

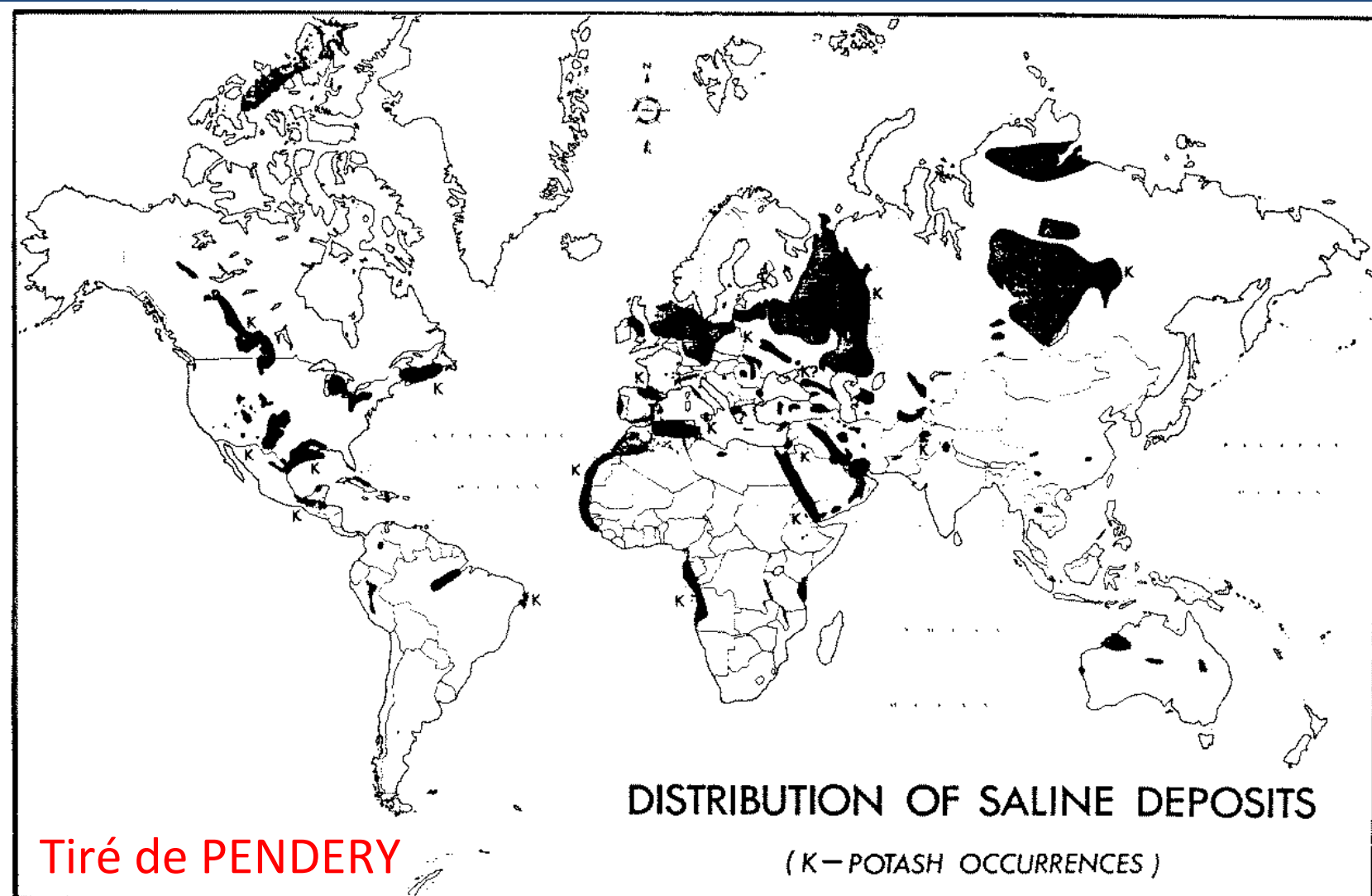
# **COMPORTEMENT À TRÈS LONG TERME DE CAVERNES RÉALISÉES DANS DES MASSIFS DE SEL**

**Pierre Bérest, LMS, Ecole Polytechnique, Palaiseau  
Benoît Brouard, Brouard Consulting, Paris**

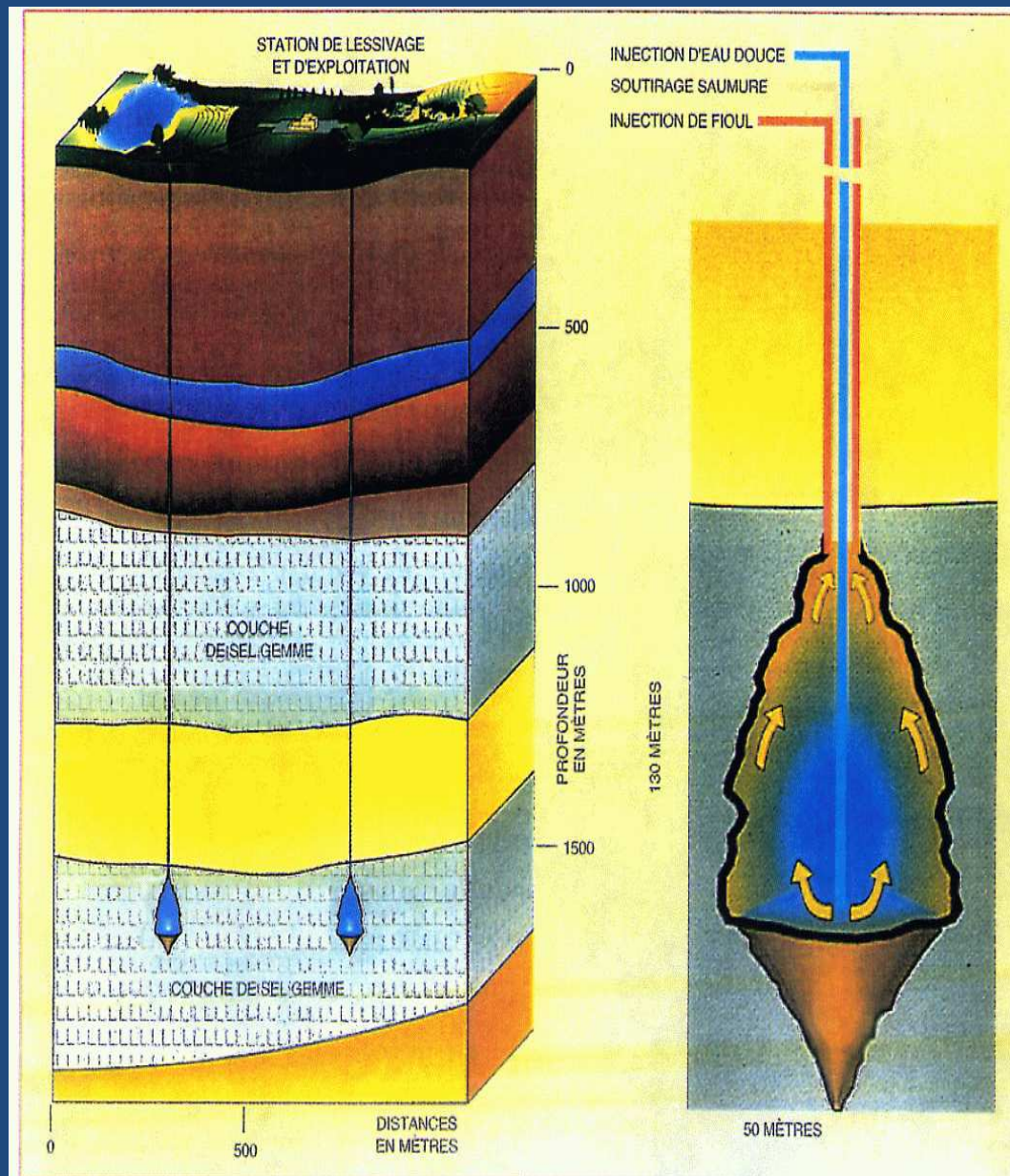
# Sommaire

1. Introduction
2. Comportement de la saumure en caverne fermée
3. Scénarios avec et sans microperméabilité
4. Essais en place
5. Conclusion

# DISTRIBUTION DES DÉPÔTS DE SEL DANS LE MONDE

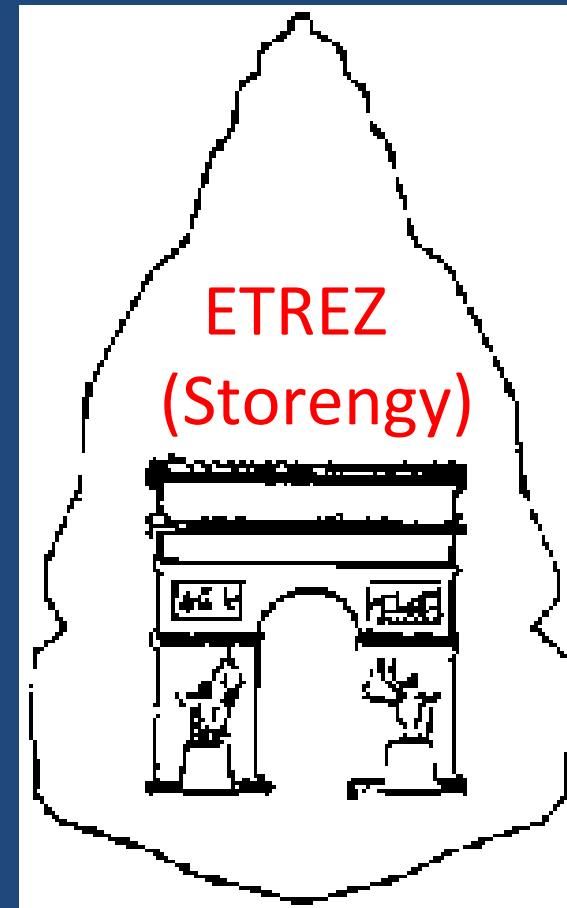
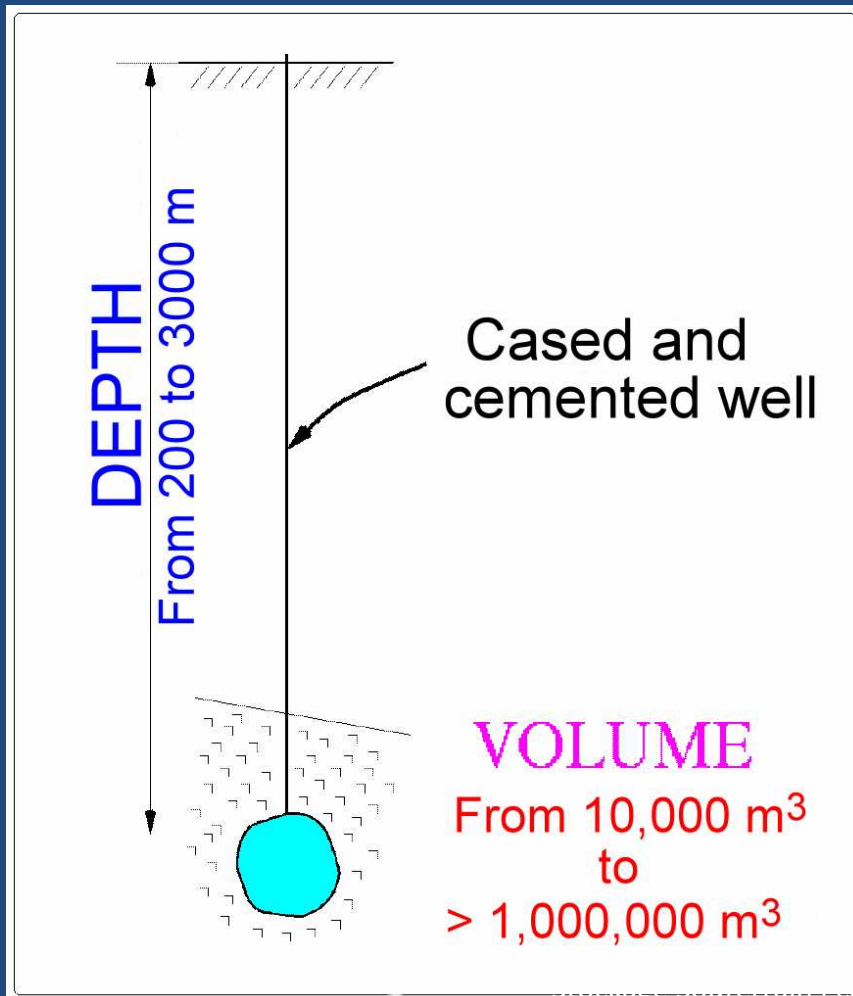


# PRINCIPE DU LESSIVAGE

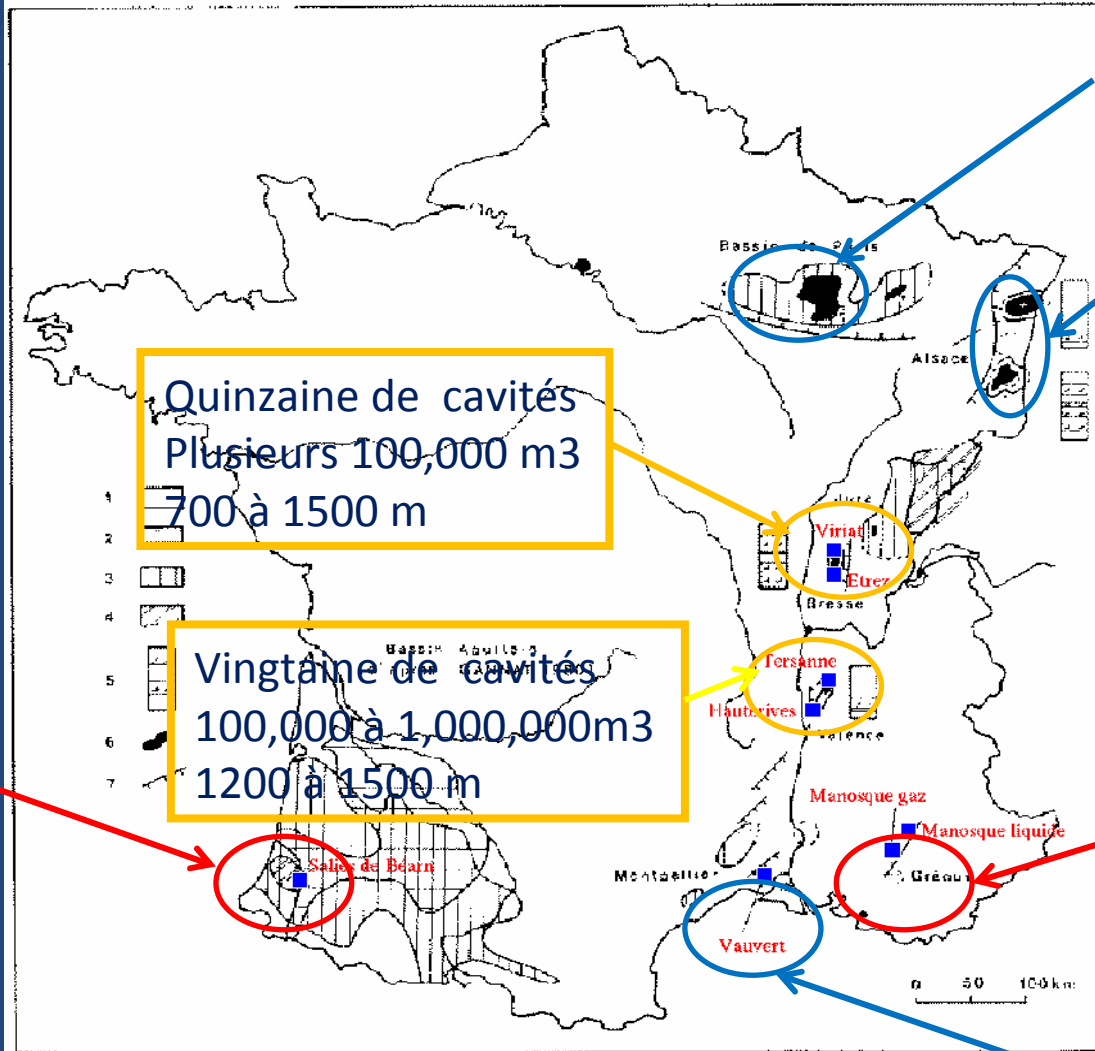
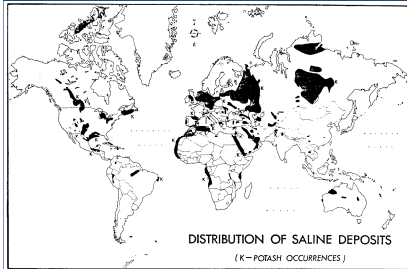


Production de saumure  
Stockage d'hydrocarbures

# Profondeur et dimensions



# GISEMENTS DE SEL EN FRANCE



Centaines 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

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

Vingtaine de cavités  
100,000 à 1,000,000 m<sup>3</sup>  
1200 à 1500 m

plusieurs cavités  
350 à 700 m

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

Plusieurs cavités  
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 classiques; 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 1 600 m, pureté supérieure à 20 %); 7. liasse majeure.

