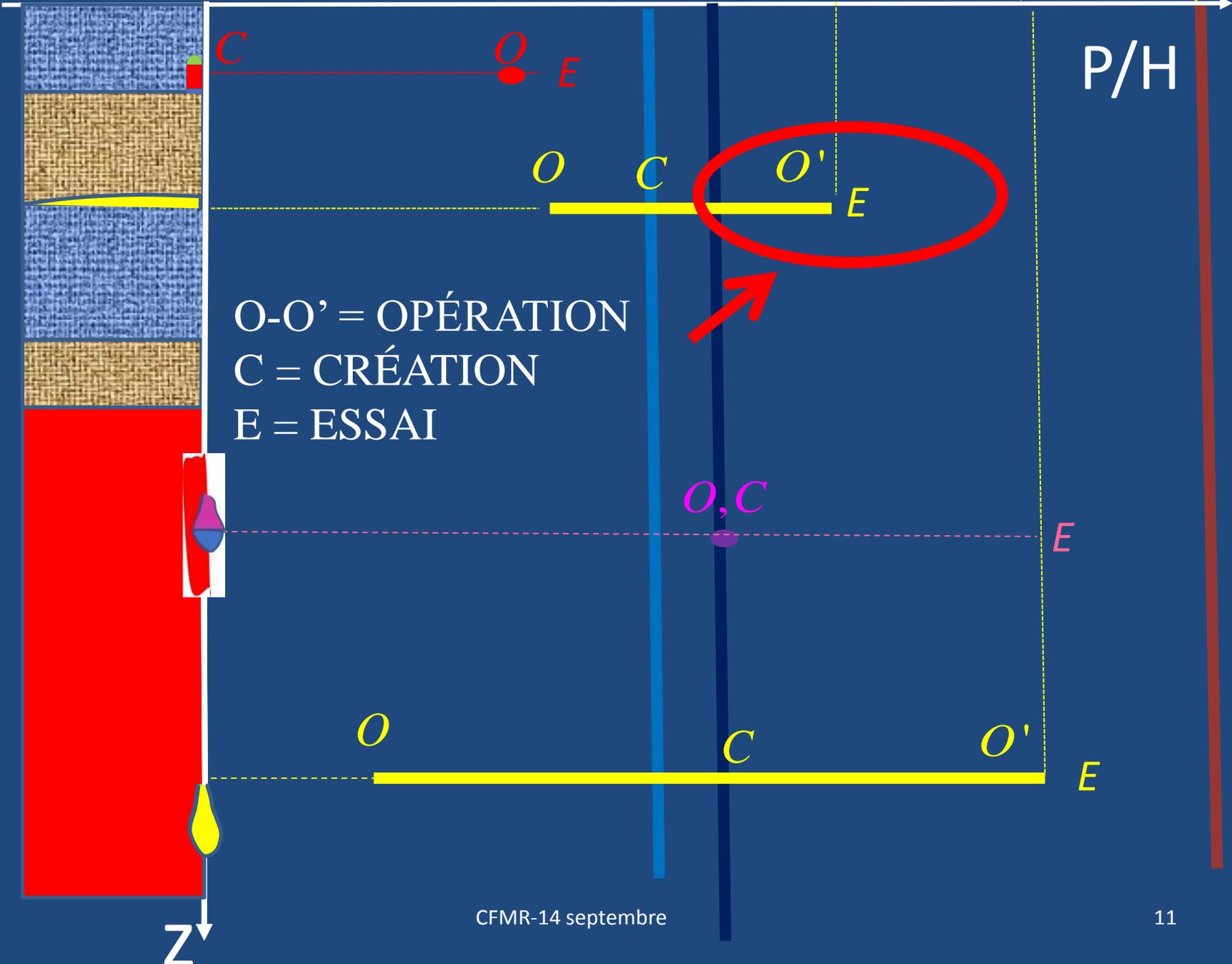






STOCKAGE EN MILIEU POREUX

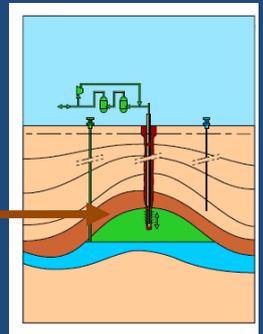
GRADIENTS : 1 1,2 1,5 1,8 2,3



O-O' = OPÉRATION
 C = CRÉATION
 E = ESSAI

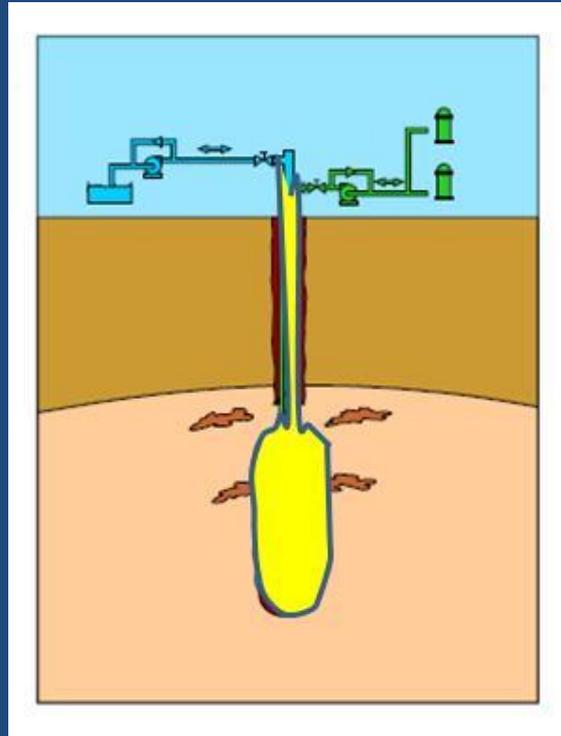
STOCKAGE EN MILIEU POREUX

“COUVERTURE”

