

# MÉCANIQUE DES CAVITÉS DANS LE SEL

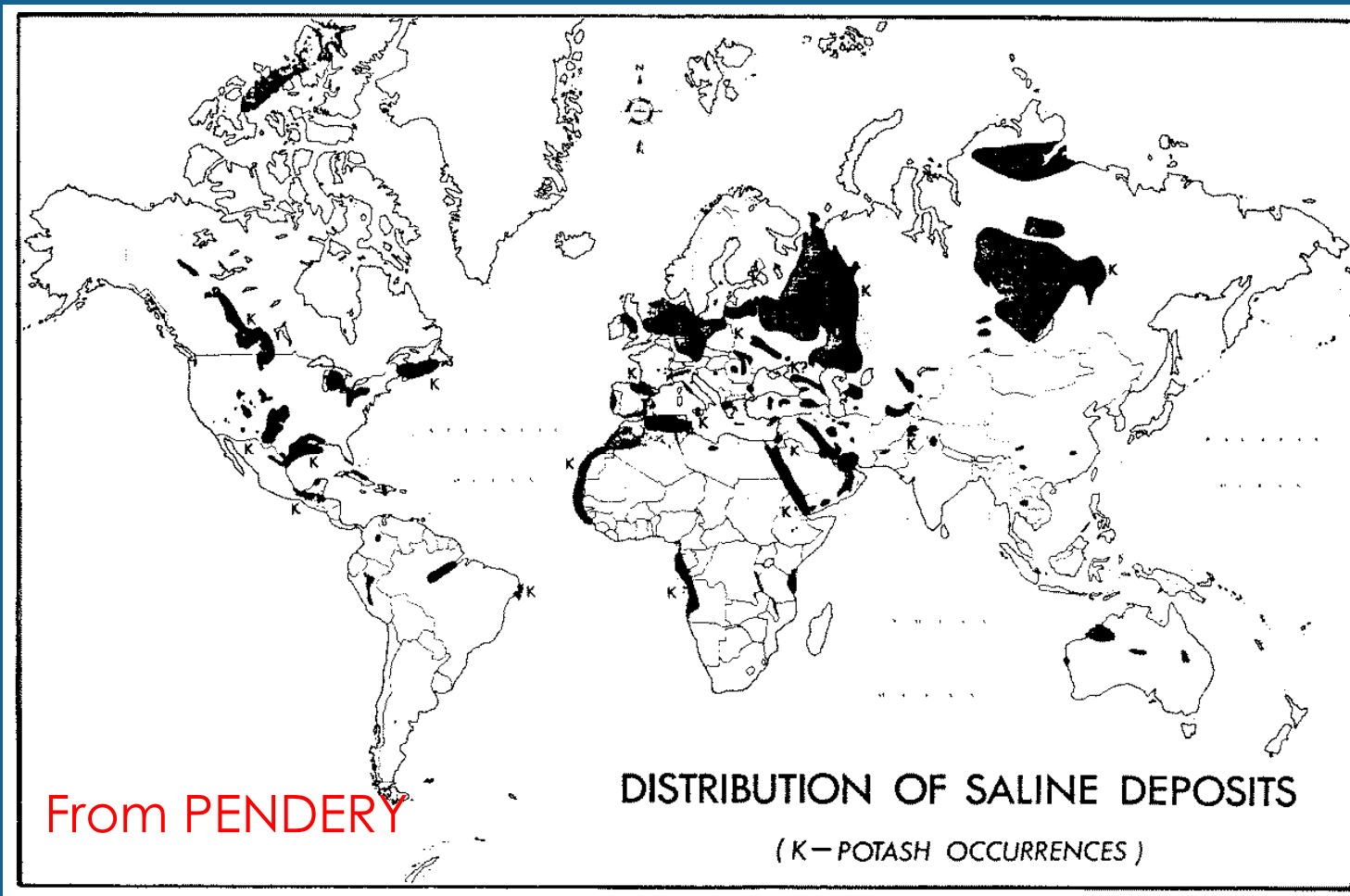
PIERRE BEREST, LMS

- ▶ Le sel dans le sous-sol
- ▶ Lessivage
- ▶ Trois familles de cavernes
- ▶ Mécanique : Rupture fragile
- ▶ Mécanique : Fluage
- ▶ Mécanique : un essai in situ
- ▶ L'avenir des cavernes

# LE SEL DANS LE SOUS-SOL

# NACL

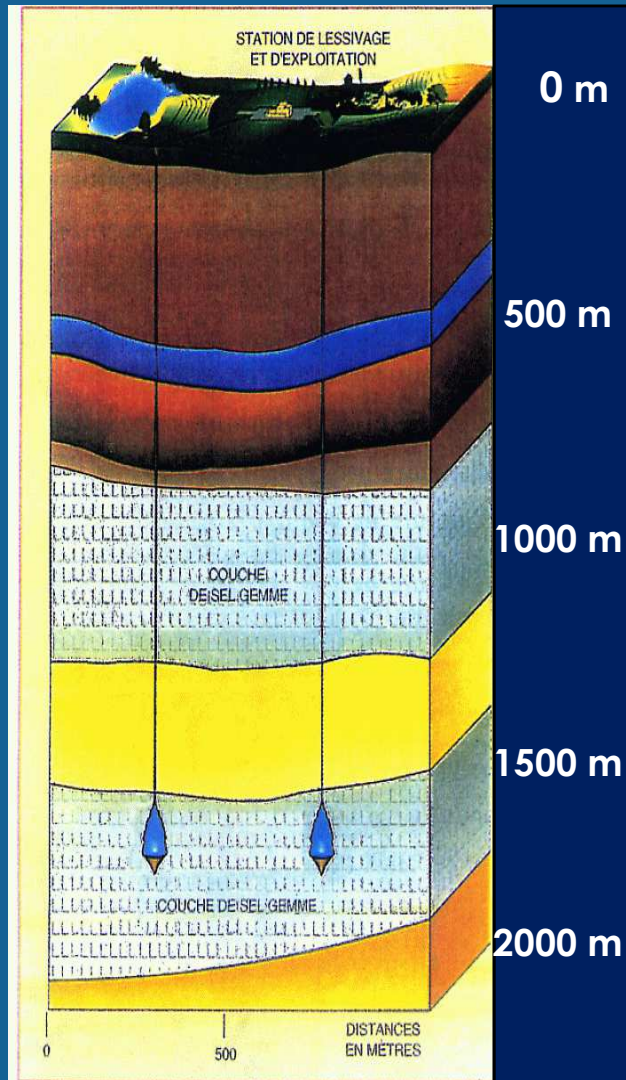




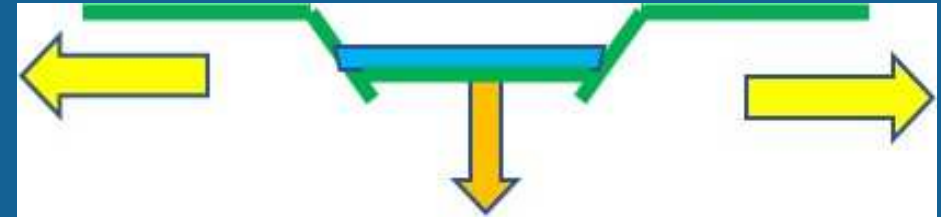
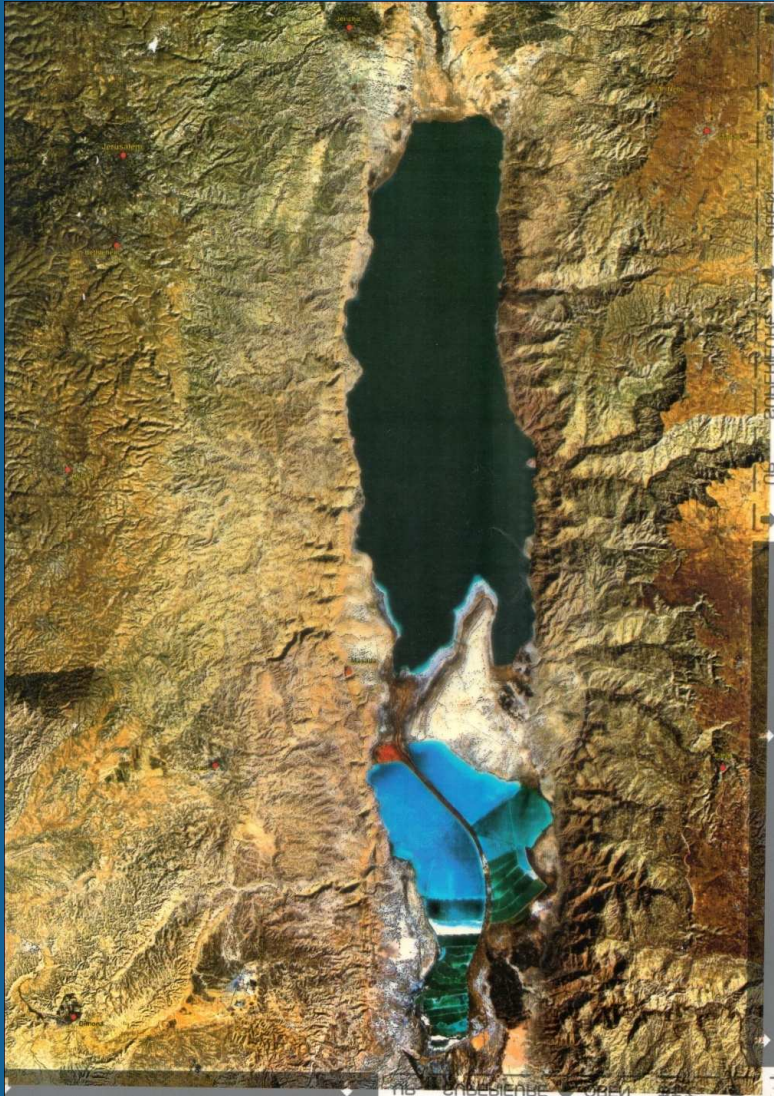
From PENDERY

DISTRIBUTION OF SALINE DEPOSITS

(K - POTASH OCCURRENCES)



DES FORMATIONS SOUVENT ÉPAISSES (Etrez, Ain) ...

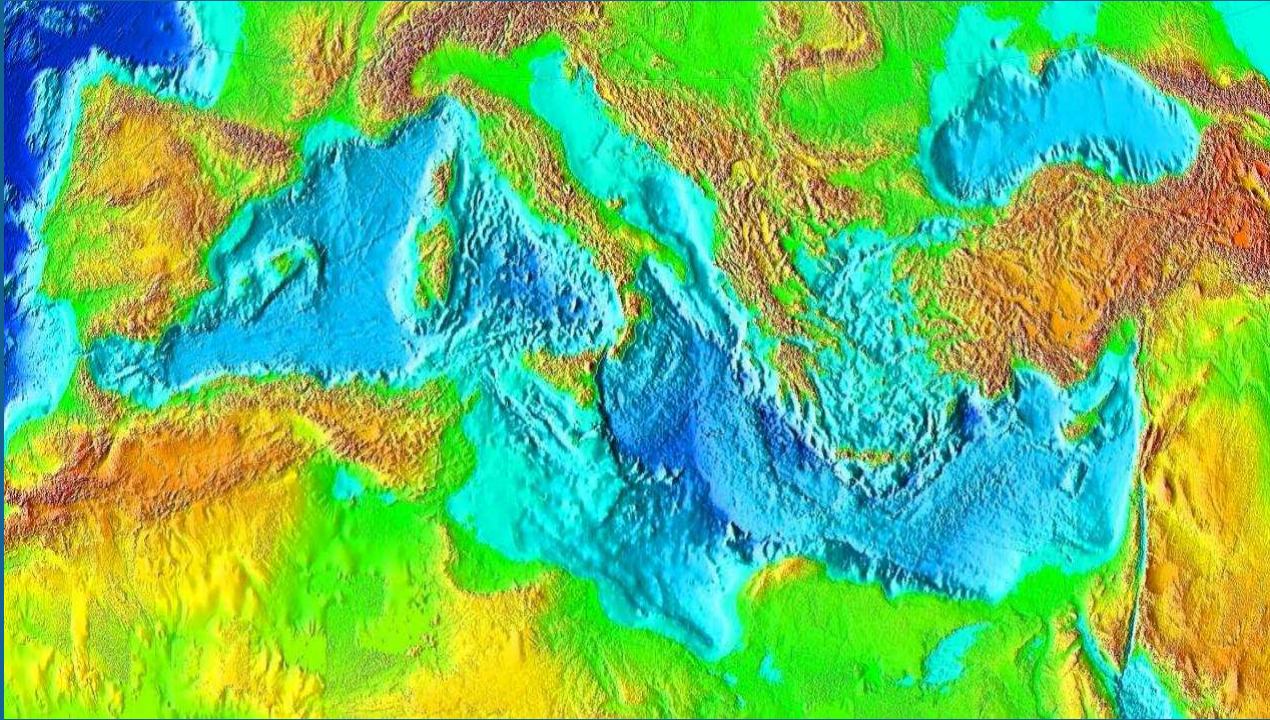


**DEUX PLAQUES S'ÉCARTENT**

**UN RIFT S'OUVRE  
LA MER L'ENVAHIT  
L'ÉVAPORATION LAISSE  
UNE COUCHE DE SEL**

**LE RIFT S'ENFONCE  
UNE NOUVELLE COUCHE  
SE DÉPOSE ETC.**





**LA CRISE MESSINIENNE (-5Ma)**

**GIBRALTAR SE FERME**

**L'ÉVAPORATION EST INTENSE**

**LA MÉDITERRANÉE  
DESCEND DE 1000 M  
LE FOND SE REMPLIT DE SEL  
(PARTIE ORIENTALE)**



## MONTS ZAGROS (IRAN)

UN (RARE) EXEMPLE  
D'AFFLEUREMENT DU SEL

LE GLACIER S'ÉCOULE  
À LA VITESSE DÉTERMINÉE  
PAR SA VISCOSITÉ  
(ÉLEVÉE -  $10^{17}$  Pa.s )

# COUCHE VS DÔME

ÉCOLE DES PONTS ET CHAUSSEES 11 JANVIER 2021

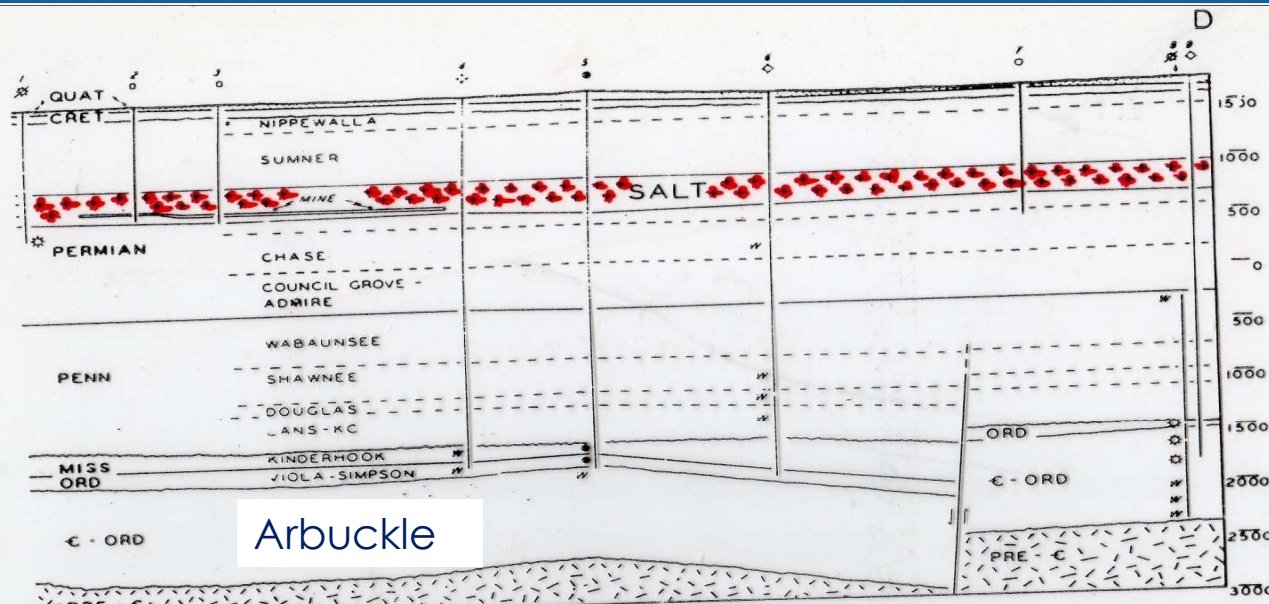


FIGURE 4.—Cross Section C-D, natural scale, near Lyons, Kansas. Length of section depicted is 1.7 miles. Wells and shafts are indicated in Appendix C. Also shown is the Lyons, Kansas mine of the Carey Salt Company in the Hutchinson Salt Member. Abbreviations used:

- |         |                                     |       |                            |
|---------|-------------------------------------|-------|----------------------------|
| QUAT    | water                               | MISS  | Mississippian -            |
| RET     | Quaternary, unconsolidated deposits | ORD   | Ordovician                 |
| PENN    | Cretaceous                          | C-ORD | Cambro-Ordovician          |
| LANS-KC | Pennsylvanian                       | PRE-C | Precambrian basement rocks |
|         | Lansing-Kansas City Group           |       |                            |
- Figures indicate distance in feet above or below mean sea level, indicated by zero.

**FORMATION HUTCHINSON (KS)**

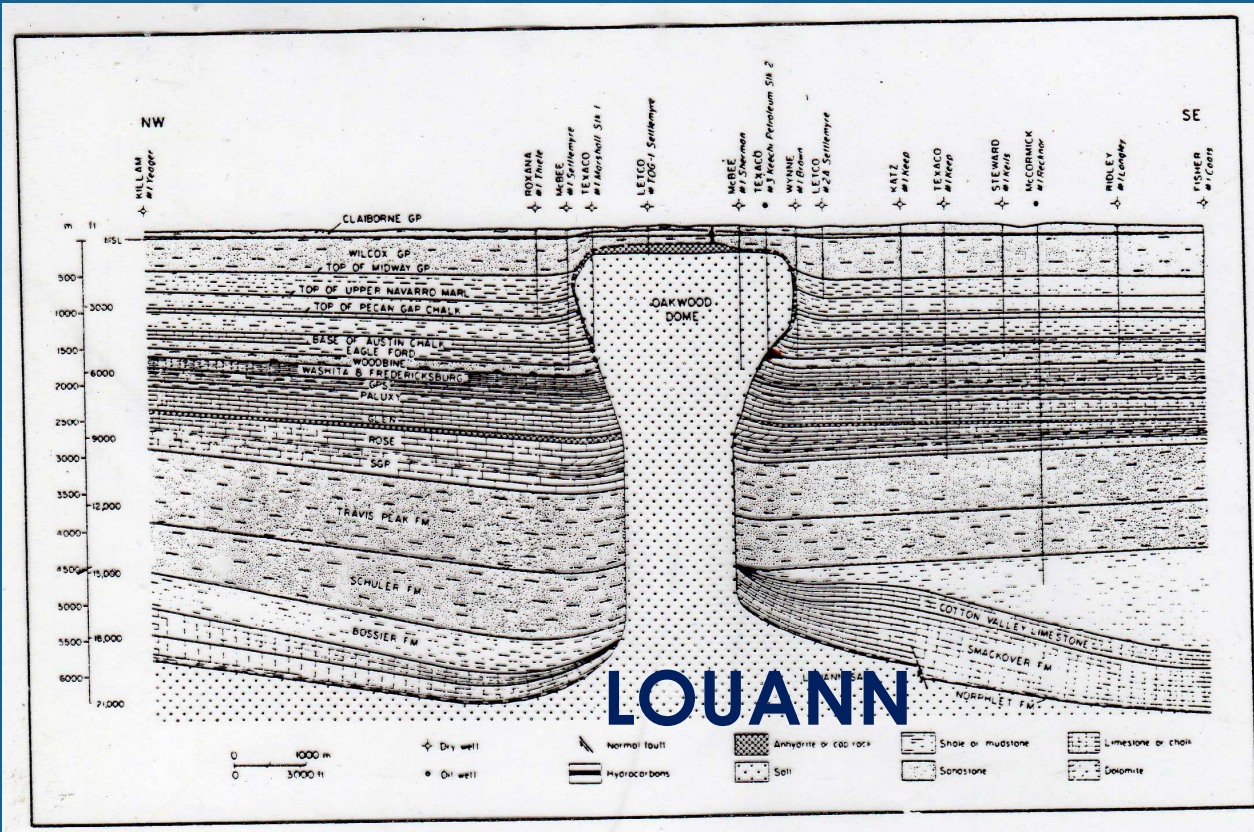
**COUCHE PEU ÉPAISSE (150 M)**  
**PEU PROFONDE (250 M)**

**QUASI HORIZONTALE**

**BIEN CONNUE**  
**(80 000 PUIITS DE GAZ OU**  
**PÉTROLE FORÉS**  
**VERS LA DOLOMIE ARBUCKLE,**  
**À 1000 M DE PROFONDEUR)**

From Walters, 1995





## DÔME D'OAKWOOD (TX)

LA COUCHE-MÈRE (LOUANN)  
EST À 6000 M DE PROFONDEUR

LE SEL, PLUS LÉGER (2160 KG/M<sup>3</sup>)  
MONTE DANS LES SÉDIMENTS  
ACCUMULÉS QUI, AYANT  
EXPULSÉ LEUR EAU, ONT UNE MASSE  
VOLUMIQUE DE 2300 KG/M<sup>3</sup>