Les cavités seront abandonnées un jour.

*Décret n° 2006-649 du 2 juin 2006*

**TITRE III**

**SURVEILLANCE ADMINISTRATIVE ET POLICE DES MINES ET DES STOCKAGES  
SOUTERRAINS**

**Chapitre V Arrêt définitif des travaux et d'utilisation d'installations minières et de  
stockage**

**Article 43.** La déclaration d'arrêt des travaux ... est accompagnée des documents et informations suivants selon la nature des travaux :

8° Pour les stockages souterrains ... [un] mémoire [qui] précise les mesures prises ou prévues pour assurer la protection des intérêts visés à l'article 79 du code minier. Il comporte notamment :

- sauf pour les stockages en nappe aquifère ou gisement déplété, les dispositions prises pour s'assurer du soutirage complet du produit stocké ainsi que les modalités de son évacuation, de son traitement éventuel ou élimination ;
- les conditions et les modalités de dégazage et/ou d'envoyage des cavités exploitées en gaz ;
- une étude de dangers destinée à évaluer les risques engendrés par les opérations mentionnées à l'alinéa précédent ;
- une évaluation des autres risques susceptibles d'intervenir et la définition des mesures aptes à en assurer la maîtrise.



Les cavités seront abandonnées un jour. Elles seront remplies de saumure, un bouchon sera placé au voisinage du sabot du cuvelage, du ciment sera coulé dans le puits ...

... isolant une grande “bulle” de saumure.

**Dont le devenir à long terme est l’objet de la présentation**

# Sommaire

1. Introduction
2. Comportement de la saumure en caverne fermée
3. Scénarios avec et sans microperméabilité
4. Essais en place
5. Conclusion

Les cavités seront fermées un jour. Elles seront remplies de saumure, un bouchon sera placé au voisinage du sabot du cuvelage, du ciment sera coulé dans le puits ...

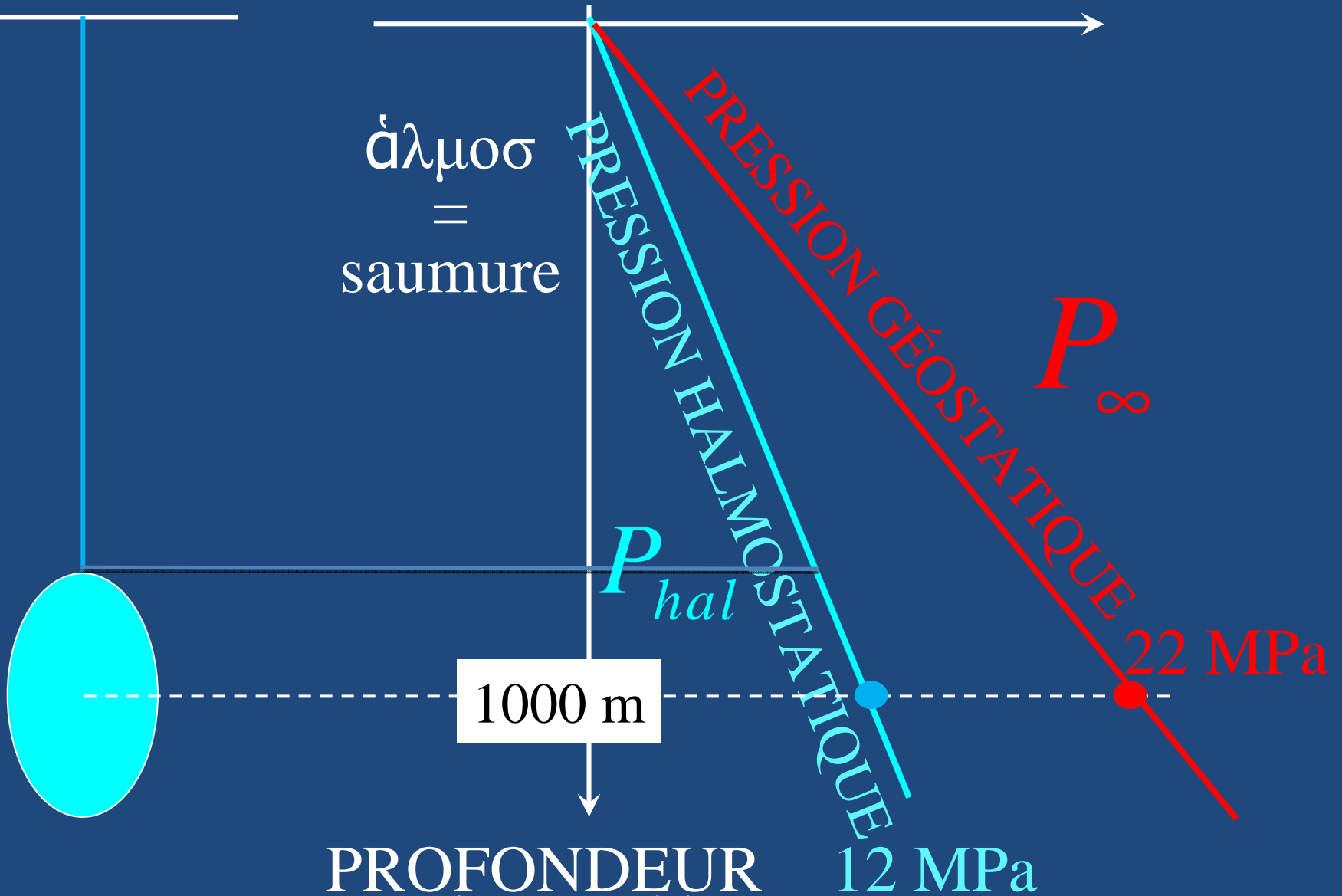
... isolant une grande “bulle” de saumure.

La pression de la saumure augmentera :

Toutes les cavités sont “artésiennes”

PRESSION

ἄλμος  
=  
saumure

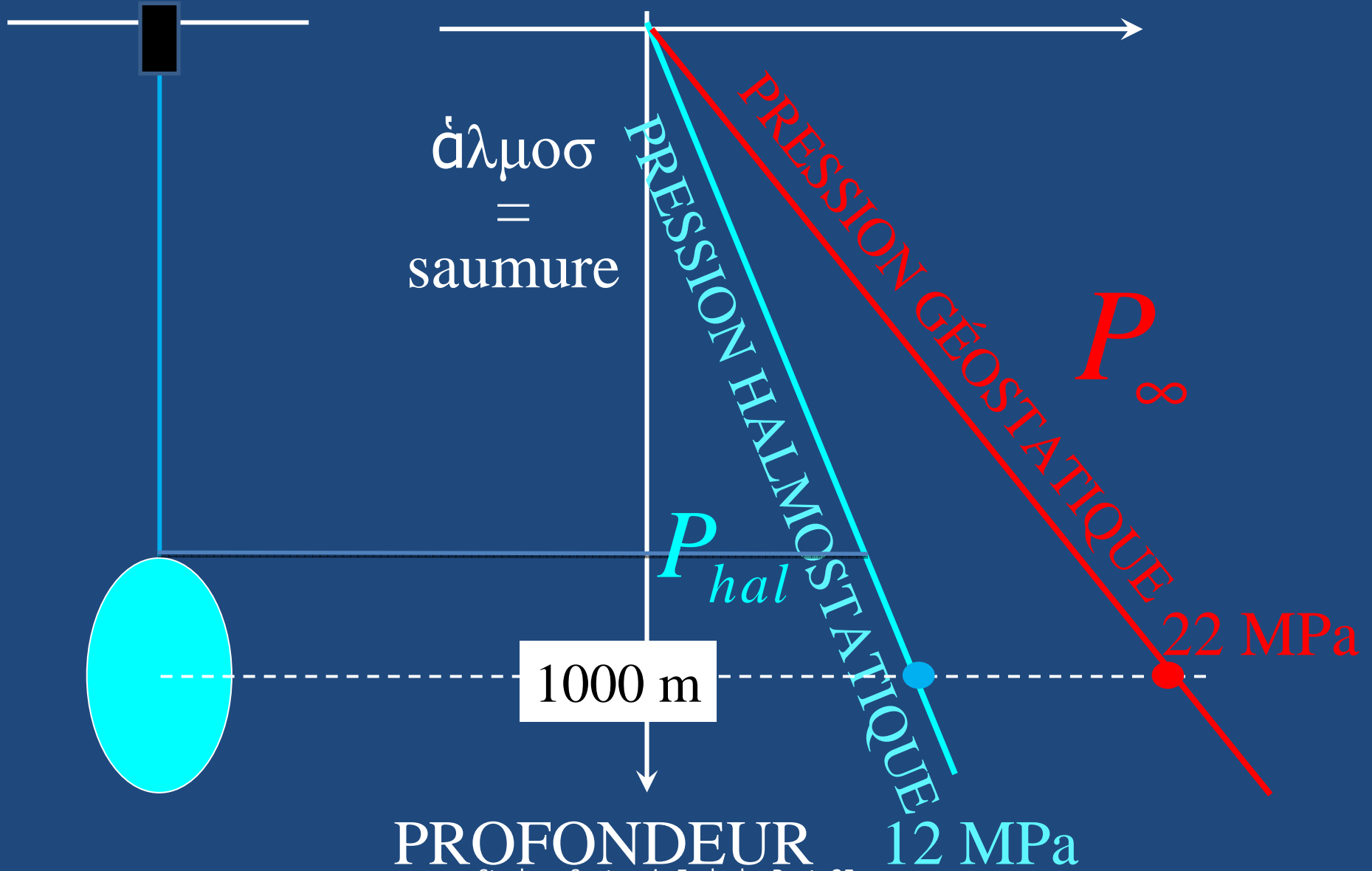


PROFONDEUR

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25

novembre 2014

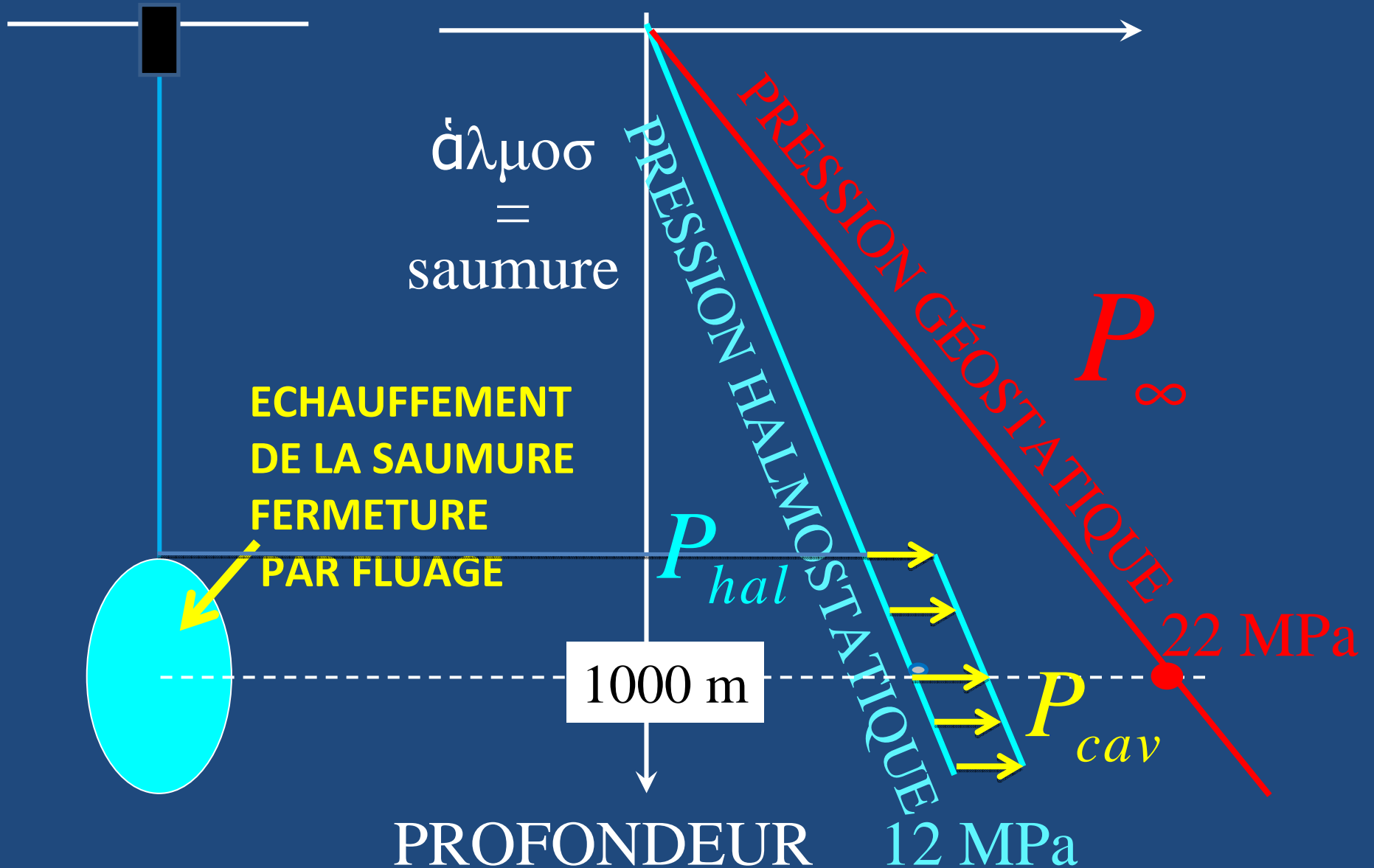
PRESSION



PROFONDEUR

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014

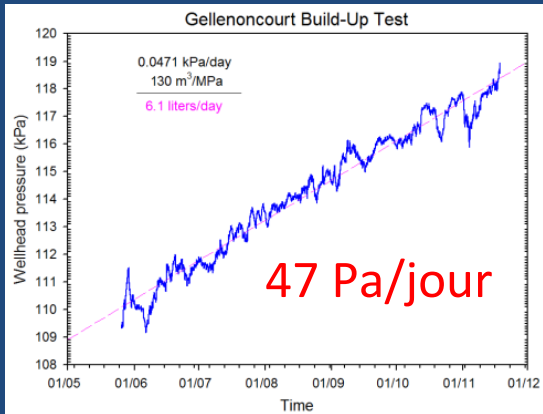
# PRESSION



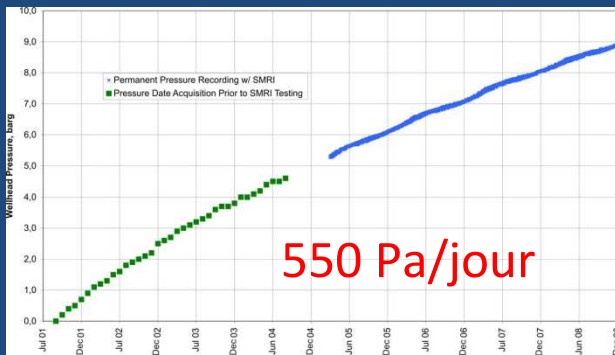
PROFONDEUR

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25

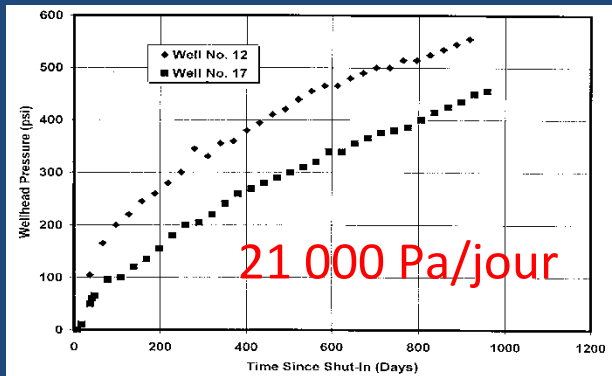
novembre 2014



Gellenoncourt (CSME, 250 m)

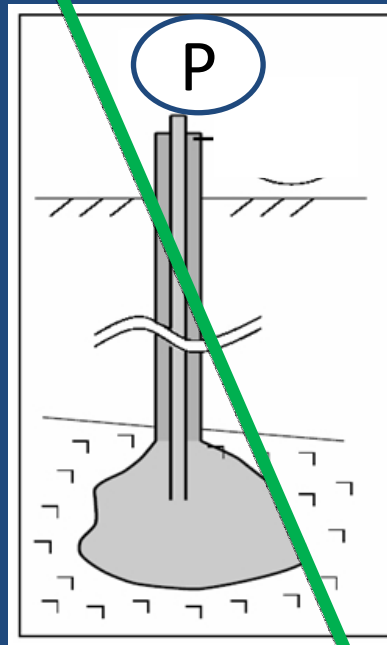


Stassfurt (Bannach & Klafki, 600 m)

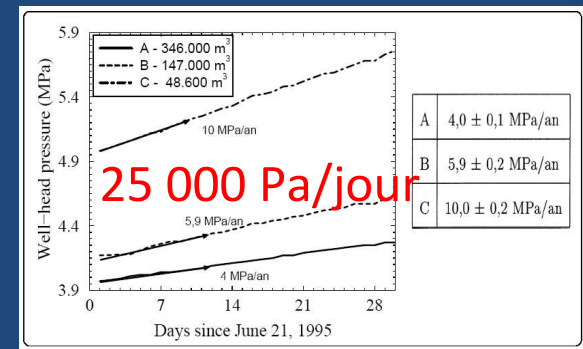


Mont Belvieu (Van Sambeek)

