

Conférence du 23 février à l'IUAD de Grenoble

Géologie du gypse et de l'anhydrite

Aspects appliqués : dissolution & gonflement tunnels et pentes

Denis FABRE (professeur émérite CNAM)

denis.fabre@cnam.fr

PLAN DE L'EXPOSE

Première Partie : Généralités sur le gypse et l'anhydrite

- 1-1 : Propriétés physico-chimiques**
- 1-2 : Géologie : Formation, Tectonique, Affleurements types**
- 1-3 : La question du gonflement de l'anhydrite**
- 1-4 : Taux de dissolution dans les roches gypseuses**
- 1-5 : Propriétés mécaniques du gypse et de l'anhydrite (résistance, fluage)**

Deuxième Partie : Applications et exemples (Génie civil)

- 2-1 : Aménagements hydrauliques (--> *exposé Devèze*)**
- 2-2 : Tunnels ferroviaires (Braus, Genevreville , St-Antoine,...)
et routiers (Galibier, Tende) . Nouveaux chantiers (Tende, Lyon-Turin)**
- 2-3 : Stabilité des pentes (St-Jean-de-Maurienne,)**
- 2-4 : Les karsts gypseux et la problématique des affaissements**
 - Bassin de Paris (--> *exposé Brisebarre*)**
 - Allevard**
 - Malbosc, Tourette, Bargemon (*Yves PAQUETTE*)**

Conclusions

Bilan sur le gonflement (nouveau cas évoqué) et la dissolution

1-1 : Propriétés physico-chimiques

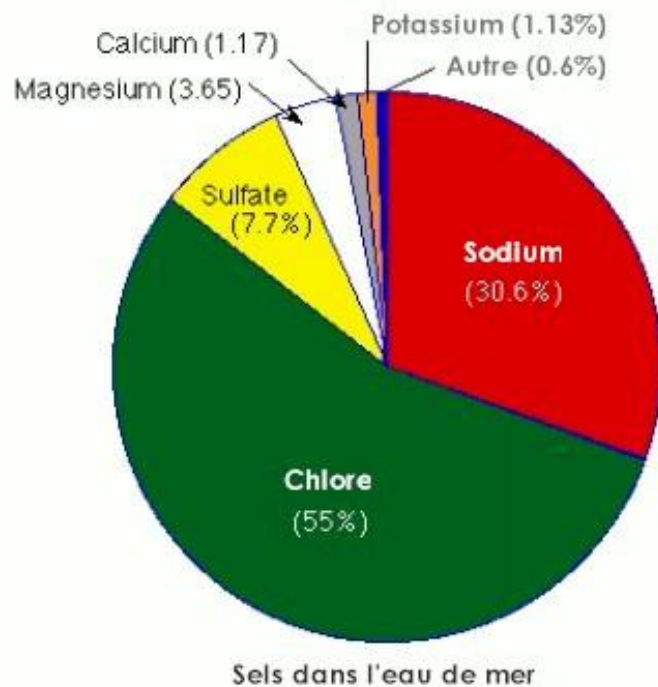
- Gypse : $\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})$
- Bassanite : $\text{CaSO}_4, 1/2(\text{H}_2\text{O})$
- Anhydrite : CaSO_4



Formation : roches évaporitiques

Solubilité : 2 à 2,5 g/l (selon température, pH, autres sels ...)

saturation facile à atteindre à partir de l'eau de mer...



Sels dans l'eau de mer

<i>principaux constituants de l'eau de mer</i> (d'après DEGENS, 1989)		
	ion	g/L
Sodium	Na ⁺	10,56
Magnésium	Mg ²⁺	1,27
Calcium	Ca ²⁺	0,40
Potassium	K ⁺	0,38
Strontium	Sr ²⁺	0,013
Chlorure	Cl ⁻	18,98
Sulfate	SO ₄ ²⁻	2,65
Hydrogénocarbonate	HCO ₃ ⁻	0,14
Bromure	Br ⁻	0,065
Fluorure	F ⁻	0,001

Formation

Précipitation
en milieu lagunaire

Selon température :

- Gypse primaire
 $T < 50^{\circ}\text{C}$
- Anhydrite primaire
 $T > 50^{\circ}\text{C}$

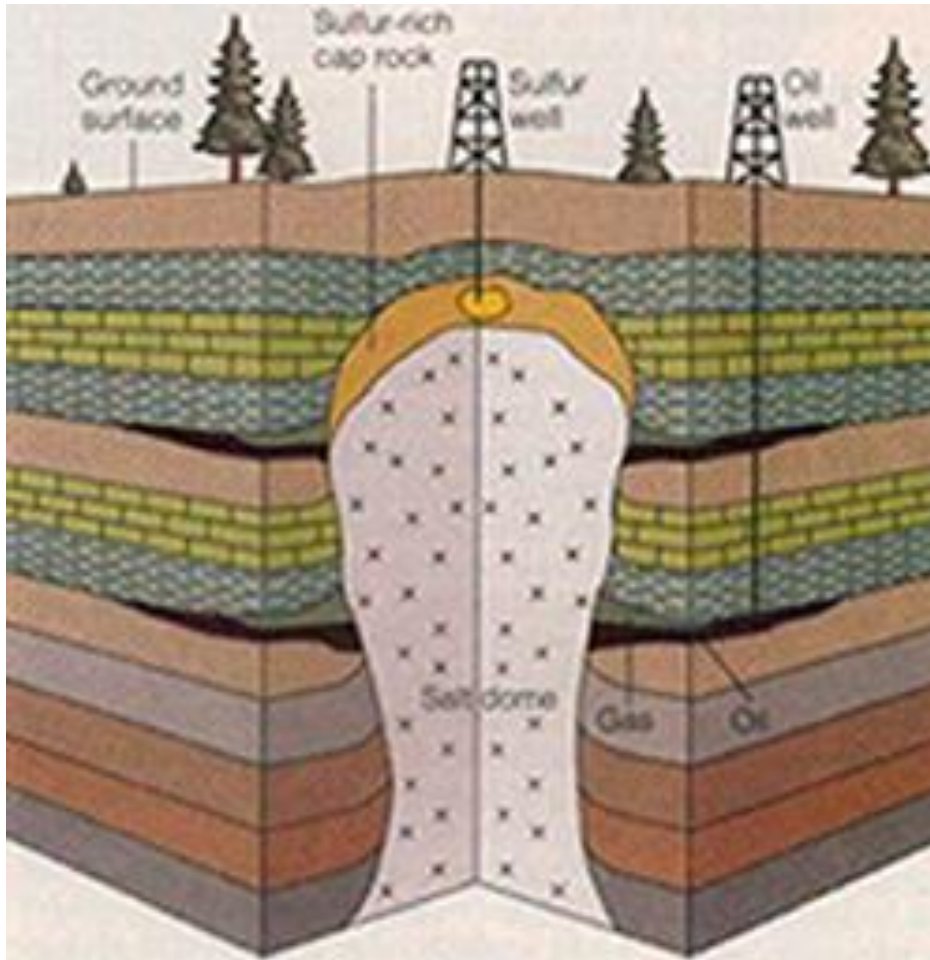


A GYPSUM-SATURATED LAGOON IN THE FIRST DEPRESSION AT EL ALAMEIN, EGYPT. This lagoon remains in natural condition. Others further east have been altered and developed since the area was studied in the late 1970s (notice hut development at the right). Gypsum was found to be precipitating at the margin of this lagoon. There is a little halite as a surface crust to the SW of the lagoon. The beach is mostly white oolitic sand. The road is on the Abu Sir Ridge, a calcrete-cemented, Pleistocene beach ridge. Aerial photograph modified after Google Earth, 2011. Ian West.