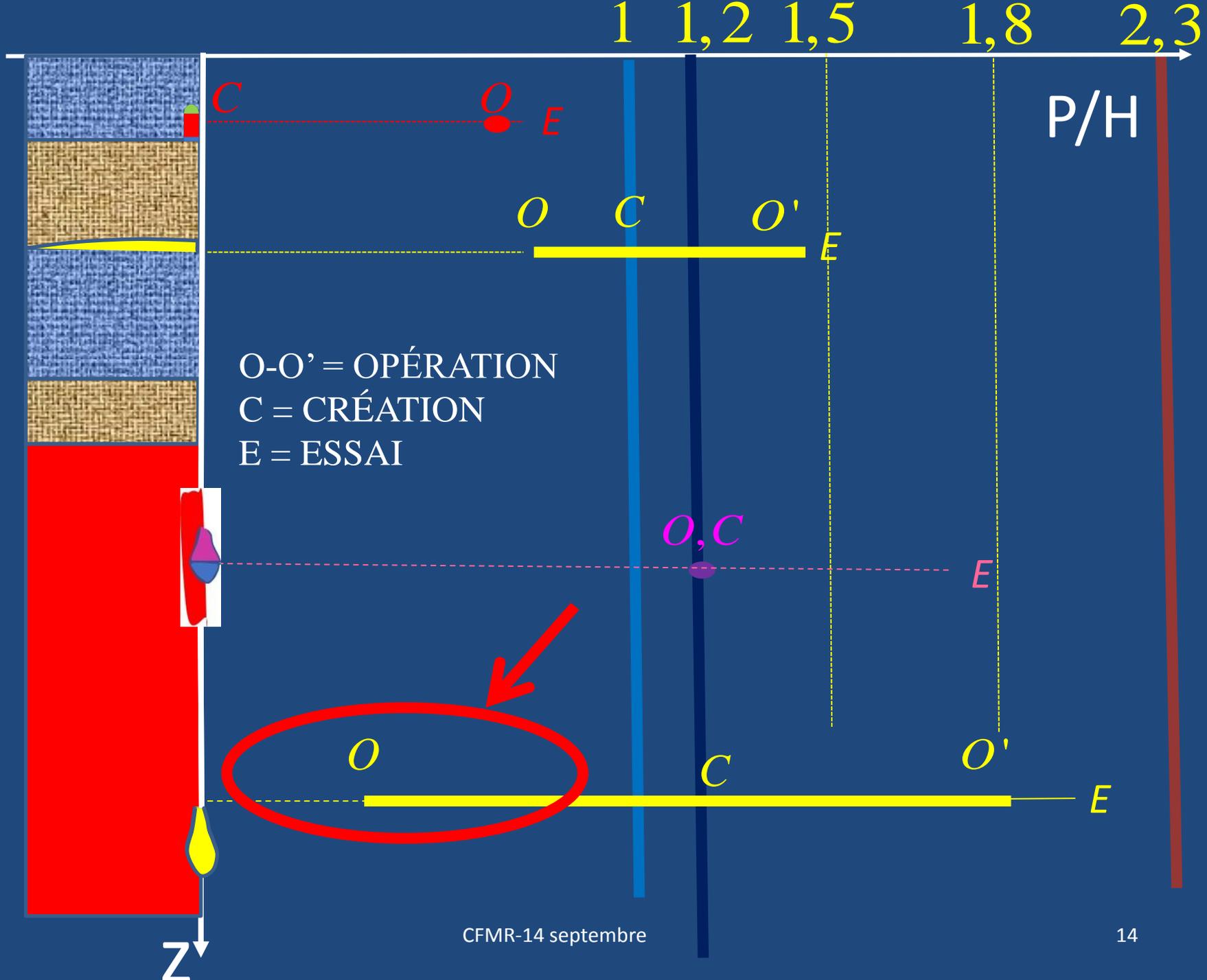


Le choix de la pression maximale, qui est assez variable suivant les sites, a été prudent et empirique. C'est un sujet de recherche pour la Mécanique des roches. D'un point de vue théorique, il implique une très bonne compréhension du fonctionnement mécanique du réservoir et des terrains surincombants, mais aussi du comportement poromécanique de la couverture (pression d'entrée, pression capillaire), et une bonne connaissance de l'état de contraintes dans le massif.

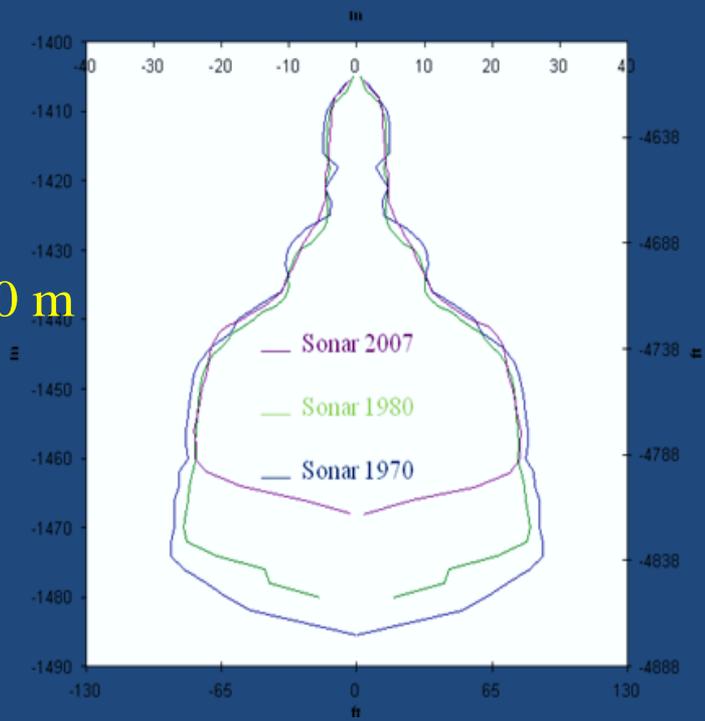
C'est un domaine exploré par les pétroliers, mais plutôt dans le contexte d'une décompression du réservoir, et avec des enjeux différents. D'un point de vue plus opérationnel, il nécessite aussi la mise au point d'une stratégie d'essais et des moyens de surveillance (« *monitoring* ») convenables pour augmenter les pressions maximales par étapes prudentes.



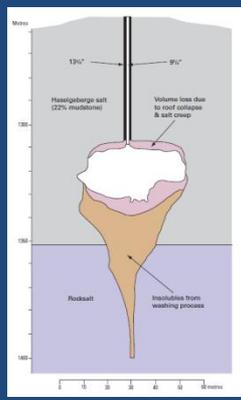
STOCKAGE EN CAVITÉ SALINE, GAZ



1450 m



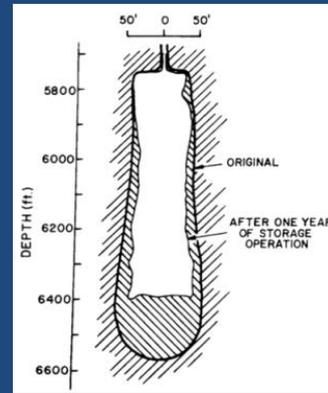
TERSANNE 02 (Storengy)



KIEL

1300 m

1900 m



EMINENCE

1300 m



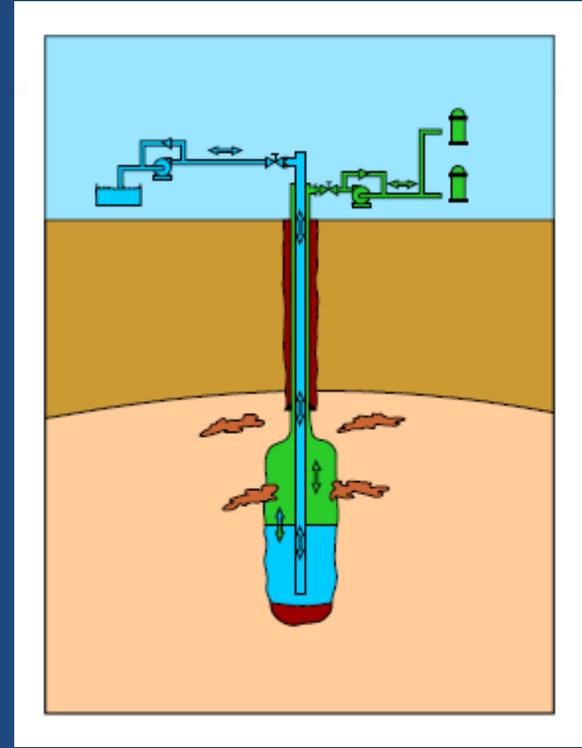
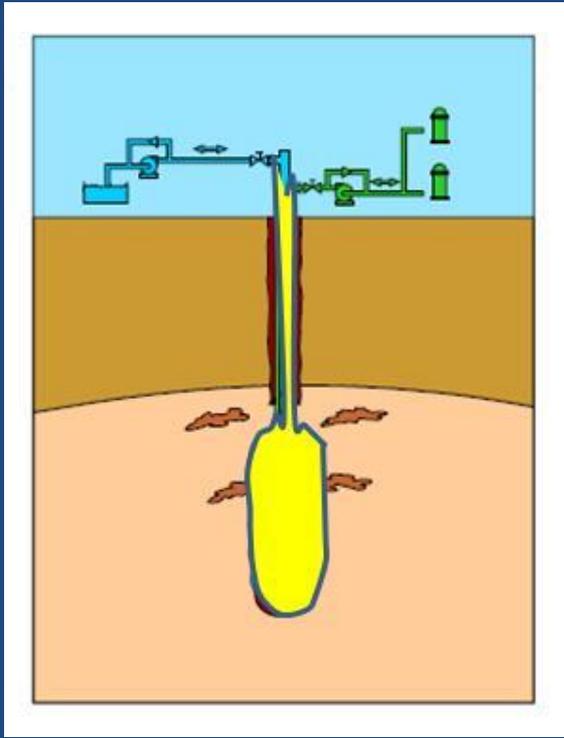
MARKHAM

ECAILLAGE, CHUTE DE BLOCS, FLUAGE

STORENGY, GEOSTOCK, MINES DE PARIS, POLYTECHNIQUE

La Mécanique des roches est au centre du dimensionnement des *cavités salines*, qui ont suscité en France depuis une cinquantaine d'années des recherches très actives, notamment de Géostock et de GDF (puis Storengy) avec le concours de l'Ecole des Mines de Paris et de l'Ecole Polytechnique.