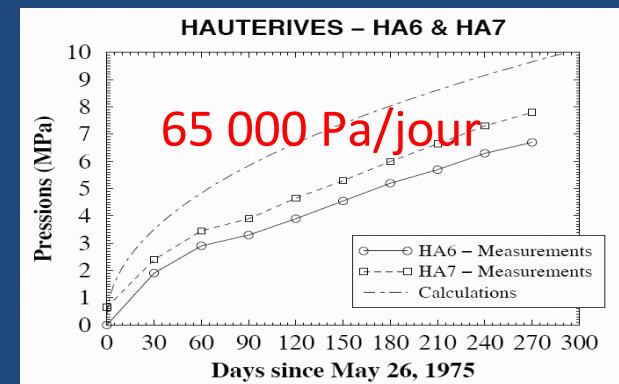
PEU PROFONDE



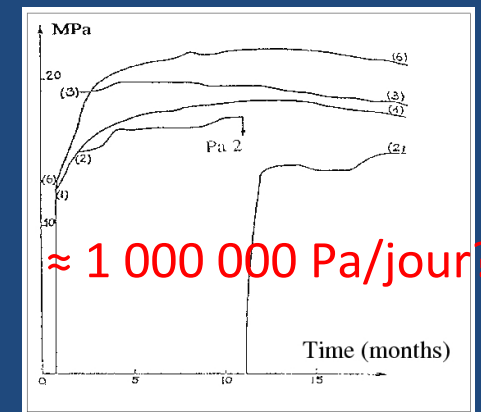
TRÈS PROFONDE



Etrez (Storengy, 1350 m)



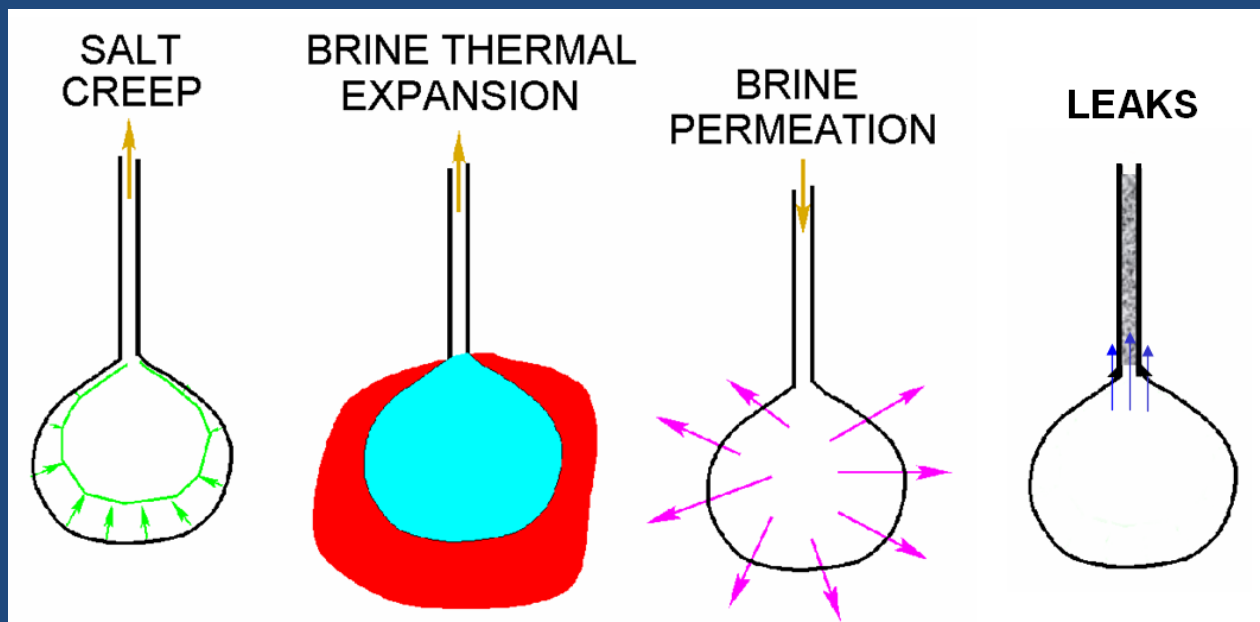
Hauterives (1600 m)



Vauvert (Kem One, 2000 m)

# POURQUOI LA PRESSION AUGMENTE

1. La caverne se referme en raison du fluage du sel
2. La saumure s'échauffe pour atteindre l'équilibre thermique avec le massif. Lent mais transitoire.
3. L'accroissement de pression est atténué par les micro-fuites





# Le retour à l'équilibre thermique est lent

## Analyse dimensionnelle

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \Delta T \quad \text{dans } \Omega \quad (\text{conduction})$$

$$\rho_{saum} C_{saum} \frac{dT_{saum}}{dt} = \int_{\partial\Omega} K \frac{\partial T}{\partial n} dS$$

$$t_c [an] = \frac{V^{2/3} [m^3]}{400} \quad 1 \text{ an si } V = 8000 \text{ m}^3; \quad 64 \text{ ans si } V = 512\,000 \text{ m}^3$$

**Dans la suite on suppose cet équilibre atteint**

# Fluage stationnaire du sel au laboratoire

$$\dot{\varepsilon}^{SS} = A(T) \sigma^n$$

$$n = 3 - 6$$

$$\sigma = 10 \text{ MPa} \quad : \quad \dot{\varepsilon} = 3 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-2} / \text{an}$$

## Vitesse de fermeture d'une caverne

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

$$\dot{V} / V = f(\Omega) A(T) (P_{géo} - P_{cav})^n$$

## Augmentation de la pression dans une cavité fermée

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

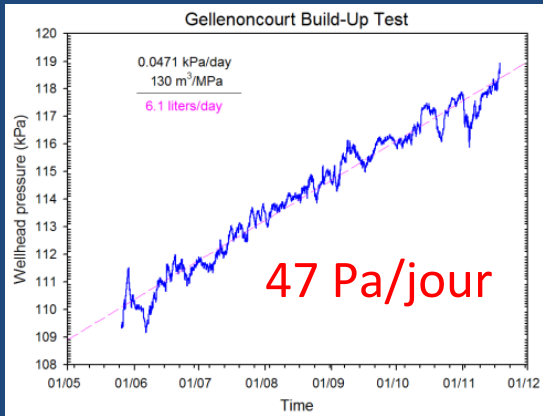
$$\dot{V} / V = A^*(T) (P_{géo} - P_{cav})^n$$

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

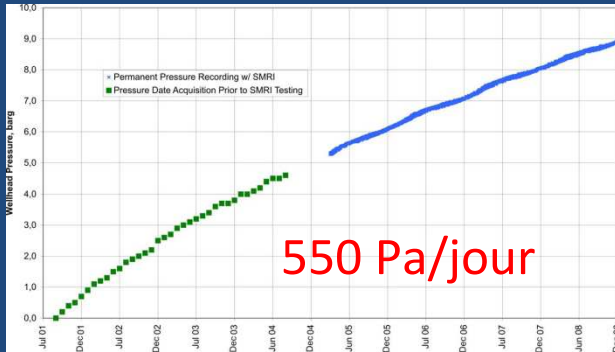


« Compressibilité de la caverne »,  $1/\beta \approx 2500$  MPa

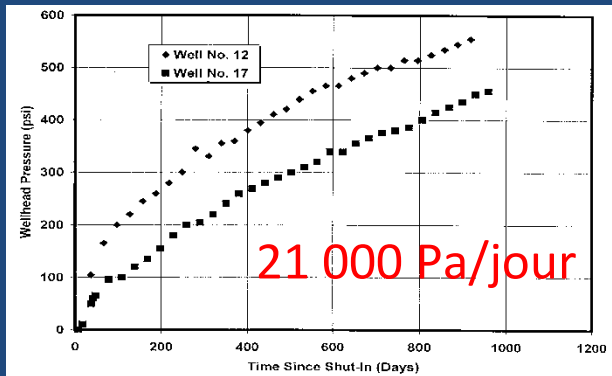
$$H = 250-2000 \text{ m} \quad \dot{P} = 0.4 - 40 \text{ MPa / an}$$



Gellenoncourt (CSME, 250 m)

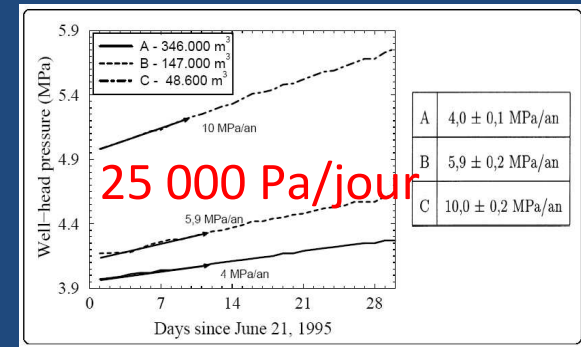
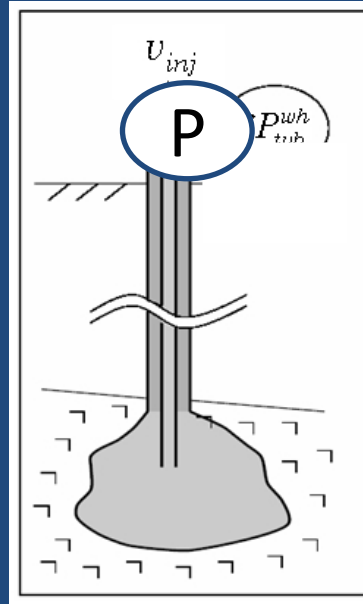


Stassfurt (Bannach & Klafki, 600 m)

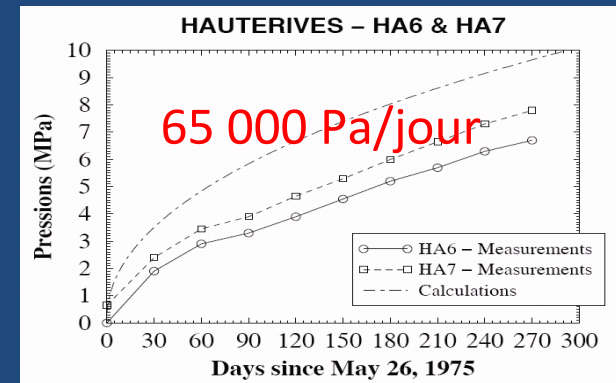


Mont Belvieu (Van Sambeek)

PEU  
PROFONDE



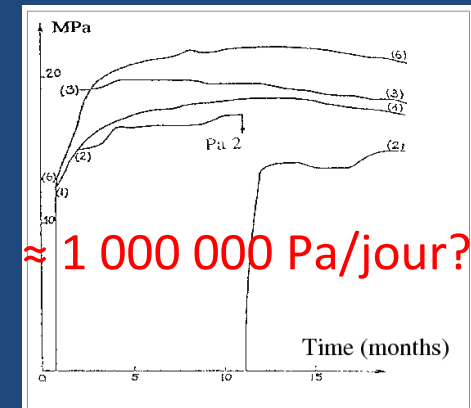
Etrez (Storengy, 1350 m)



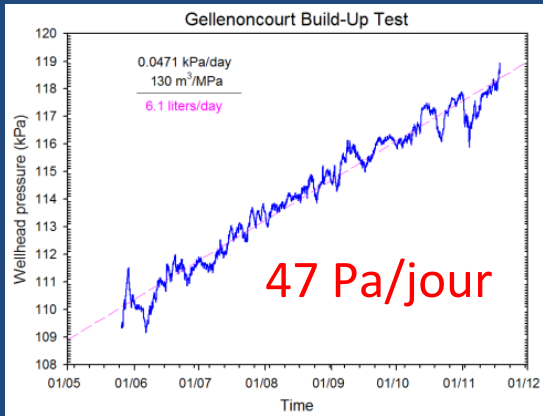
Hauterives (1600 m)

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

TRÈS  
PROFONDE

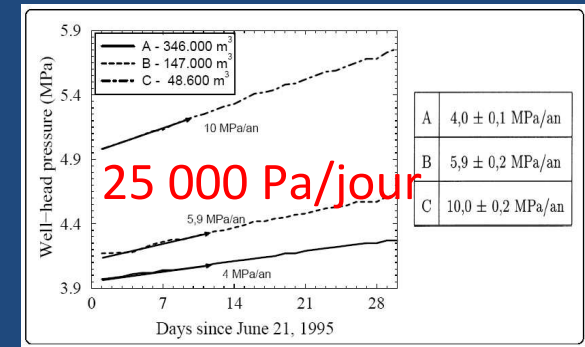


Vauvert (Kem One, 2000 m)



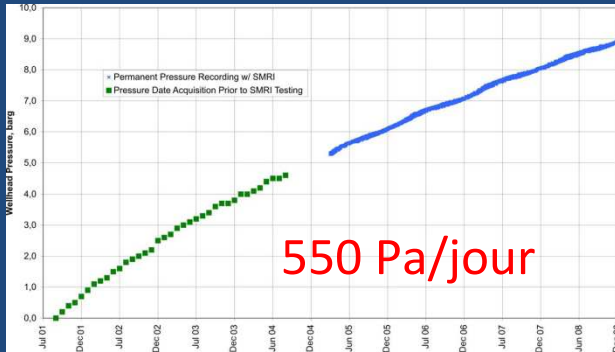
Gellenoncourt (CSME, 250 m)

PEU PROFONDE

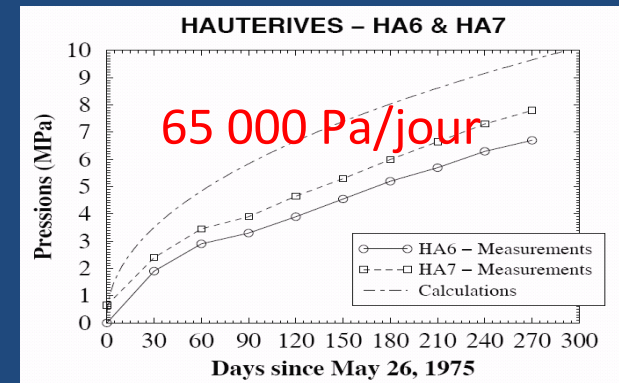


Etrez (Storengy, 1350 m)

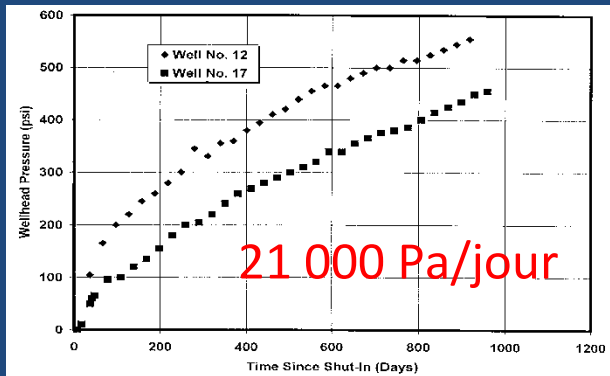
ÉVOLUTION DE LA PRESSION EN CAVERNE FERMÉE



Stassfurt (Bannach & Klafki, 600 m)

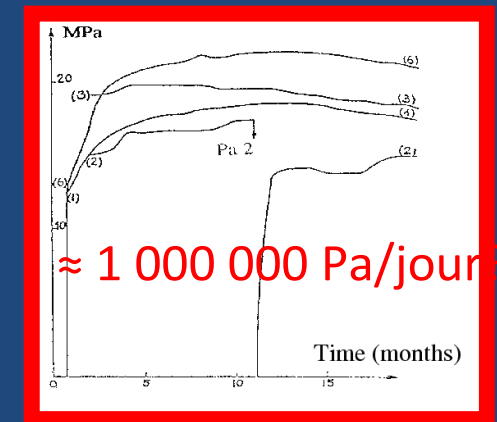


Hauterives (Vencorex, 1600 m)