(INSTABILITÉ DE RAYLEIGH-TAYLOR)

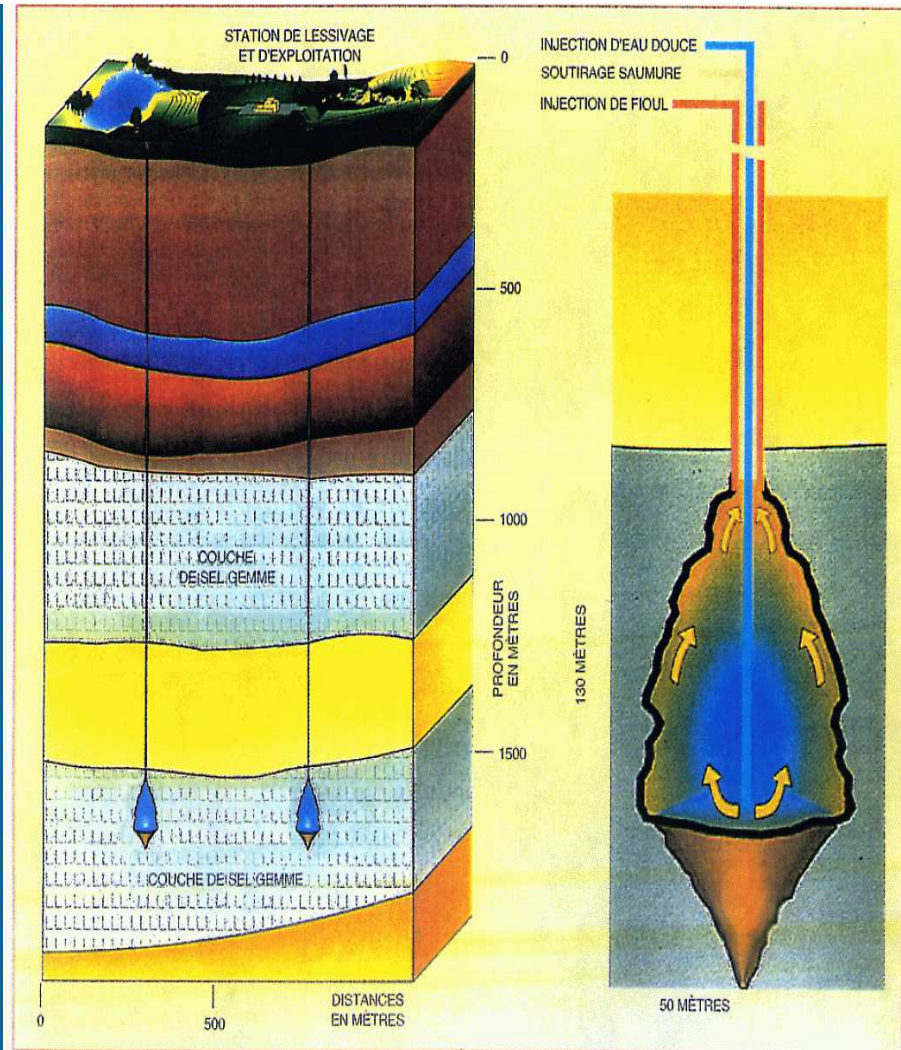


# MINES "SÈCHES" DE SEL



MINES "SÈCHES" DE SEL (VARANGÉVILLE)

- ▶ Le sel dans le sous-sol
- ▶ Lessivage
- ▶ Trois familles de cavernes
- ▶ Mécanique : Rupture fragile
- ▶ Mécanique : Fluage
- ▶ Mécanique : un essai in situ
- ▶ L'avenir des cavernes



**STORENGY (ETREZ, AIN)**

**ON ACCÈDE À LA FORMATION SALIFÈRE  
PAR UN Puits CUVELÉ-CIMENTÉ,  
"SABOT" SOUS LE TOIT DU SEL (1300 M)**

**DANS LEQUEL ON DESCEND UN 2<sup>ème</sup> TUBE**

**L'EAU DOUCE EST INJECTÉE  
PAR CE TUBE CENTRAL (100-200 M<sup>3</sup>/H)**

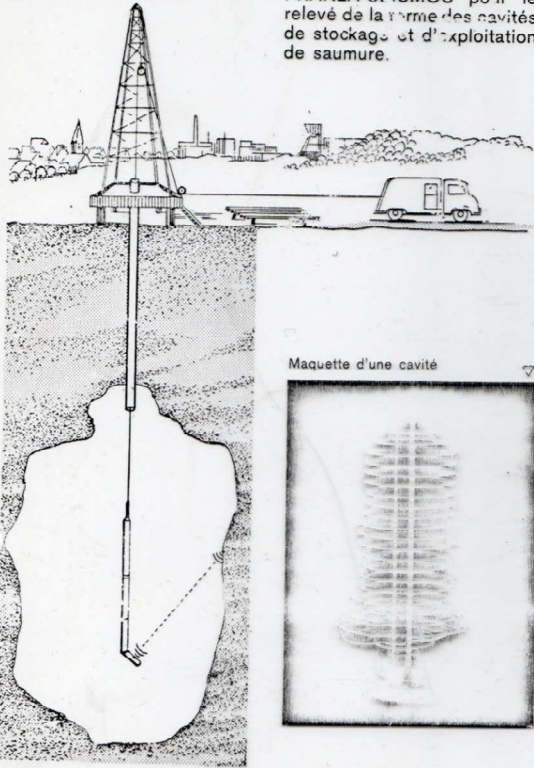
**LA SAUMURE REMONTE PAR L'ANNULAIRE**

**IL FAUT 8 M<sup>3</sup> D'EAU DOUCE POUR CRÉER  
1 M<sup>3</sup> DE TROU, ET QUELQUES ANNÉES  
POUR OBTENIR UNE CAVITÉ DE 400,000 M<sup>3</sup>**



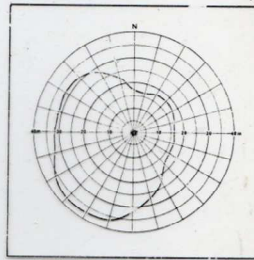
## ECHO-LOG

Le procédé échométrique de PRAKLA-SISMOS pour le relevé de la forme des cavités de stockage et d'exploitation de saumure.

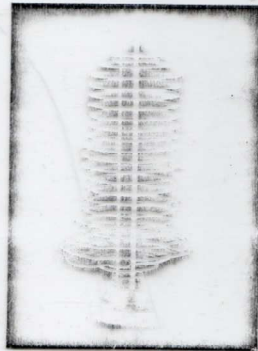


Représentation des résultats

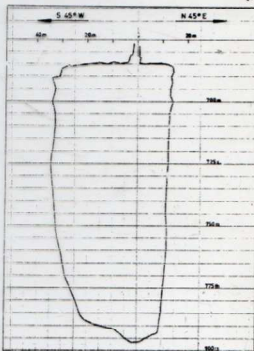
Coupe horizontale



Maquette d'une cavité



Coupe verticale

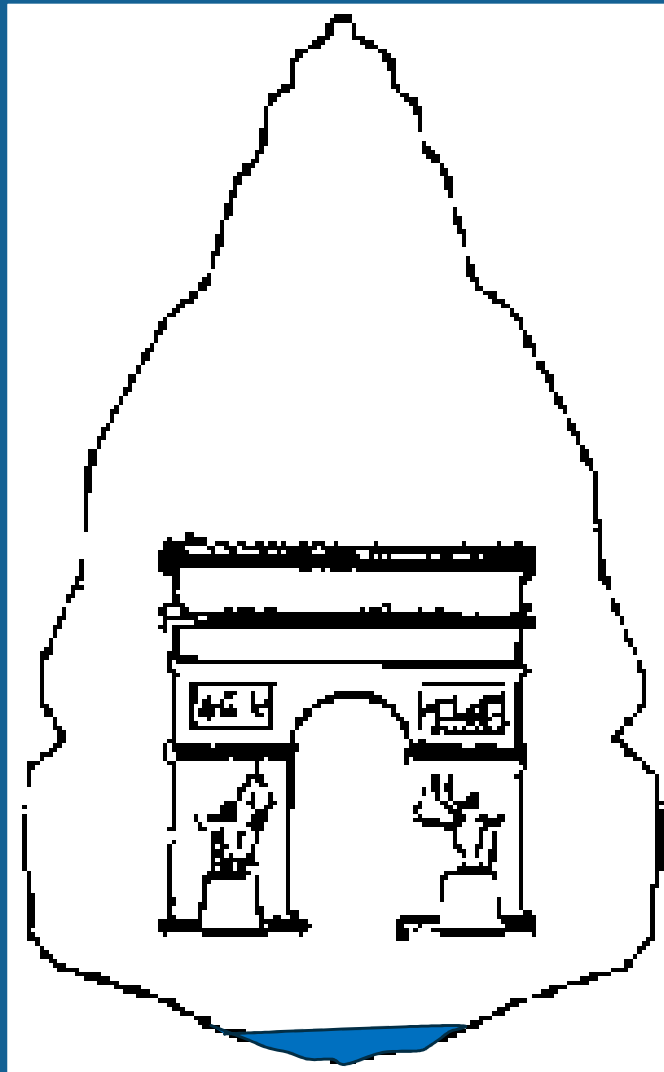


**LA FORME DE LA CAVITÉ  
SE MESURE AU MOYEN  
D'UN SONAR ORIENTABLE  
EN AZIMUT ET EN PROFONDEUR**

**DESCENDU DANS LA CAVERNE  
PLEINE DE SAUMURE**

**PRÉCISION 1 À 2% SUR LE RAYON  
POUR UNE FORME CONVEXE**

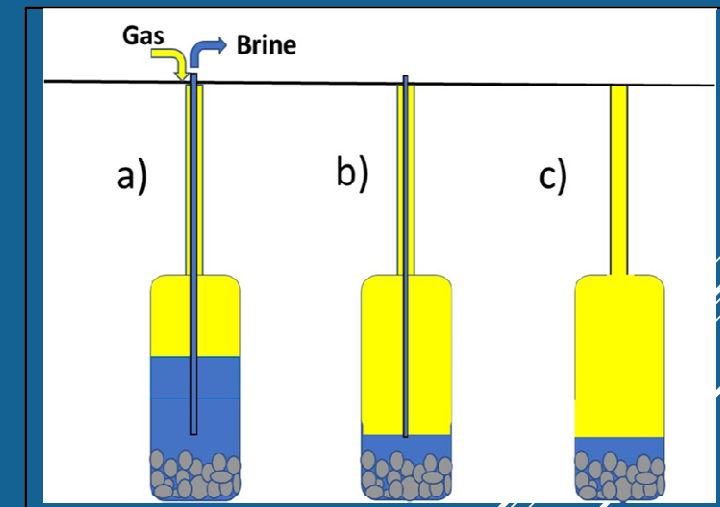


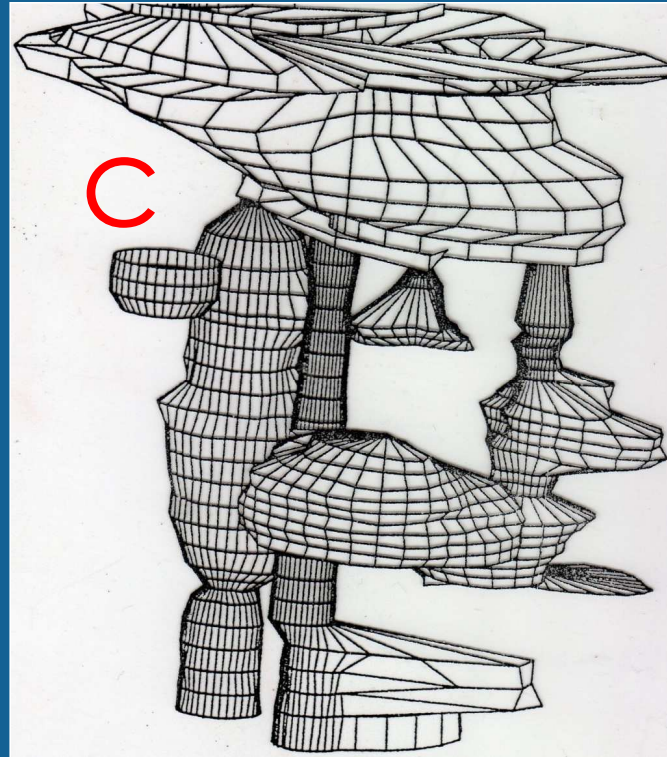
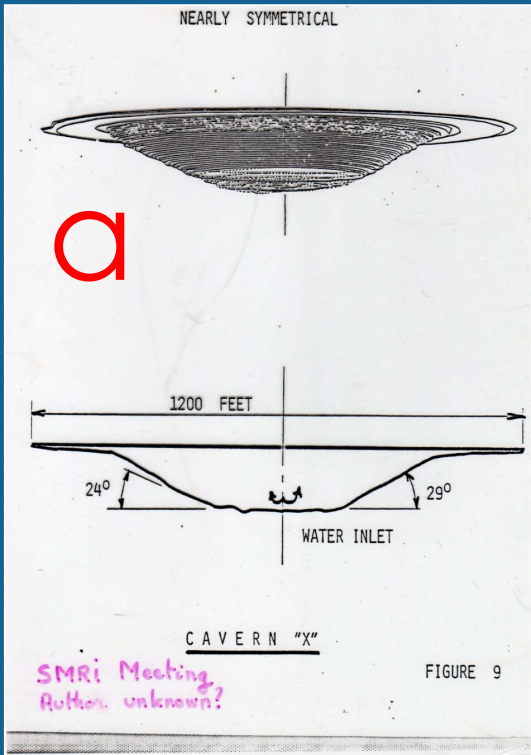


**UNE CAVITÉ  
DE STORENGY  
(GAZ NATUREL)**

**À ETREZ (AIN)**

**ON ENTRE LE  
GAZ PAR  
L'ANNULAIRE  
EXTÉRIEUR**





## FORMES INHABITUELLES

a. WEST HACKBERRY,  $L_a$ ,  
 $\varphi = 360$  M

b.  $H = 600$  M

c. MULTI-CAVITÉS ;  
PRÉSENCE  
DE SELS DE K ET Mg  
TRÈS SOLUBLES



- ▶ Le sel dans le sous-sol
- ▶ Lessivage
- ▶ **Trois familles de cavernes**
- ▶ Mécanique : Rupture fragile
- ▶ Mécanique : Fluage
- ▶ Mécanique : un essai in situ
- ▶ L'avenir des cavernes

# TROIS TYPES DE PRODUITS TROIS FAMILLES DE CAVITÉS

22

ÉCOLE DES PONTS ET CHAUSSEES 11 JANVIER 2021

# LES HYDROCARBURES SONT SURTOUT COMPOSÉS D'ALCANES

## ALCANES

$n = 1$  :  $\text{CH}_4$  (méthane)

$n = 2$  :  $\text{C}_2\text{H}_6$  (éthane)

$n = 3$  :  $\text{C}_3\text{H}_8$  (propane)

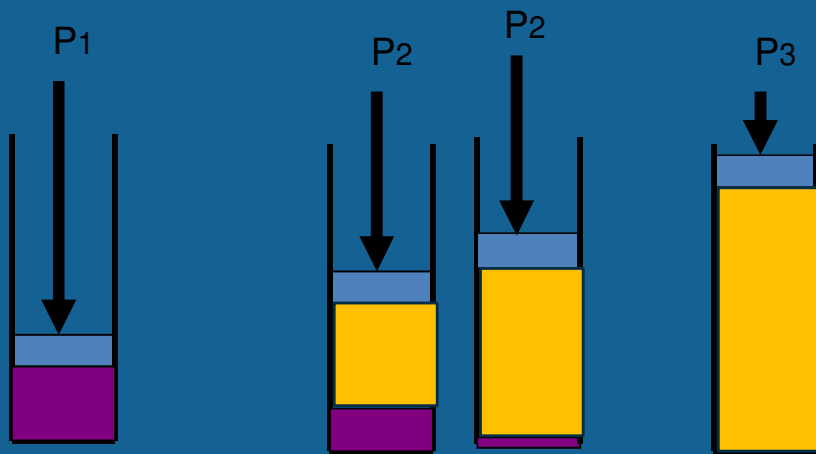
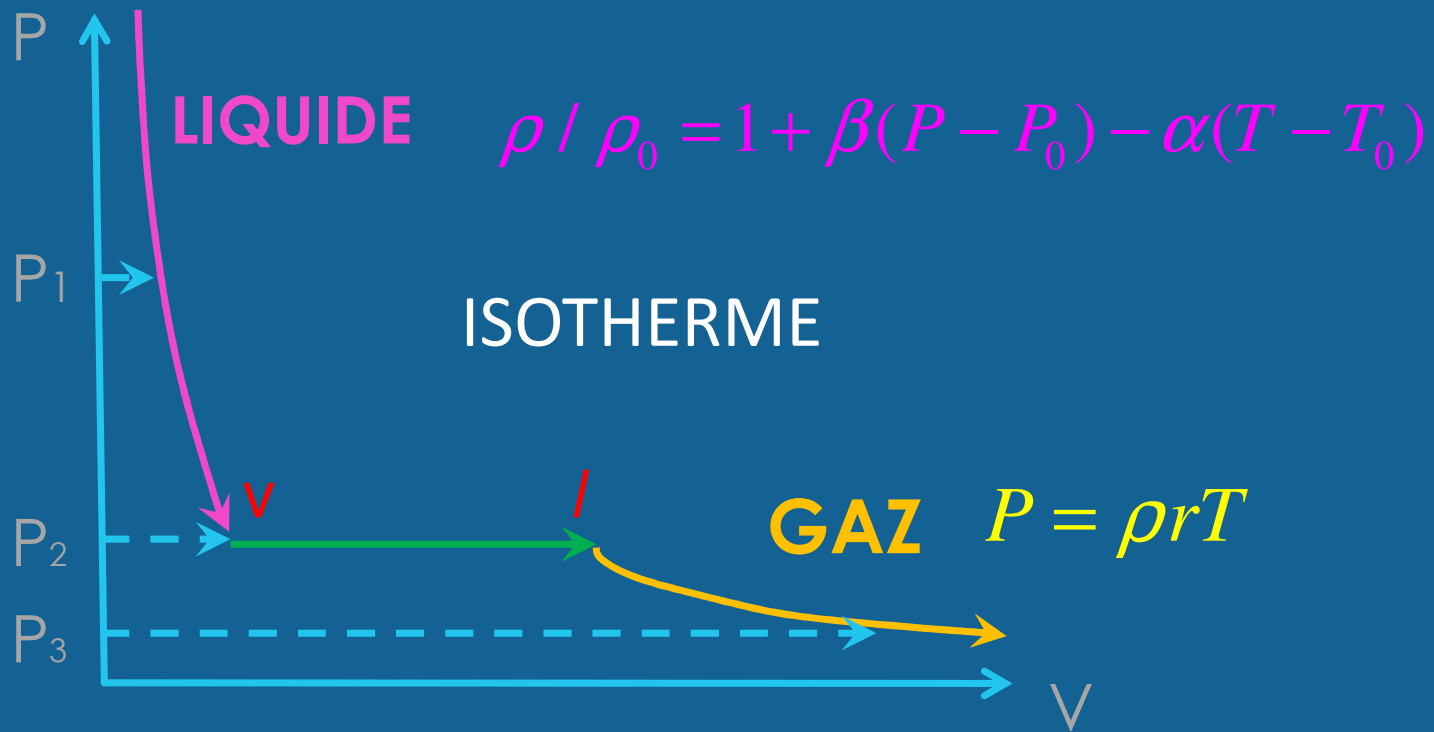
$n = 4$  :  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  (butane)

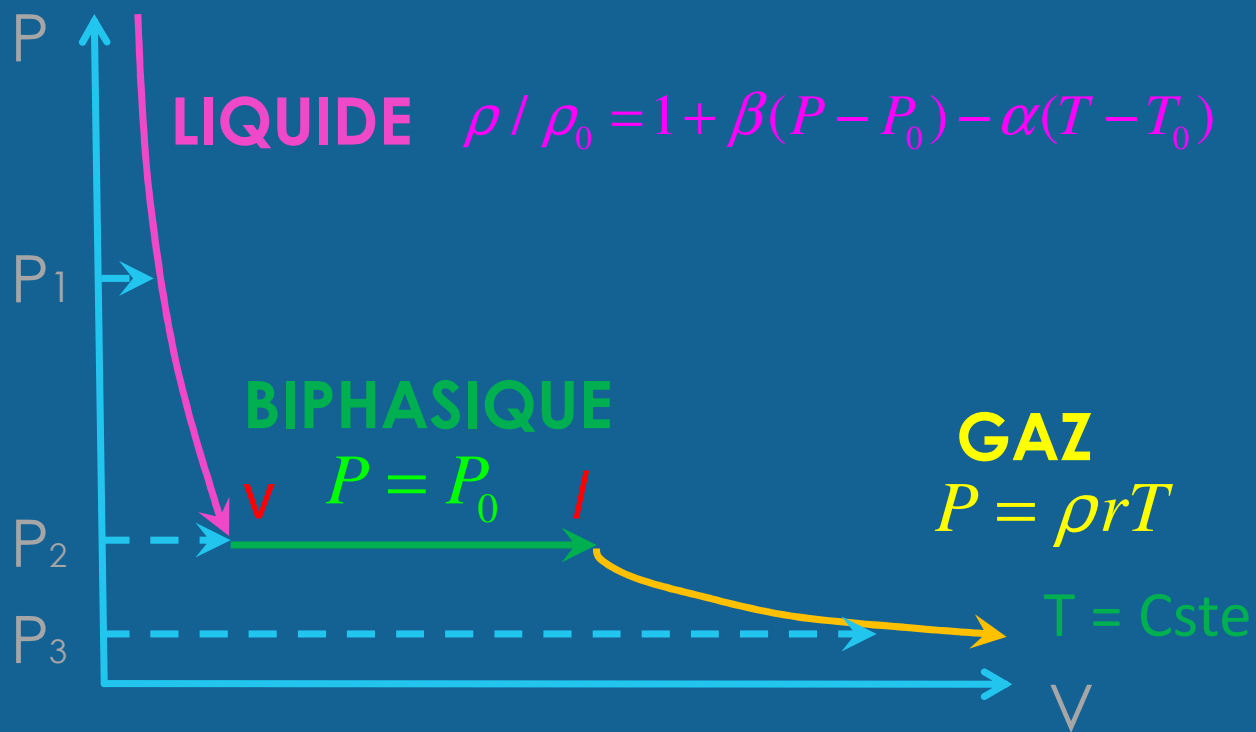
$n = 5$  :  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  (pentane)

$n = 6$  :  $\text{C}_6\text{H}_{14}$  (hexane)

etc.