L'origine des problèmes tient, comme le plus souvent, à l'écart entre la pression géostatique et la pression intérieure dans l'ouvrage, qui engendre une vitesse de fermeture, fonction non linéaire de la profondeur. Les problèmes sont donc les plus aigus dans les stockages de gaz naturel, souvent plus profonds, et dans lesquels la pression intérieure est particulièrement faible à stock bas.



**POURQUOI LES CAVERNES DE STOCKAGE NE
S'EFFONDRENT-ELLES PAS ?
(LES CAVERNES DE PRODUCTION DE SAUMURE
LE FONT PARFOIS)**



Cargill Sinkhole
Kansas



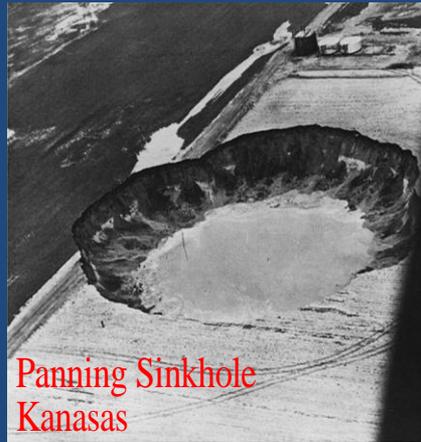
Haoud Berkaoui
Algeria



Bayou Corne
Louisiana



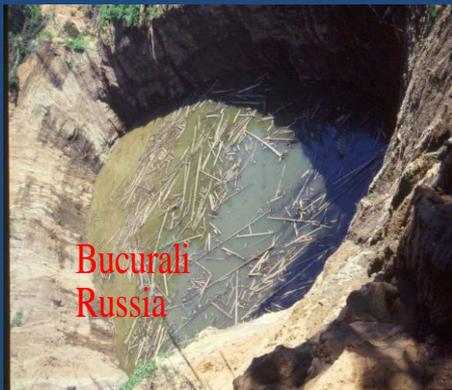
Cerville, France



Panning Sinkhole
Kansas



Denver, Texas



Bucurali
Russia



Gellenoncourt
France
CFMR-14 septembre

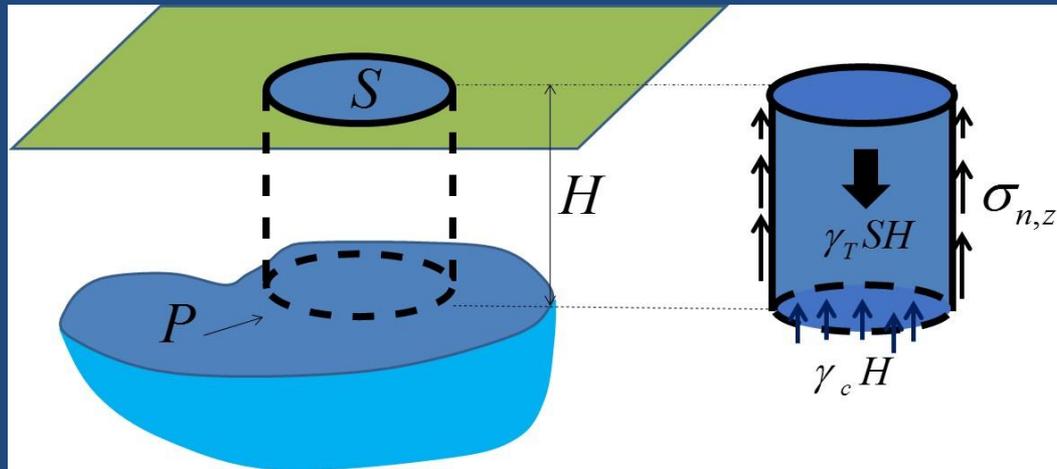


La Rape
France
62 meters

March 2005

L'équilibre d'un cylindre arbitraire au-dessus d'une caverne résulte du poids des terrains, de la pression dans la caverne (dont les effets croissent comme l'aire) et des forces de cisaillement (proportionnelles au périmètre). Donc le contour le plus favorable à la rupture est un cercle