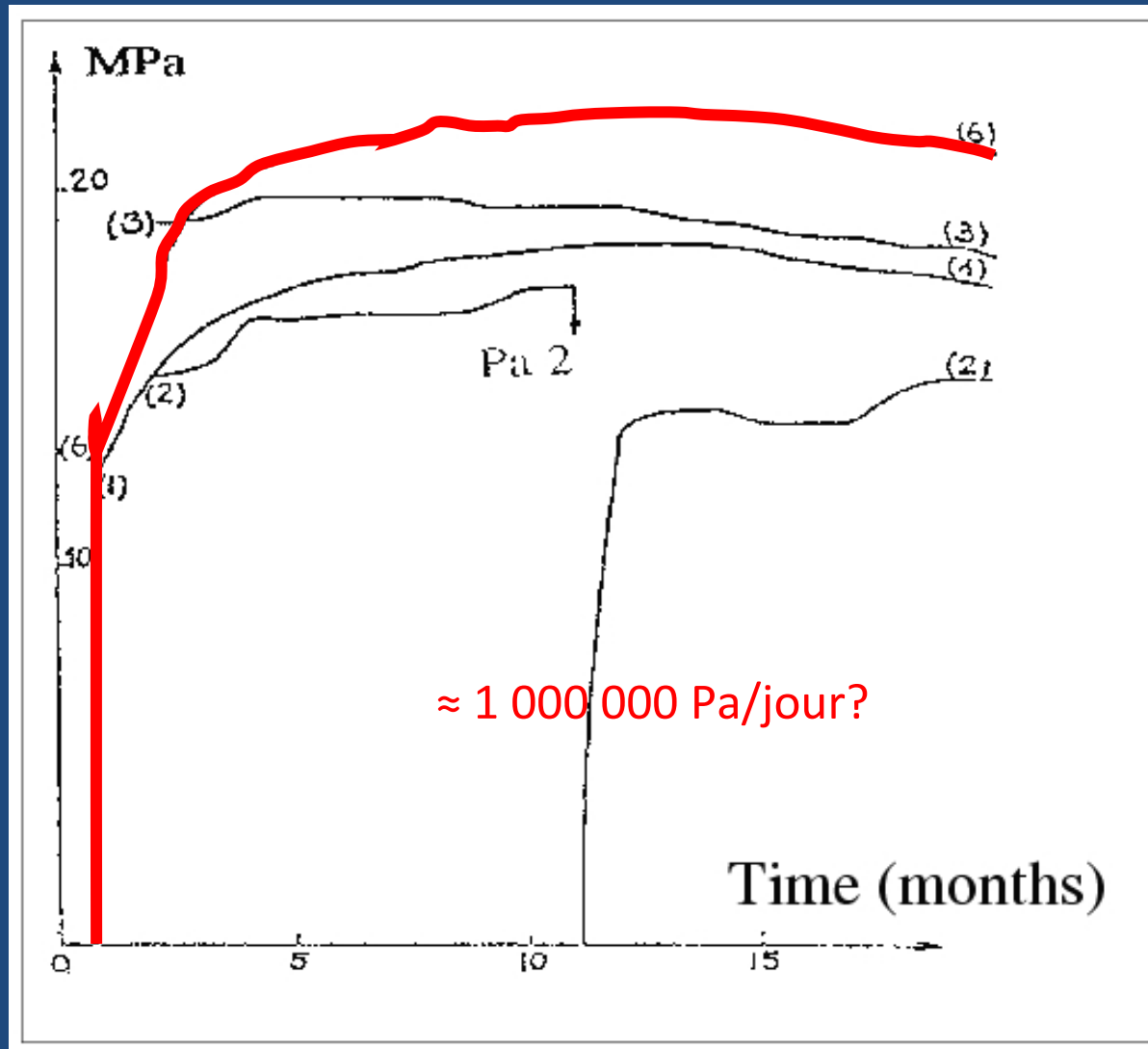


Mont Belvieu (Van Sambeek)

TRÈS PROFONDE

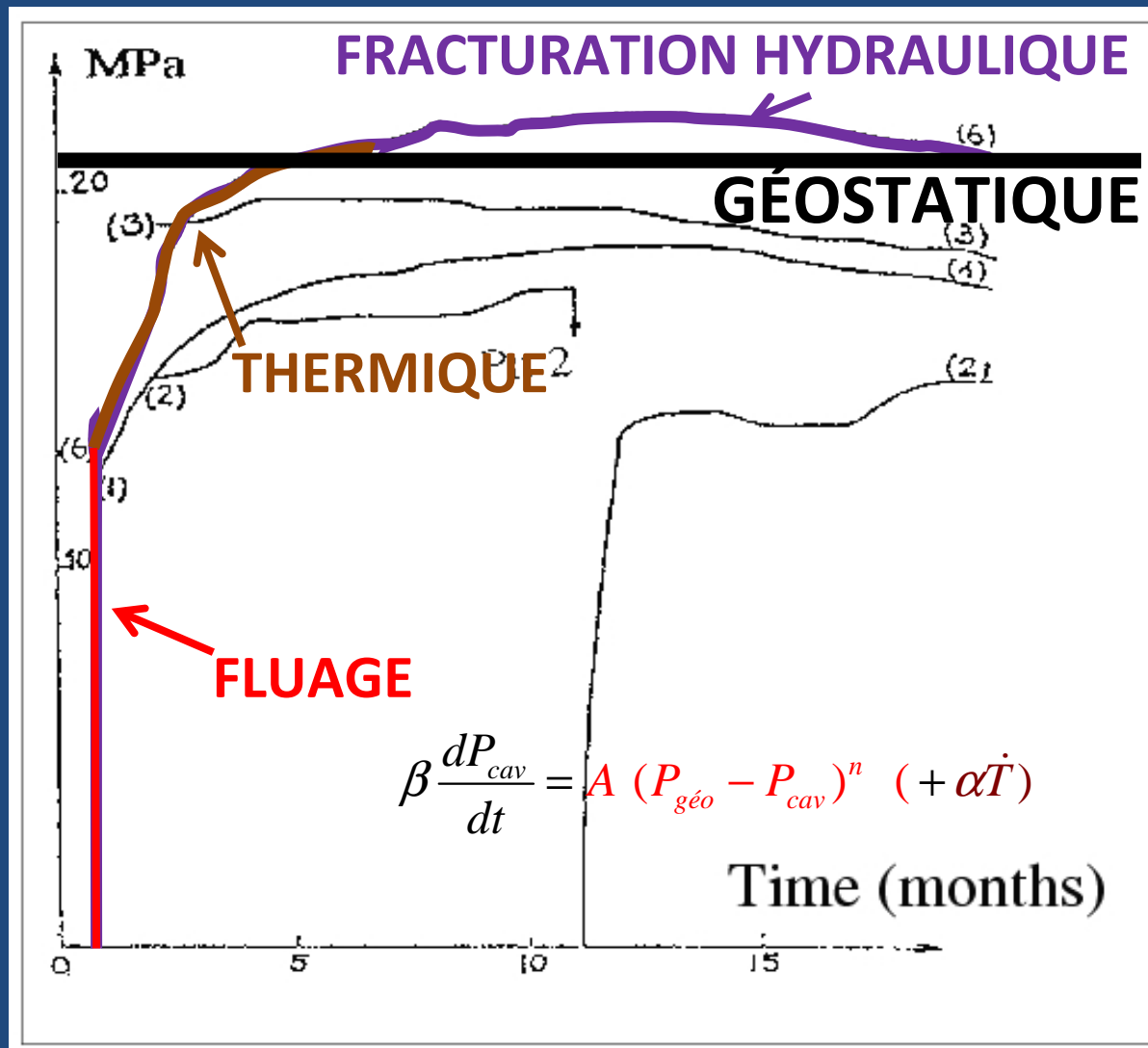


Vauvert (Kem One, 2000 m)



# Vauvert (Kem One, 2000 m)

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014



Vauvert (Kem One, 2000 m)

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014



Les cavités seront fermées un jour. Elles seront remplies de saumure, un bouchon sera placé au voisinage du sabot du cuvelage, du ciment sera coulé dans le puits ...

... isolant une grande “bulle” de saumure.  
La pression de la saumure augmentera.

La valeur finale atteinte par la pression de la saumure dans la caverne est essentielle du point de vue de la protection de l'environnement.

Dans certaines circonstances, cette pression peut atteindre une valeur supérieure à la pression géostatique, engendrer une hydrofracturation, un écoulement de saumure vers les aquifères potables peu profonds et leur pollution.

# Sommaire

1. Introduction
2. Comportement de la saumure en caverne fermée
3. Scénarios avec et sans microperméabilité
4. Essais en place
5. Conclusion

EST-CE QUE LA PRESSION  
AUGMENTERA RÉELLEMENT  
JUSQU'À LA PRESSION  
GÉOSTATIQUE ?

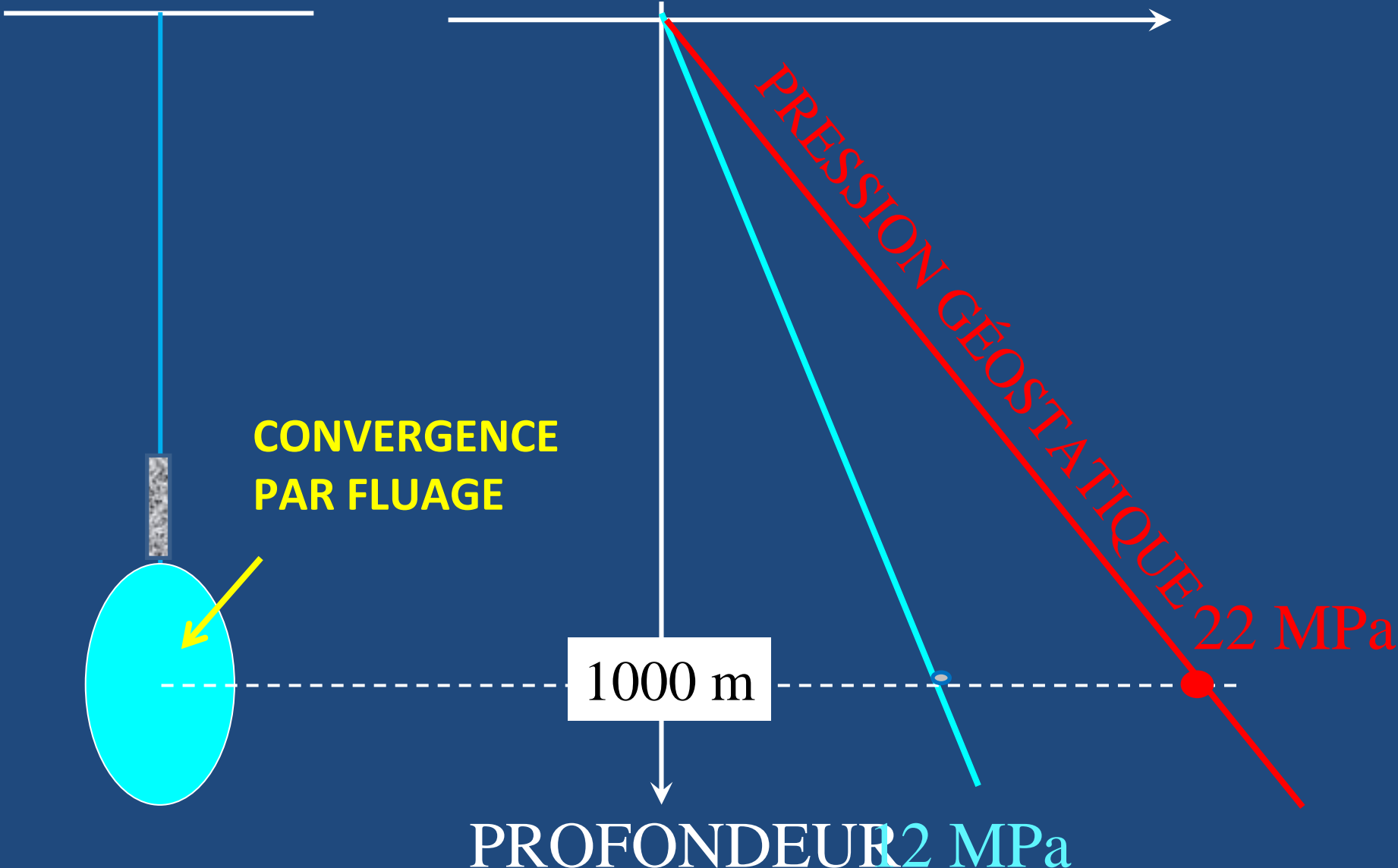
# UN SCÉNARIO PESSIMISTE

## LA CAVITÉ EST PARFAITEMENT ÉTANCHE

LA CONVERGENCE PAR FLUAGE EST ACTIVE  
(QUOIQUE DE PLUS EN PLUS LENTE) JUSQU'À CE  
QUE LA PRESSION DANS LA CAVERNE ( $P_{cav}$ )  
ATTEIGNE LA PRESSION GÉOSTATIQUE ( $P_{géo}$ )