Autre propriété importante : **la densité**

- celle du gypse est d'environ **2,3**
- celle de l'anhydrite **2,98**

Diapirisme



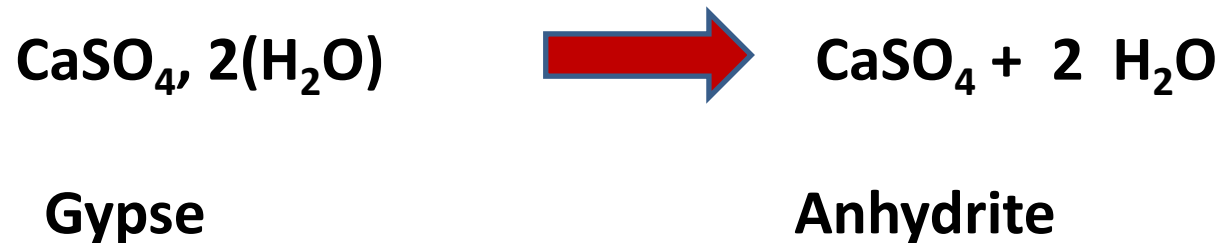
Le diapirisme concerne le gypse, roche légère

Il peut expliquer la migration et les surépaisseurs



diapir Kuh-e-Namak(Iran) : « glacier de sel »

Déshydratation - Hydratation



Ces deux réactions sont réversibles à froid...

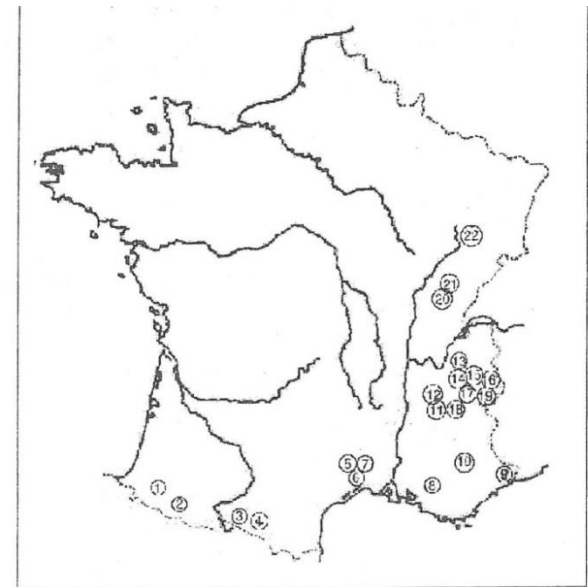
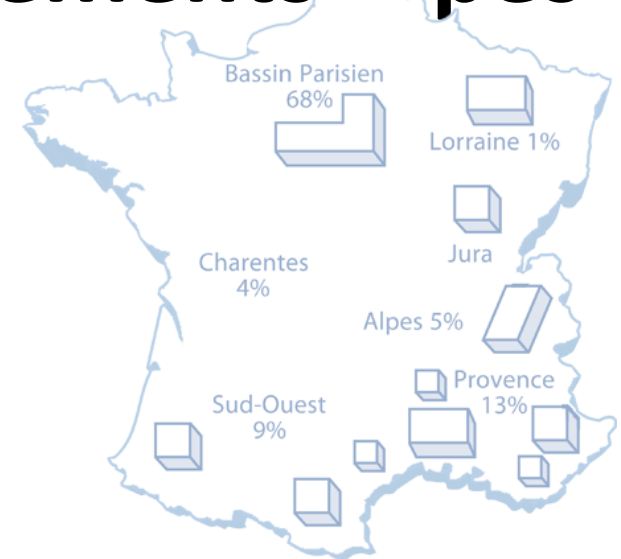
1-2 : Géologie- Affleurements types

Gypse : pierre à plâtre...



Le Pin

Anhydrite : peu intéressante à exploiter...



Denis FABRE : Géologie du gypse et de l'anhydrite. Aspects app

Figure 2.2: Anhydrite deposits in France: 1:Carresse, 2:Pontacq, 3:Salies-du-Salat, 4:Aurignac, 5:Les Gypières, 6:La Porte du Pas, 7:Monoblet, 8:Aix, 9:Col de Tende, 10:Digne, 11:Vizille, 12:Saint-Firmin, 13:Arly, 14:Moutiers, 15:Bourg-Saint-Maurice, 16:Val d'Isère, 17:Modane, 18:Galibier, 19:Mont Cenis, 20:Grozon, 21:Saint-Lothain, 22:Genevreuille, after [Sahores, 1962].



Gypse (Le Beausset, 83)

Denis FABRE : *Géologie du gypse et de l'anhydrite. Aspects appliqués : dissolution & gonflement ; tunnels et pentes*



Dissolution superficielle :

- Cannelures
- Ravines

La Plagne, 73



Denis FABRE : Géologie du gypse et de l'anhydrite. Aspects appliqués : dissolution & gonflement ; tunnels et pentes



La Plagne



***Entonnoirs de dissolution au Mont Jovet (73)
dans la base de la Nappe des Schistes Lustrés***

***Les principaux chevauchements des Alpes ont une
semelle « gypseuse » triasique...***



Un sommet en gypse à près de 3000 m : le Roc du Soufre , 73

Denis FABRE : Géologie du gypse et de l'anhydrite. Aspects appliqués : dissolution & gonflement ; tunnels et pentes



En montant au Roc du Soufre ...



**Mais, dans les Alpes
l'anhydrite n'est jamais
bien loin...**

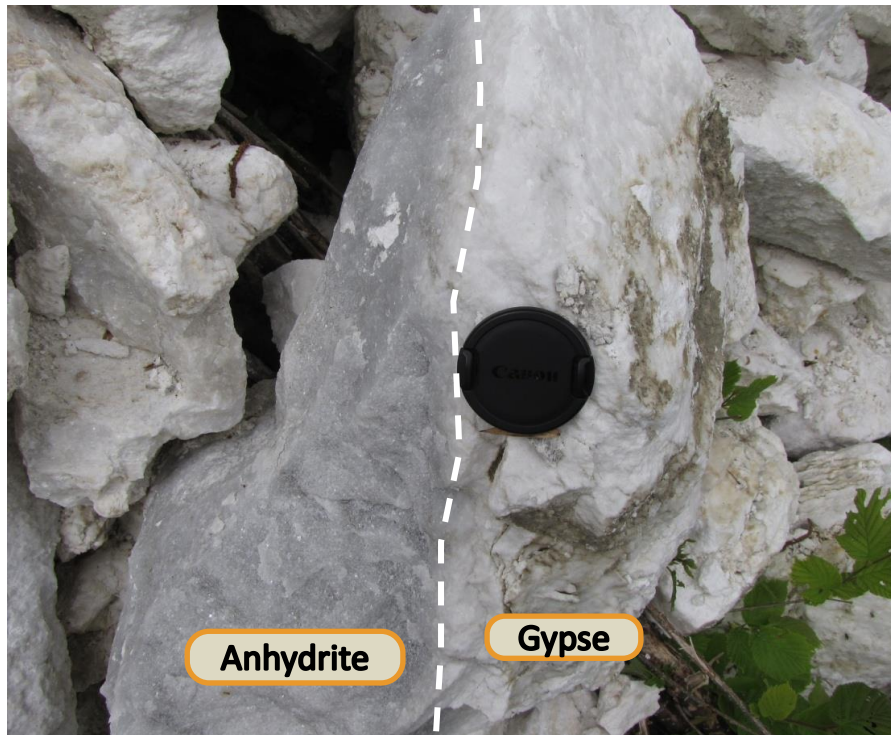
Ici, à l'amont de Modane
(73), l'Arc coule sur l'anhydrite

Ici, à l'entrée du vallon de Bramans (73),
toute la partie inférieure du versant
est en anhydrite