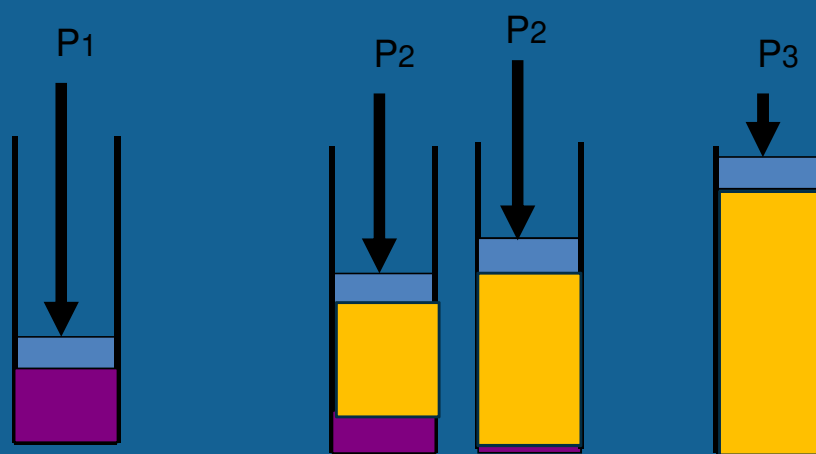


À TEMPÉRATURE ORDINAIRE,

LE GAZ NATUREL EST STOCKÉ GAZEUX

LES GPL, BIPHASIQUES

LE PÉTROLE, LIQUIDE

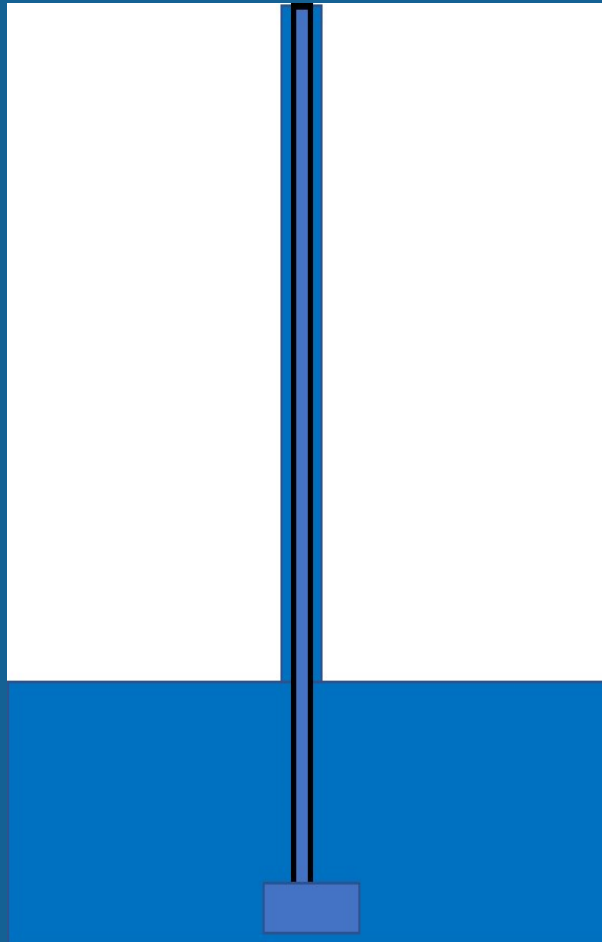
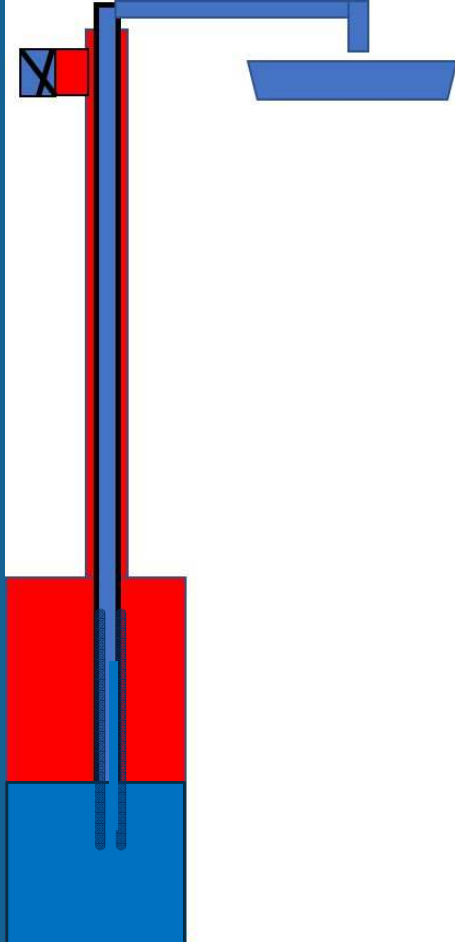
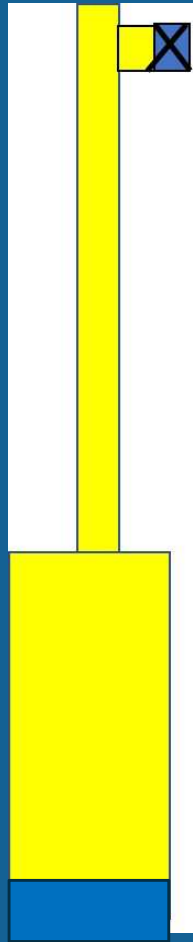


Techniques \ Produits		Produits		
		Gaz naturel	GPL (LPG/NGL)	Liquides (Brut et produits pétroliers)
Souterrain	Aquifères profonds	0,15 à 0,30 € / Nm <sup>3</sup> utile	-	30 à 70 € / m <sup>3</sup>
	Cavités salines	0,40 à 0,80 € / Nm <sup>3</sup> utile	75 à 150 € / m <sup>3</sup>	
	Cavités minées non revêtues (en bonnes conditions géologiques)	Dépendant de la pression minimale et maximale atteinte	600 à 900 € / m <sup>3</sup>	-
			250 à 450 € / m <sup>3</sup>	-
		225 à 375 € / m <sup>3</sup>	-	
		200 à 300 € / m <sup>3</sup>	100 à 200 € / m <sup>3</sup>	
		125 à 200 € / m <sup>3</sup>	75 à 150 € / m <sup>3</sup>	
Aérien	Stockage enterré 2 000 to 4 000 m <sup>3</sup>	-	1 200 à 1 800 € / m <sup>3</sup>	-
	Bacs aériens	-	450 à 600 € / m <sup>3</sup>	75 à 150 € / m <sup>3</sup>
	Bacs réfrigérés	600 à 900 € / m <sup>3</sup> GNL	450 à 600 € / m <sup>3</sup>	-

GEOSTOCK (A. RÉVEILLÈRE)

1 M3 = 6 BBLs

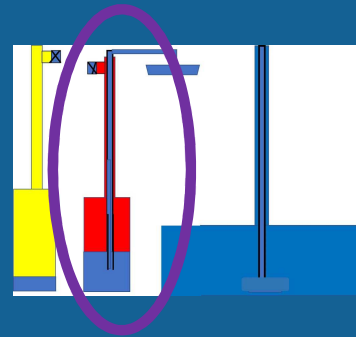
1 BBL = 40 À 100 \$



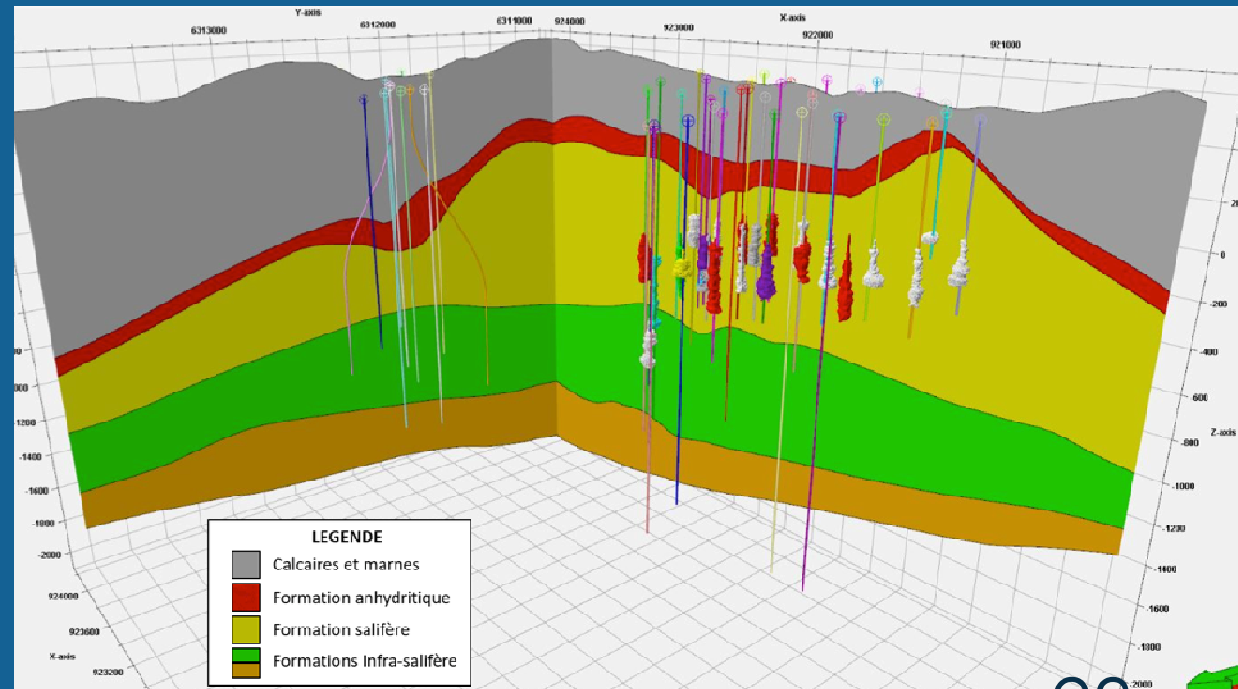
**STOCKAGE DE GAZ  
"BOUTEILLES »  
ENTRE  $P_{min}$  ET  $P_{max}$   
( $PV = mrT$ )**

**STOCKAGE DE LIQUIDES  
ET LIQUÉFIÉS  
PAR « BALANCEMENT »  
 $P(\text{MPa}) = 0,012 Z(\text{m})$**

**PRODUCTION SAUMURE  
DÉFRUITEMENT MAXIMAL  
 $P(\text{MPa}) = 0,012 Z(\text{m})$**

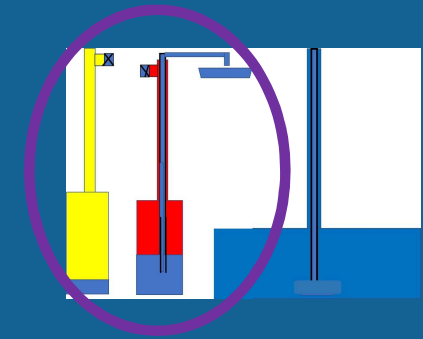
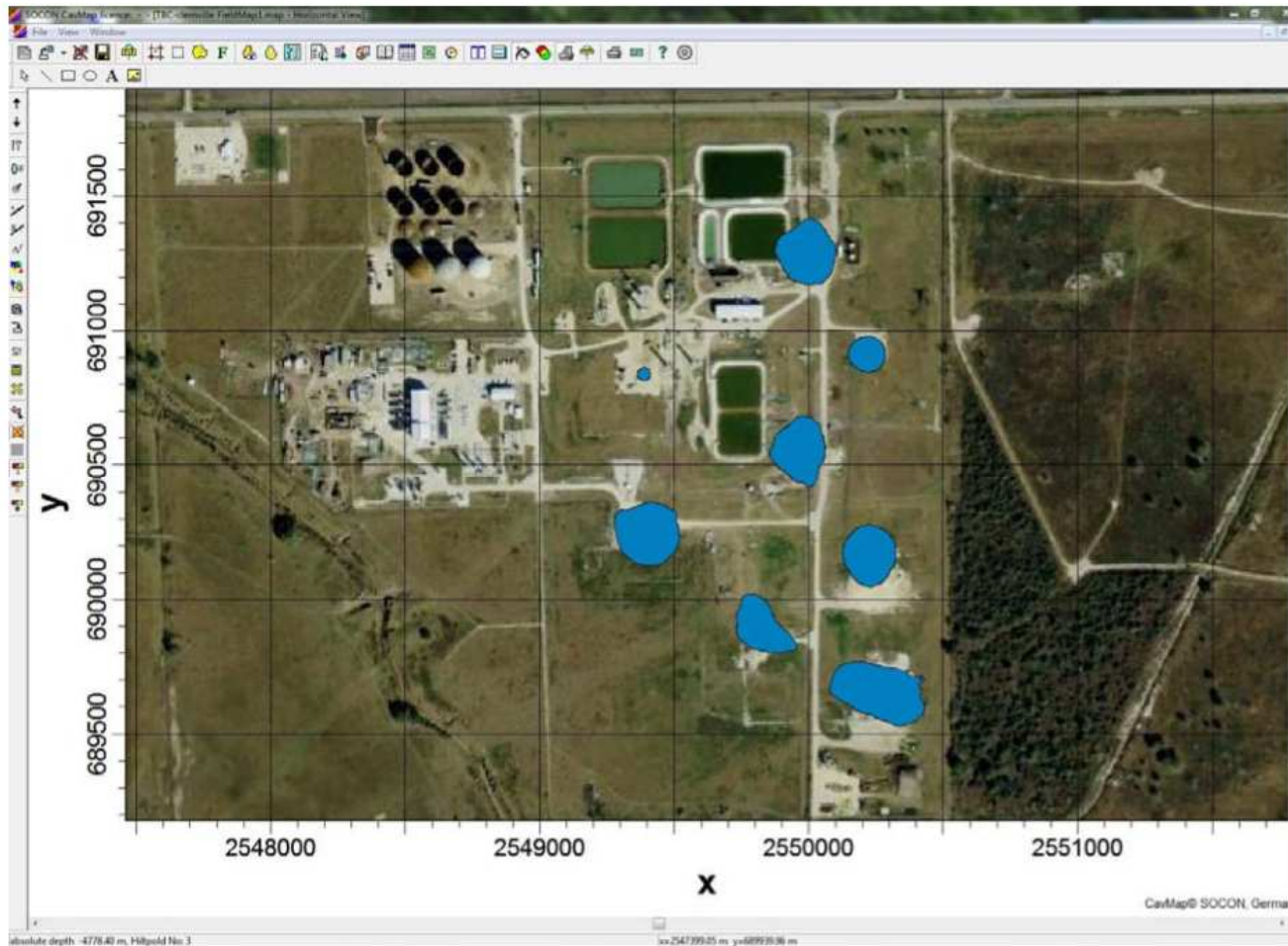


# Station du stockage de liquides (10 millions tonnes) à Manosque (Haute Provence)



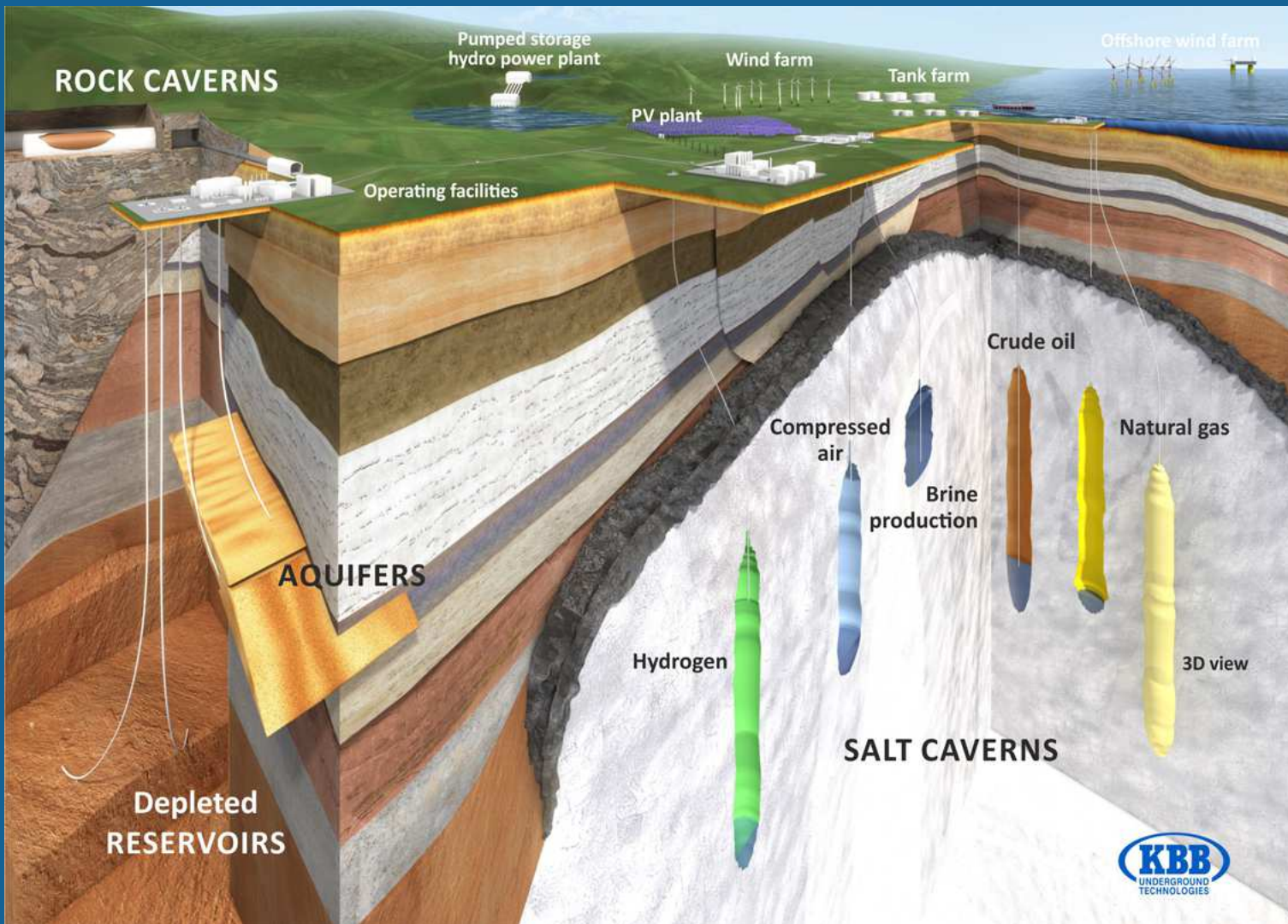
**GEOSTOCK**





**Stockage de  
Gaz naturel  
et GPL  
À Markham (TX)  
(Mc Cartney,  
2002)**

Stockage de Markham, Texas. McCartney et al., 2002



## Gaz

Gaz naturel  
Hélium  
Air comprimé  
Hydrogène

## Liquides

Brut  
Naphta  
Essence  
Kérosène

## Liquéfiés

Propane  
Butane

## Super critiques

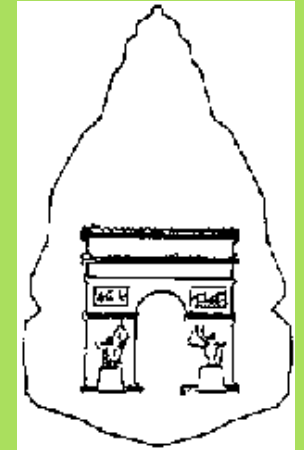
Éthylène  
Propylène  
CO<sub>2</sub> ?