$$(\gamma_R - \gamma_c)HS = P \int_0^H \sigma_{nz}(z) dz$$

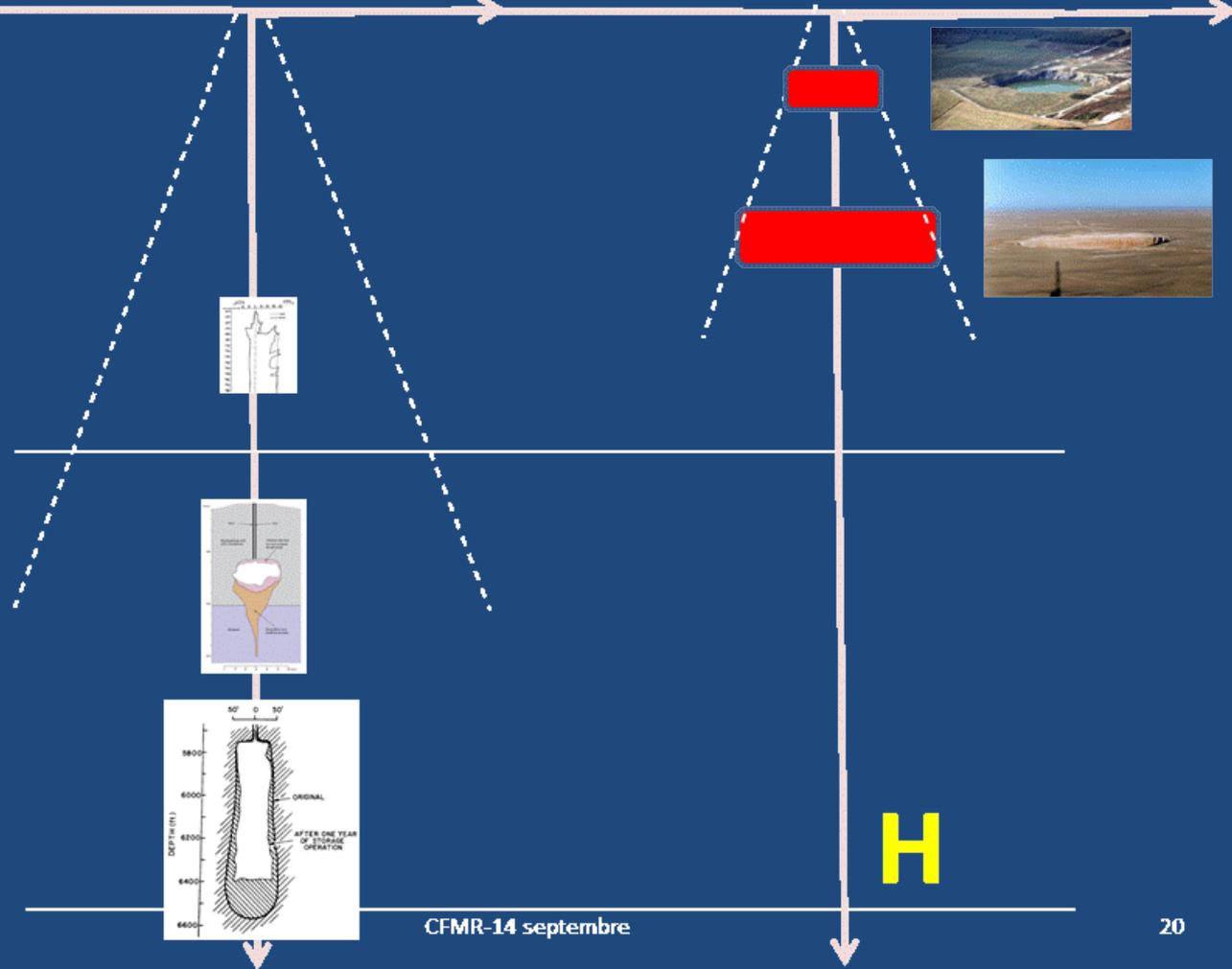


Si on admet un critère de Coulomb, le domaine instable est un cône

$$(\gamma_R - \gamma_c)R > 2C + \gamma_R H \operatorname{tg} \varphi$$

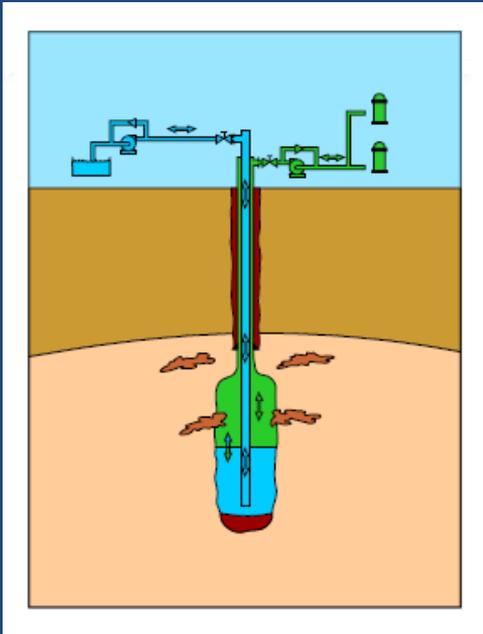
SURFACE DU SOL

R



CFMR-14 septembre

20



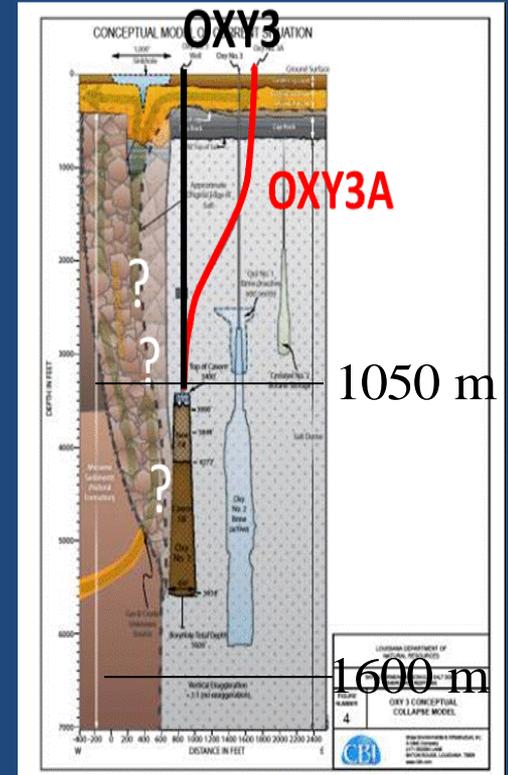
**POURQUOI LES CAVERNES DE STOCKAGE
NE S'EFFONDRENT-ELLES PAS ?
(LES CAVERNES DE PRODUCTION DE SAUMURE
LE FONT PARFOIS)**

**PARCE QU'ELLES RESPECTENT UN RATIO DIAMETRE/PROFONDEUR
PRUDENT**

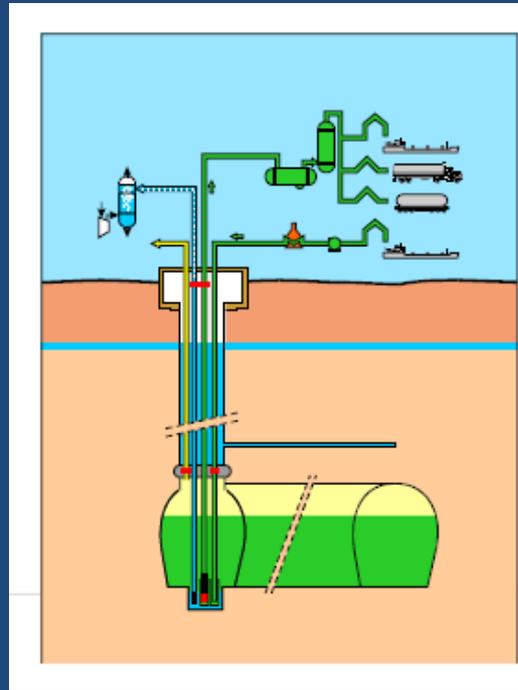
**ATTENTION POURTANT A NE PAS ETRE TROP PROCHE DU TOIT OU DES
BORDS DU GISEMENT !**

1^{er} Interlude

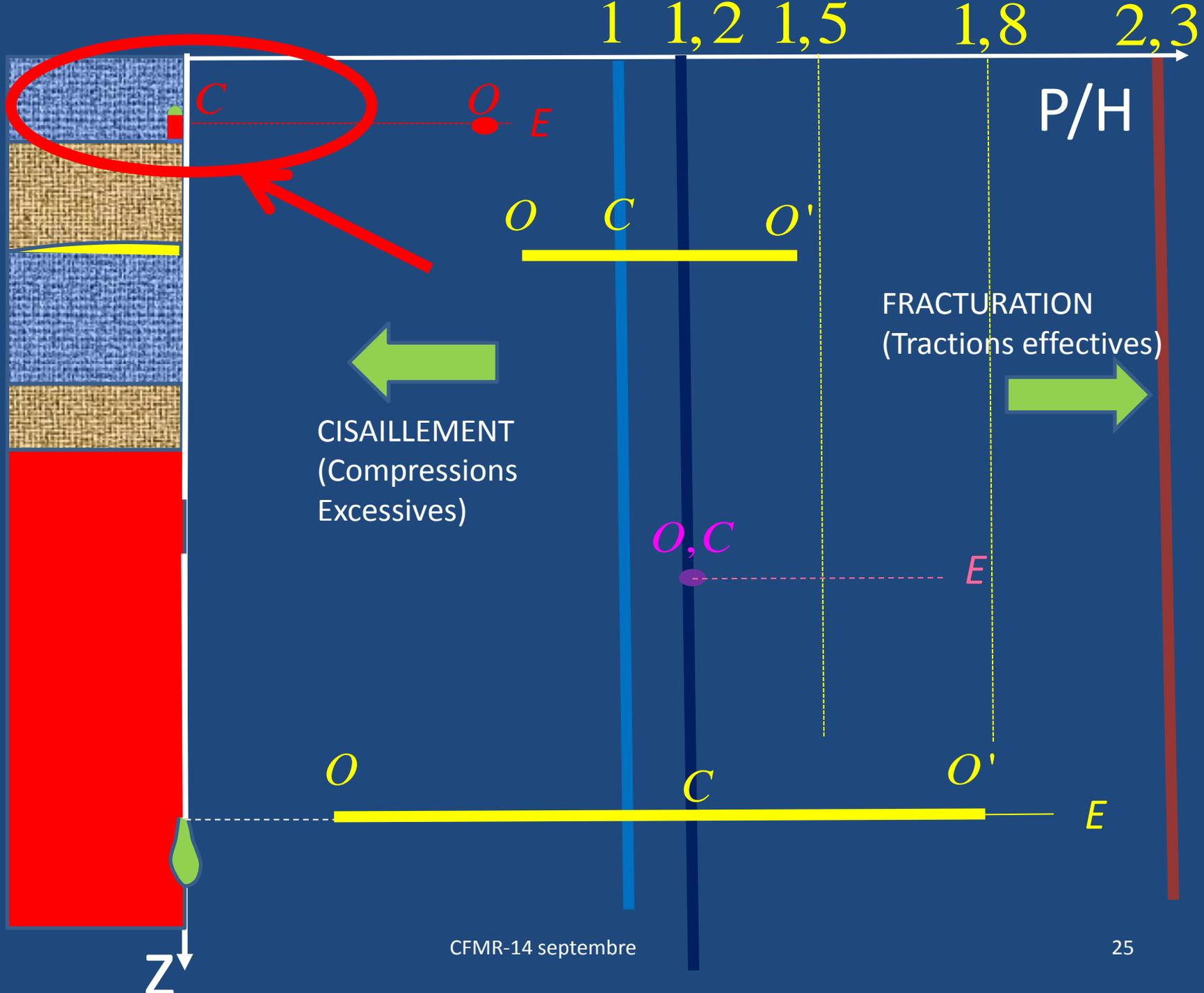
Pourquoi les cavernes ne doivent pas être trop proches des bords du gisement