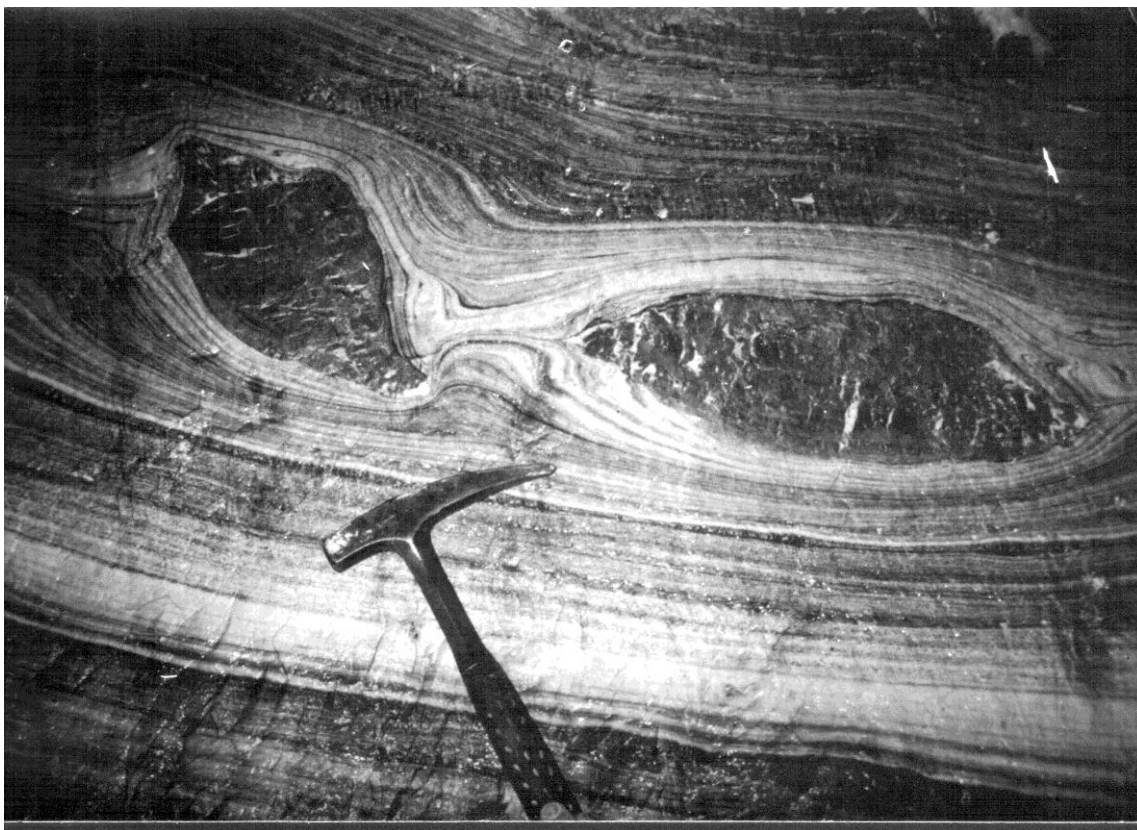
La partie supérieure est gypsifiée

**Des écoulements apparaissent
à la limite gypse-anhydrite...**



**Ce bloc prélevé en carrière montre le contact
« intime » des deux matériaux...**





Et, en tunnel , on trouve
presque toujours
l'anhydrite ...

*Ici dans la galerie EDF
Arc-Isère*

Mise en évidence du comportement ductile !

Denis FABRE : Géologie du gypse et de l'anhydrite. Aspects appliqués



Karsts dans l'anhydrite : quelques exemples

- *La Nova
(Beaufortin):
rivière
souterraine*



- *Modane (73) : paléo cours souterrain de l'Arc...*

- *Granier (Aime) : réseau à genèse singulière...*

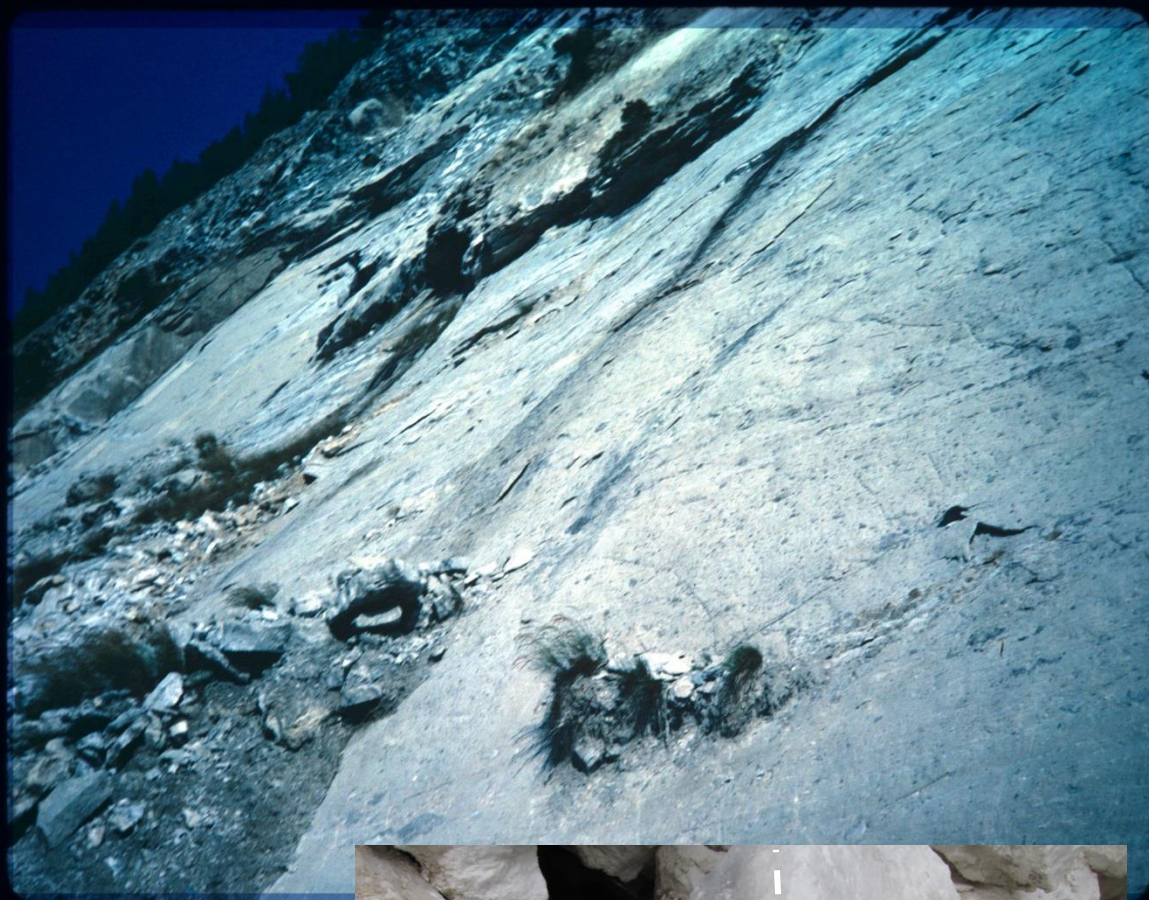
1-3 : La question du gonflement de l'anhydrite



Masses : 136,14 g + 36 g = 172,14 g

Volumes : 46,2 cm³ + 36 cm³ → 74,4 cm³
(82,2 cm³)

Alors Gonflement ou Retrait ?
système ouvert ou système fermé ???



En surface : gonflement → desquamation

En profondeur : ???
possibilité de réaction
sans variation de volume....