# Stockage de Gaz naturel

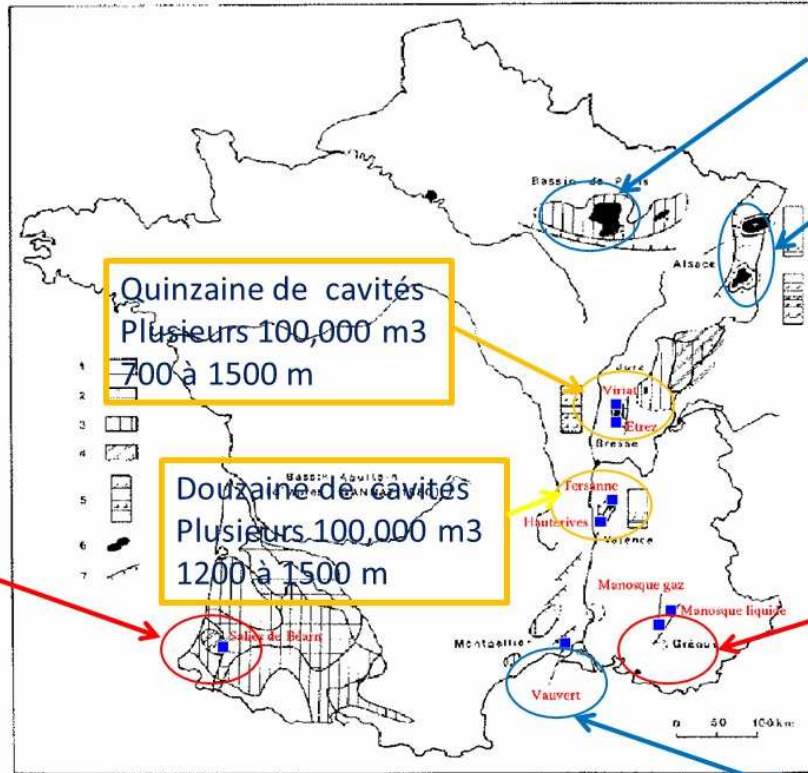
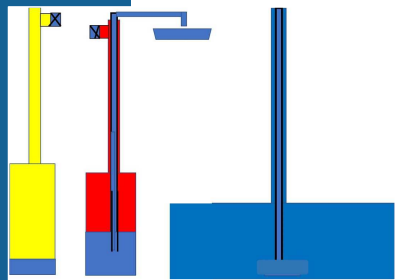
à



**Étrez, Ain  
(Storengy)**

31

# GISEMENTS DE SEL EN FRANCE



4 + cavités  
Petit volume  
350 à 700 m

Quinzaine de cavités  
Plusieurs 100,000 m<sup>3</sup>  
700 à 1500 m

Douzaine de cavités  
Plusieurs 100,000 m<sup>3</sup>  
1200 à 1500 m

Certaines de cavités  
100,000 m<sup>3</sup> à  
1,000,000 m<sup>3</sup>  
200 à 300 m

Pas de cavités  
Potentiel  
intéressant

40 cavités  
Plusieurs  
100,000 m<sup>3</sup>  
600 à 1300 m

Plusieurs cavités  
Plusieurs  
100,000 m<sup>3</sup>  
2000 m et plus

Fond de carte  
D'après Friès, 1981

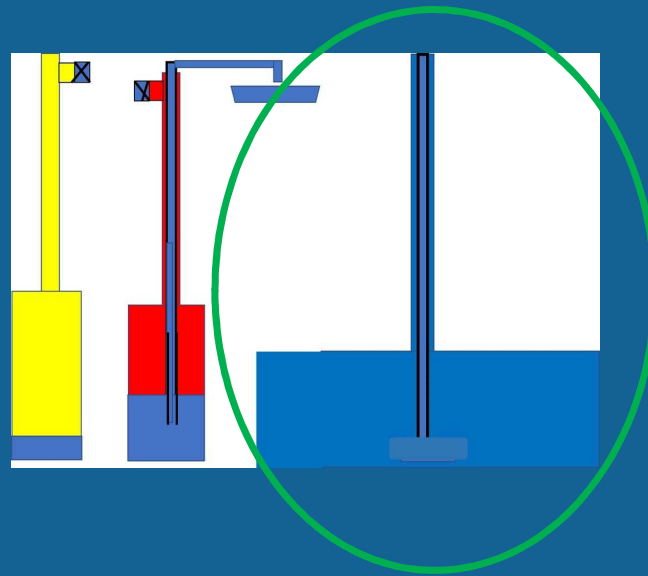
— Les gisements de sel en France et les possibilités de stockages d'hydrocarbures.  
1, bassins oligocènes; 2, bassins liasiques; 3, bassins d'âge keuper; 4, bassins d'âge muschelkalk; 5, niveaux salifères superposés; 6, zone favorable au stockage (épaisseur de sel supérieure à 100 m, profondeur supérieure à 1600 m, pureté supérieure à 80 %); 7, taille majeure.

**STOCKAGE DE GAZ**  
**“BOUTEILLES”**  
**ENTRE P<sub>min</sub> ET P<sub>max</sub>**  
**(PV = mrT)**

**STOCKAGE DE LIQUIDES**  
**PAR « BALANCEMENT »**  
**P(MPa) = 0,012 Z(m)**

**PRODUCTION SAUMURE**  
**DÉFRUITEMENT MAXIMAL**  
**P(MPa) = 0,012 Z(m)**

- ▶ Le sel dans le sous-sol
- ▶ Lessivage
- ▶ Trois familles de cavernes
- ▶ Mécanique : Rupture fragile
- ▶ Mécanique : Fluage
- ▶ Mécanique : un essai in situ
- ▶ L'avenir des cavernes



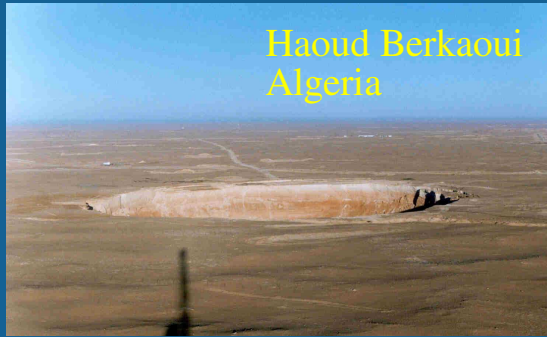
**LES CAVERNES D'EXPLOITATION DE SAUMURE RECHERCHENT  
LE TAUX D'EXTRACTION MAXIMAL, DONC  
LE RATIO DIAMÈTRE / PROFONDEUR LE PLUS ÉLEVÉ**

**PARFOIS, LE DIAMÈTRE DEVIENT TROP GRAND ...**





Cargill Sinkhole  
Kansas



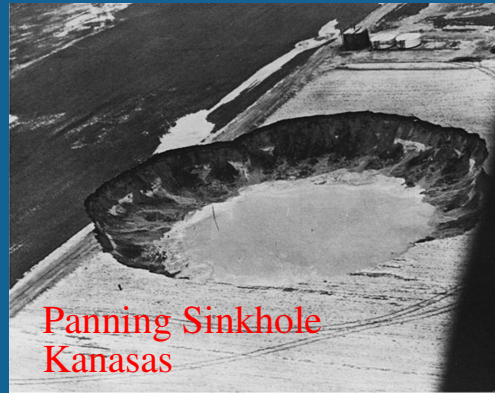
Haoud Berkaoui  
Algeria



Bayou-Corne  
Louisiana



Cerville, France



Panning Sinkhole  
Kansas



Denver, Texas



Bueurali  
Russia



Gellenoncourt  
France



La Rape  
France

62 meters

March 2005

# EXPLOITATIONS DE SAUMURE

## EXEMPLES DE CRATÈRES

### GRAND RAPPORT

### DIAMÈTRE / PROFONDEUR

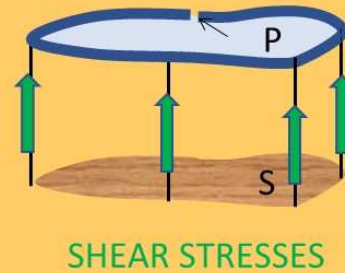
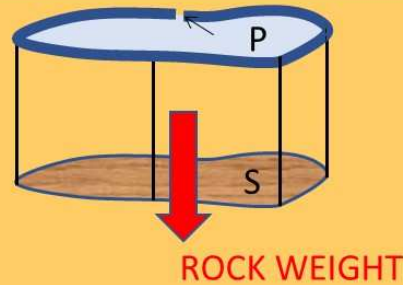
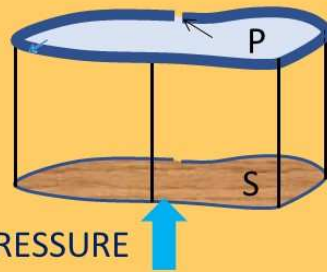
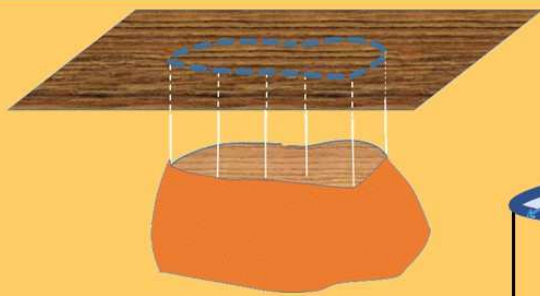
35





Cargill salt plant, Hutchinson, Kansas, 1974.  
Some 14 hrs after the collapse, the sinkhole diameter was 200 ft.  
(Photograph by *Hutchinson News*, October 21, 1974.)





BRINE (OR AIR) PRESSURE

ROCK WEIGHT

SHEAR STRESSES

$$SH\gamma_R = SH\gamma_B + P \int_0^H \tau(z) dz$$

LE CYLINDRE AU-DESSUS DE LA CAVERNE EST SOUMIS :

- À SON POIDS
- À LA PRESSION DE SAUMURE
- AUX CISAILLEMENTS SUR LE POURTOUR, BORNÉS PAR UN CRITÈRE DE COULOMB

$$\tau(z) < C + \text{tg}\phi \cdot \gamma z$$

$$SH(\gamma_R - \gamma_B) = P(CH + \text{tg}\phi\gamma_R H^2 / 2)$$

(LE POIDS EST PROPORTIONNEL À LA SURFACE DU CONTOUR  $S$ )

LA RÉULTANTE DES CISAILLEMENTS SUR LE POURTOUR À SON PÉRIMÈTRE  $P$

LA FORME DU CYLINDRE INSTABLE EST OBTENUE POUR LE MAXIMUM DE  $S/P$ )

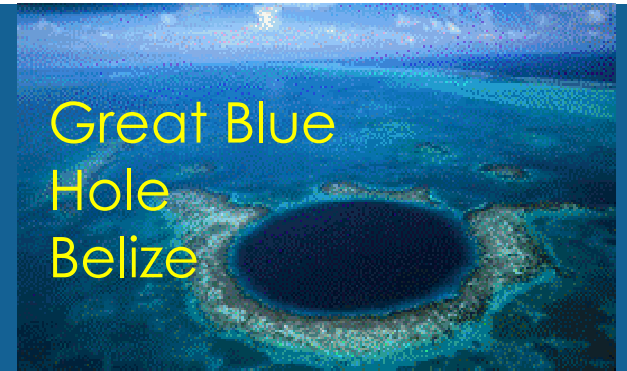
Guatemala City  
(volcano ash)



Haoud Berkaoui  
Algeria



Great Blue  
Hole  
Belize



Cerville  
France



The circular shape maximizes the ratio weight/shear strength, i.e., the ratio area/perimeter.  
(« Dido's problem »)

Denver  
Texas



Bucourouli  
Russia



Gellenoncourt  
France



La Rape  
France



GROUND LEVEL STABLE R UNSTABLE R

1 000 m

2 000 m

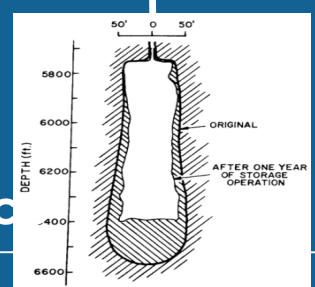
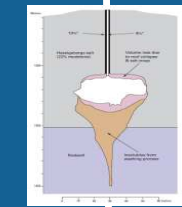
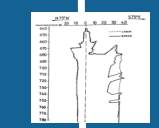
Huntorf

Kiel

Eminenc

Cerville

Haoud Berkadui



GAZ

SAUMURE

$$(\gamma_R - P_{fl}/H)R < 2C + \gamma_R H \operatorname{tg} \phi$$

H

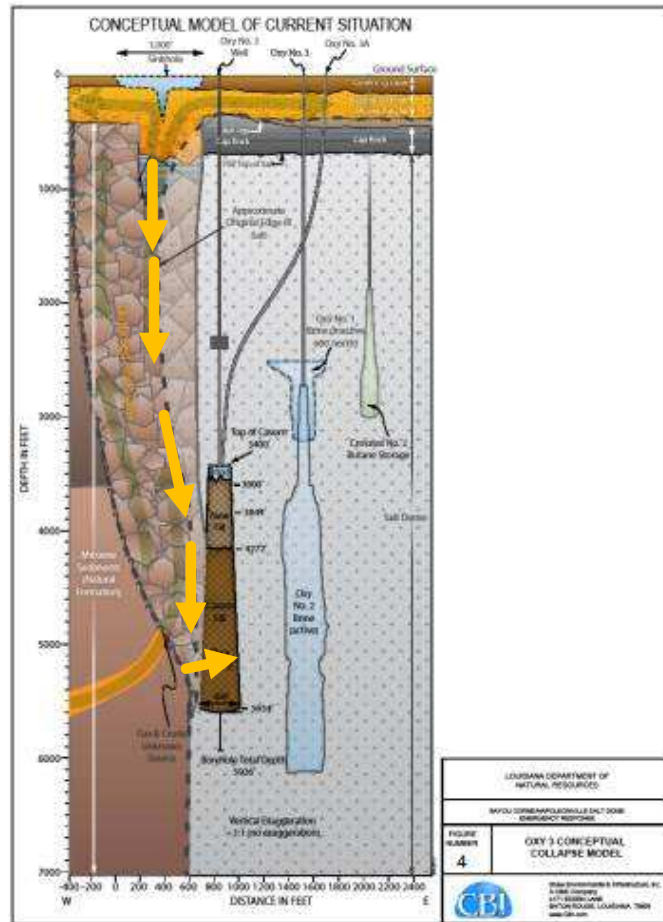
39

# MÉCANIQUE

UN CAS EXCEPTIONNEL: BAYOU CORNE



5000 ft



**LES SÉDIMENTS ACCUMULÉS  
LE LONG DU FLANC DU DÔME  
S'ÉCOULENT  
VERS LA BRÈCHE OUVERTE  
AU FOND DE LA CAVERNE  
QU'ILS REMPLISSENT  
PROGRESSIVEMENT**





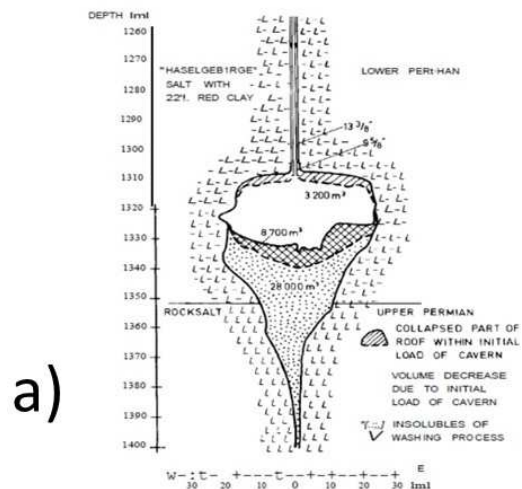
FROM TIME TO TIME, SINKHOLE BOTTOM SLID  
TO THE BREACH AT THE CENTER OF THE SINKHOLE

43

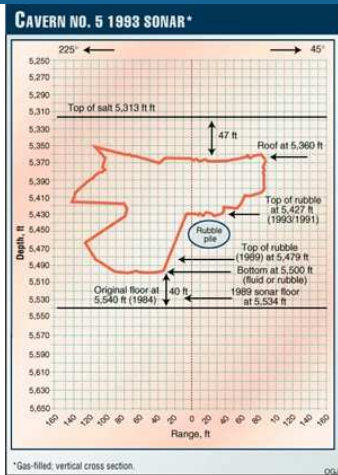
# MÉCANIQUE

## 2. LES DÉSORDRES LOCAUX

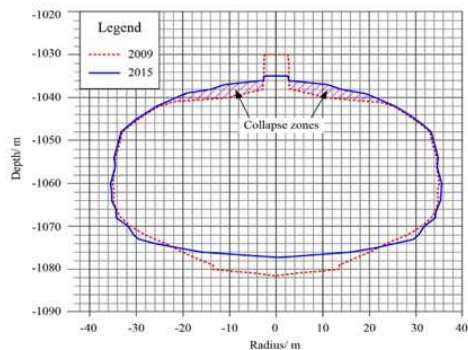




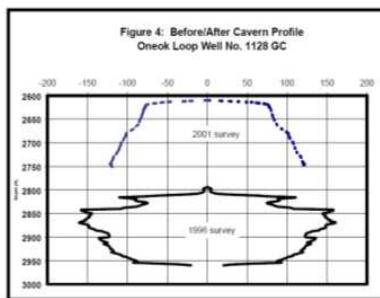
a)



b)



c)



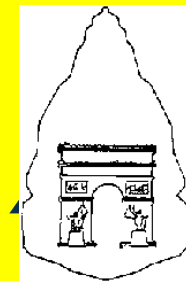
d)

# DES CHUTES DE TOIT ONT ÉTÉ OBSERVÉES DANS QUELQUES CAVERNES

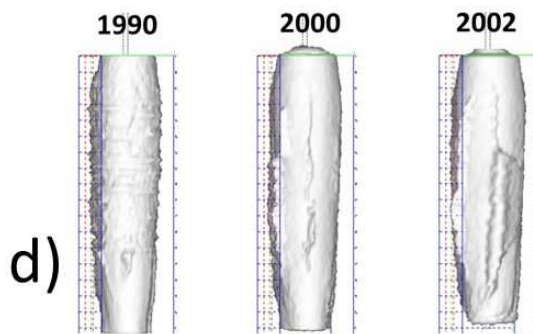
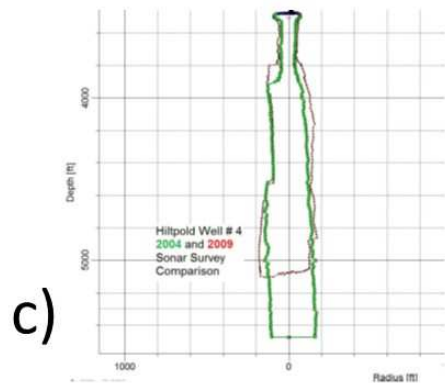
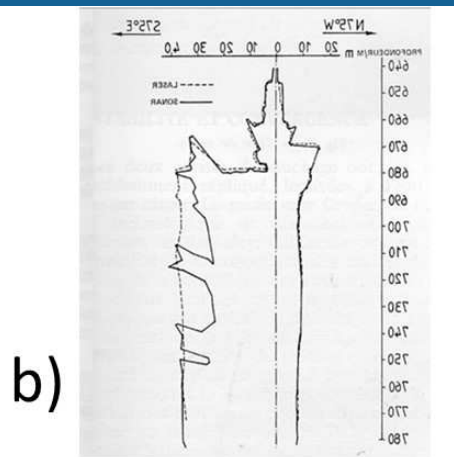
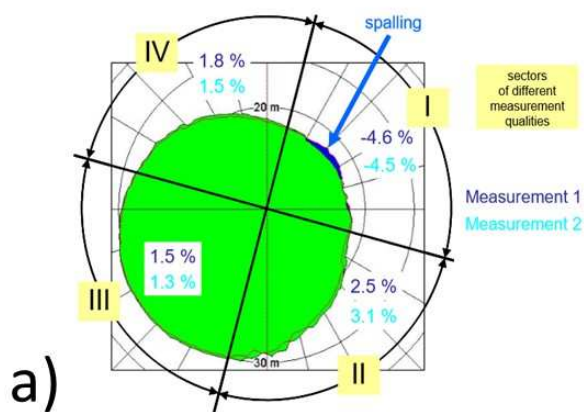
## LES 4 CONDITIONS SUIVANTES ÉTAIENT REMPLIES

1. TOIT DE GRANDE PORTÉE
2. TOIT RELATIVEMENT PLAT
3. TOIT DU SEL FEUILLETÉ
4. PRESSION TRÈS BASSE

→ AVANTAGE DE LA FORME CONIQUE !



- a) Kiel K 101 (Röhr, 1974)
- b) Regina South n° 5 (Crossley, 1998)
- c) Jintan JK-A (Wang et al., 2018),
- d) Oneok n° 1128 (Johnson, 2003).