$$\beta \frac{dP_{cav}}{dt} = A (P_{géo} - P_{cav})^n \quad (+\alpha \dot{T})$$

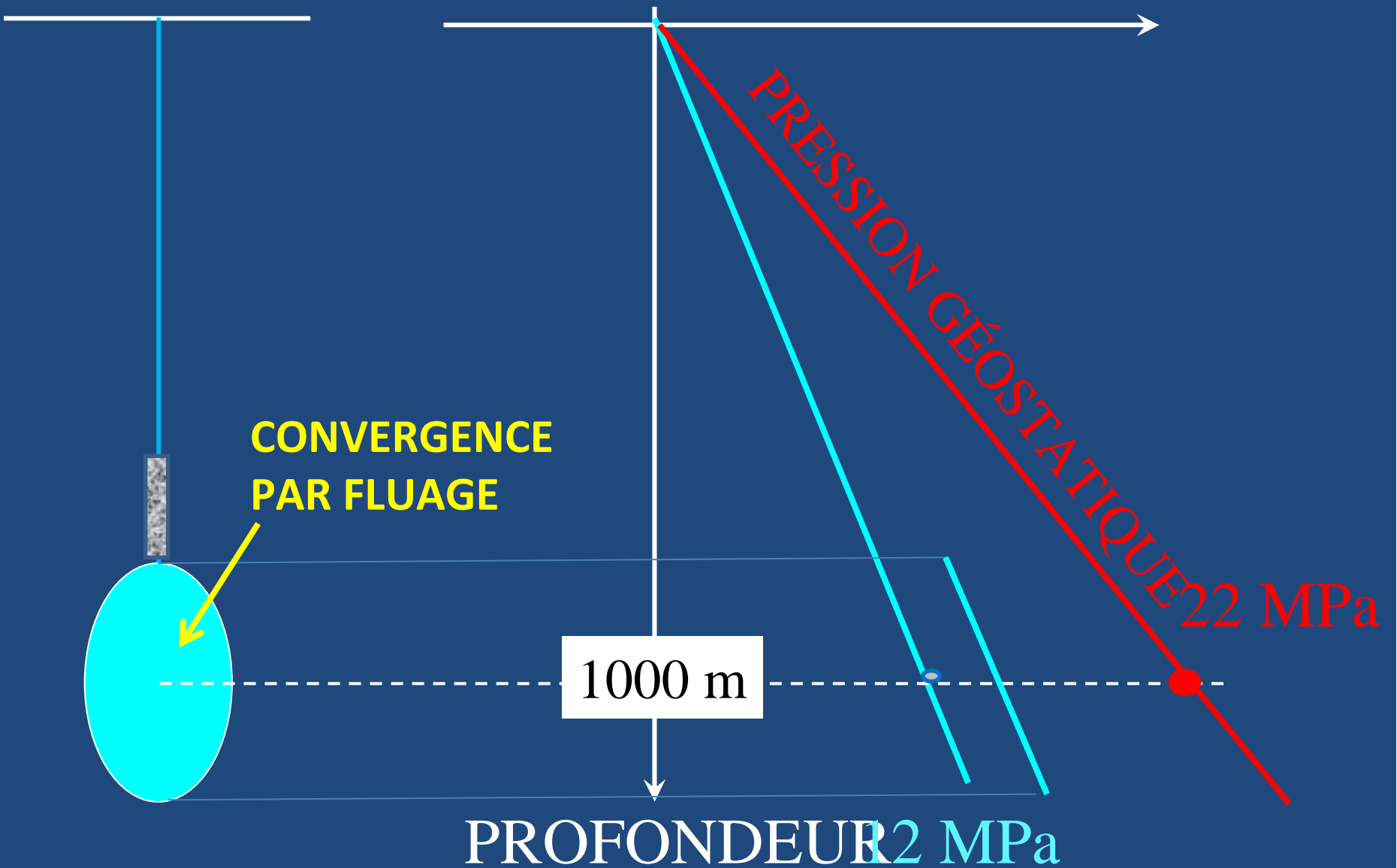
PRESSION



UN SCENARIO PESSIMISTE

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014

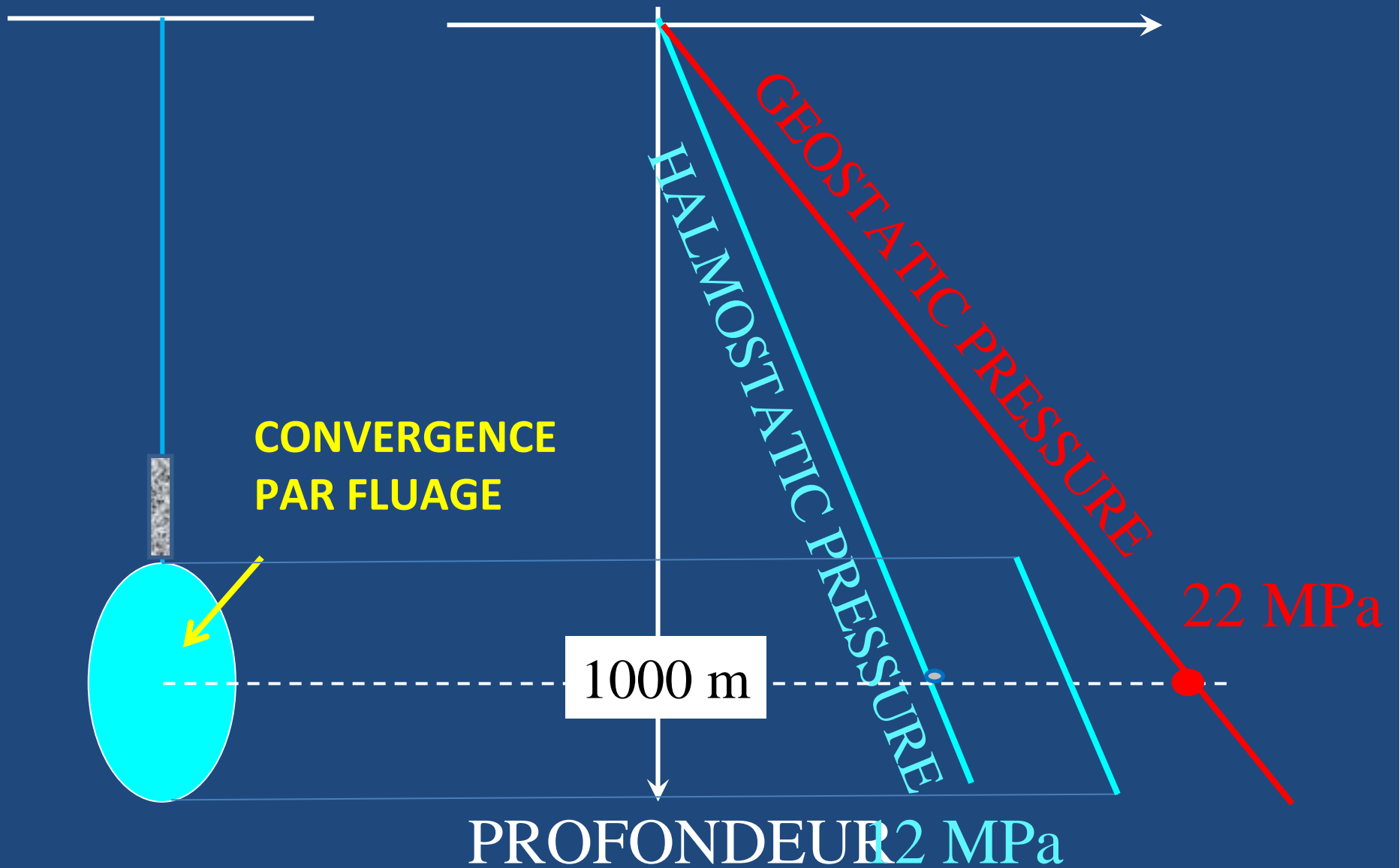
PRESSION



UN SCENARIO PESSIMISTE

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014

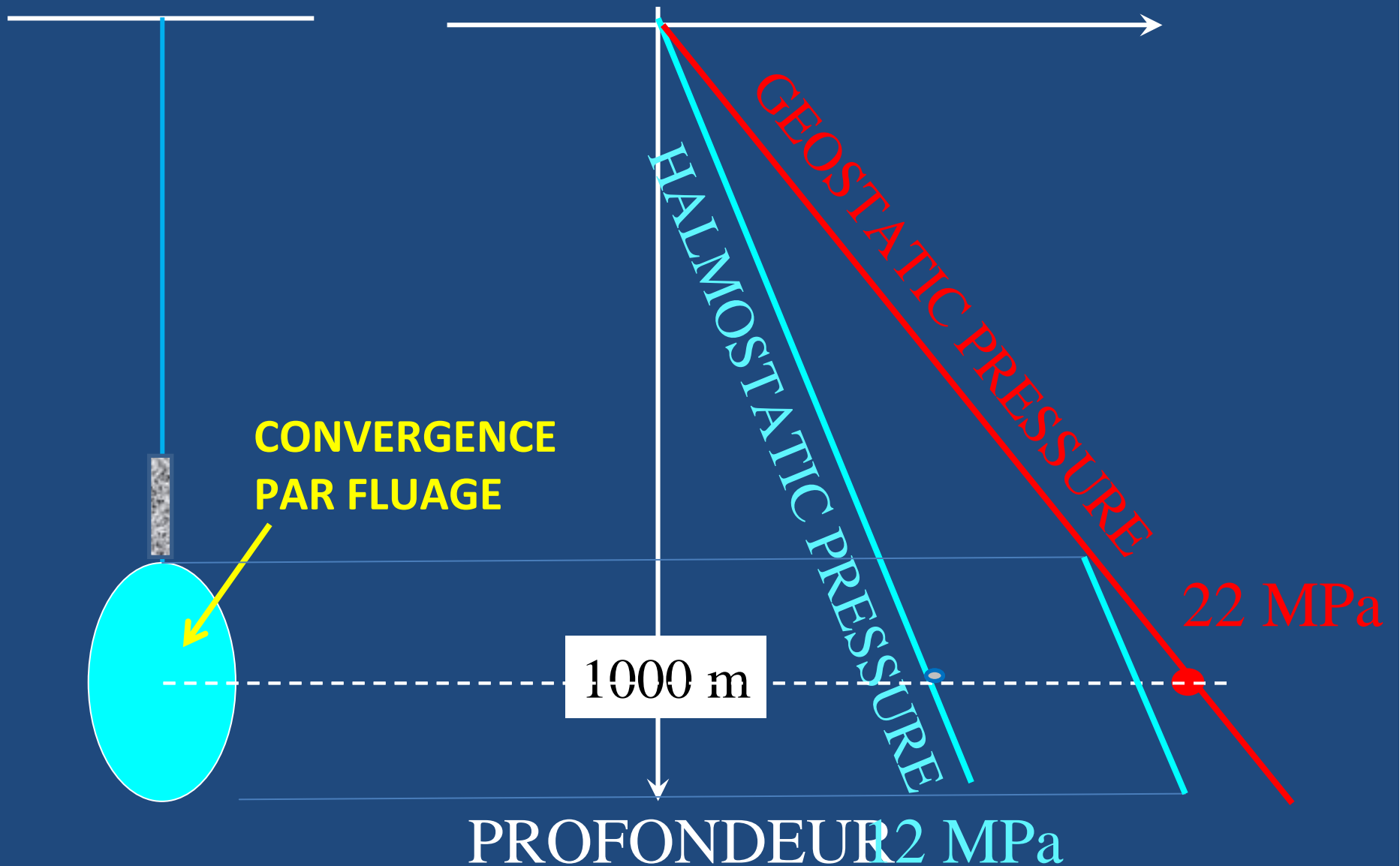
PRESSION



UN SCENARIO PESSIMISTE

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014

PRESSION

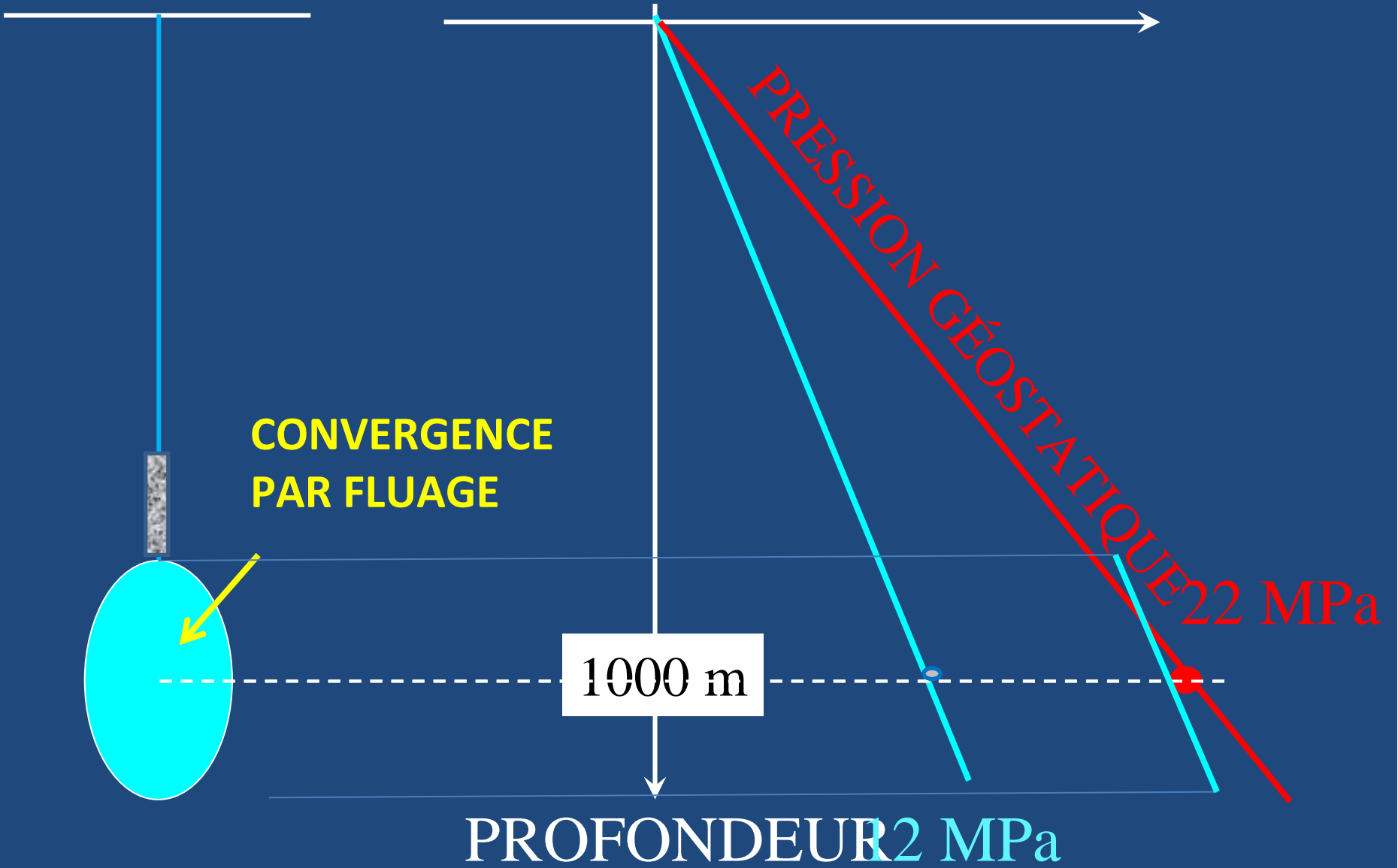


UN SCENARIO PESSIMISTE

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014



PRESSION



CONVERGENCE  
PAR FLUAGE

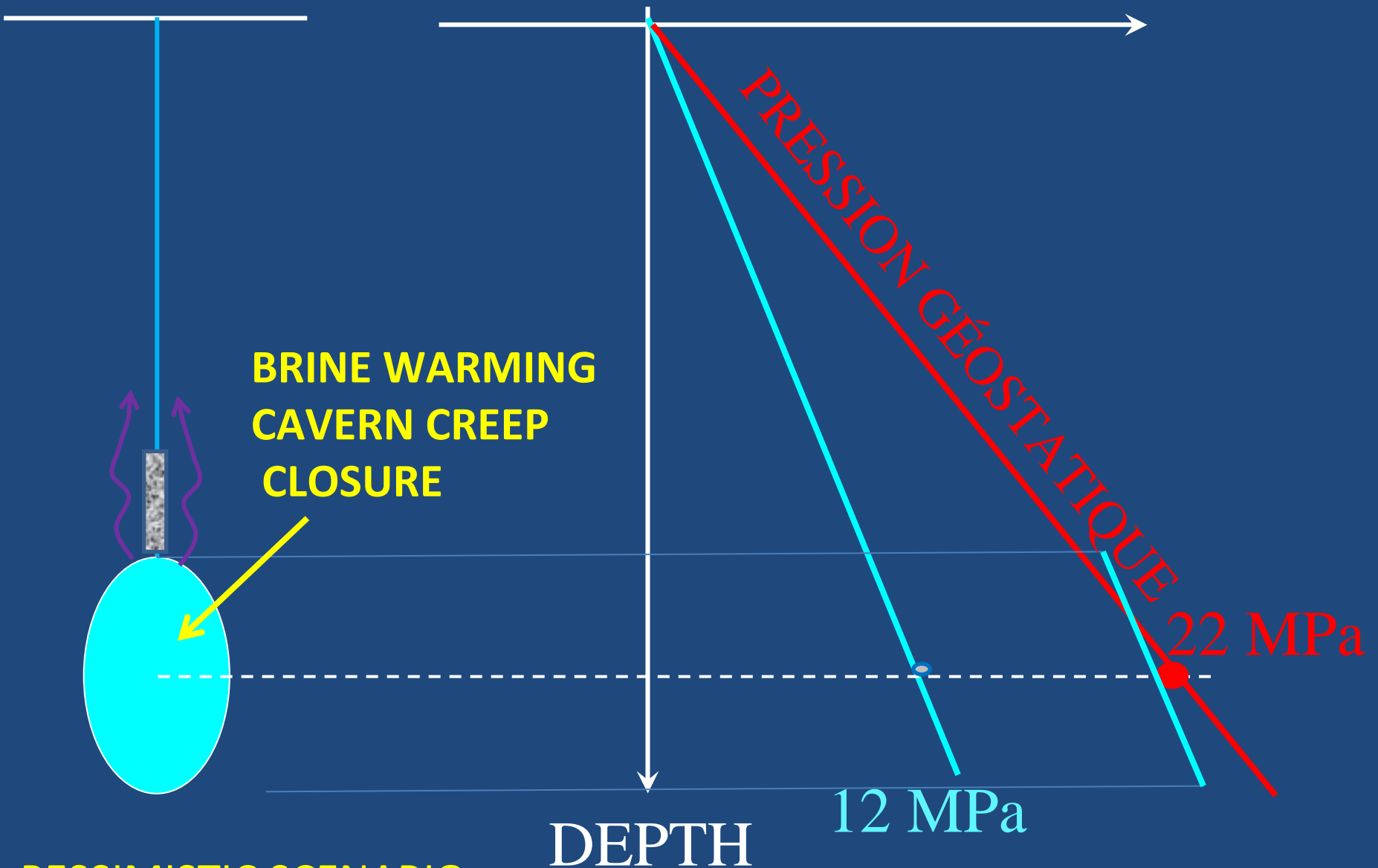
1000 m

PROFONDEUR 2 MPa

UN SCENARIO PESSIMISTE

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014

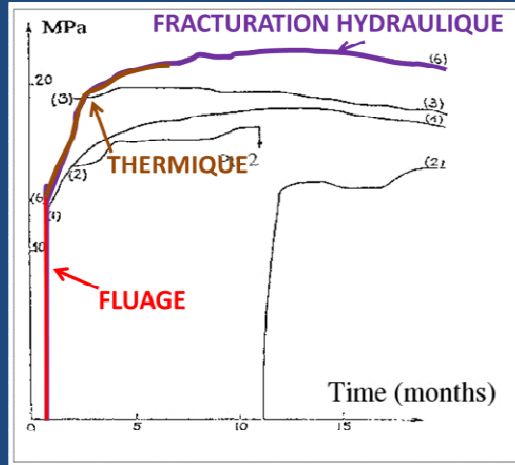
PRESSURE



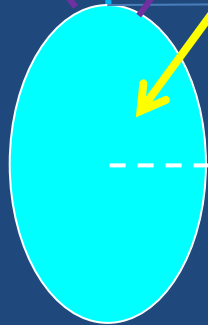
A PESSIMISTIC SCENARIO

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014

PRESSURE



BRINE WARMING  
CAVERN CREEP  
CLOSURE



PRESSION GÉOSTATIQUE

22 MPa

12 MPa

DEPTH

A PESSIMISTIC SCENARIO

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014

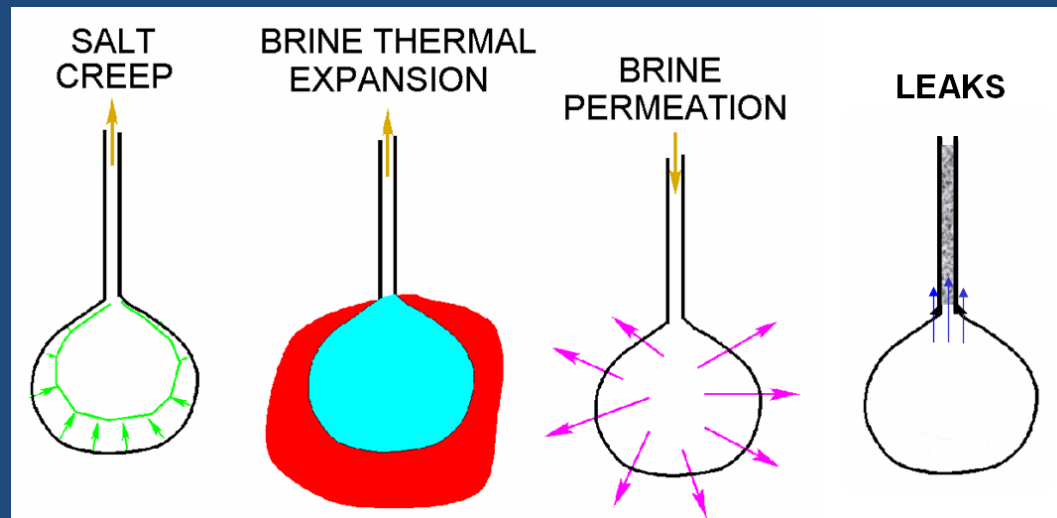
# UN SCÉNARIO MOINS PESSIMISTE

# UN SCÉNARIO MOINS PESSIMISTE

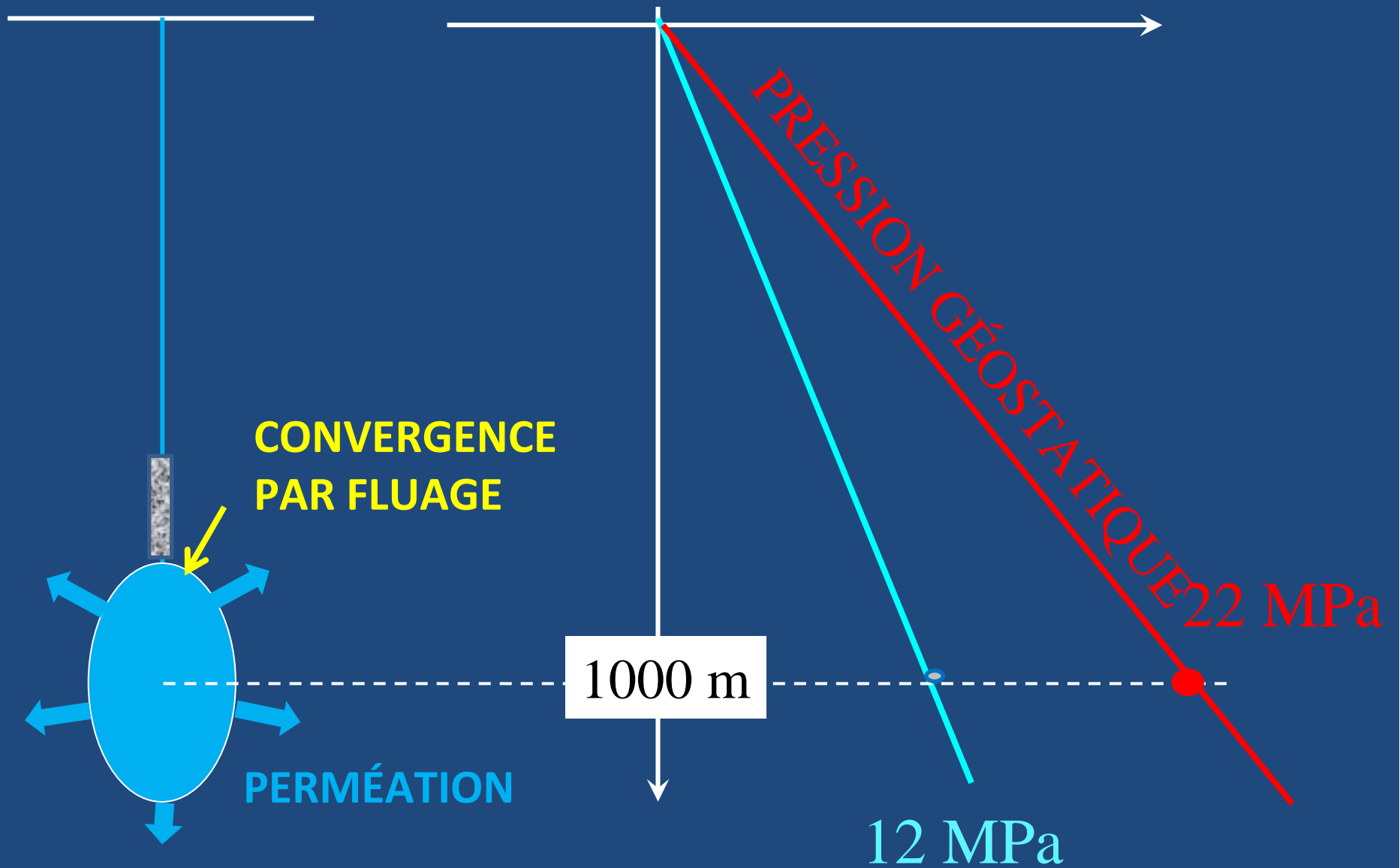
LE SEL EST (MICRO) PERMÉABLE

et fait « soupape »