Denis FABRE : Géologie du gypse et de l'anhydrite. Aspects appliqués



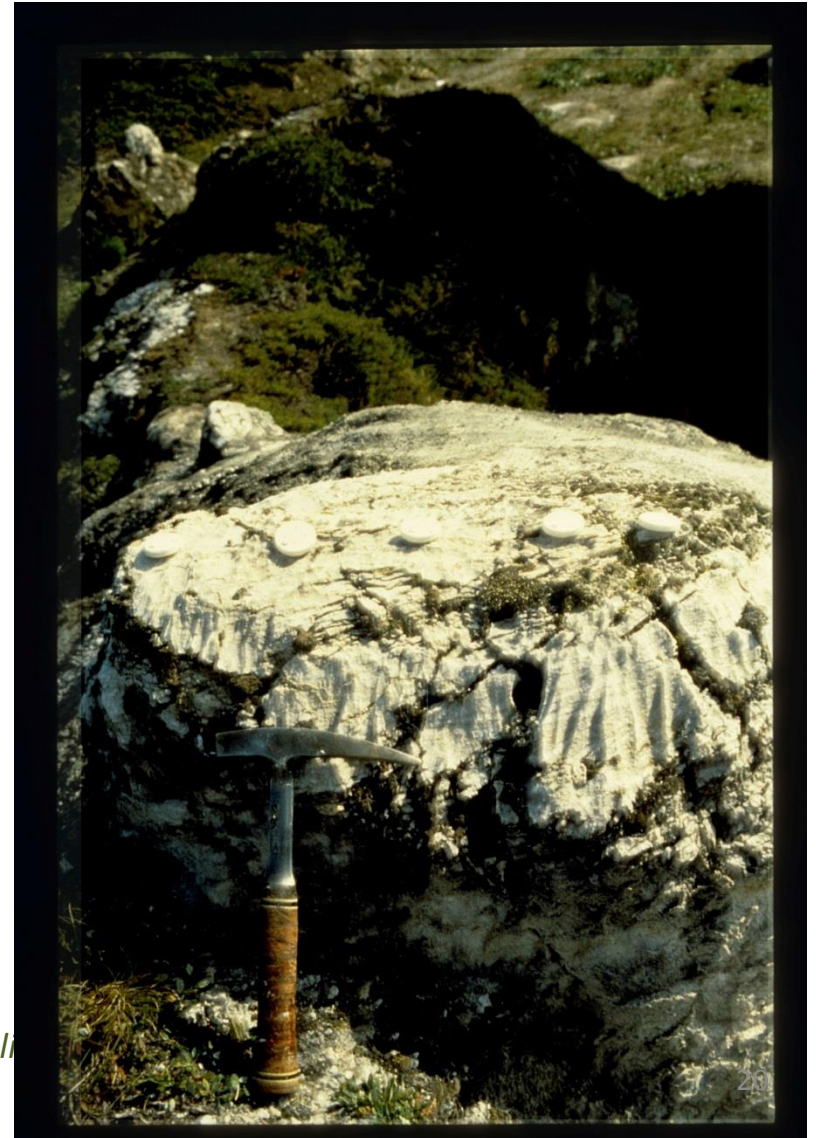
1-4 : Taux de dissolution dans les roches gypseuses

MESURES

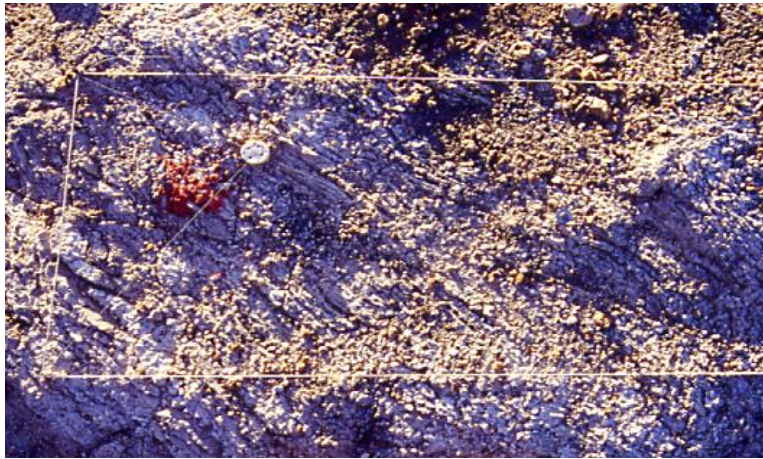
- Micrométrie

- Méthode des plaquettes
(Georges ROVERA)

« rondelles » de gypse
placées en conditions diverses
et relevées périodiquement...





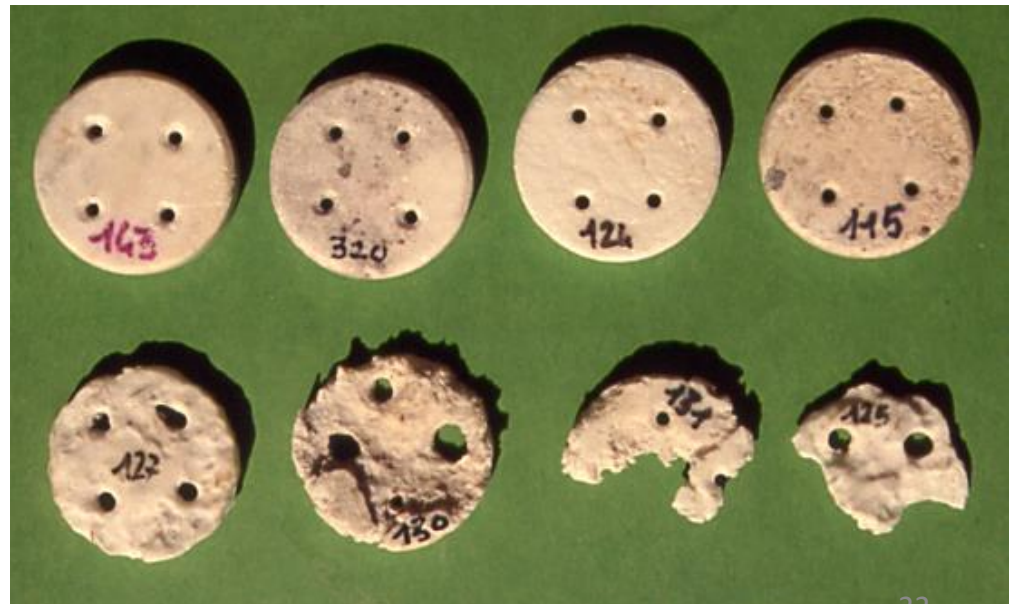


L'érosion totale dans les zones gypseuses est plus importante que celle due à la seule dissolution

Résultats globaux:

L'érosion par dissolution varie entre 1 et 3 mm/an en conditions « naturelles ».

Les plaquettes placées en conditions anthropiques (proches d'un drain ou de certaines fondations...) donnent évidemment des valeurs plus grandes...



1-5 : Propriétés mécaniques du gypse et de l'anhydrite (résistance, fluage)

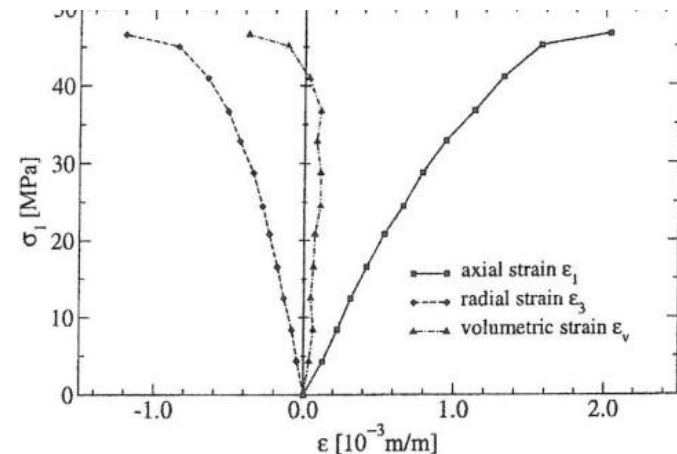
Roches	Compression (MPa)	Module (GPa)
Gypse (Bassin Parisien)	8 - 28	10 - 20
Gypse (Savoie)	20 - 60	16 - 30
Anhydrite (Savoie)	50 - 150	23 - 98

Références :

Bassin Parisien : thèse Marcel Toulemont

Savoie :

- article Fabre et Dayre, *Bull AIGI*, 1982
- thèse Michal Muhlbauer 2002



compression test on gypsum of St Jean-de-Maurien
Lirigm laboratory, 1983.