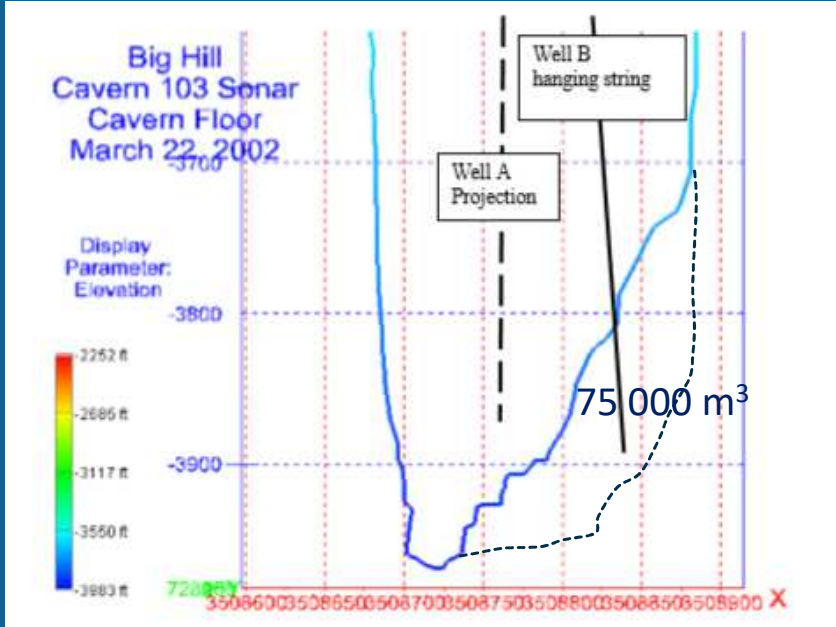
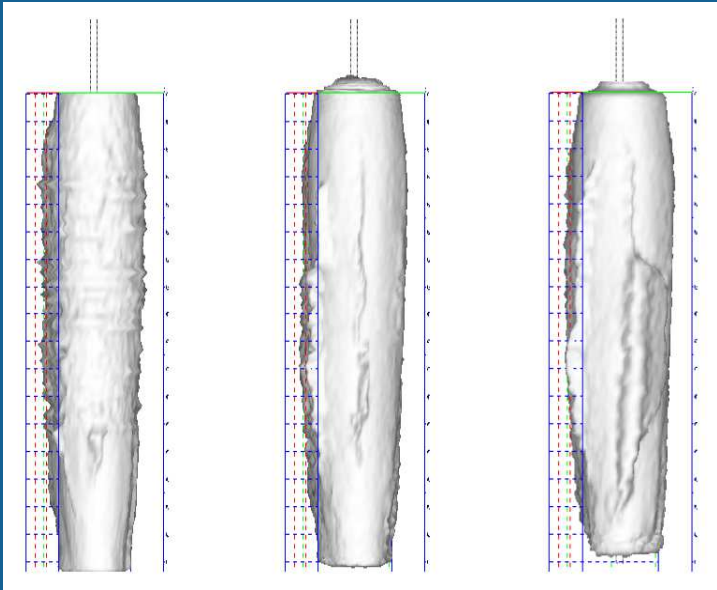
- a) Lille Torup T0 6 test (*Rokahr et al., 2007*)
- b) Huntorf NK1 (*Quast, 1983*)
- c) Markham Hillpold 4 (*McCartney et al., 2012*)
- d) Big Hill 103 (*Munson et al., 2004*).

**LES CHUTES DE BLOCS  
SONT FRÉQUENTES ET NE  
POSENT PROBLÈME QUE SI ELLES  
SONT MASSIVES**

**QUELQUES MÉCANISMES :**

**CHANGEMENT DE POUSSÉE  
D'ARCHIMÈDE LORS DU  
REPLISSAGE EN GAZ**

**ZONES « ANORMALES » DANS  
LES DÔMES (INTERFACES ENTRE  
SPLINES)**

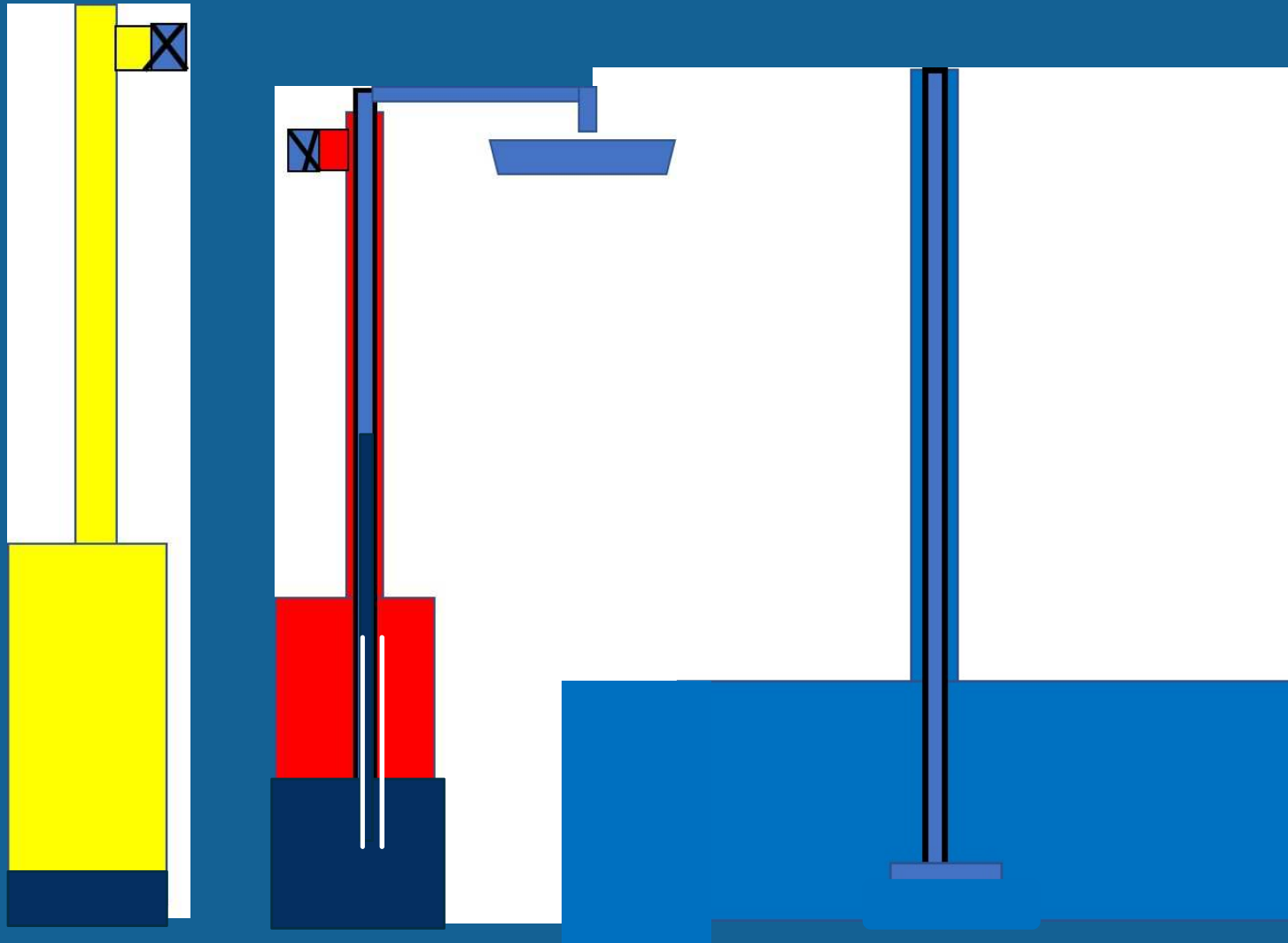


- ▶ Le sel dans le sous-sol
- ▶ Lessivage
- ▶ Trois familles de cavernes
- ▶ Mécanique : Rupture fragile
- ▶ Mécanique : Fluage
- ▶ Mécanique : un essai in situ
- ▶ L'avenir des cavernes

# MÉCANIQUE

## 3. POURQUOI LES CAVERNES SE REFERMENT TOUJOURS



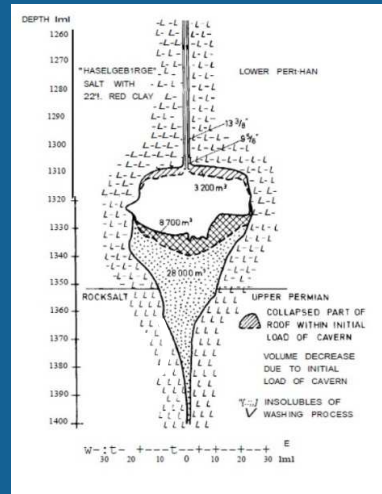
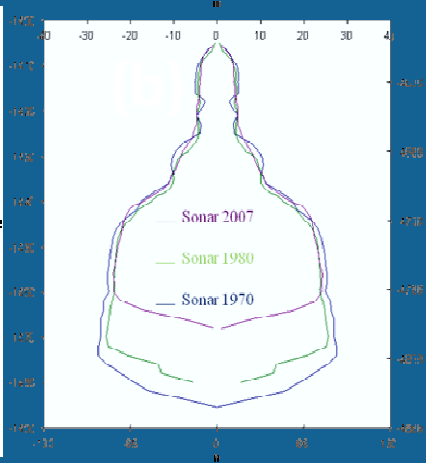
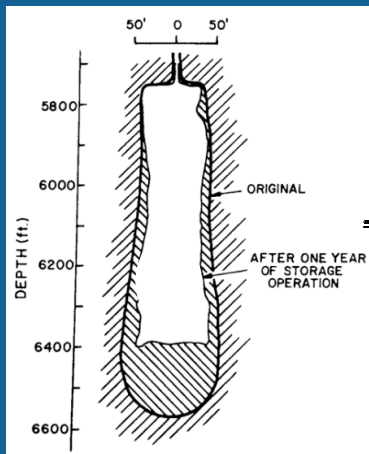


**STOCKAGE DE GAZ  
"BOUTEILLES »  
ENTRE  $P_{min}$  ET  $P_{max}$   
( $PV = mrT$ )**

**STOCKAGE DE LIQUIDES  
PAR « BALANCEMENT »  
 $P(\text{MPa}) = 0,012 Z(\text{m})$**

**PRODUCTION SAUMURE  
DÉFRUITEMENT MAXIMAL  
 $P(\text{MPa}) = 0,012 Z(\text{m})$**

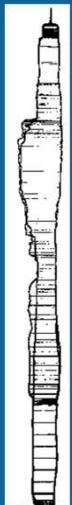
50



**PLUSIEURS CAS DE FERMETURE RAPIDE (FLUAGE) SONT CONNUS (> 1% PAR AN)**

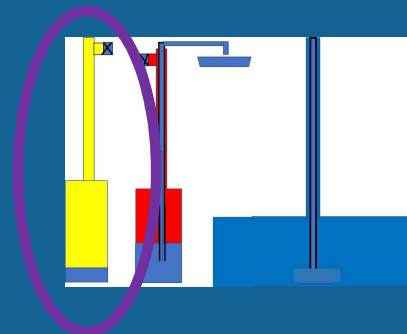
**PRESQUE TOUJOURS :**

**PROFONDEUR > 1300 m  
PRESSION INTERNE  
FAIBLE (STOCKAGE GAZ)**



(d)

- a) Eminence Salt Dome 1 (*Serata and Cundey, 1979*);
- b) Tersanne TE02 (*Hévin et al., 2007*)
- c) Kiel K 101 test (*Röhr, 1974*)
- d) Markham 5, (*Cole, 2002*).





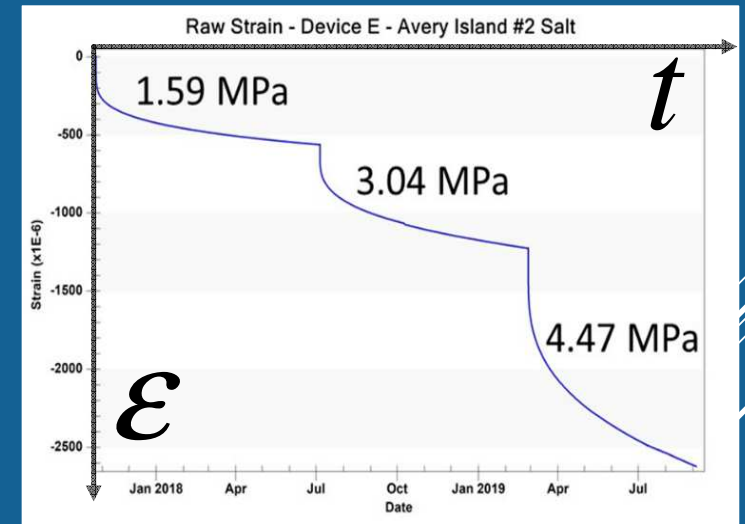
# ESSAIS DE FLUAGE



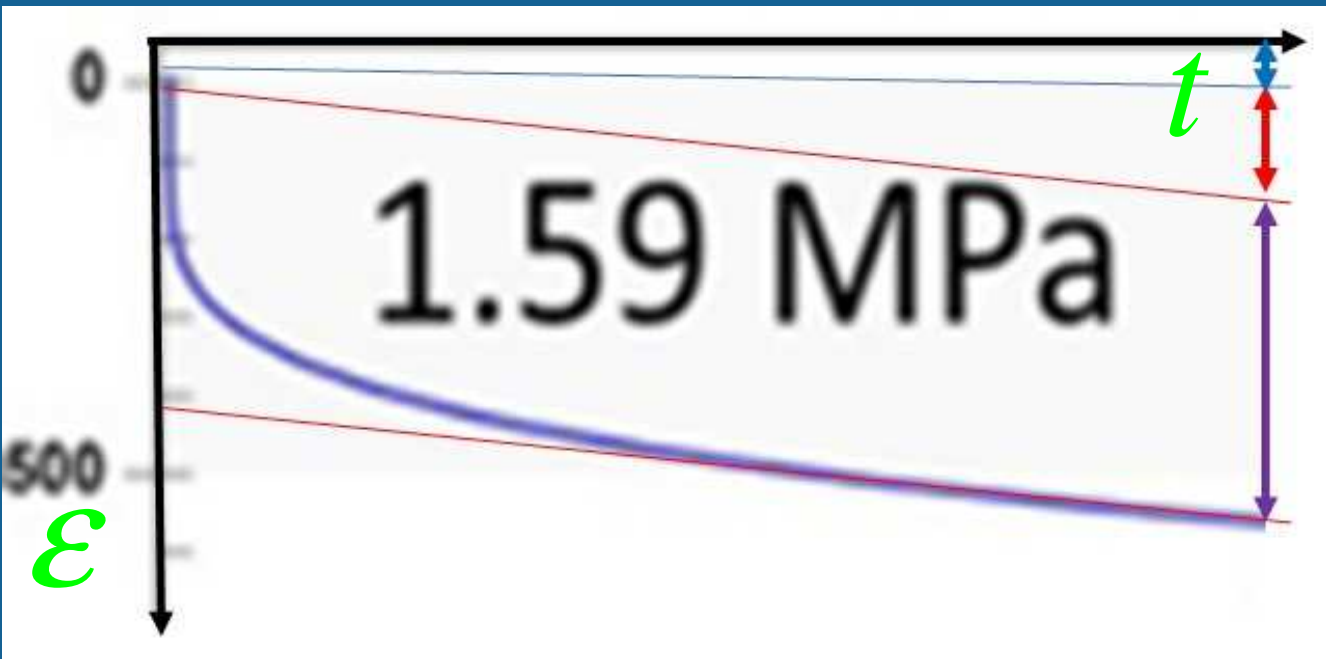
DANS UNE GALERIE SOUTERRAINE +/- 0,01°C



AU LABORATOIRE (MINES DE PARIS)



ON MESURE LA DÉFORMATION CUMULÉE AU COURS DU TEMPS

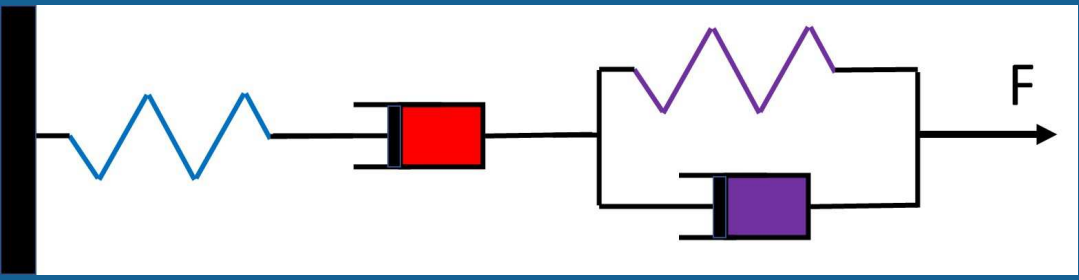


$$\epsilon^{el} = \sigma / E$$

$$\epsilon^{ss} = A(T)\sigma^n t$$

$$\epsilon^{*tr} = Ke^{cT} \sigma^m$$

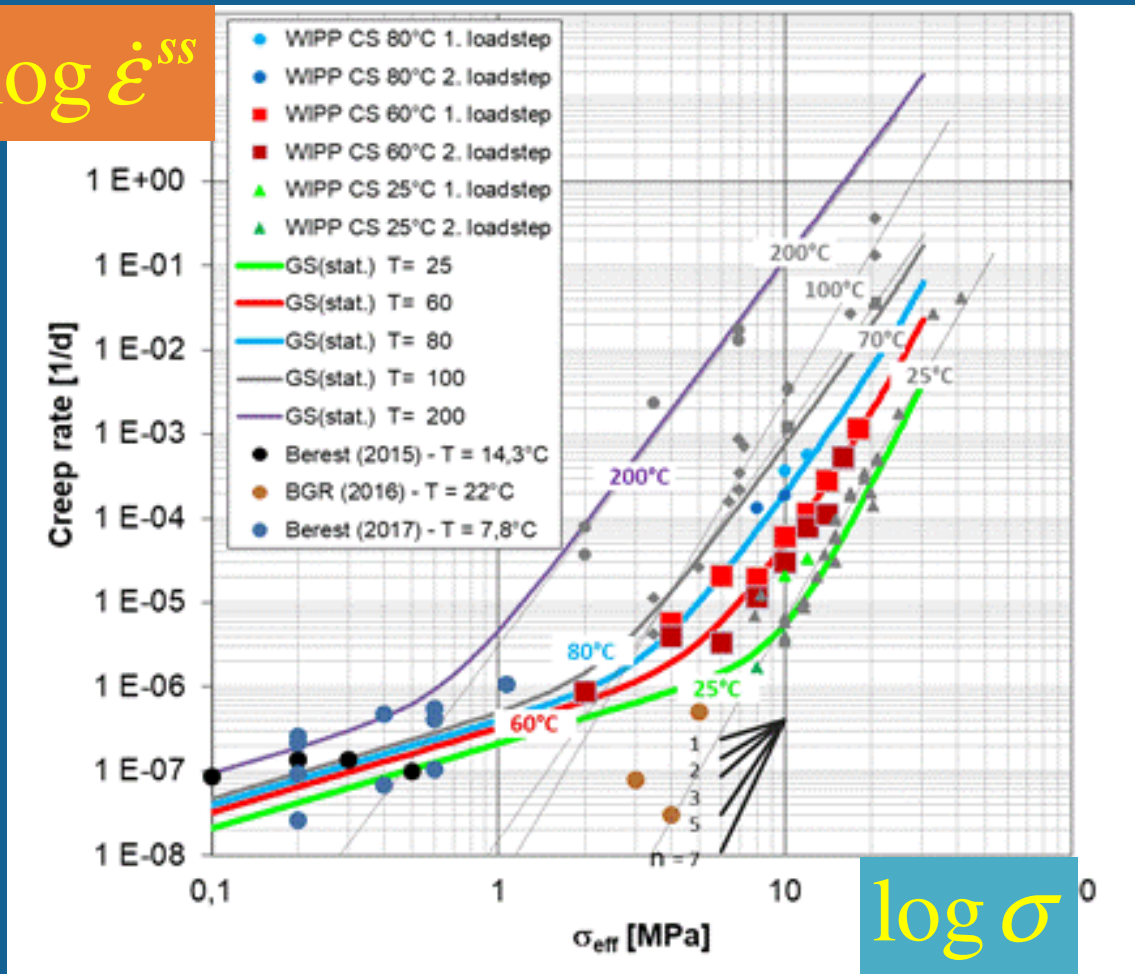
$$\dot{\epsilon}^{tr}(t) + \chi(\epsilon^{tr}(t) - \epsilon^{*tr})^p = 0$$



$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + A\sigma^n + \dot{\epsilon}^{tr}$$



$\log \dot{\epsilon}^{ss}$



SALT IS A VISCOUS,  
NON-NEWTONIAN  
THERMO-SENSITIVE  
LIQUID

$$\dot{\epsilon}^{ss} = A(T)\sigma^n$$

$$\sigma < 3 \text{ MPa}, 15^\circ\text{C}$$

$$\eta_{salt} = 10^{17} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\eta_{honey} = 10^1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Exposé LMS 7 mars

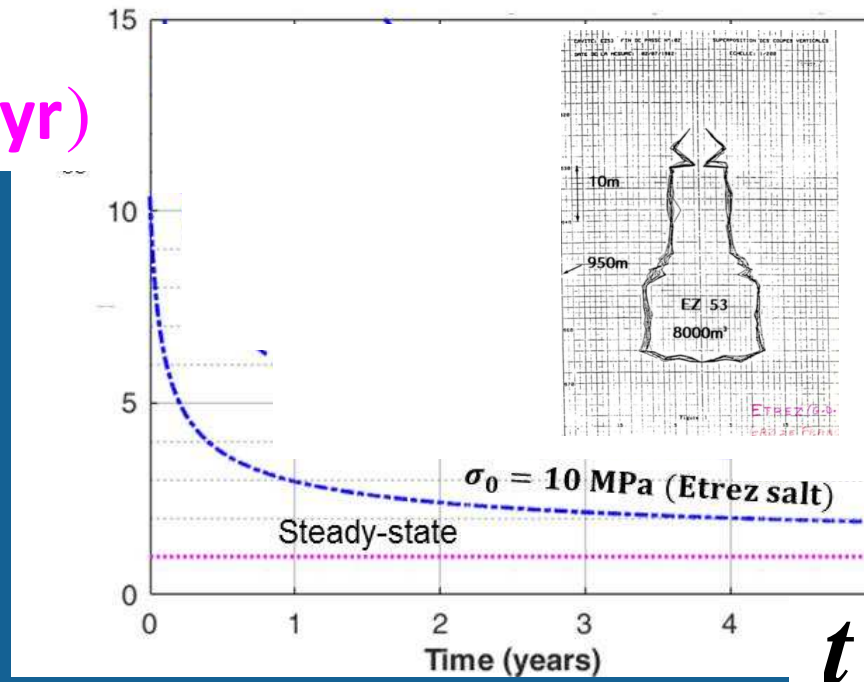
Herchen et al. (2018), IX Conf. Mech. Beh. Salt.