NAPOLEONVILLE, 2013 ("BAYOU CORNE")



STOCKAGE EN GALERIE NON REVÊTUE

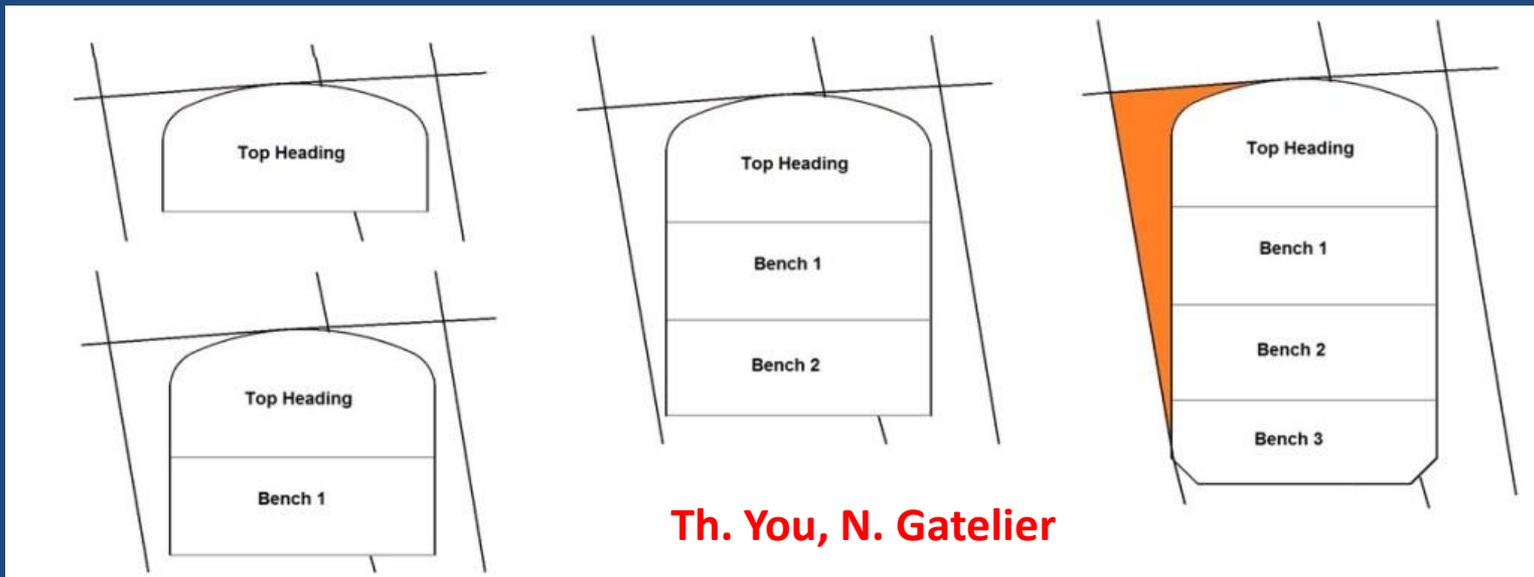




LAVÉRA (GEOSTOCK)



GARGENVILLE (GEOSTOCK)

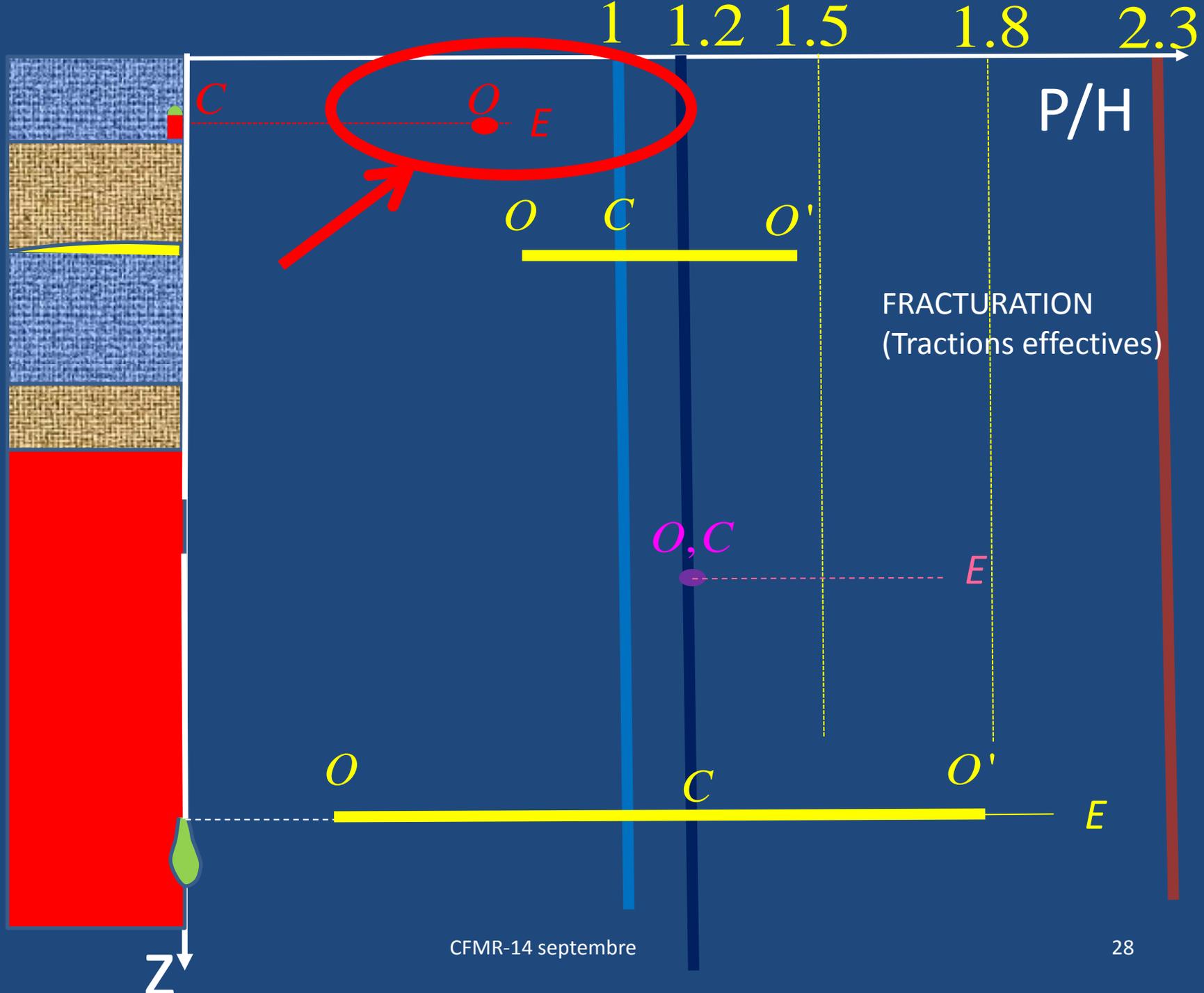


Dans le cas des galeries, le problème de stabilité présente une certaine analogie avec les tunnels et cavernes de très grandes sections excavées au rocher, L'examen géotechnique préalable doit donc faire l'objet de beaucoup de soin.