Denis FABRE : *Géologie du gypse et de l'anhydrite. Aspects appliqués : dissolution & gonflement ; tunnels et pentes*

Comportement mécanique de l'anhydrite

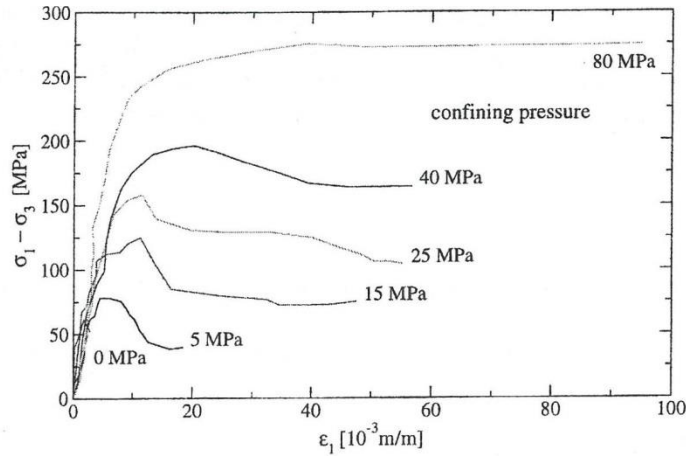


Figure 2.12: Stress-strain curves on anhydrite ASJ [Combe, 1989].

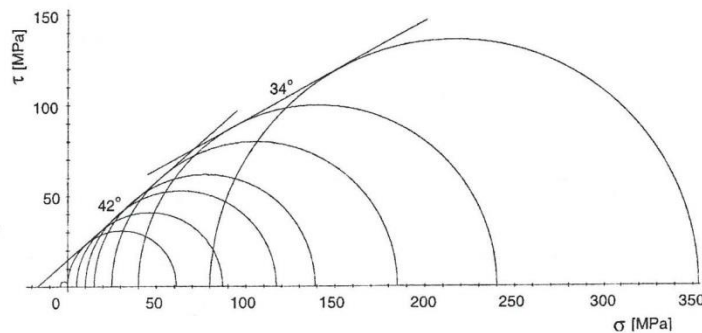
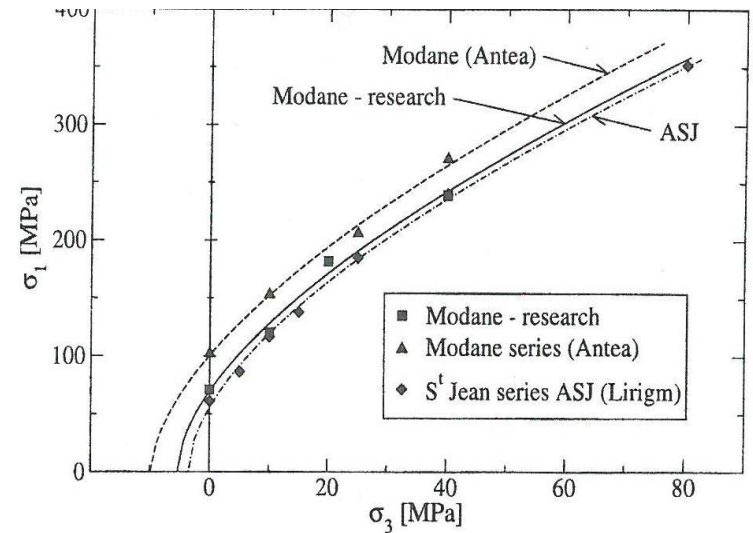


Figure 2.13: Mohr circles and Mohr-Coulomb linear criterion, anhydrite ASJ [Combe, 1989].

- Travaux du LIRIGM (Grenoble)
- Essais Antea pour Alpetunnel
- Thèse MUHLBAUER



Hoek and Brown criterion for Modane anhydrite, σ_1 and σ_3 are major and minor principal stresses. Comparison with ASJ and Modane (Antea) series.

Fluage de l'anhydrite :

Essais de Muhlbauer (2002)

6 essais de fluage multipaliers
(durée moyenne 25 jours)

Fluage secondaire observé pour
des contraintes supérieures à $0,5 \sigma_c$

**Vitesses de déformation
(fluage secondaire)
10-10 à 10-12 s-1**

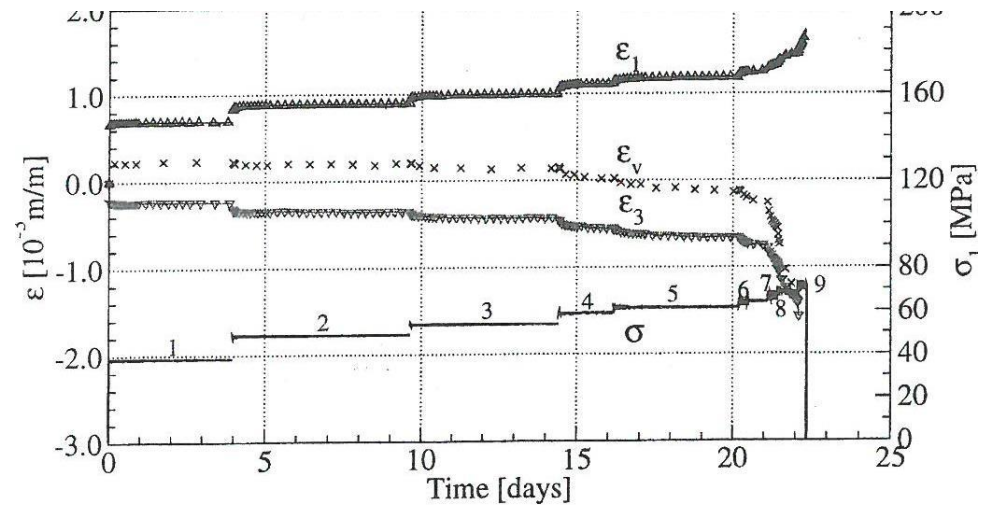


Figure 6.26: Plot of uniaxial creep test, specimen F31-33.