# CONSÉQUENCES POUR UNE CAVERNE

- CALCUL DE LA PERTE DE VOLUME
- ÉTAT DE CONTRAINTES DANS LE MASSIF, COMPARÉ À UN CRITÈRE DE RUPTURE

$$\dot{V}_c / V$$

( $10^{-4} / \text{yr}$ )



Manivannan and Berest, 2008, RMRE

**À MOYEN ET LONG TERME, LE SEL SE COMPORTE COMME UN LIQUIDE VISQUEUX, NON NEWTONIEN, THERMOSENSIBLE.**

**TOUTE CAVERNE SE FERME, RAPIDEMENT QUAND ELLE EST PROFONDE**

**LE CALCUL DES CONTRAINTES EST COMPLEXE**

**L'EXEMPLE QUI SUIT REPRÉSENTE LA TRAJECTOIRE DES CONTRAINTES EN UN POINT DANS UN PLAN CISAILLEMENT – CONTRAINTE MOYENNE (PLAN DU CRITÈRE DE COULOMB)**

**BIEN ADAPTÉ À L'ANALYSE DE L'APPARITION DE LA RUPTURE**

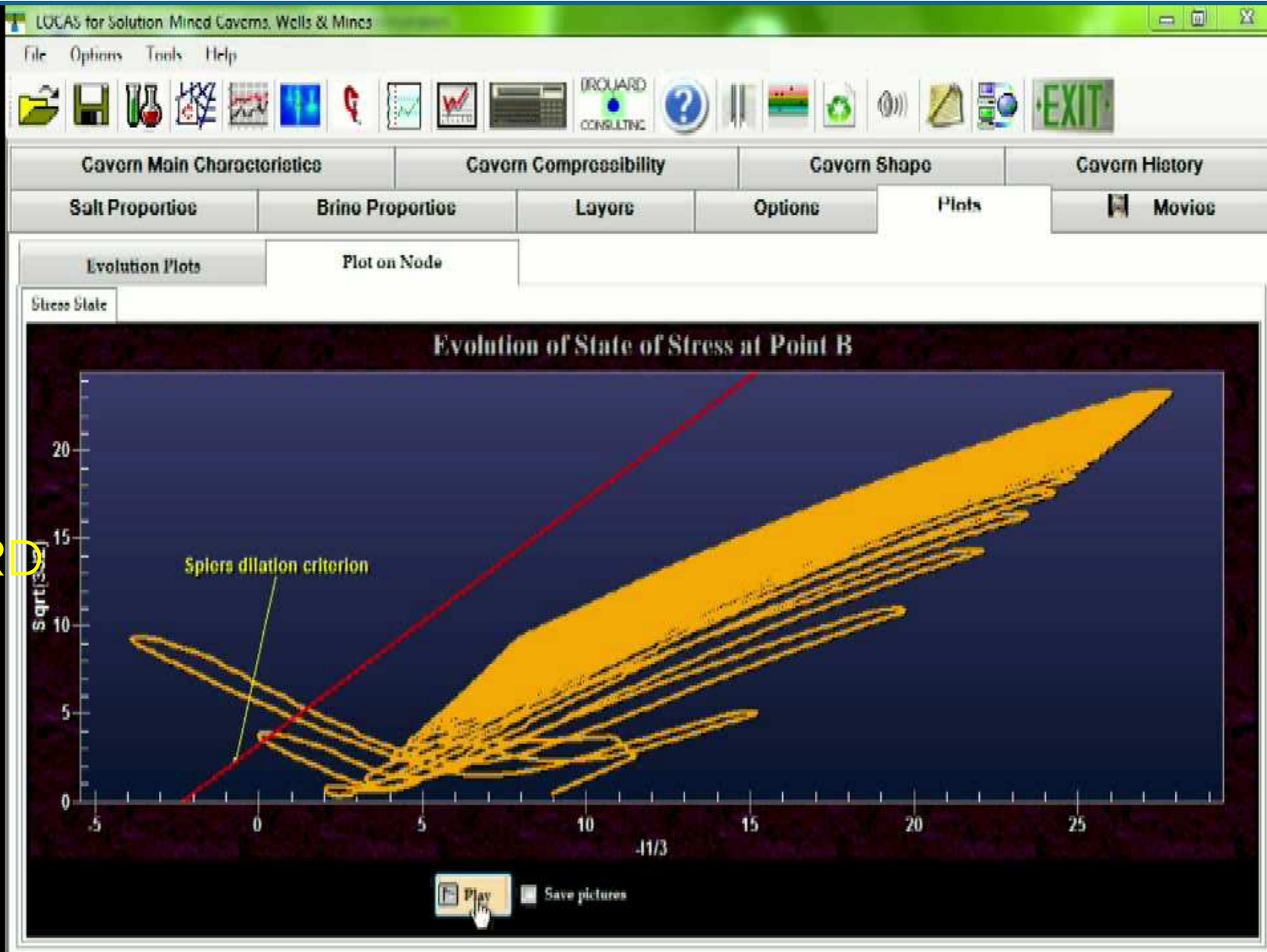


$\tau$



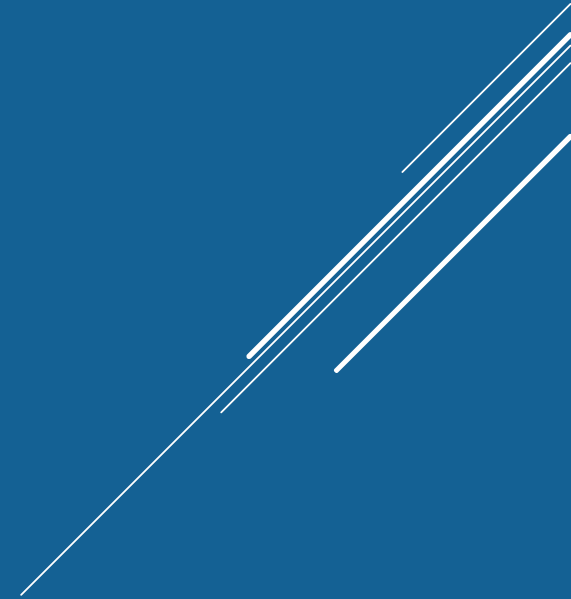
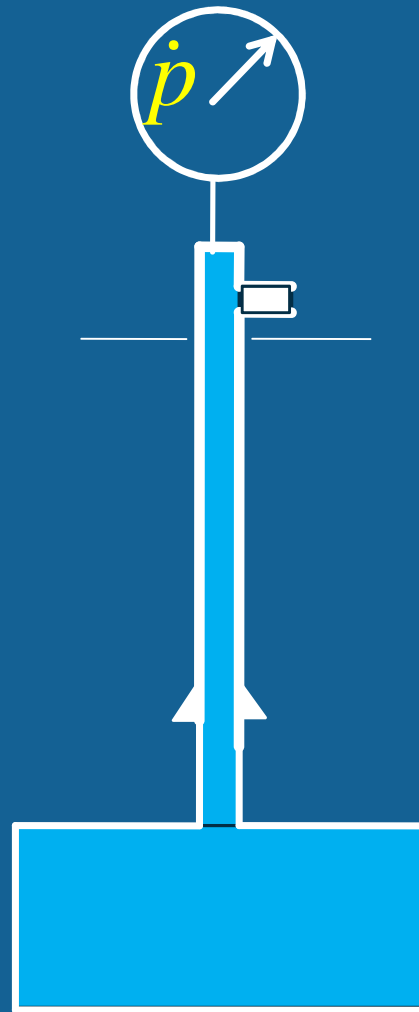
3 P<sub>m</sub>  
59

BENOÎT  
BROUARD



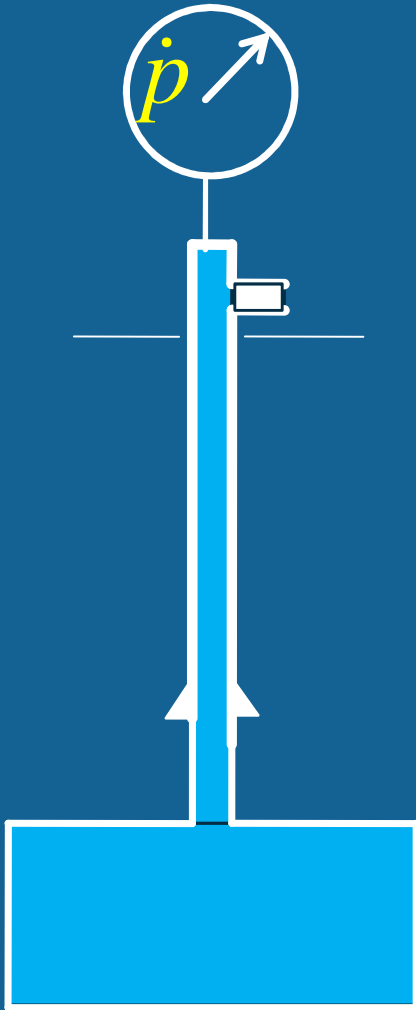
- ▶ Le sel dans le sous-sol
- ▶ Lessivage
- ▶ Trois familles de cavernes
- ▶ Mécanique : Rupture fragile
- ▶ Mécanique : Fluage
- ▶ **Mécanique : un essai in situ**
- ▶ L'avenir des cavernes

# SHUT-IN TESTS





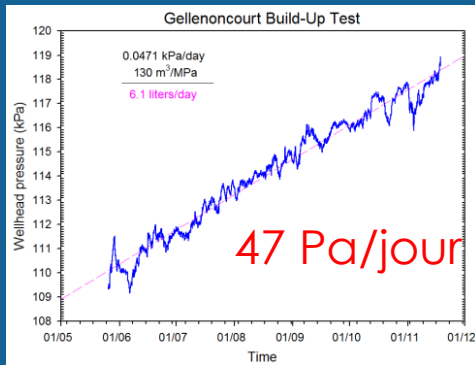
# SHUT-IN TESTS



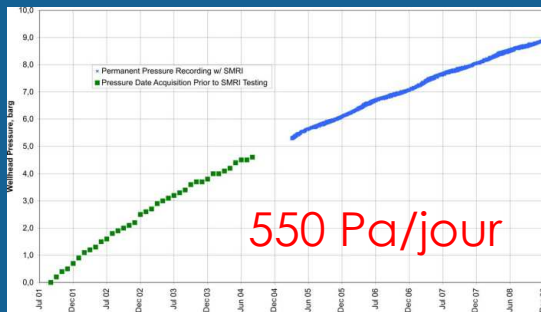
Etrez (01)

Exposé

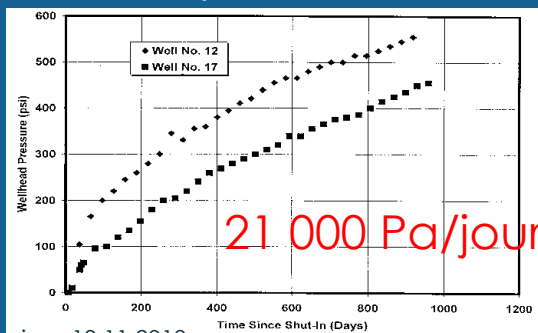
PEU  
PROFONDE



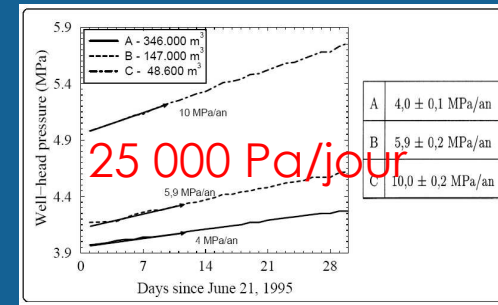
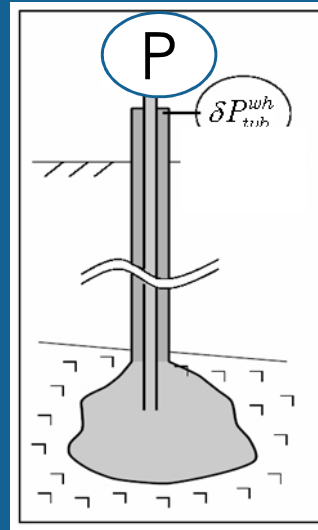
Gellenoncourt (CSME, 250 m)



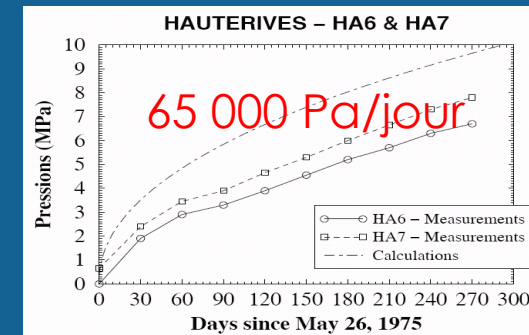
Stassfurt (Bannach & Klafki, 400 m)



Mont Belvieu (Van Sambeek)



Etrez (Storengy, 1350 m)

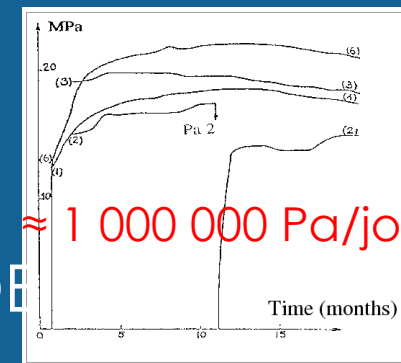


Hauterives (1600 m)

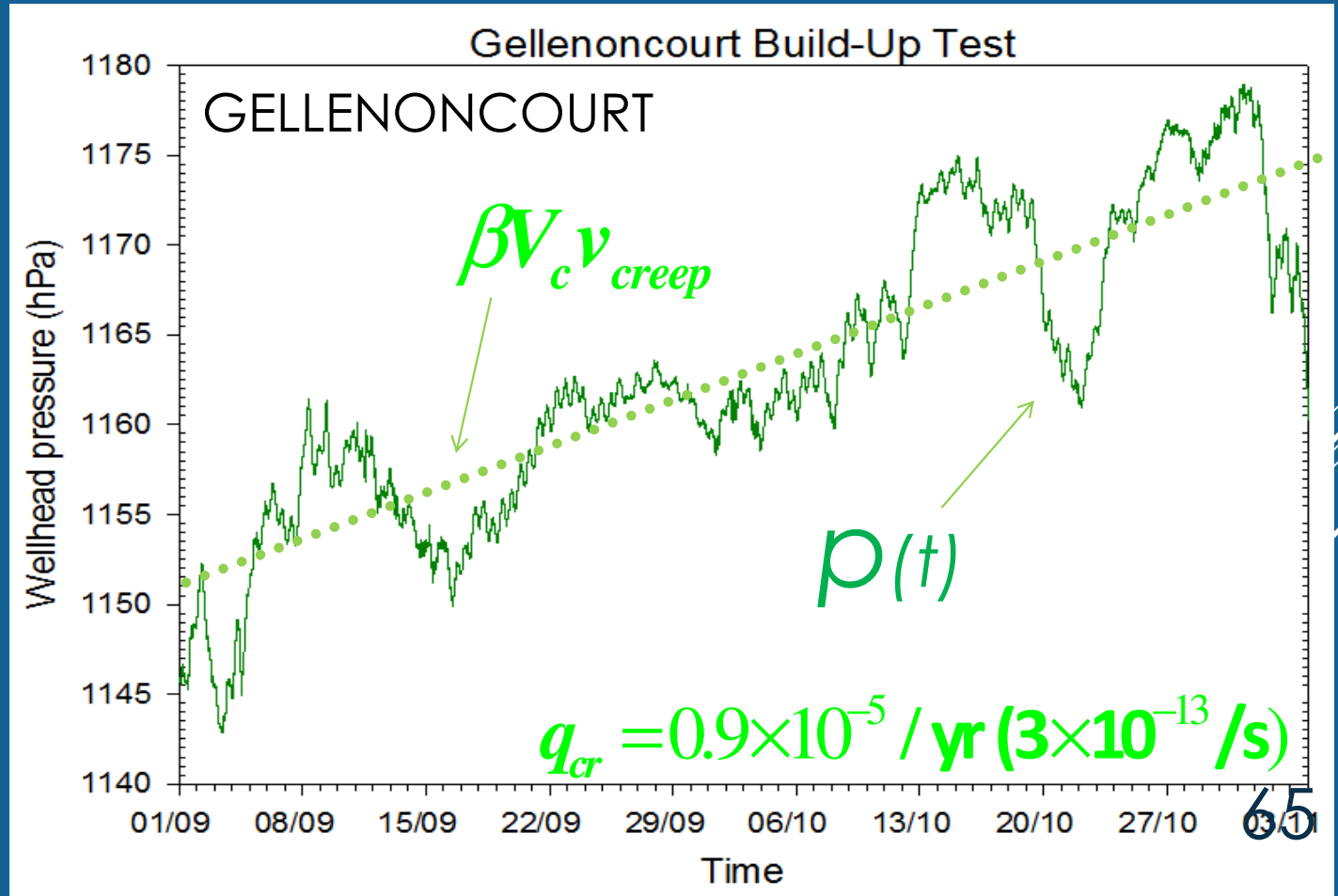
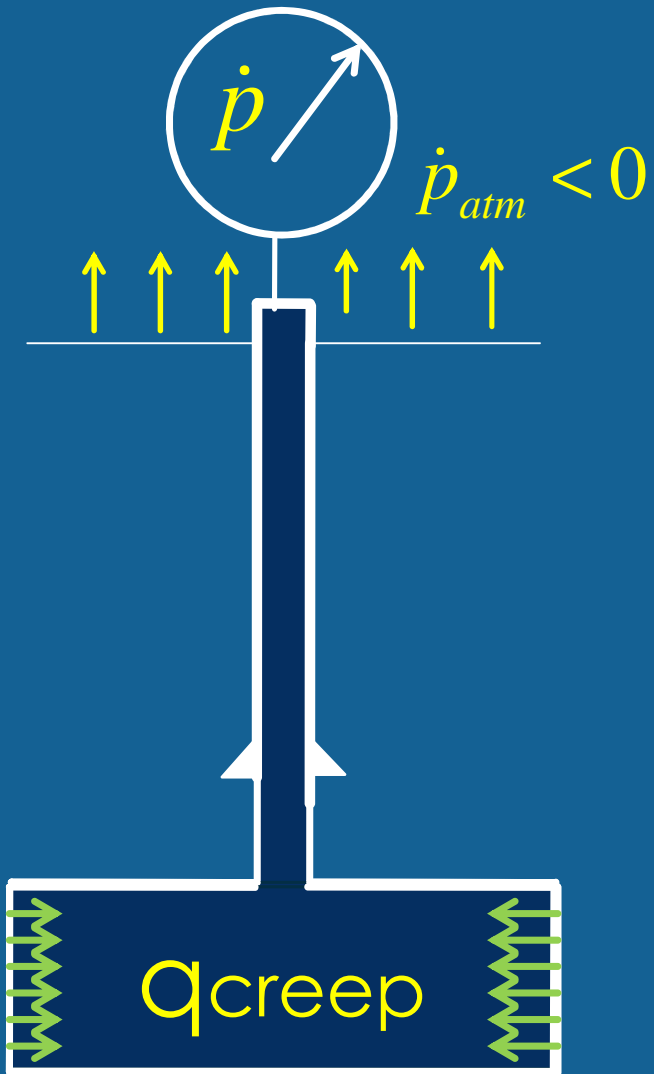
$$\beta \dot{P}_{cav} = A * (T) (P_{géo} - P_{cav})^n$$