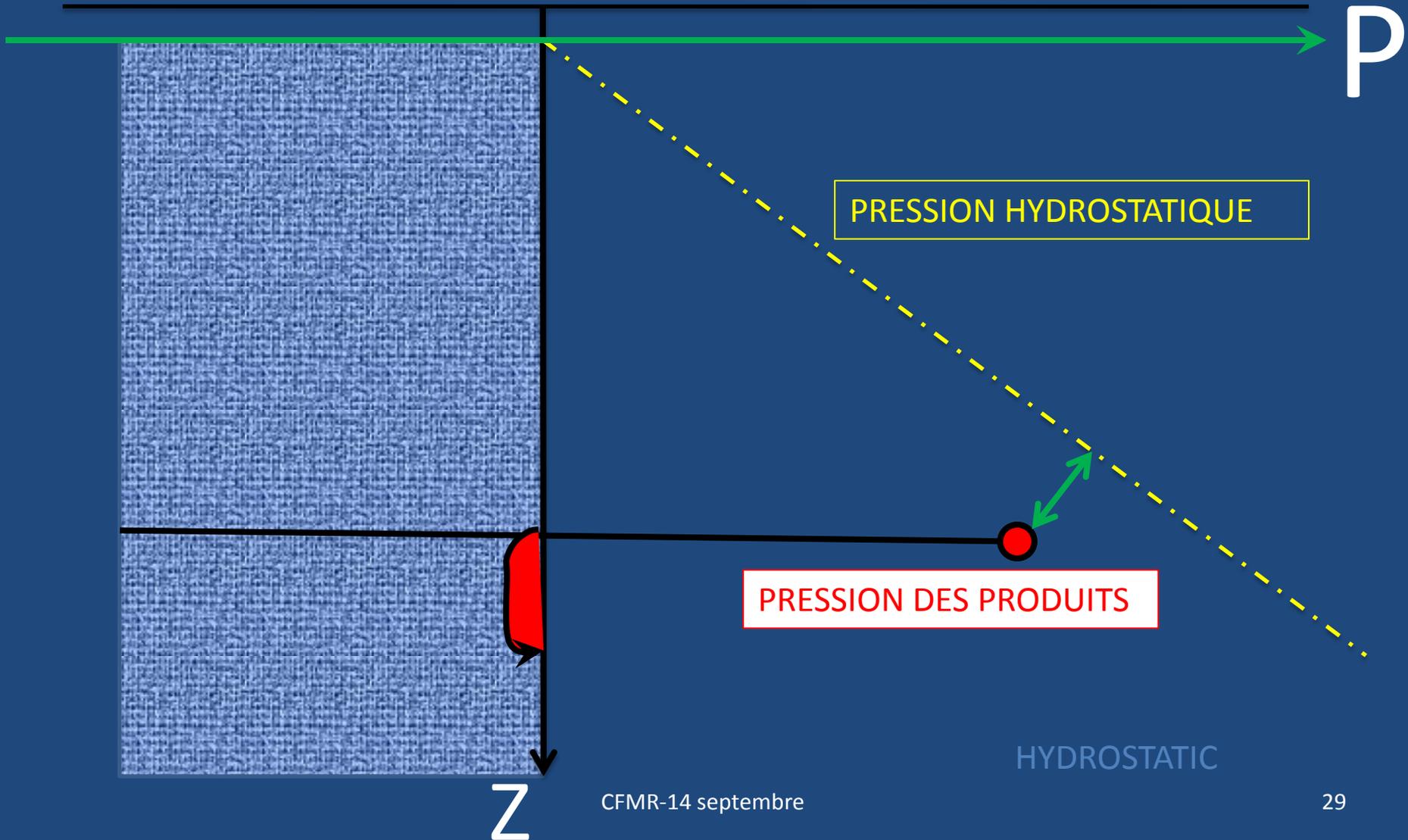
Mais les dimensions sont plus grandes (donc la formation d'un dièdre instable plus probable); Et on ne pose pas de revêtement, sauf très localement, le confortement s'effectuant par boulonnage.

Dans ce contexte, l'évaluation des contraintes en place revêt une grande importance : avec les observations faites lors des premiers creusements, elles peuvent suggérer une modification du dessin initial de la section de l'ouvrage.

Les effets thermomécaniques, méritent aussi l'attention, en raison des écarts de température qui peuvent affecter les produits livrés.

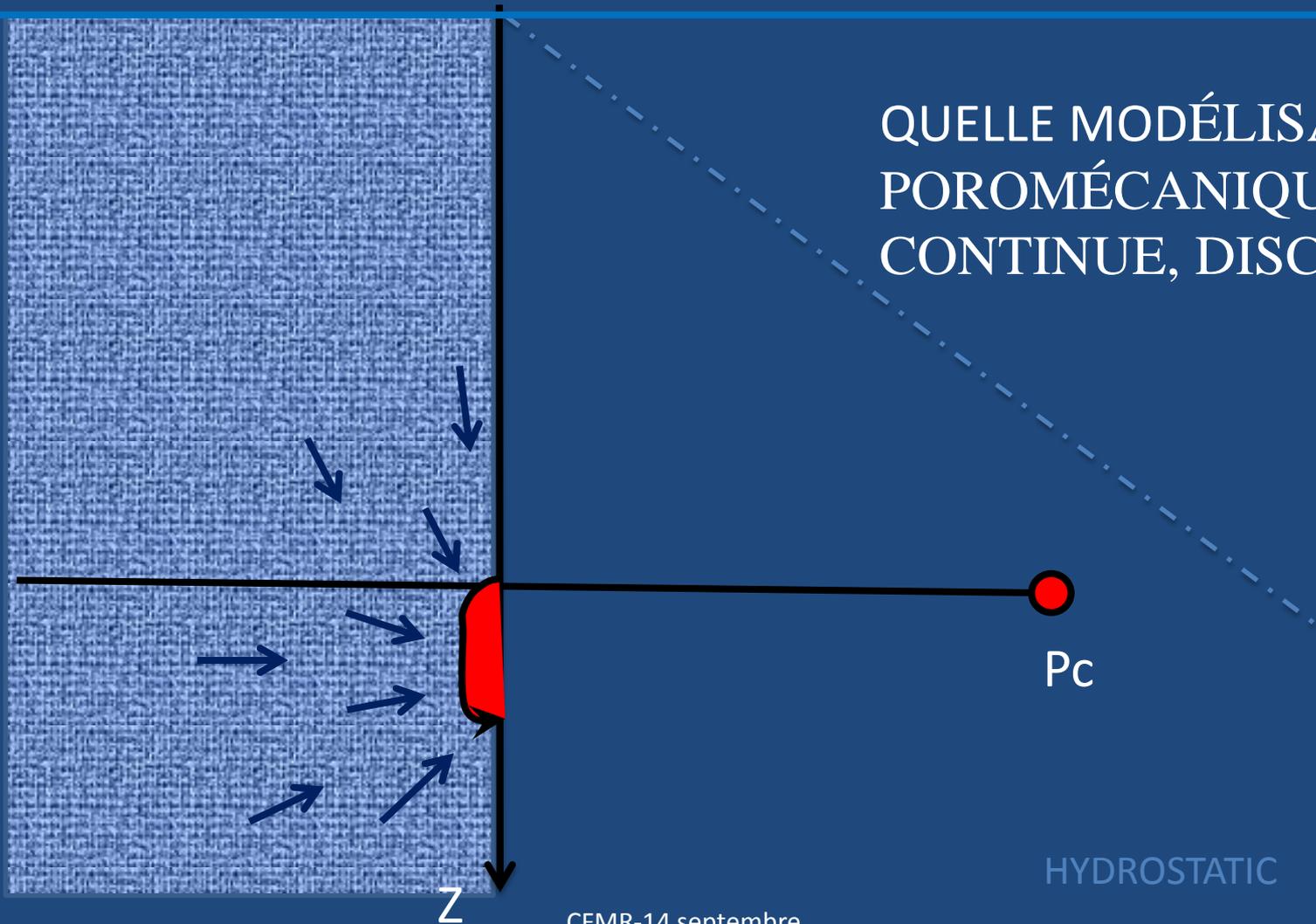


Pour assurer le confinement (hydrodynamique) la pression dans la caverne doit être (nettement) plus petite que la pression naturelle de l'eau à la profondeur de la caverne