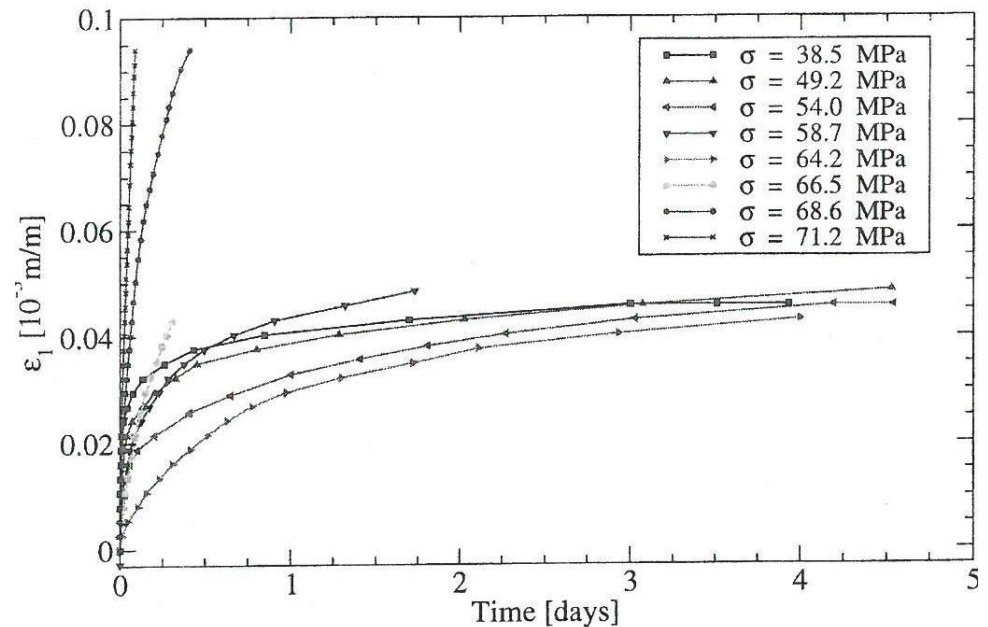
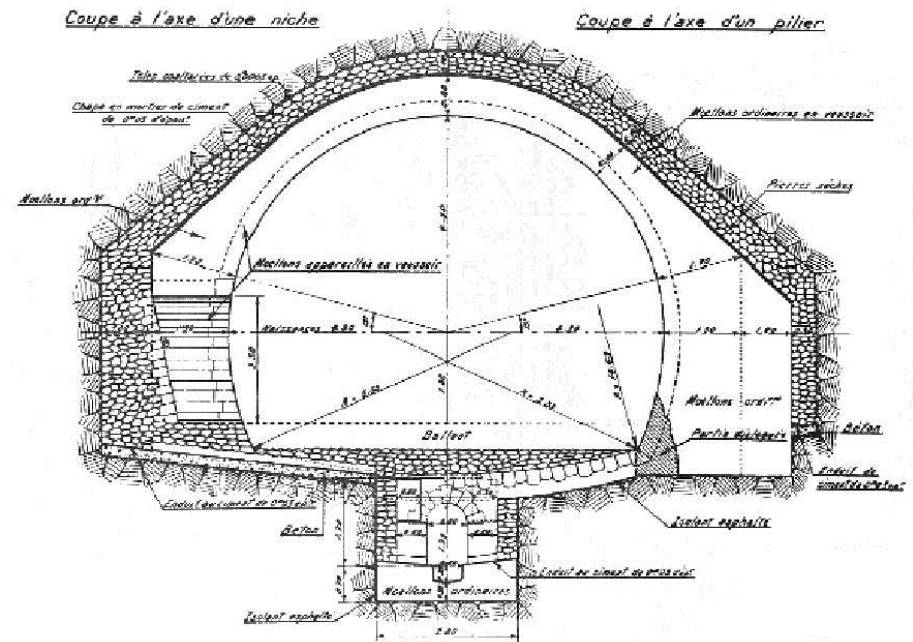
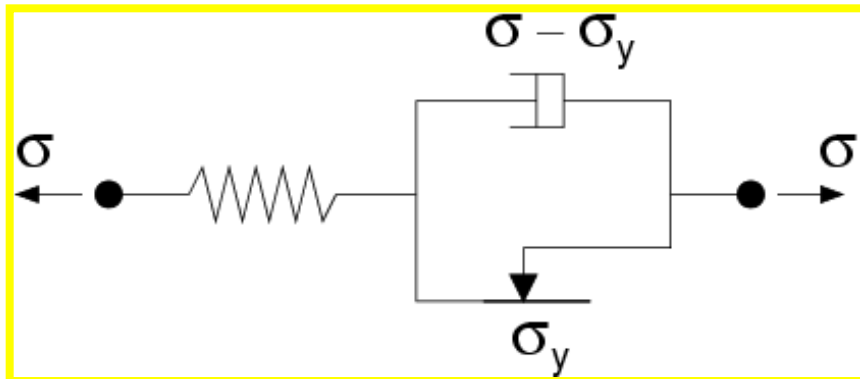


Figure 6.27: Creep test plot, specimen F31-33.

Fluage : Déformations différées, pouvant entraîner de fortes convergences



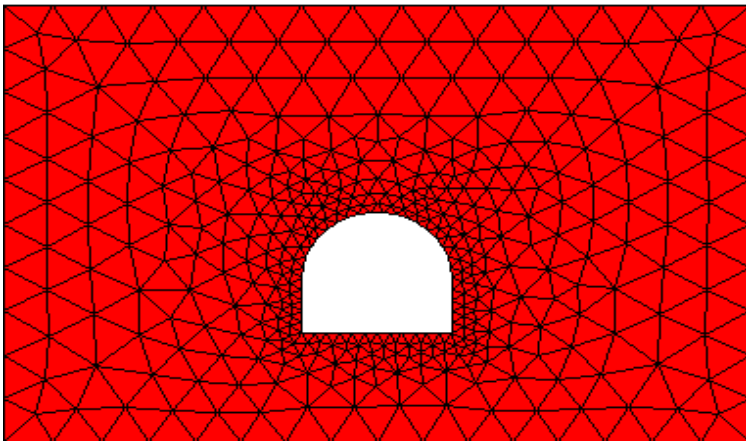
Anhydrite = Soutènements surdimensionnés ??



- **Modèles viscoplastiques (Perzyna...)**
- **Loi de Lemaitre**

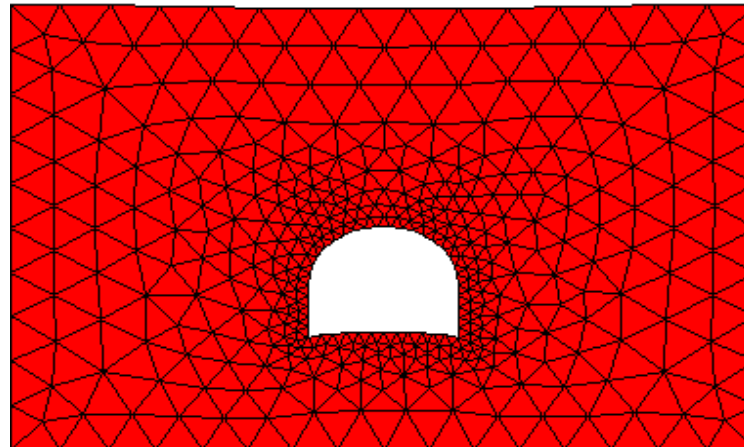
$$\varepsilon^{vp} = \left[(1-m) A \sigma^n t \right]^{1/(1-m)}$$

1



**Modélisation (exemple) :
Tunnel en milieu
viscoplastique**

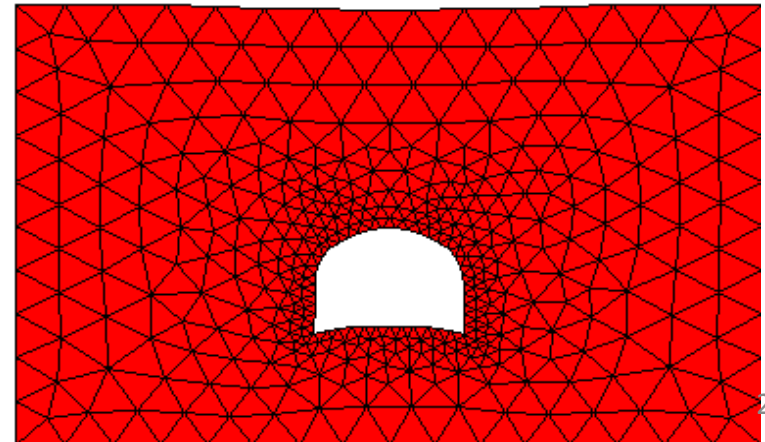
2



**Section dans l'anhydrite
Loi de Lemaitre**

*inspiré du tunnel de Tende
(Thèse Mühlbauer, 2002)*

3



2-1 : Aménagements hydrauliques

Lacs de barrage :

exemple du Mt-Cenis



et galeries hydroélectriques

exposé Guilhem DEVEZE

Denis FABRE : Géologie du gypse et de l'anhydrite. Aspects appliqués : dissolution & gonflement ; tunnels et pentes

2-2a : Tunnels ferroviaires SNCF

Tunnels de Genevrevuille,

- St-Antoine, Les Plaines,
- Fréjus, Col de Braus ...



Le tunnel de Genevrevuille de la ligne Paris-Bâle près de Vesoul date de 1858. Sa longueur est de 620m.