$$+(\alpha \dot{T})$$

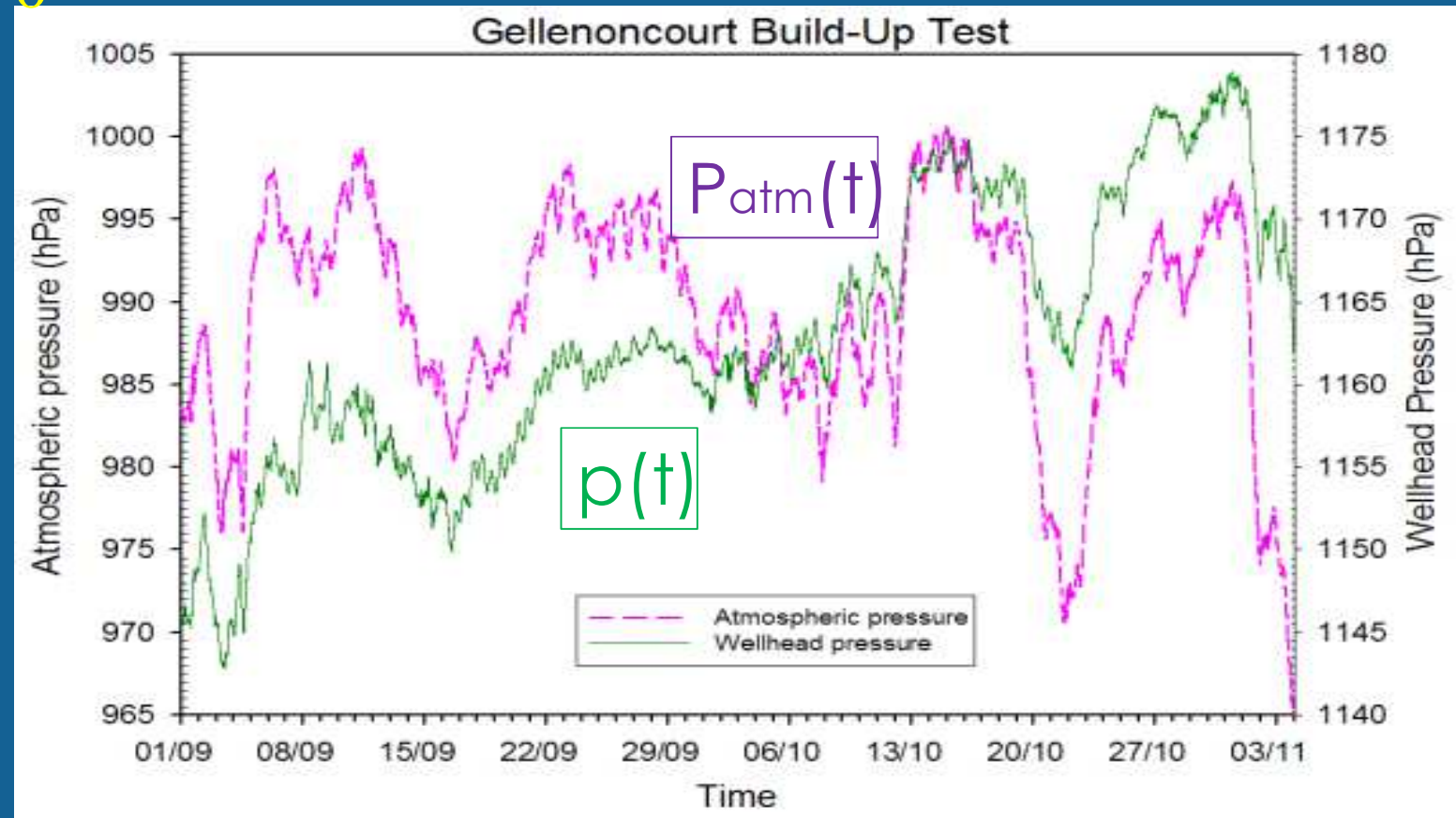
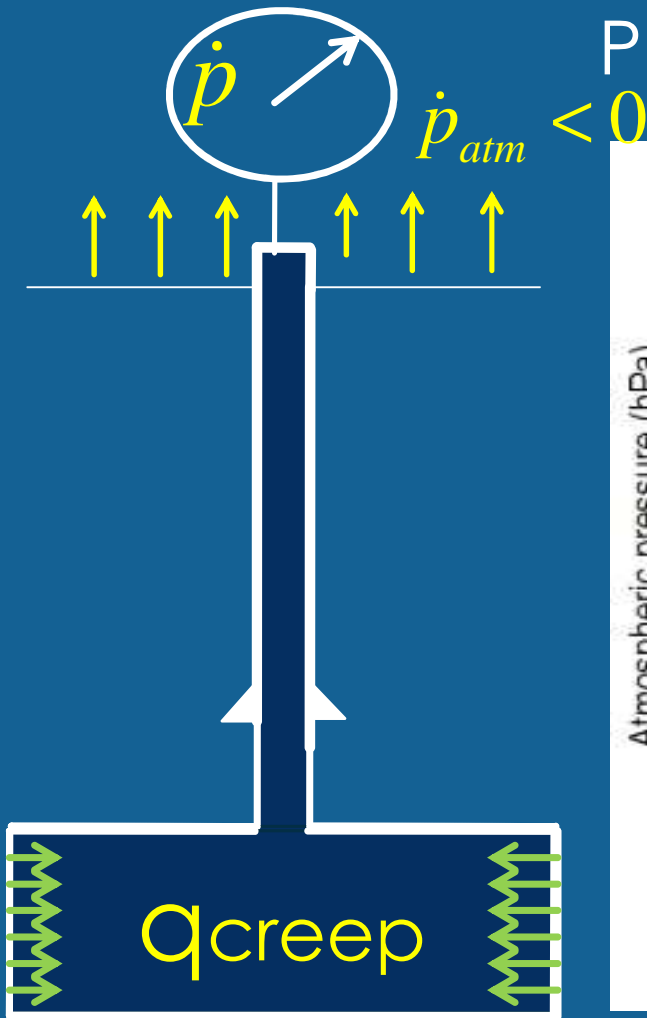
TRÈS  
PROFONDE



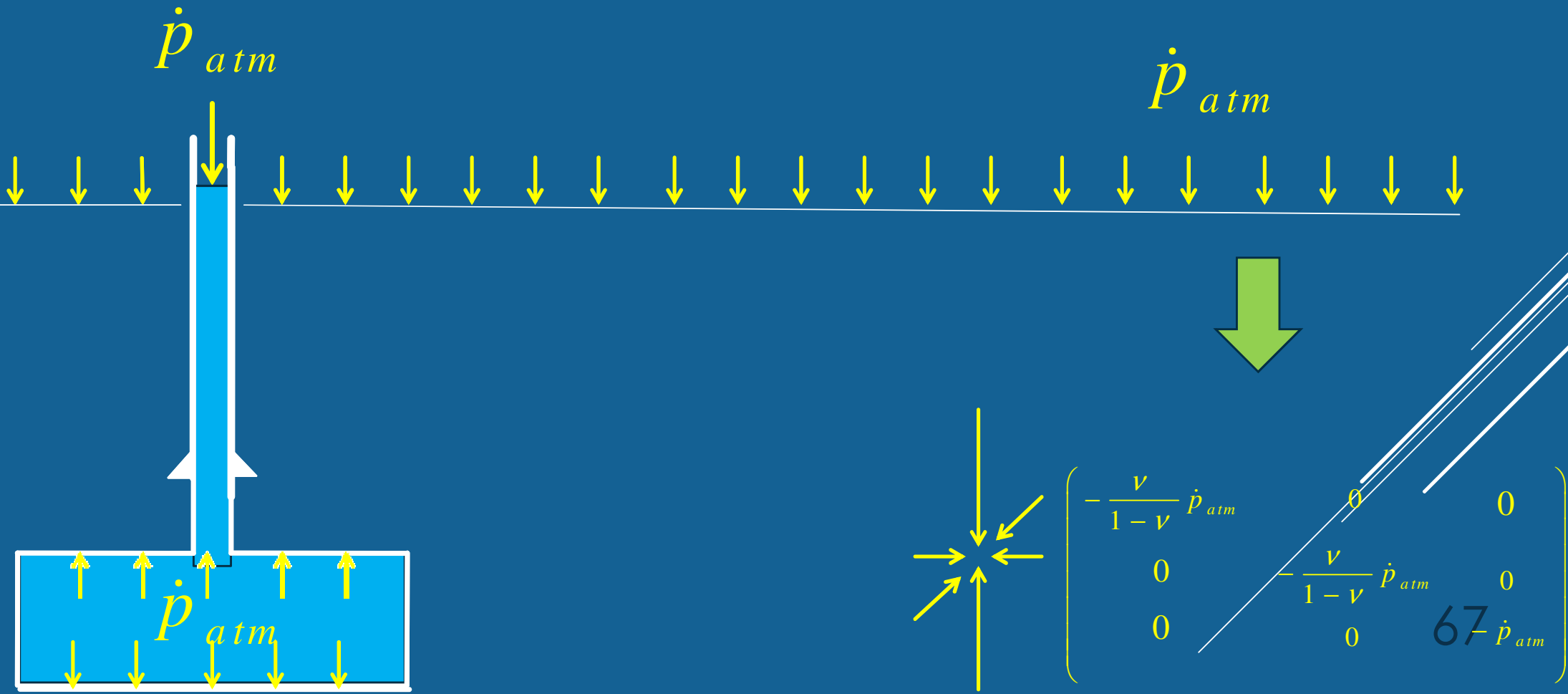
Vauvert (Kem One, 2000 m)



# A VERY SENSITIVE BAROMETER ... WHICH WORKS PERFECTLY WHEN IT IS PLUGGED!



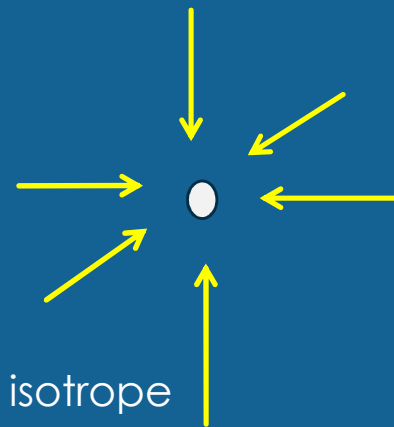
# A VERY SENSITIVE BAROMETER ...



$$\begin{pmatrix} -\frac{\nu}{1-\nu} \dot{p}_{atm} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\nu}{1-\nu} \dot{p}_{atm} & 0 \\ 0 & 0 & 67 \dot{p}_{atm} \end{pmatrix}$$

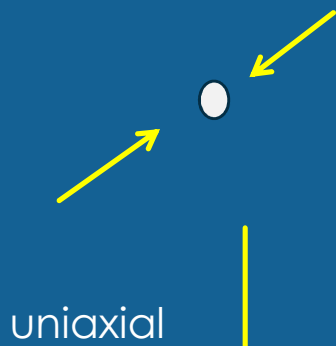


# CAS D'UNE SPHERE



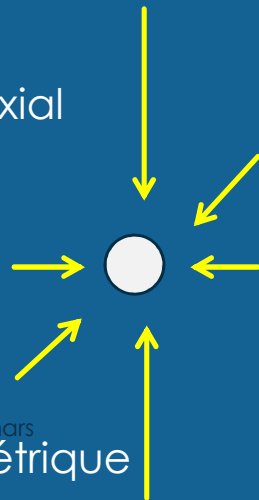
$$\begin{pmatrix} -\delta p_a & 0 & 0 \\ 0 & -\delta p_a & 0 \\ 0 & 0 & -\delta p_a \end{pmatrix}$$

$$\frac{\delta V_c}{V_c} = -\frac{3(1-\nu)}{2E} \delta P_\infty$$



$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\delta p_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

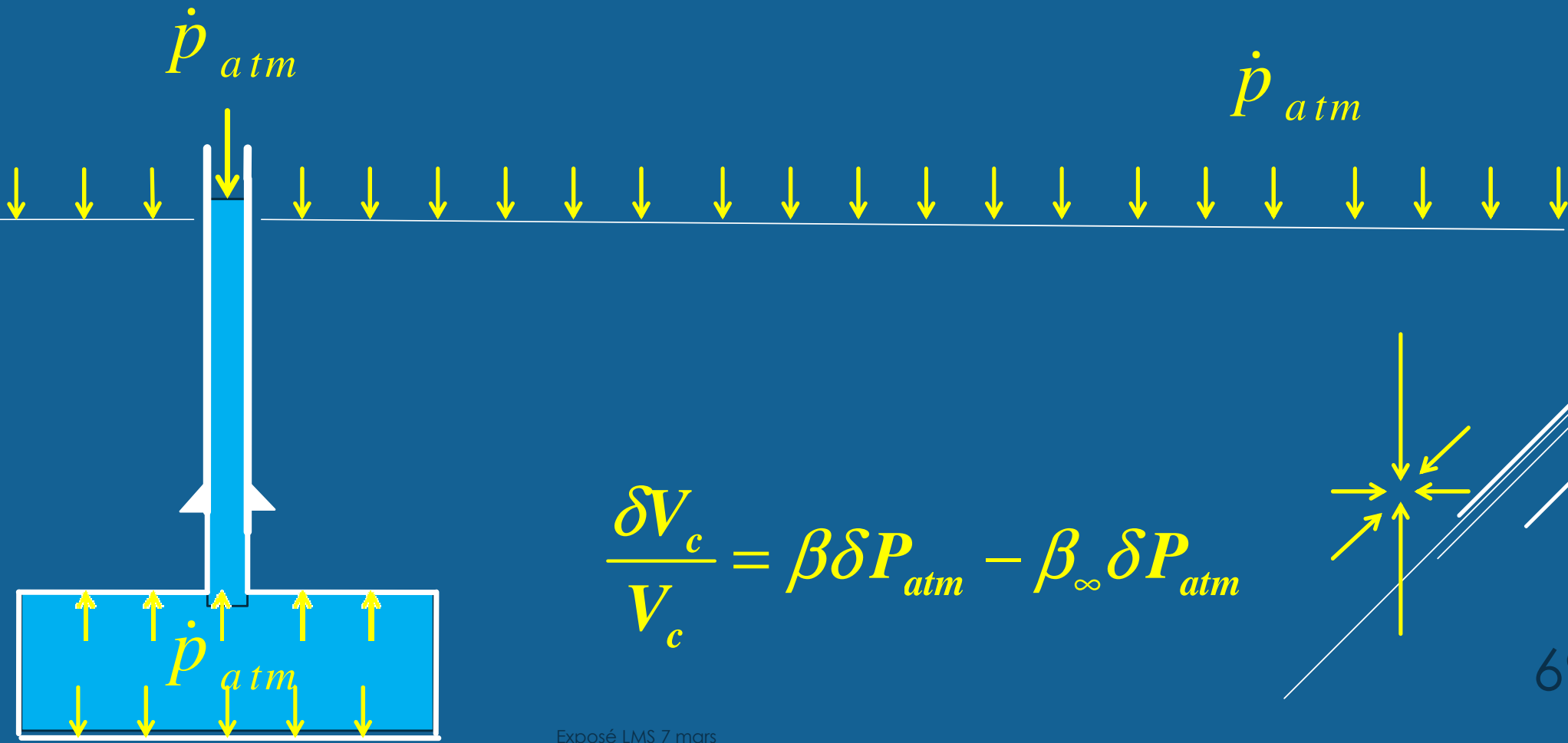
$$\frac{\delta V_c}{V_c} = -\frac{(1-\nu)}{2E} \delta P_\infty$$



$$\begin{pmatrix} -\frac{\nu}{1-\nu} \delta p_a & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\nu}{1-\nu} \delta p_a & 0 \\ 0 & 0 & -\delta p_a \end{pmatrix}$$

$$\frac{\delta V_c}{V_c} = -\frac{(1-\nu)}{2E} \left(1 + 2\frac{\nu}{1-\nu}\right) \delta P_\infty$$