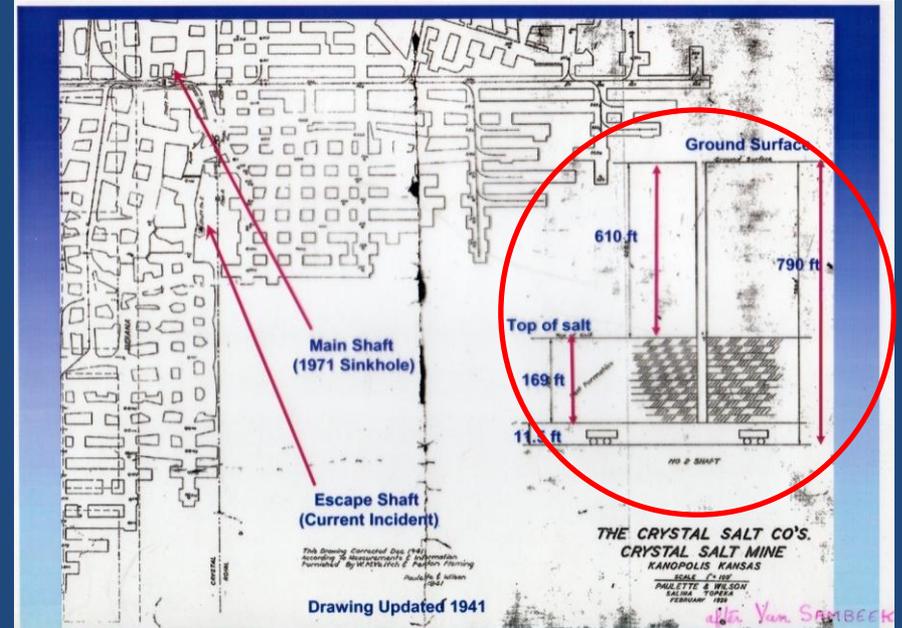
Ainsi c'est l'eau du massif qui s'écoule vers la caverne, interdisant la sortie des produits stockés

QUELLE MODÉLISATION
POROMÉCANIQUE?
CONTINUE, DISCRÈTE ?

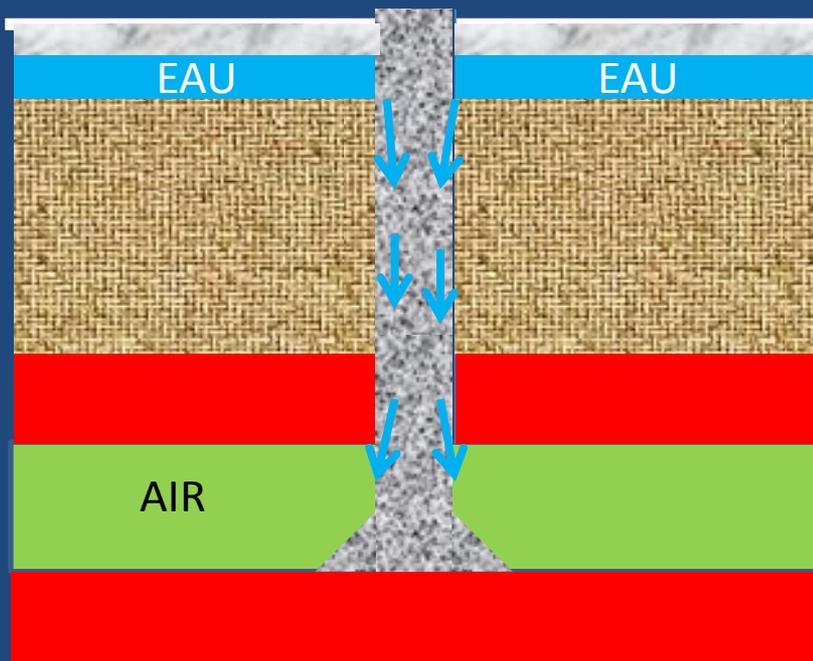


2ème Interlude

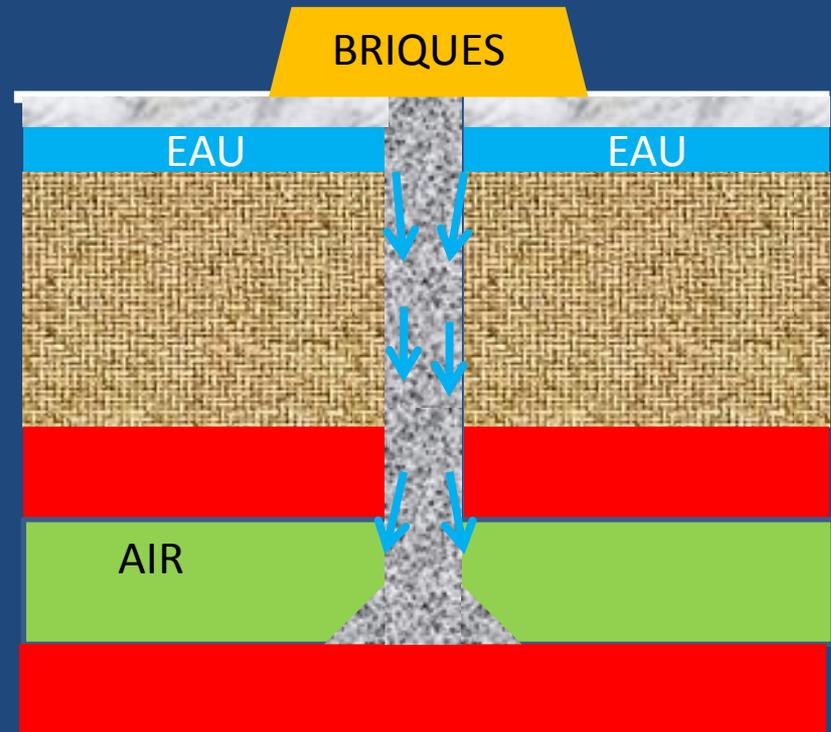
Un stockage involontaire et raté d'air comprimé