Denis FABRE : Géologie du gypse et de l'anhydrite. Aspects



INVENTAIRE des TUNNELS FERROVIAIRES de FRANCE
itff@hotmail.fr
FICHE TUNNEL

N° INVENTAIRE : 70262.1 **NOM :** Tunnel de Creuse Genevrevuille

SECTION de LIGNE : VESOUL (70) > LURE (70)

COMMUNES : Entrée : Genevrevuille (70) Sortie : Genevrevuille (70)

COORDONNEES : Lambert II Etendu

X :	902,689	X :	903,262
Y :	2305,824	Y :	2305,586

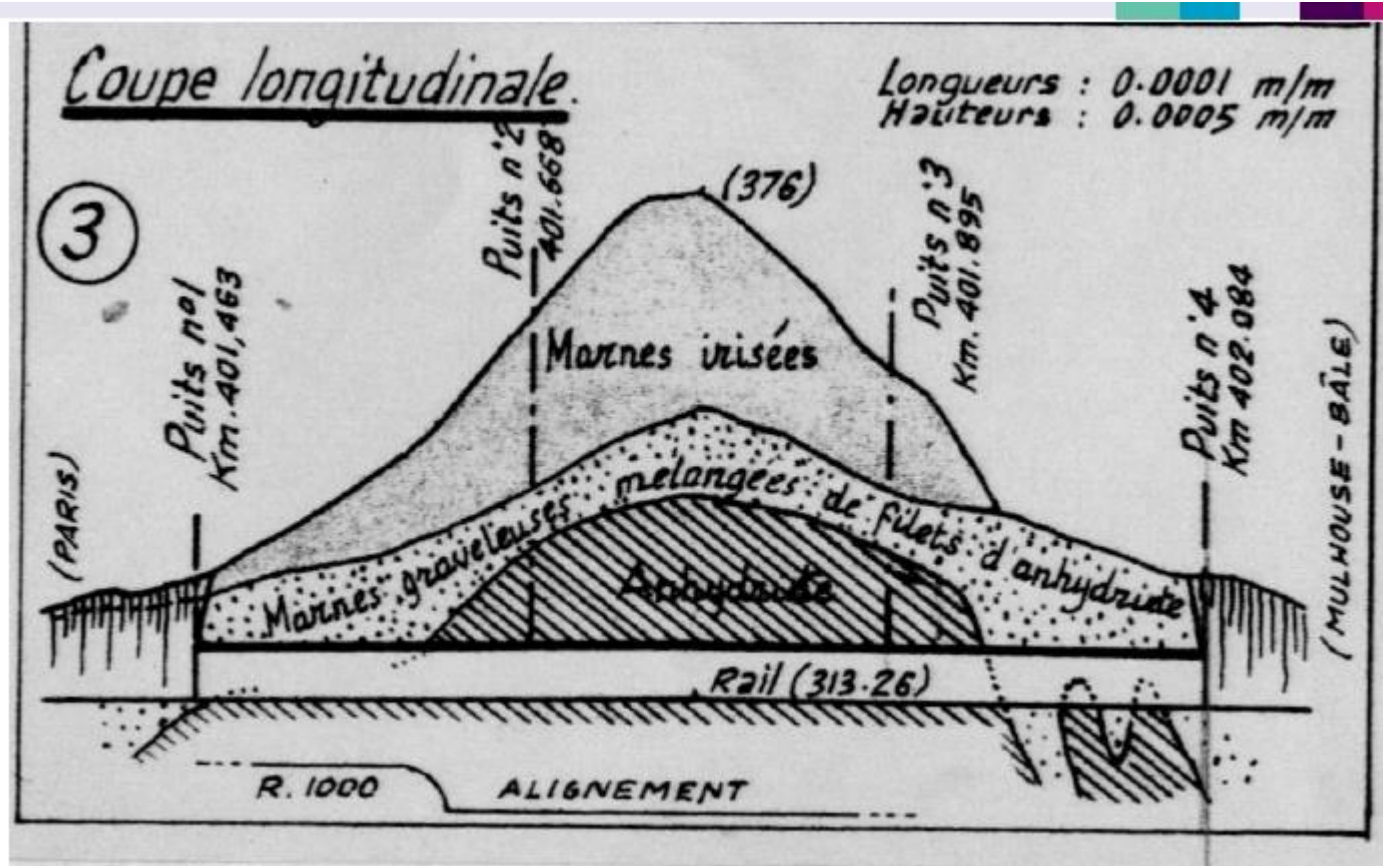
Altitude moyenne : 308 m



DONNEES TECHNIQUES :

Nature de l'ouvrage :	Vrai tunnel de percement
Longueur :	621 m
Nombre de voies :	2
Usage actuel :	En service (accès dangereux)
Etat général accès :	Ligne en service (accès dangereux)
Etat général galerie :	Bon

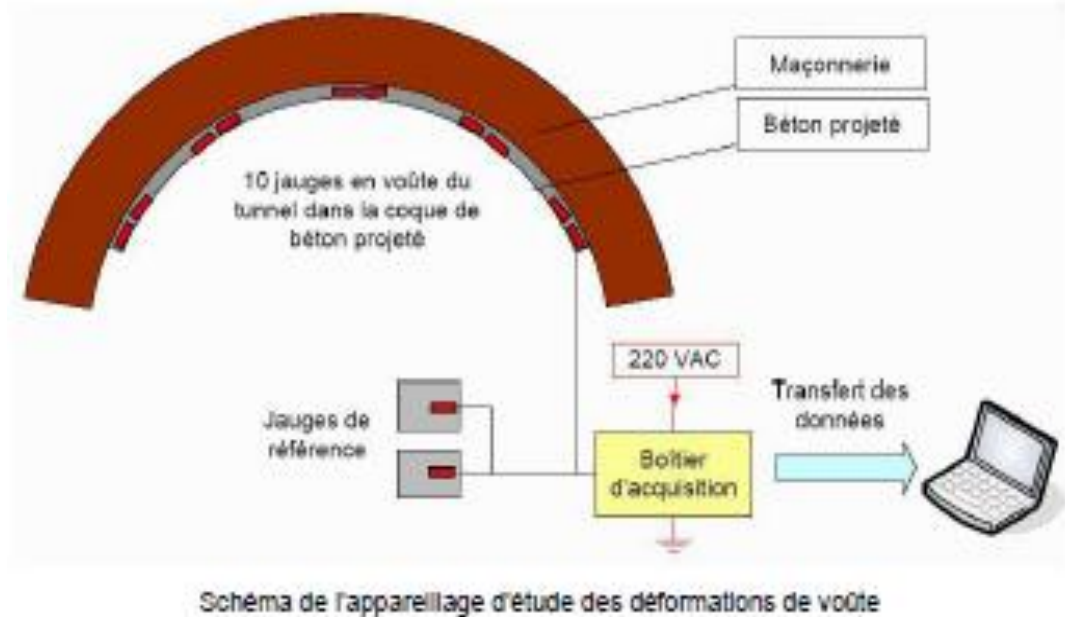
Genevrevuille



**Le cœur du tunnel est constitué d'anhydrite « massive », avec tout autour des marnes à « filets d'anhydrite » (Trias de faciès germanique).
Le gonflement de l'anhydrite se traduit par un soulèvement de la plate forme...**

Genevreuille : Derniers travaux (2005)