# A VERY SENSITIVE BAROMETER ...

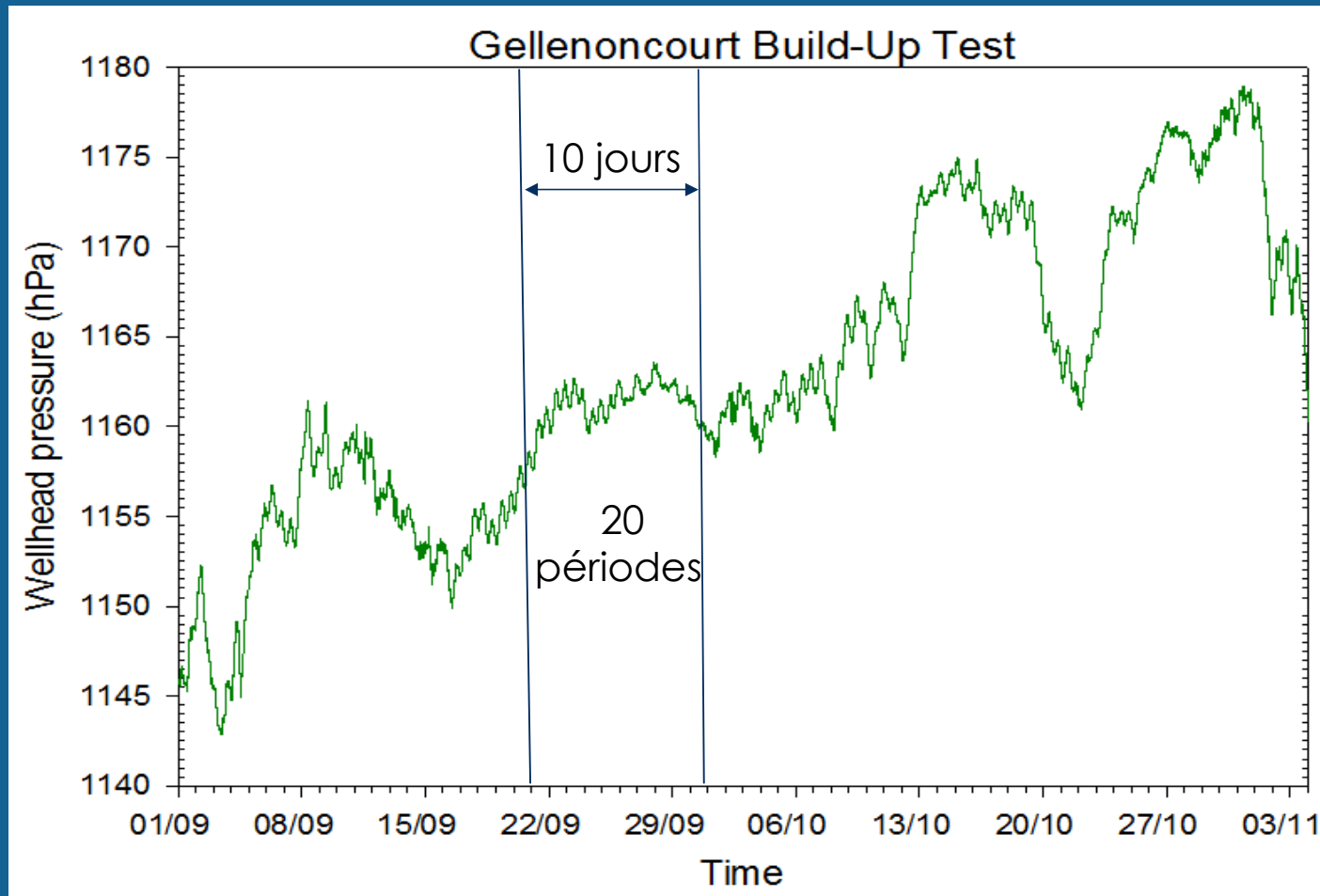


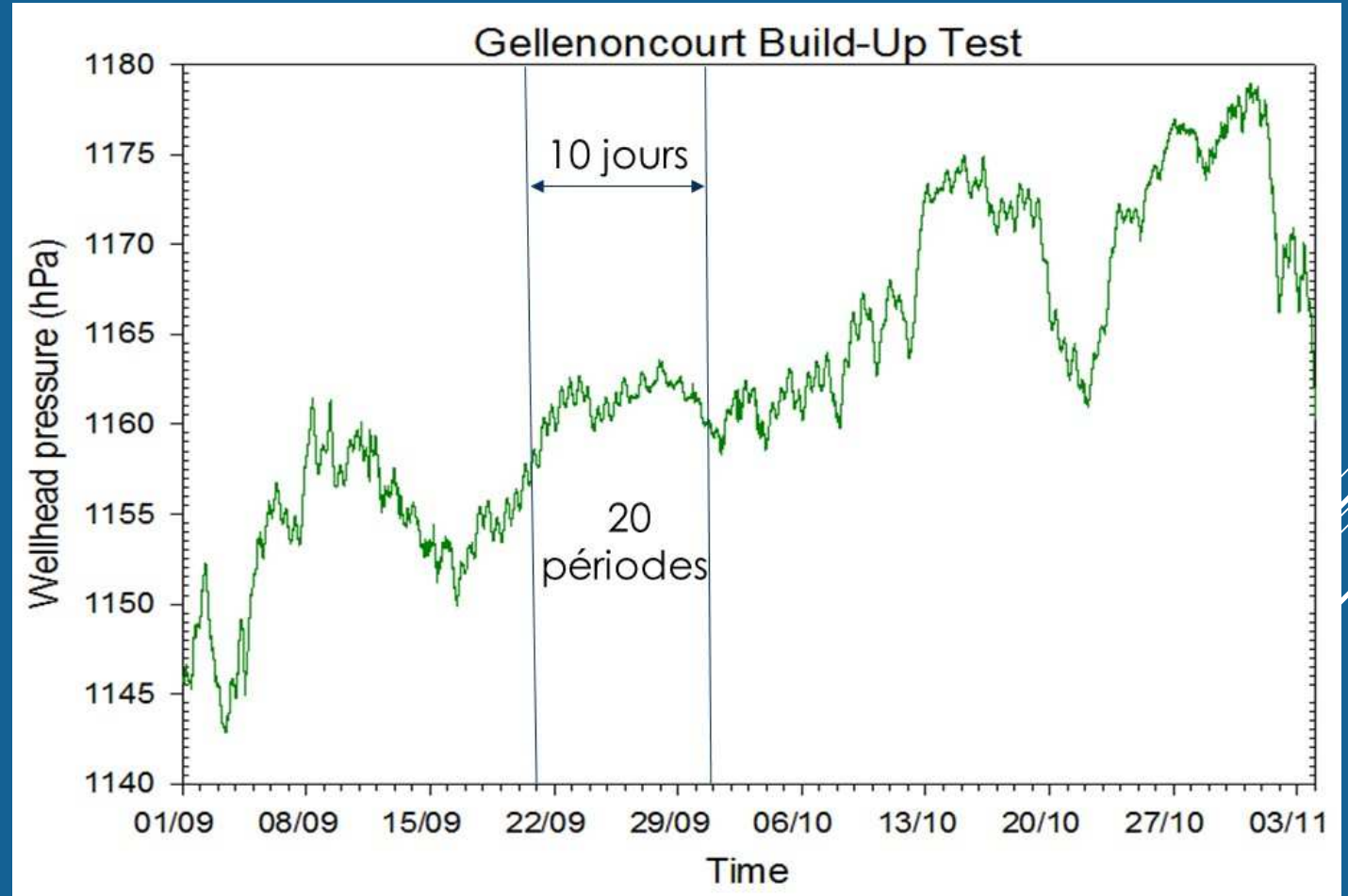
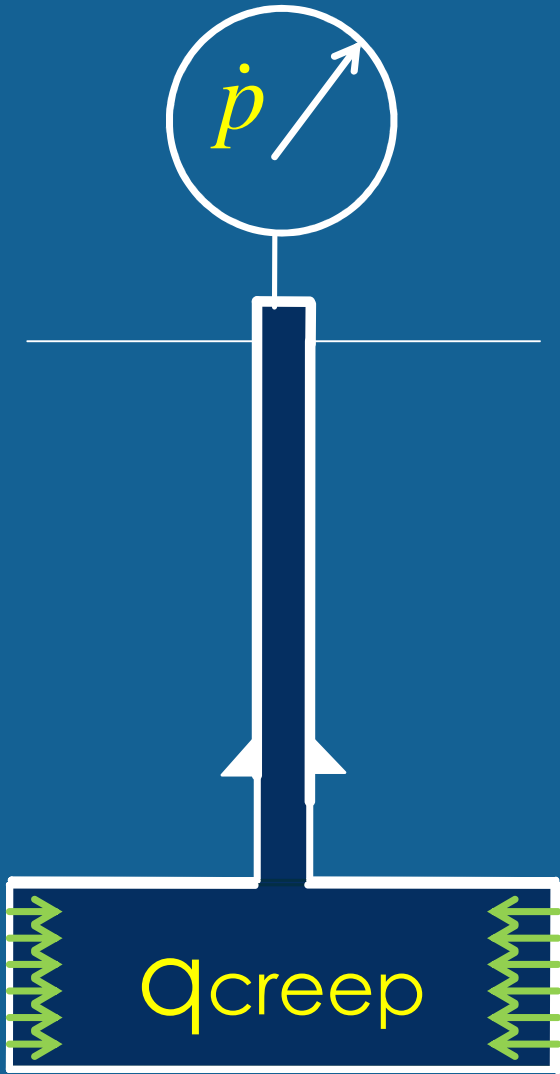
$$\frac{\delta V_c}{V_c} = \beta \delta P_{atm} - \beta_{\infty} \delta P_{atm}$$

# UN MARÉGRAPHE

Exposé LMS 7 mars

70







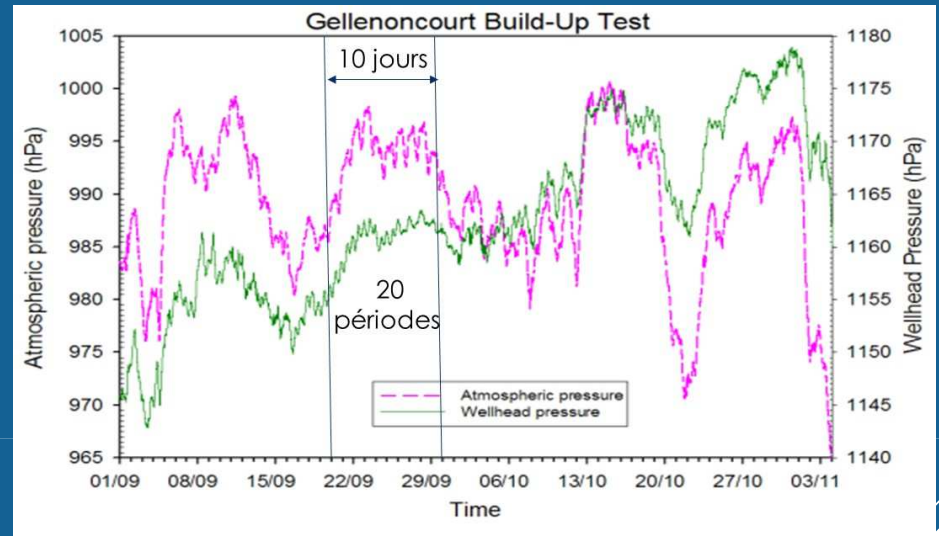
# Marées océaniques



Jeudi 7 mars 2019, Marées à l'Aber W'rach, Finistère

	Heure	Hauteur	Coefficient
BM	00:42	1.29	---
PM	06:34	7.54	88
BM	12:57	1.22	---
PM	18:51	7.46	88

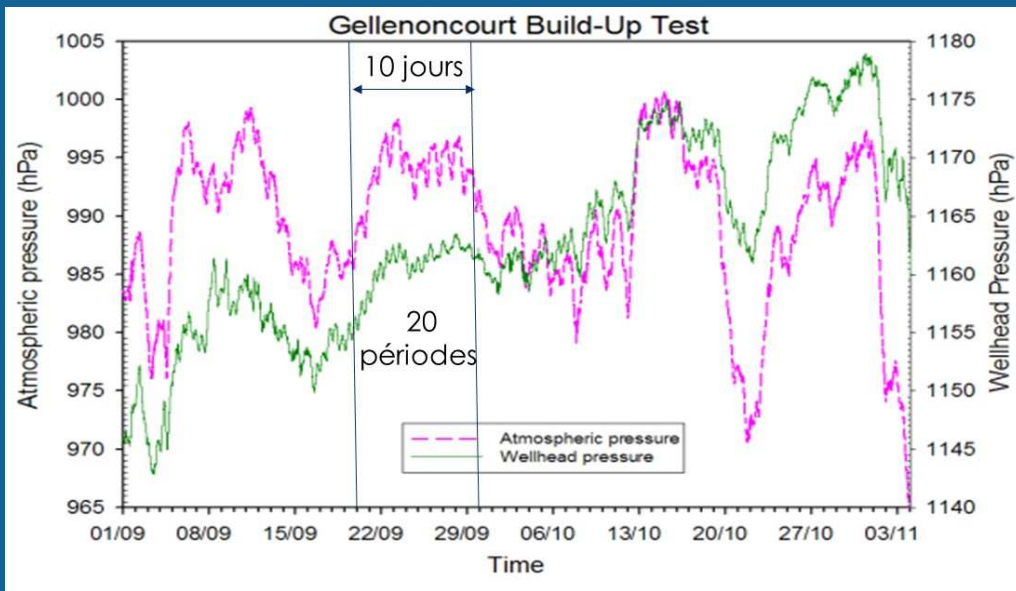
Exposé LMS 7 mars



# Marées terrestres

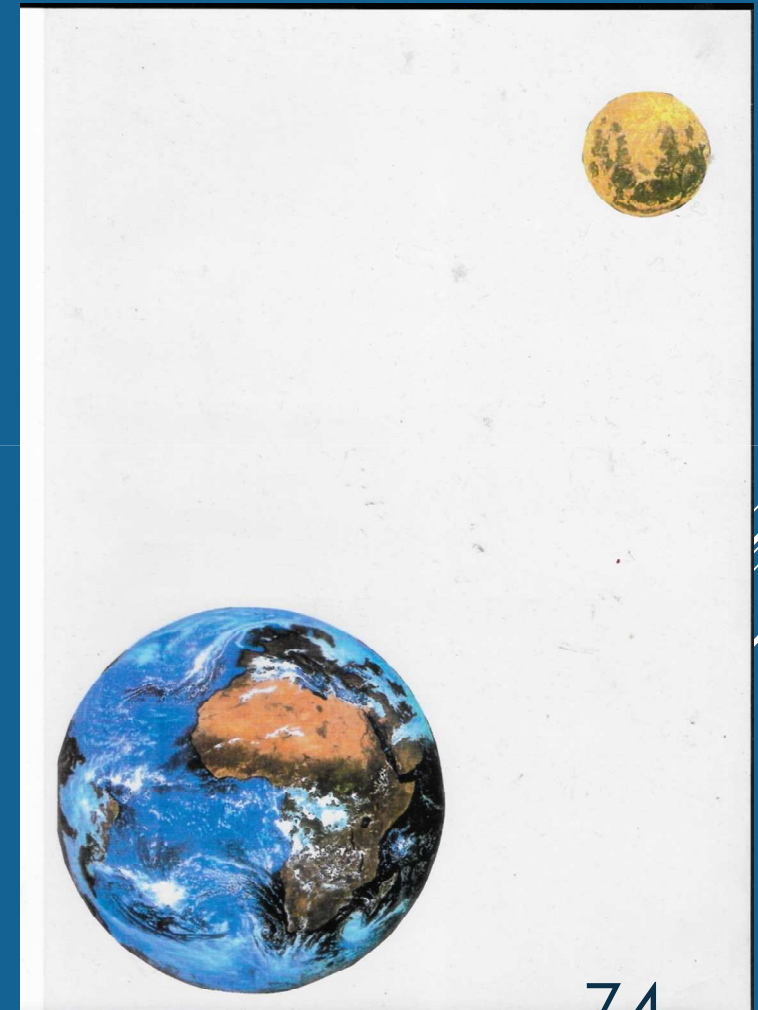
$$\Delta R = 1 \text{ m} \quad \epsilon = 10^{-8} - 10^{-7}$$

73

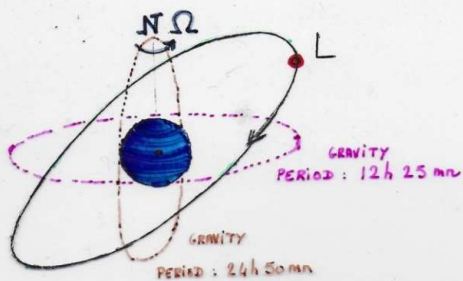


Vendredi 8 mars 2019, Marées à l'Aber W'rach, Finistère

	Heure	Hauteur	Coefficient
BM	00:42	1.29	---
PM	06:34	7.54	88
BM	12:57	1.22	---
PM	18:51	7.46	88



**Earth Tides First Period is 12 h 25 minutes  
(instead of 12 h = 1 day period / 2)**



Exposé LMS 7 mars

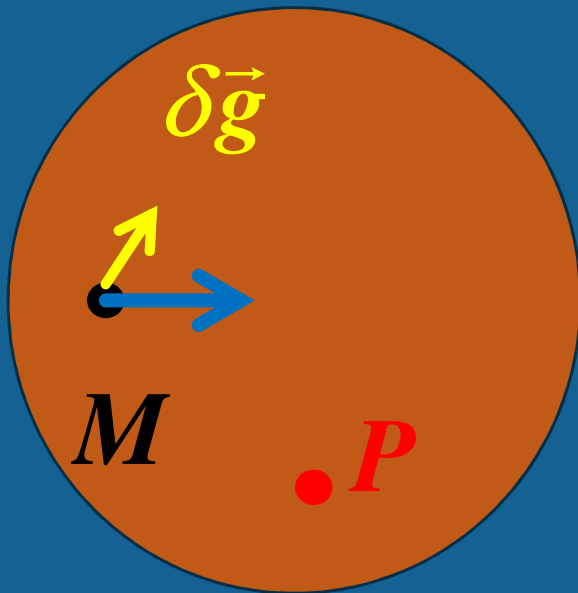
1st Earth Tide Period is  
 $T = 12\text{ h } 25\text{ minutes}$   
(instead of 1 day / 2)

As Moon rotation around the Earth  
has a 28-dayperiod

LUNE 

$$\vec{g}(M) = G \iiint_{\Omega} \frac{\vec{e}_{MP}}{|\vec{PM}|^2} dm(P) + G M_{moon} \frac{\vec{e}_{ML}}{|\vec{LM}|^2}$$

TERRE



$$(\lambda + \mu) \text{grad tr } \delta \bar{\bar{\epsilon}} + \mu \Delta \delta \bar{\bar{\epsilon}} + \rho \delta \vec{g} = \vec{0}$$

$$\delta \bar{\bar{\sigma}}(R) = \lambda \text{tr } \delta \bar{\bar{\epsilon}} \vec{n} + 2\mu \delta \bar{\bar{\epsilon}} \cdot \vec{n} = 0$$

$$\delta \bar{\bar{\epsilon}} = (\text{grad } \delta \vec{M} + {}^T \text{grad } \delta \vec{M}) / 2$$

$$\delta \vec{g}(M) = G \iiint_{\Omega} -\frac{2\vec{e}_{MP} (\delta \vec{M} - \delta \vec{P})}{|\vec{PM}|^3} dm(P) - G M_{moon} \frac{2\vec{e}_{ML} \cdot \delta \vec{L}}{|\vec{LM}|^3}$$

« ce qui fait qu'on croit tant de faux effets  
de la lune c'est qu'il y en a de vrais »

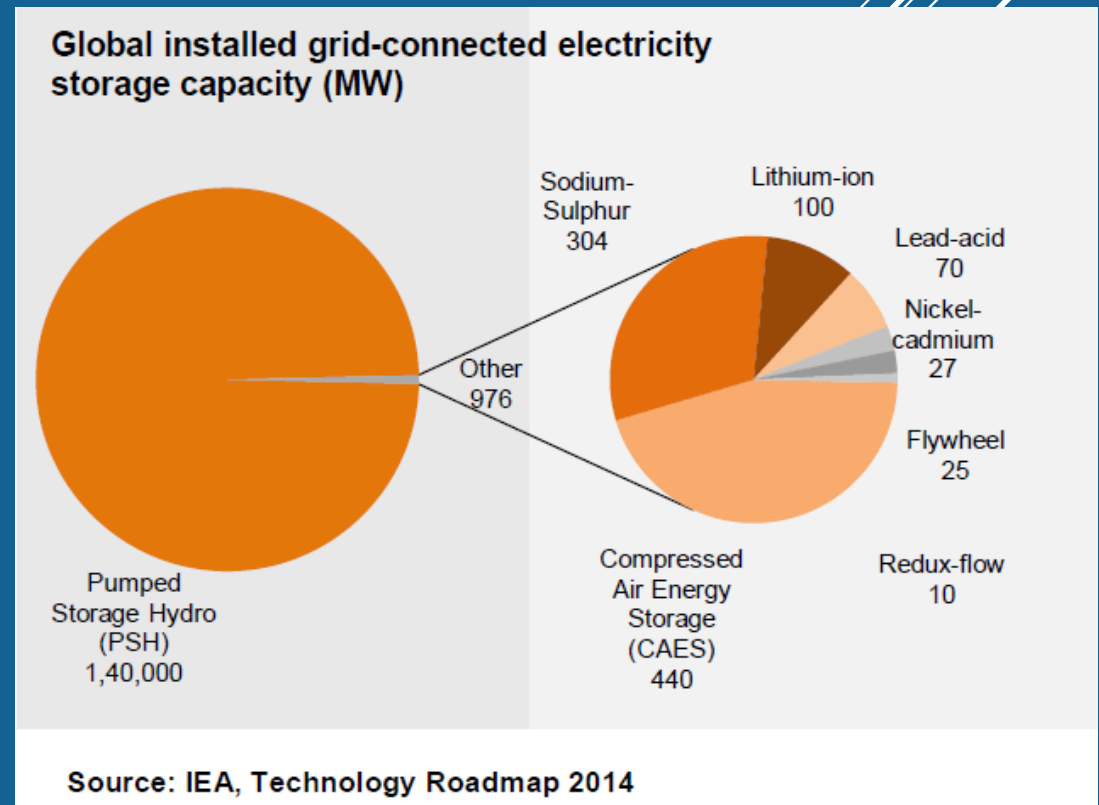
Blaise Pascal, *Pensées*, 1678



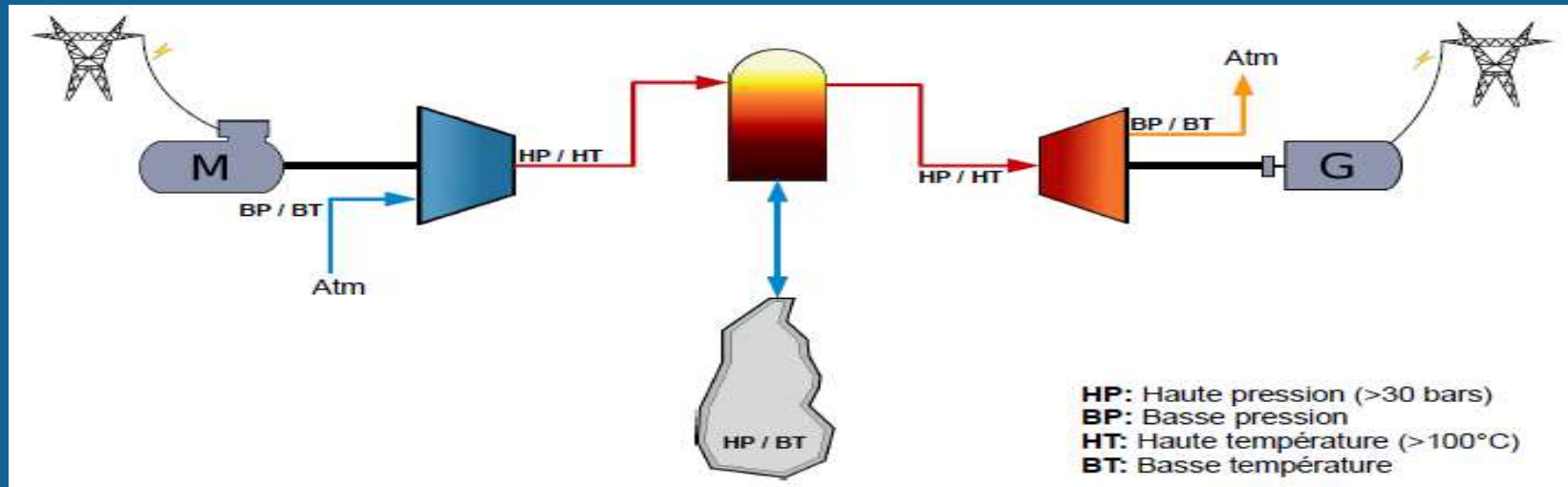
- ▶ Le sel dans le sous-sol
- ▶ Lessivage
- ▶ Trois familles de cavernes
- ▶ Mécanique : Rupture fragile
- ▶ Mécanique : Fluage
- ▶ Mécanique : un essai in situ
- ▶ L'avenir des cavernes

# LE FUTUR DES CAVERNES

- STOCKAGE D'HYDROCARBURES
  - STOCKAGE DE MASSE DE L'ELECTRICITÉ
- DANS LA PERSPECTIVE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE



# CAES



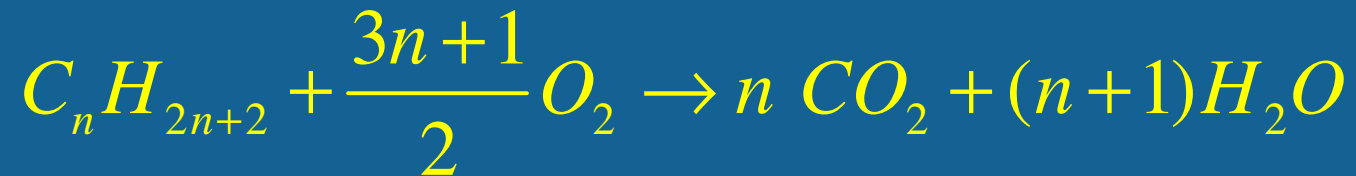
CAES: DEUX STOCKAGES D'AIR COMPRIMÉ HISTORIQUES (À HUNTORF ET McINTOSH)

TYPIQUEMENT, CYCLE JOURNALIER 4,7-7 MPa ; 340 000 M<sup>3</sup> ; 250 MW PENDANT 4H ;  
RENDEMENT 50% ET 70% DANS LA VERSION ADIABATIQUE

ATTRACTIF POUR DES APPLICATIONS LOCALES

[Dans 1 m<sup>3</sup> de cavité, l'énergie mécanique contenue est faible en comparaison de CH<sub>4</sub>)

# HYDROGÈNE



L'hydrogène est envisagé comme vecteur d'énergie pour la transition énergétique . Il serait obtenu par électrolyse de l'eau.

6 cavités historiques de stockage, UK et Texas, pour usages industriels

Les sujets de recherche :

- Matériaux pour le puits et la tête de puits
- Etanchéité du stockage
- Comportement mécanique sous cycles

# QUESTIONS ?