$$\beta \dot{P}_{cav} = A (P_{\infty} - P_{cav})^n - \chi (P_{cav} - P_0)$$



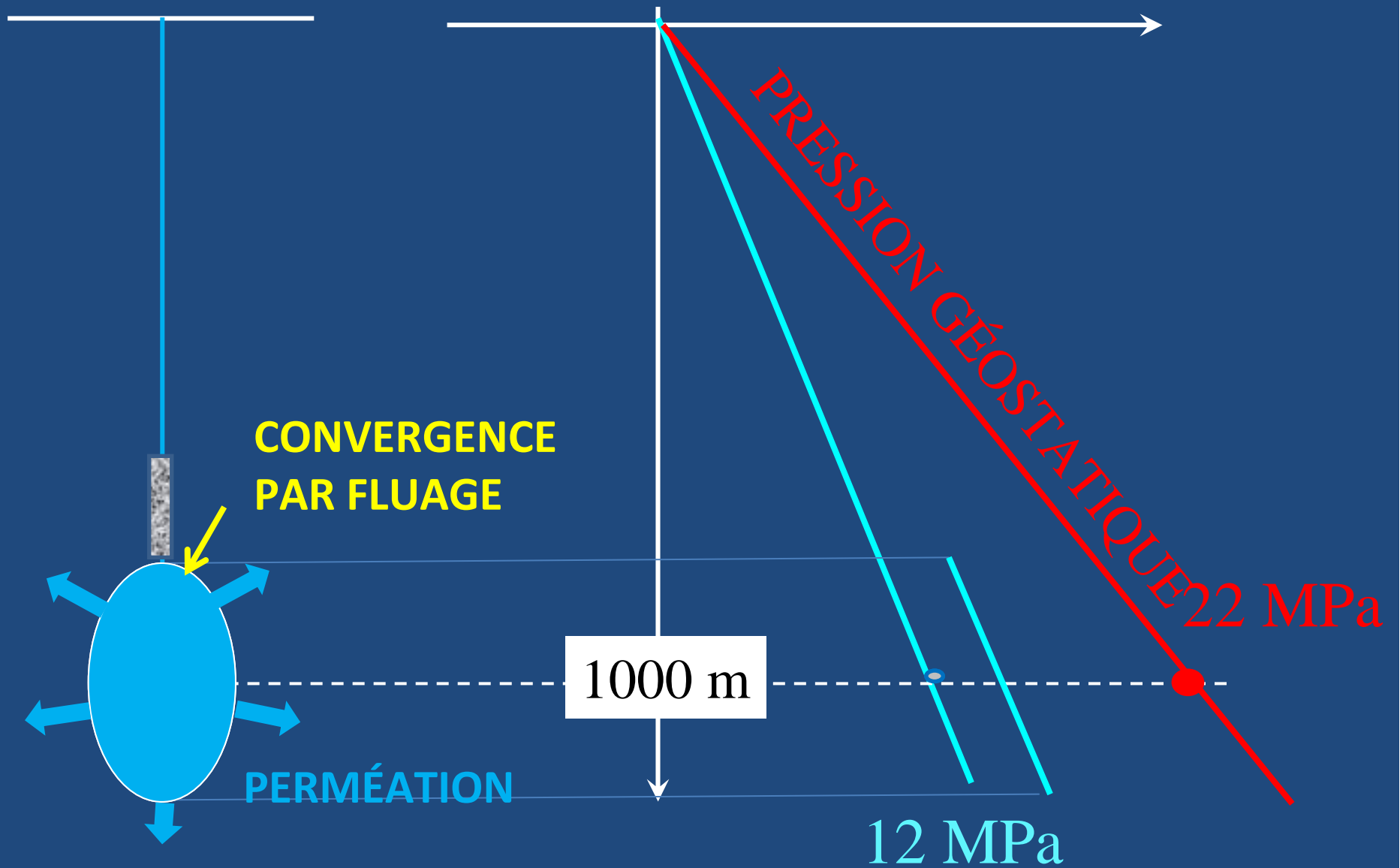
# PRESSION



UN SCENARIO MOINS PESSIMISTE

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014

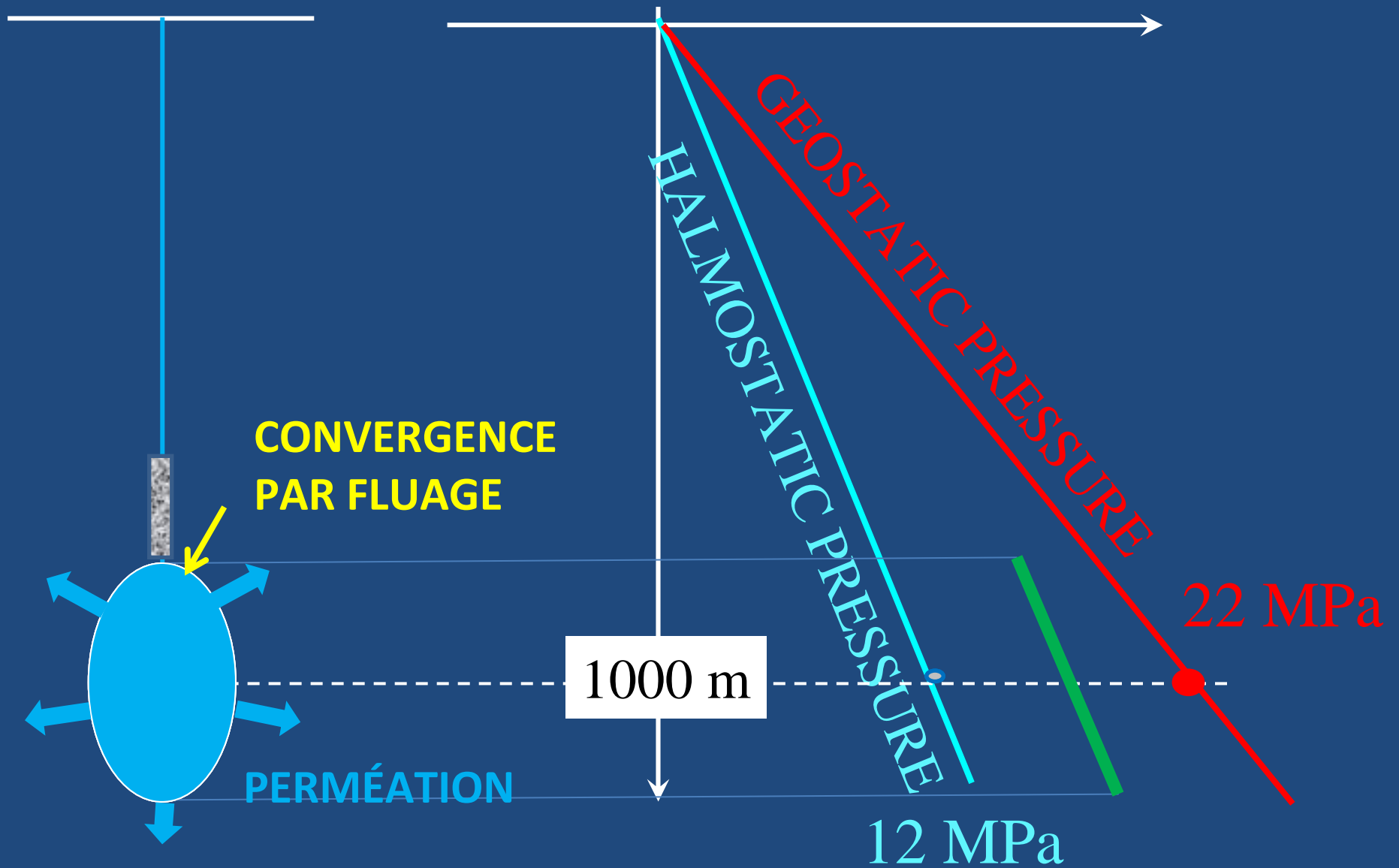
# PRESSION



UN SCENARIO MOINS PESSIMISTE

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014

# PRESSION

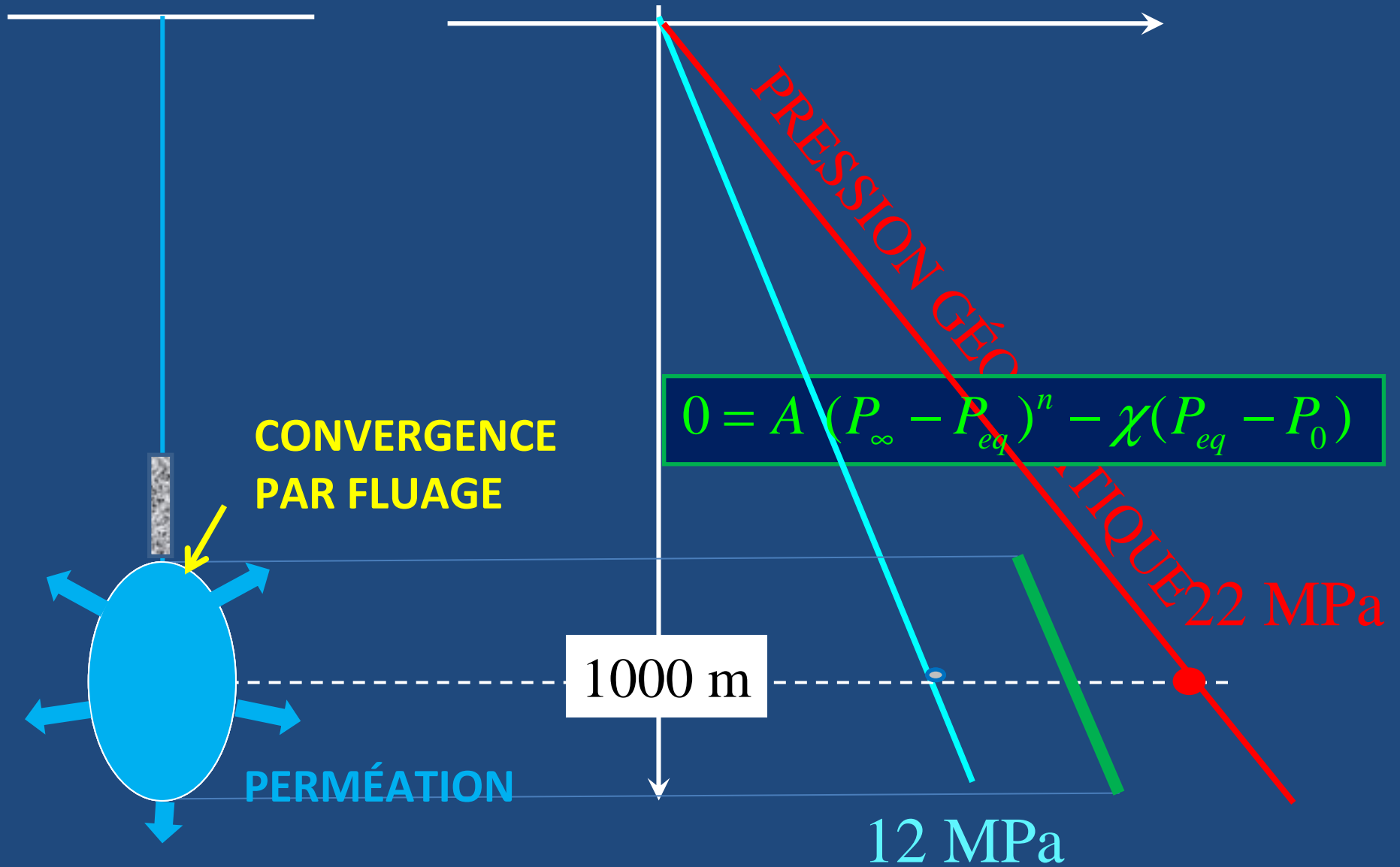


UN SCENARIO MOINS PESSIMISTE

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014



# PRESSION



# Sommaire

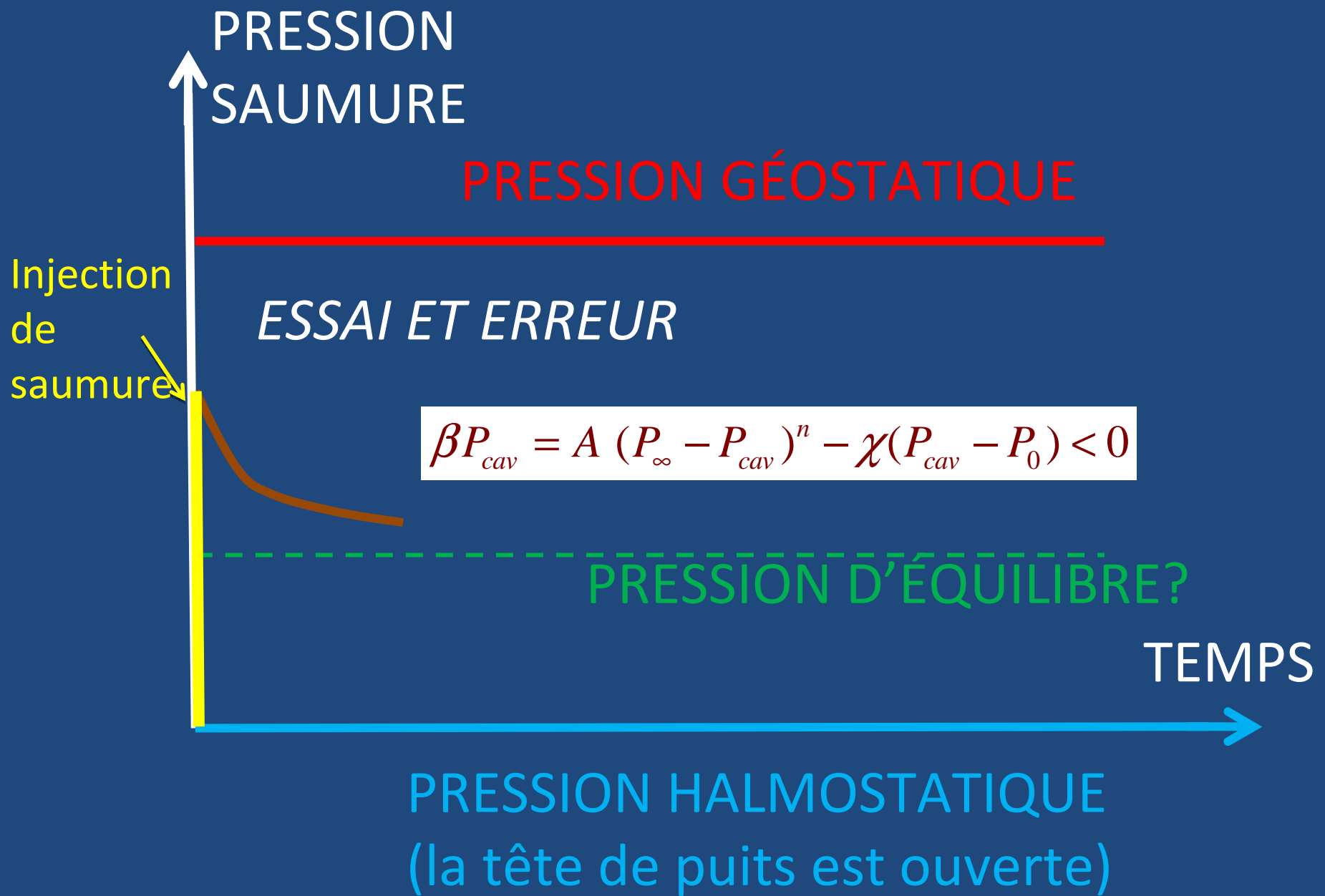
1. Introduction