CRYSTAL MINE, KANOPOLIS, KANSAS



1. La mine est abandonnée en 1948. On remplit les puits avec du tout venant. Un peu d'eau s'infiltré par le puits

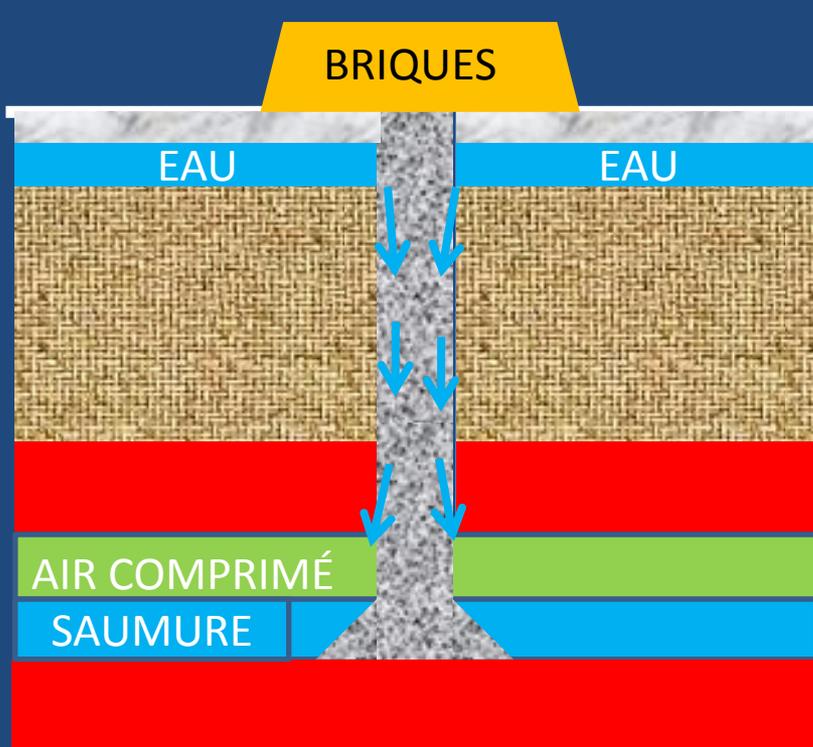


2. Une briquetterie s'installe sur le carreau de la mine. On forme un tas de briques au-dessus du puits. 50 ans passent

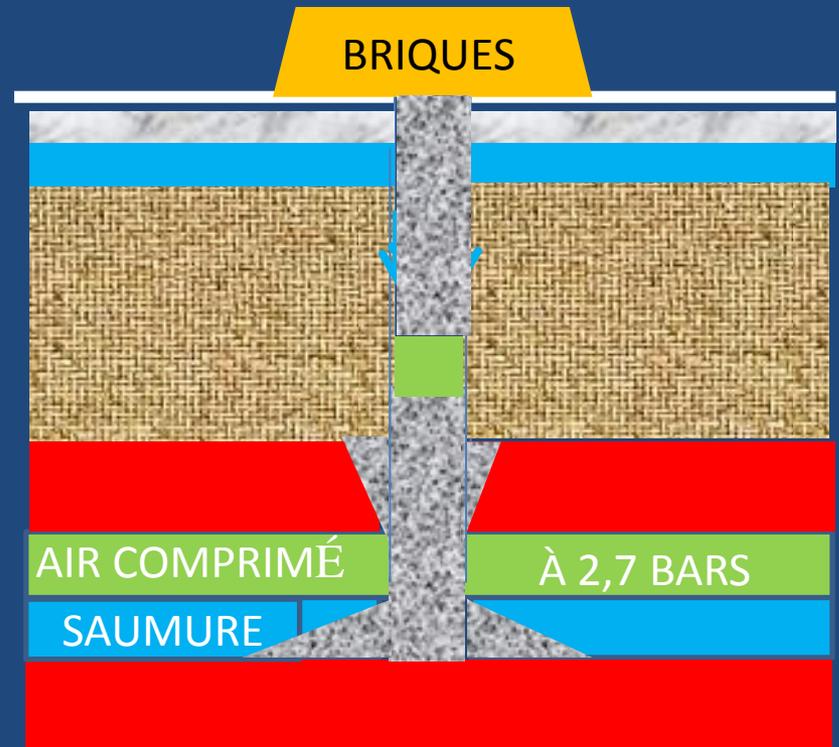


CFMR-14 septembre



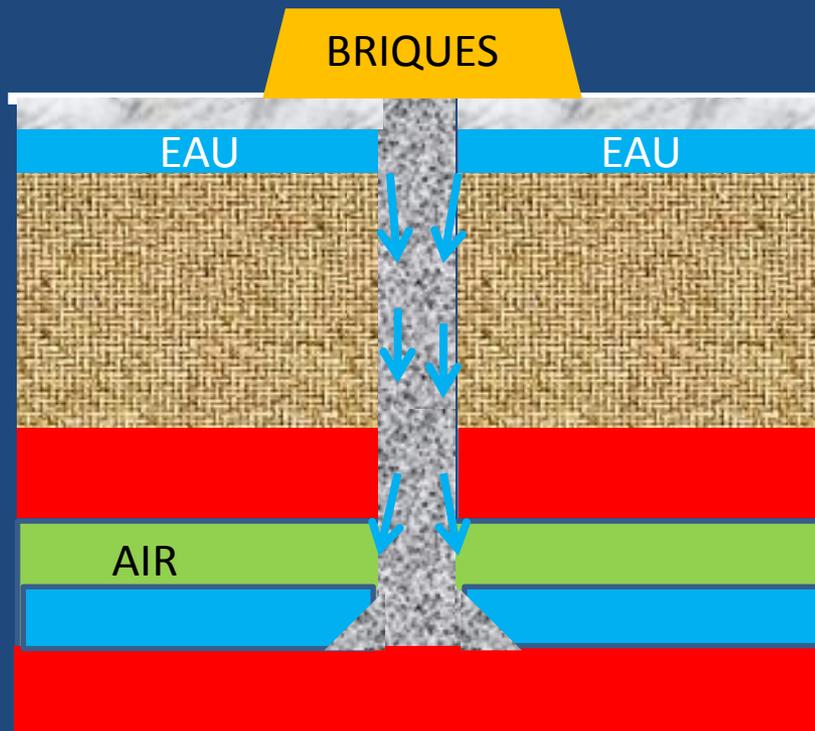


3. La pression d'air augmente dans la mine (étanchéité hydraulique)

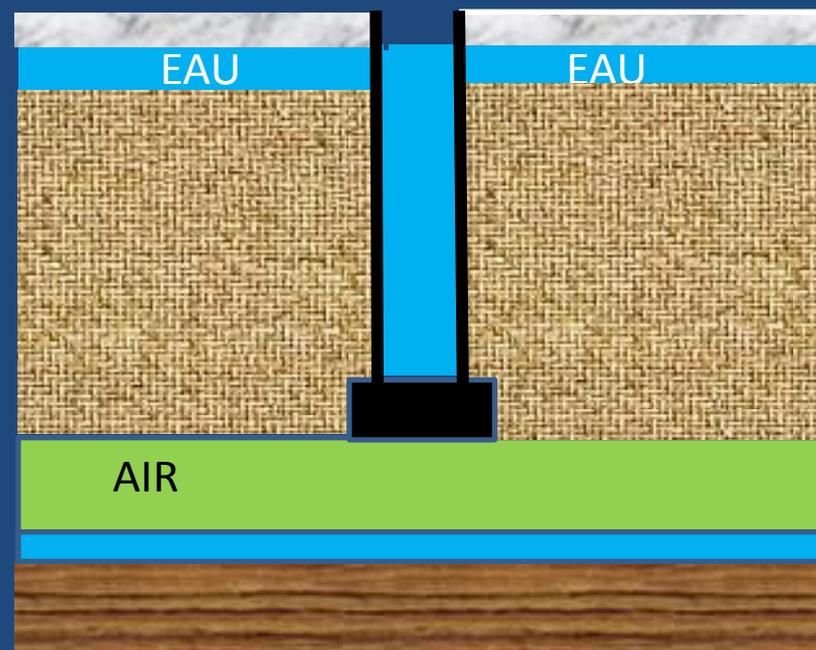


4. Le puits débouffe, remontant la condition à la limite hydraulique

(LEO VAN SAMBEEK, RESPEC)



MAUVAIS



BON

STOCKAGES D'ÉNERGIE DU FUTUR

La France est globalement bien équipée en stockages souterrains d'hydrocarbures. Les techniques ainsi disponibles contribueront de diverses manières à la transition énergétique

La **séquestration du CO₂** consiste à l'injecter dans une couche aquifère *salée* (afin de ne pas obérer des ressources en eau potable). Cette technique présente une certaine analogie avec le stockage de gaz naturel en aquifère, dont il paraît bon de s'inspirer (reconnaissance géométrique, double cuvelage, vanne de sécurité, *history matching*)

L'**hydrogène** est déjà stocké en cavité saline, au Texas et en Grande-Bretagne. Les moyens d'un stockage de masse seront, le jour venu, immédiatement disponibles. Pas de problème très particulier, sauf le choix des matériaux pour les tubes et la tête de puits.

La **méthanation** (H_2 obtenu par électrolyse est combiné pour former du méthane avec du CO_2 ; dans la variante EMO, le méthane est brûlé et le CO_2 produit est utilisé pour la méthanation) implique aussi le stockage éventuel d' O_2 et de CO_2 . Les cavités salines offrent là aussi une solution et quelques nouveaux problèmes, par exemple d'ordre thermodynamique.

Il existe deux sites de **stockage d'air comprimé** en cavité saline, en Allemagne et aux USA. On utilise un excès d'électricité pour comprimer de l'air, qui est injecté pendant la nuit. Le soutirage est rapide, la détente produit un refroidissement intense surtout dans une caverne très grande. Il faut alors tenir compte de la dilatation thermique du sel. À la paroi, apparaissent des contraintes additionnelles de traction, auxquelles la roche résiste mal. Ces effets ont été largement étudiés, par le calcul mais aussi en France par un essai en mine (Storengy, Ineris, Ecole des Mines de Paris).

QUESTIONS ?

Remerciements: Gérard Vouille, Nguyen Minh Duc, Jean Bergues, Vincent Maury, Bernard Côme, Gérard Durup, Grégoire Hévin, Michel Tijani, Hippolyte Djakeun-Djizanne, Mehdi Karimi-Jafari, Benoît Brouard, Thierry You, Nicolas Gatelier, Louis Londe, Pierre Chiquet, Fabien Favret ...