2. Comportement de la saumure en caverne fermée
3. Scénarios avec et sans microperméabilité
4. Essais en place
5. Conclusion

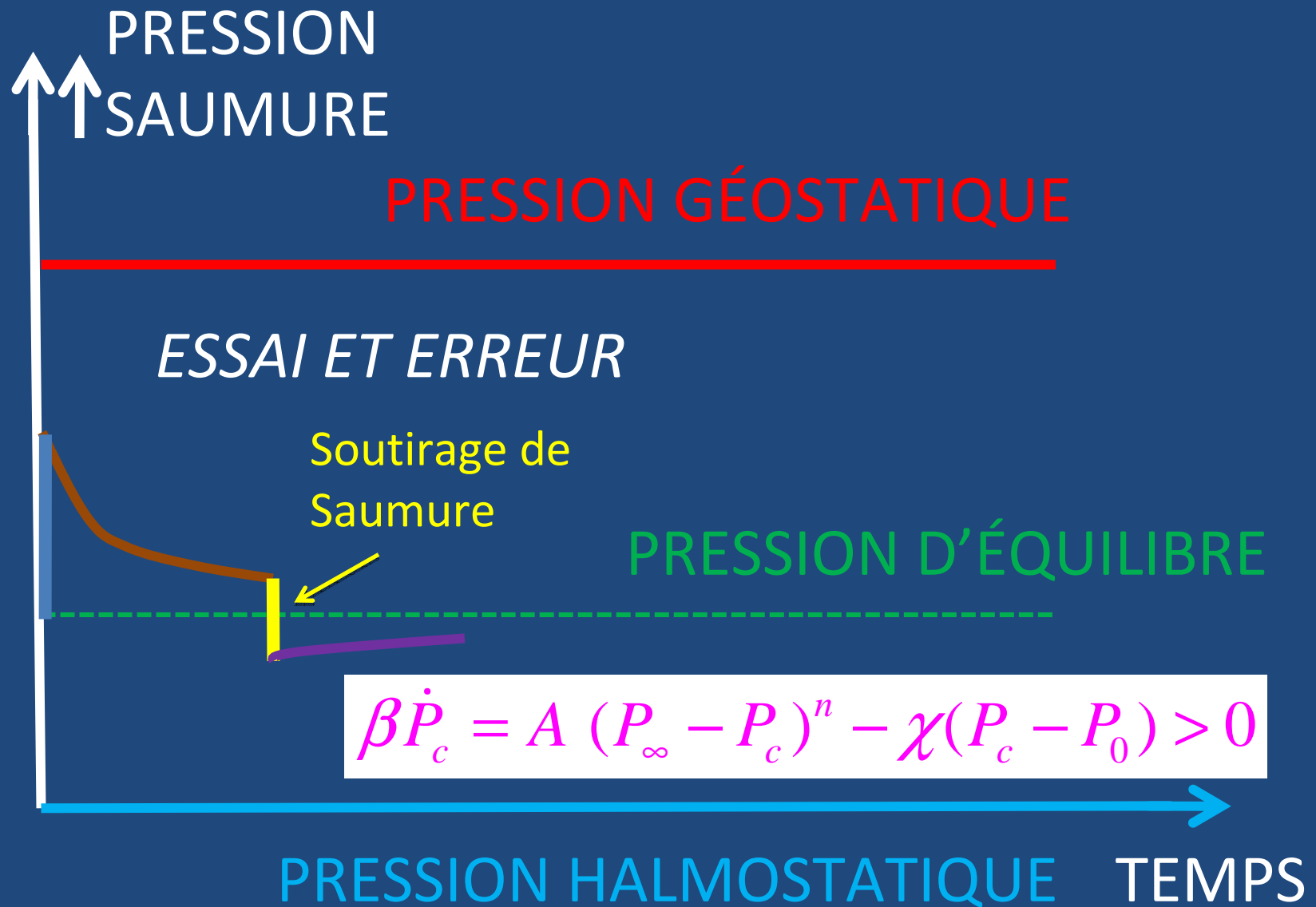
# CINQ CAVITÉS

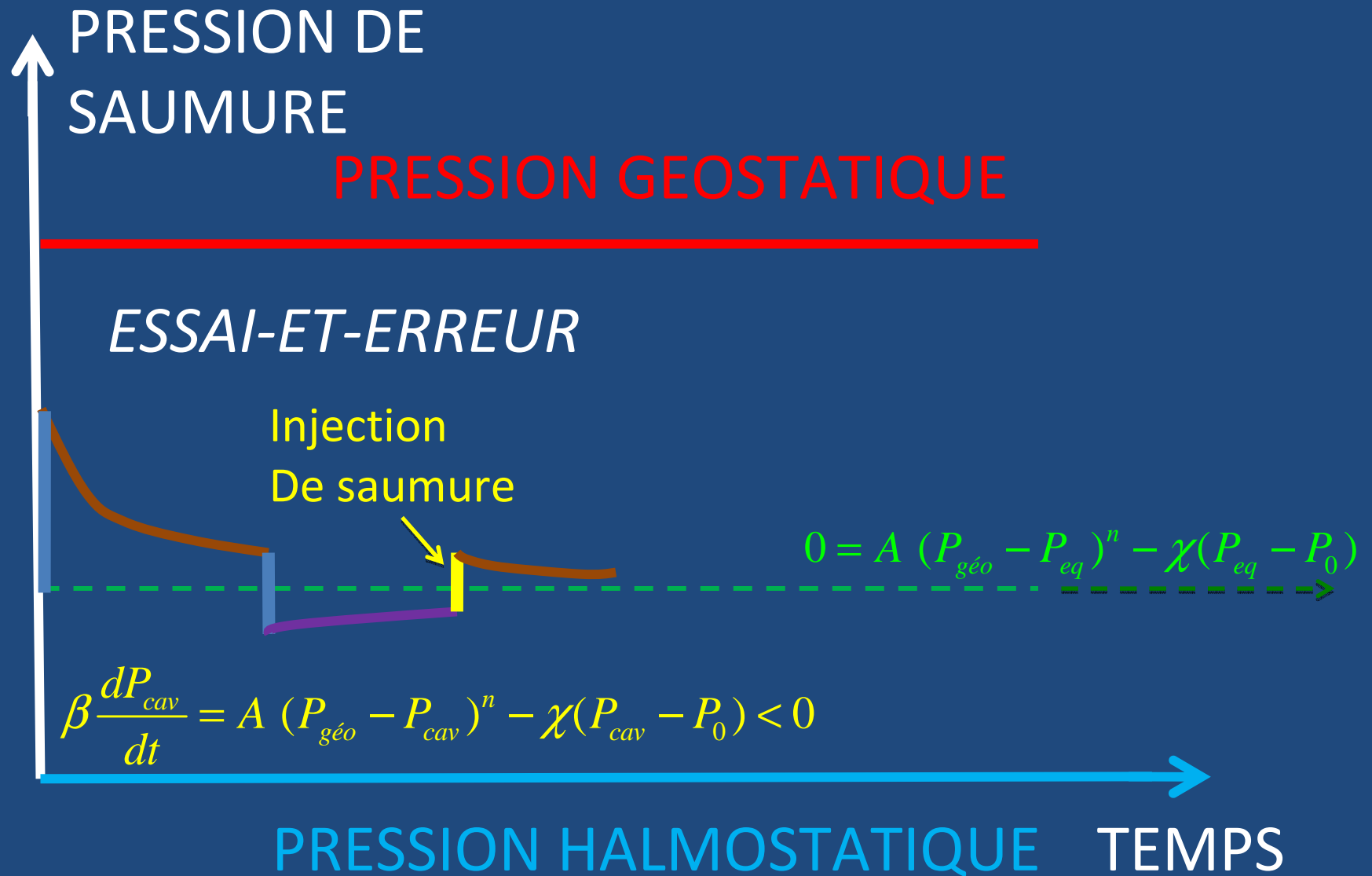


# À LA RECHERCHE DE LA PRESSION D'ÉQUILIBRE

Essai et erreur  
(borne supérieure – borne inférieure)









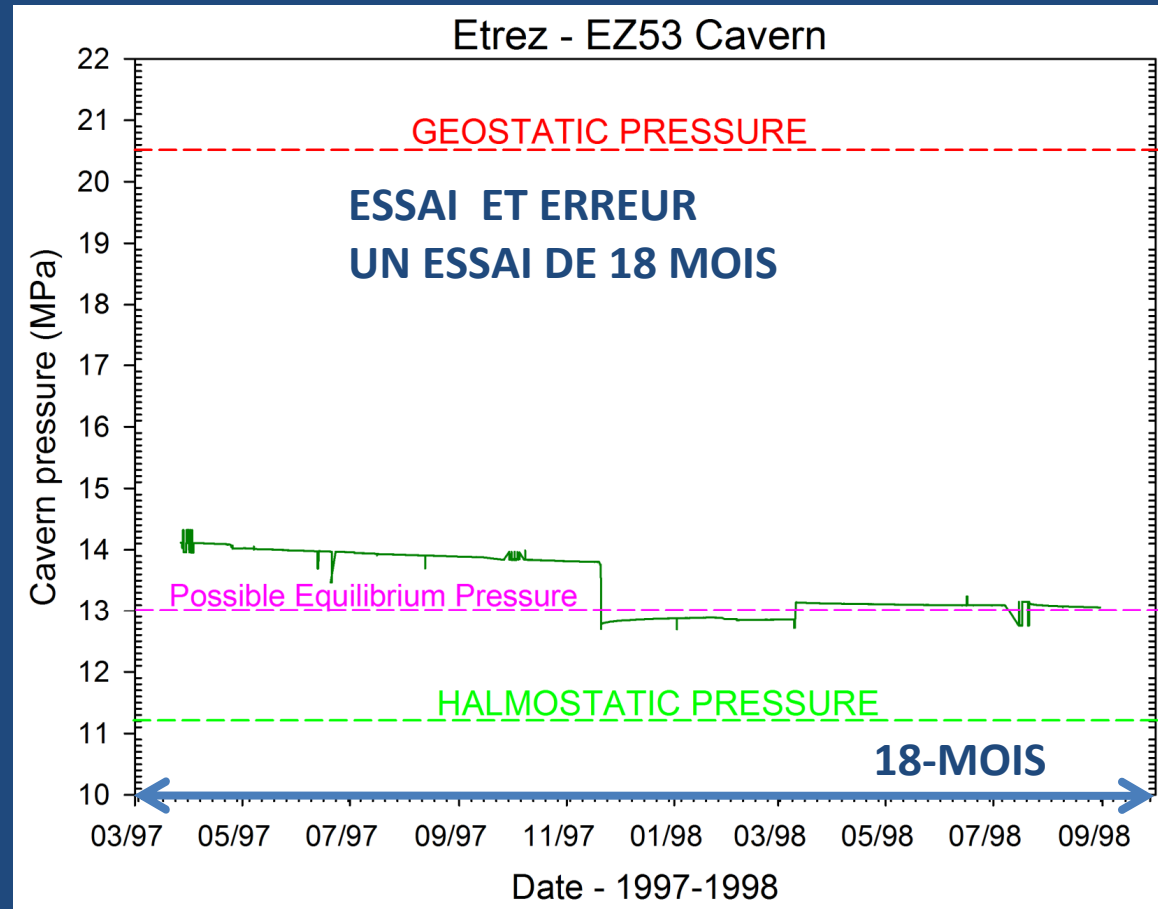
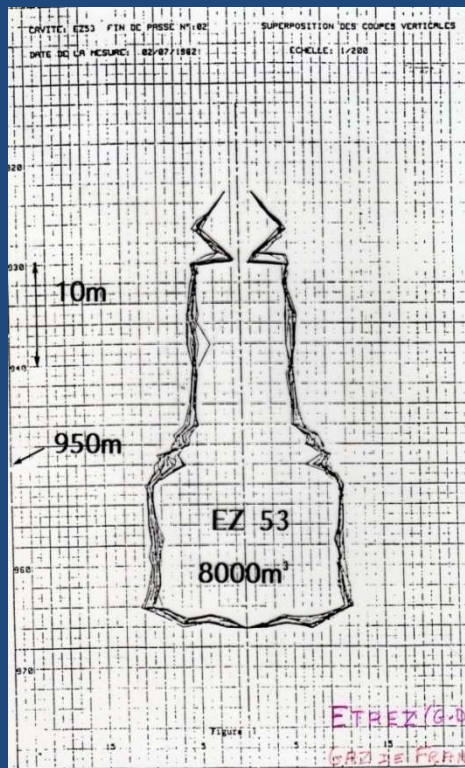
# EZ 53 (ETREZ, STORENGY)

1997-2013

Bérest P., Bergues J., Brouard B., Durup J.G., Guerber B. *A salt cavern abandonment test.*  
*Int. J. Rock Mech. & Mining Sci.*, 38:357-368, 2001.

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014

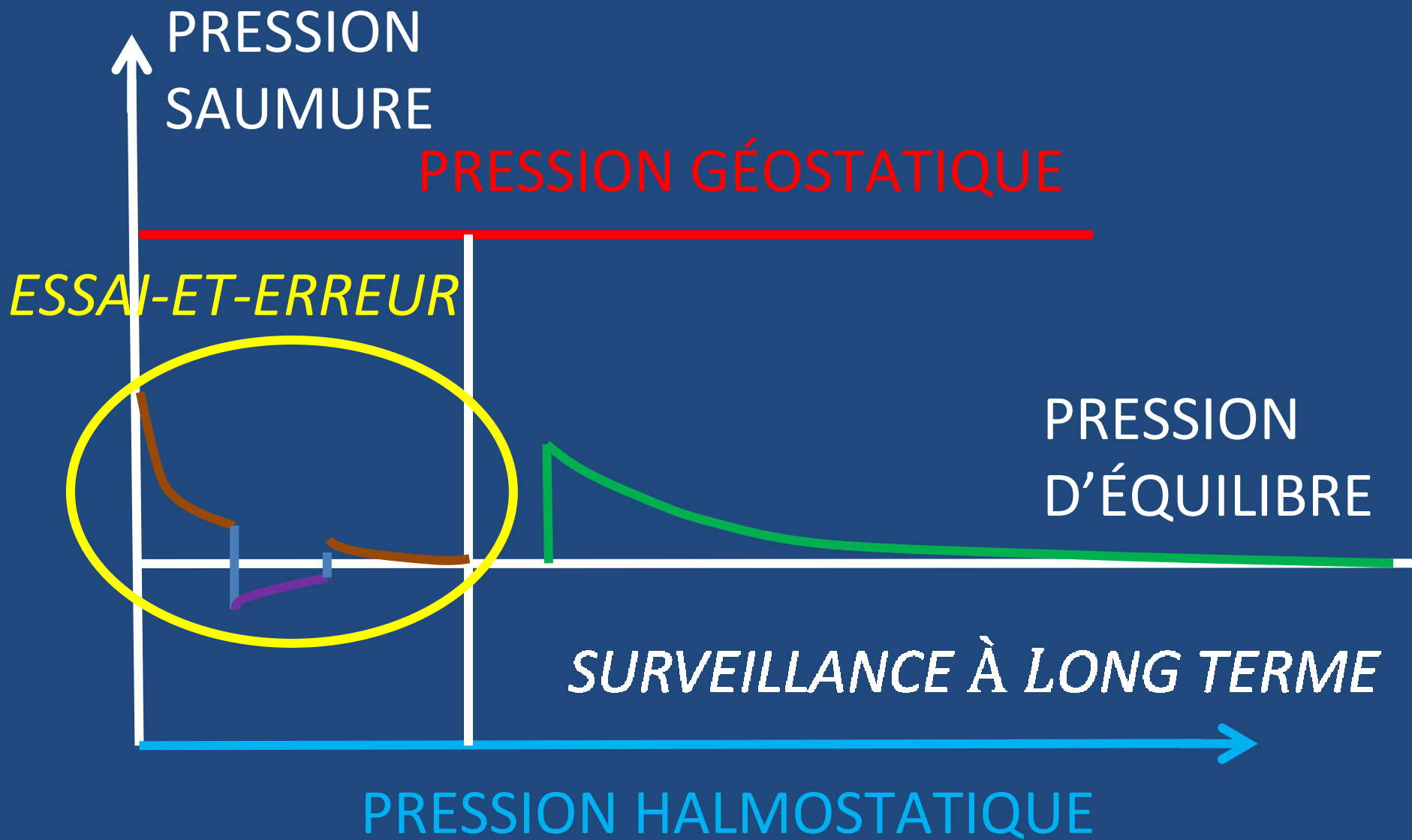
# EZ53: ESSAI ET ERREUR



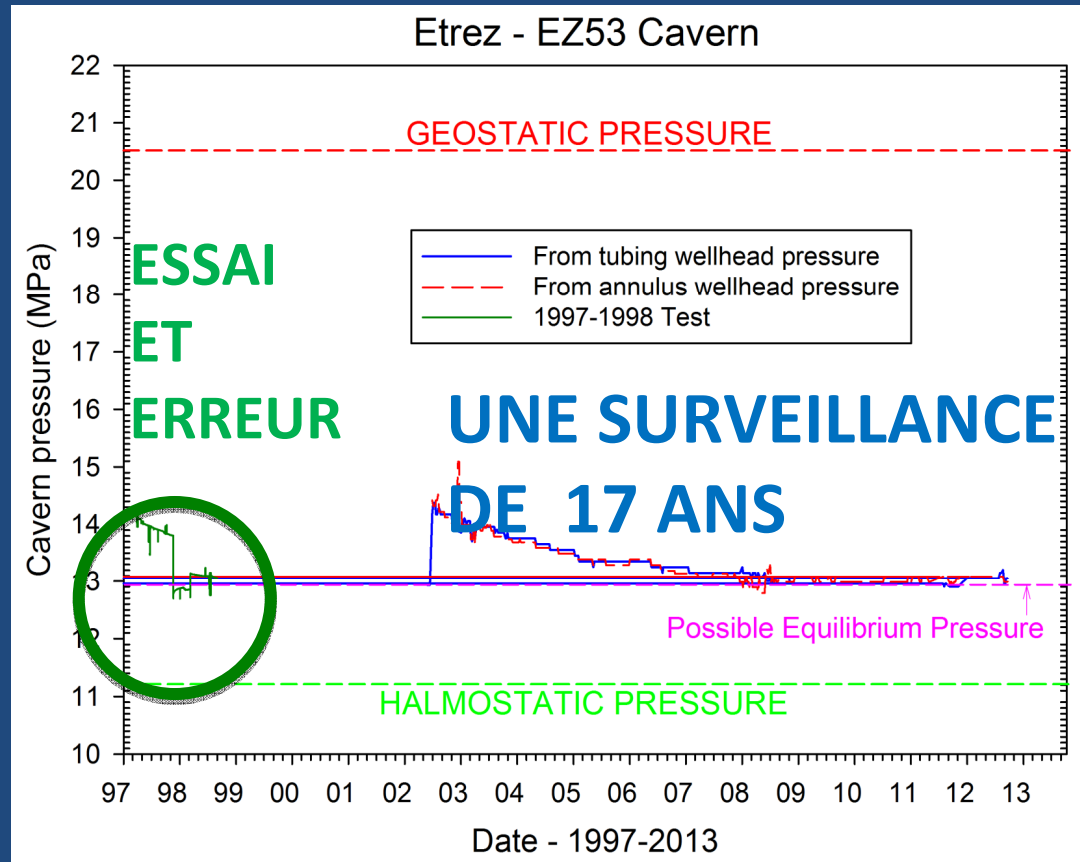
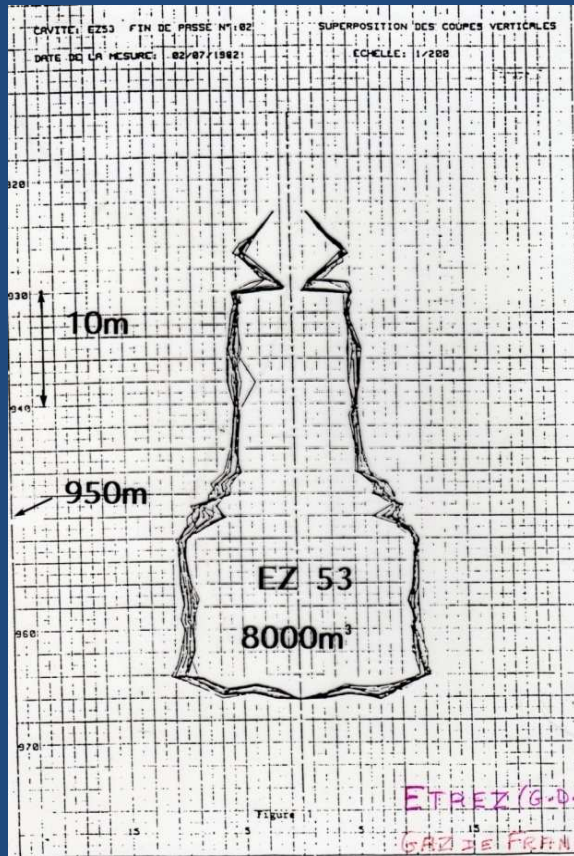
EZ53 (STORENGY, 950 M DE PROFONDEUR, 0.003/an

# CONFIRMATION DE LA VALEUR DE LA PRESSION D'ÉQUILIBRE

## SURVEILLANCE À LONG TERME



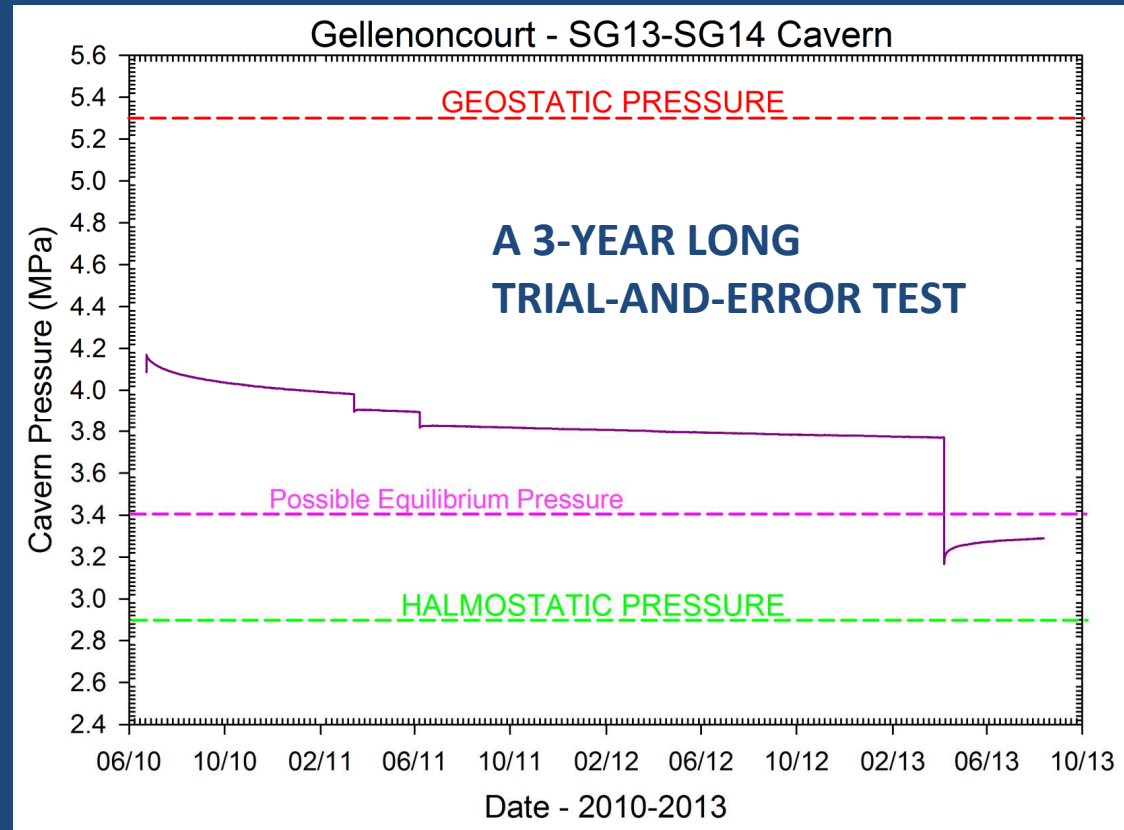
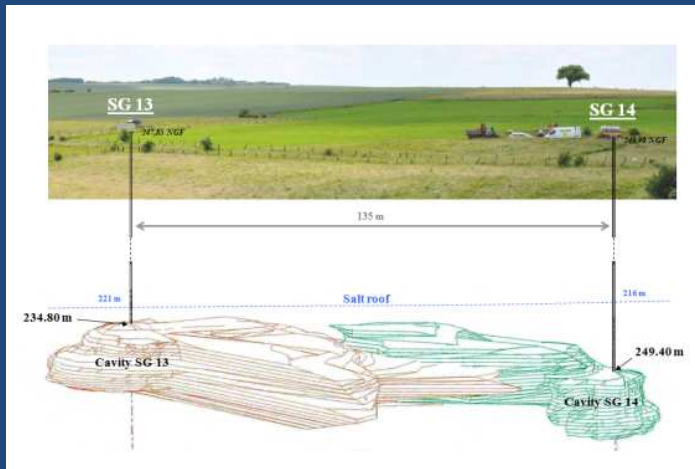
# EZ53 : ESSAI DE SURVEILLANCE DE LA PRESSION



Bérest P., Brouard B., Hévin G. *A 12-year long pressure monitoring in an idle salt cavern –the 1997-1998 Etrez abandonment test revisited.* *Int. J. Rock Mech. Min. Sc.*, Vol. 45, Issue 7, 1025-1043.

# GELLENONCOURT (SALINS)

2010-2014 ...



# SG13-14 (CSME, 250-M DE PROFONDEUR)

Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25

novembre 2014

# CONCLUSIONS

A très long terme, quand l'équilibre thermique est atteint, la pression atteint une valeur d'équilibre :  
 $0 =$  Vitesse de convergence – vitesse de perméation

$$0 = A (P_{\infty} - P_{eq})^n - \chi (P_{eq} - P_0)$$

Quand la loi de fluage est bien connue,  
On peut en déduire la valeur de la perméabilité à grande échelle ( $K = 1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$  à Etrez)



# CONCLUSIONS

Ce type d'essai permet de montrer qu'à long terme, la pression dans la caverne demeurera inférieure à la géostatique, le flux de saumure vers le massif équilibrant la contraction de la caverne par fluage :

La cavité se videra dans le massif de sel sans fracturation

Mais :

La démonstration est plus difficile si la caverne est plus profonde

Il faut attendre que la phase d'échauffement soit achevée

# REMERCIEMENTS: SMRI

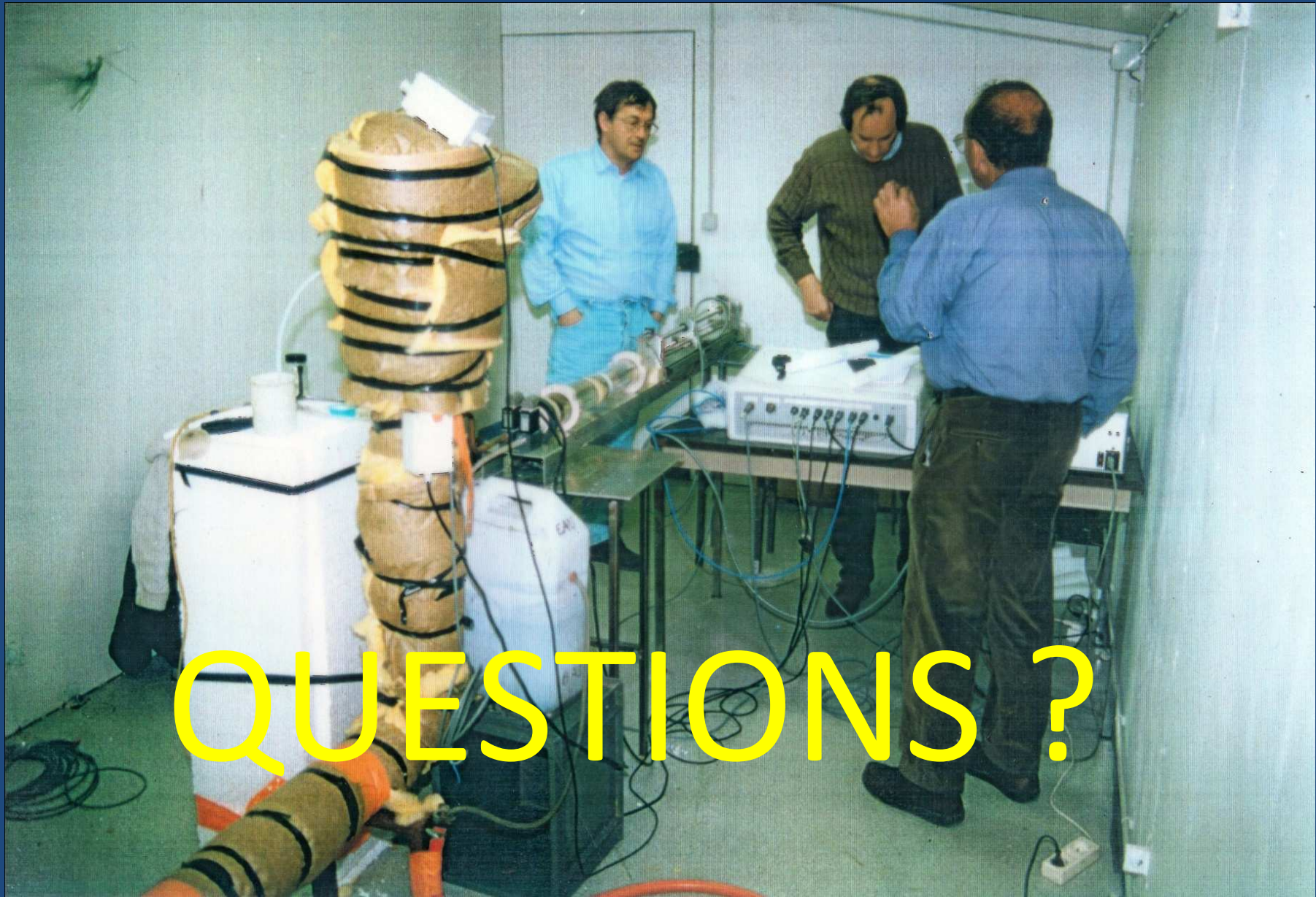


«The SMRI and its member companies have long recognized the complex issues associated with high fluid pressures in solution-mined caverns – particularly the high pressures that develop in sealed and abandoned caverns in 1996, the SMRI initiated a multiproject program focused on addressing the complex issues of sealing and abandonment »

J. Ratigan, *The SMRI S&A Program 1996 through 2002*, SMRI 2003 Meeting, Houston.

Et

V. de Greef, J.F. Béraud, M. Karimi-Jafari, J. Bergues (LMS), G. Durup, B. Guerber, G. Hévin (Storengy), P. de Laguérie (Géostock), C. Lheur, E. Hertz (Salins), P.Y. Héas, D. Fourmaintraux (Total)



Stockage Souterrain Ecole des Ponts 25  
novembre 2014