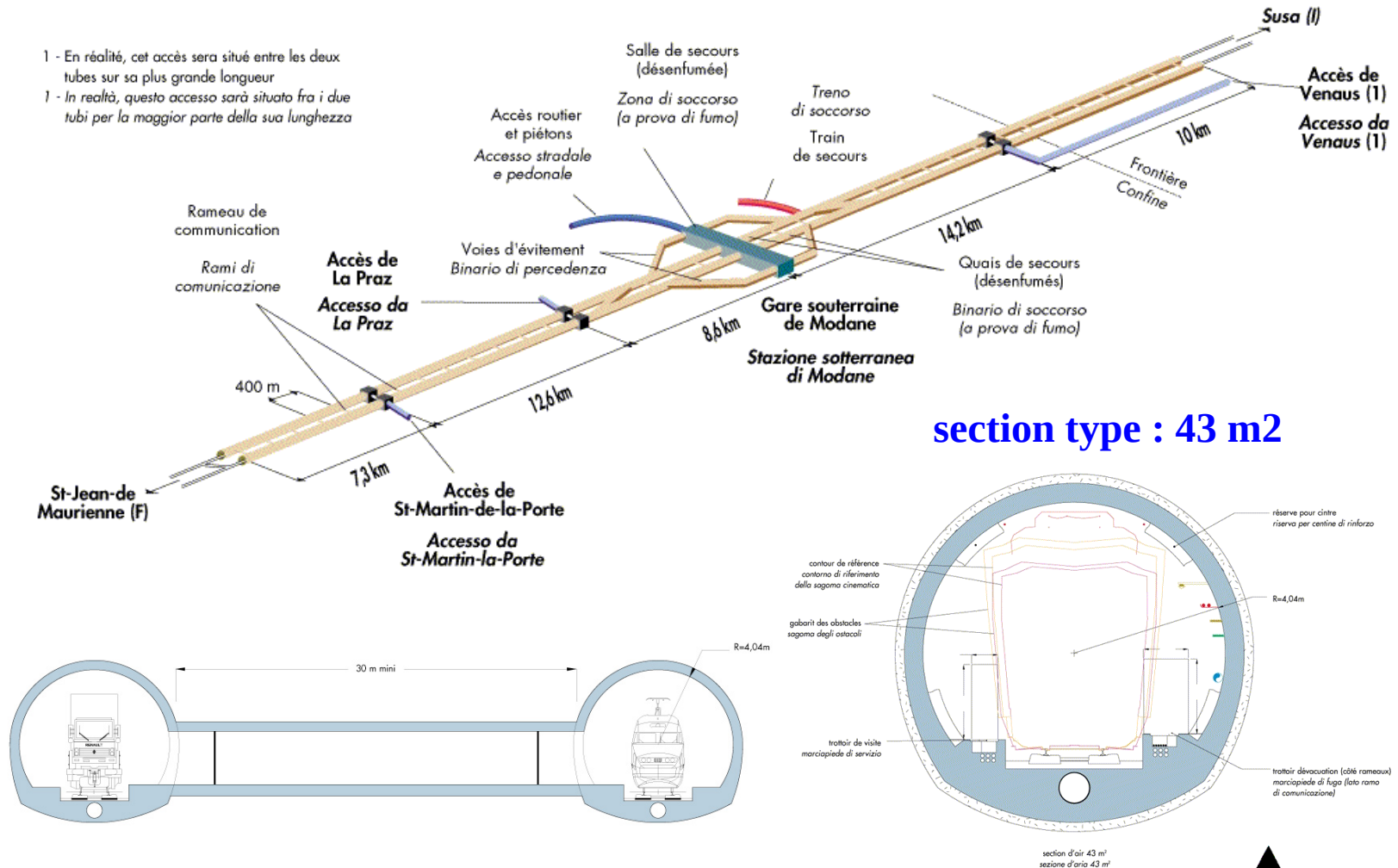
- abaissement du plan des voies,
- ancrages des bases de piédroits,
- chemisage par coque en béton projeté de 4 zones de tunnel (PM 75 à 95, 425 à 450, 475 à 495 et 610 à 621),
- système de collecte d'eau par caniveaux perchés
- système de suivi des déformations



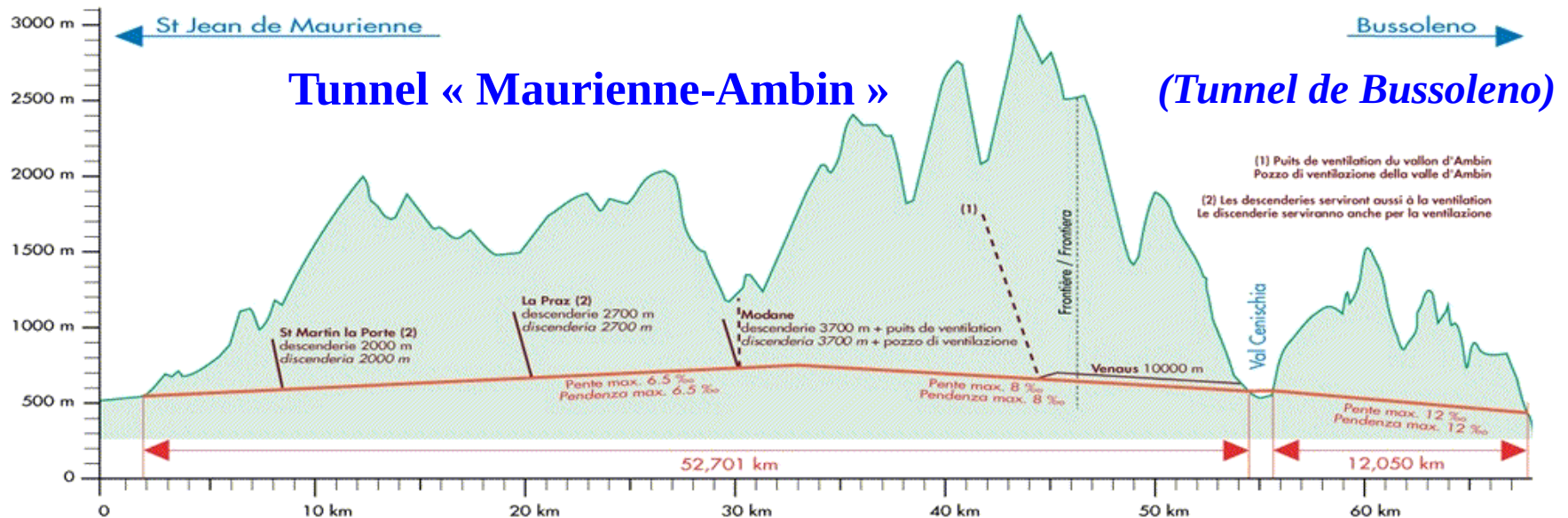
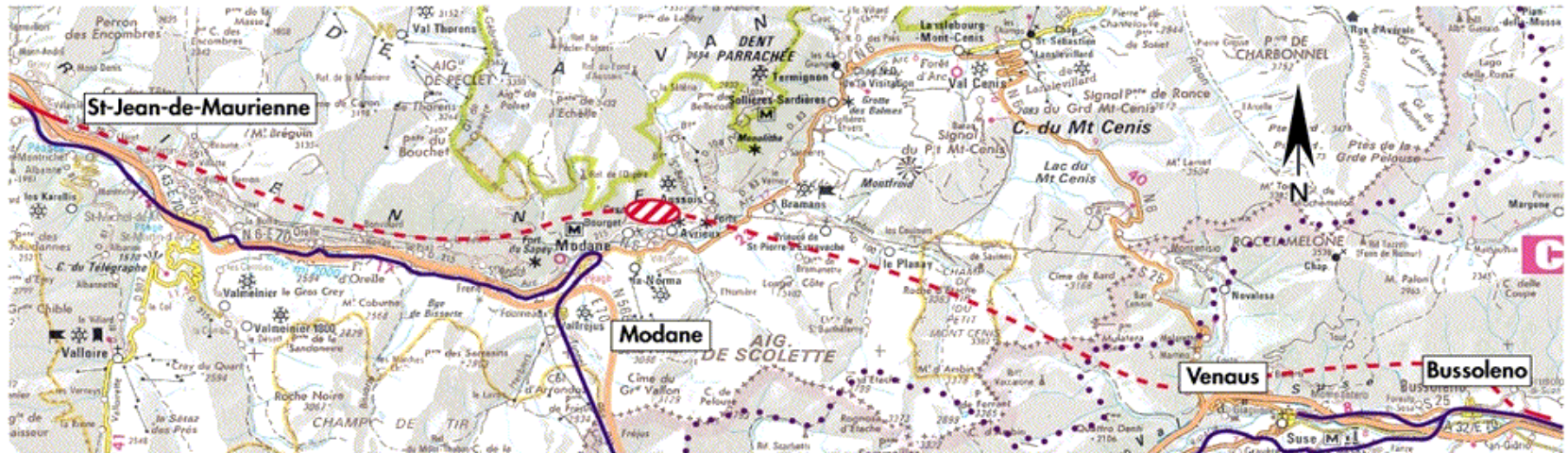
Cependant, les convergences se poursuivent à raison de 1 à 4 mm/an, les valeurs les plus fortes sont dans les marnes gypseuses...

Tunnel de base Maurienne-Ambin : disposition générale

- 1 - En réalité, cet accès sera situé entre les deux tubes sur sa plus grande longueur
- 1 - In realtà, questo accesso sarà situato fra i due tubi per la maggior parte della sua lunghezza



LTF : les tunnels de la section internationale



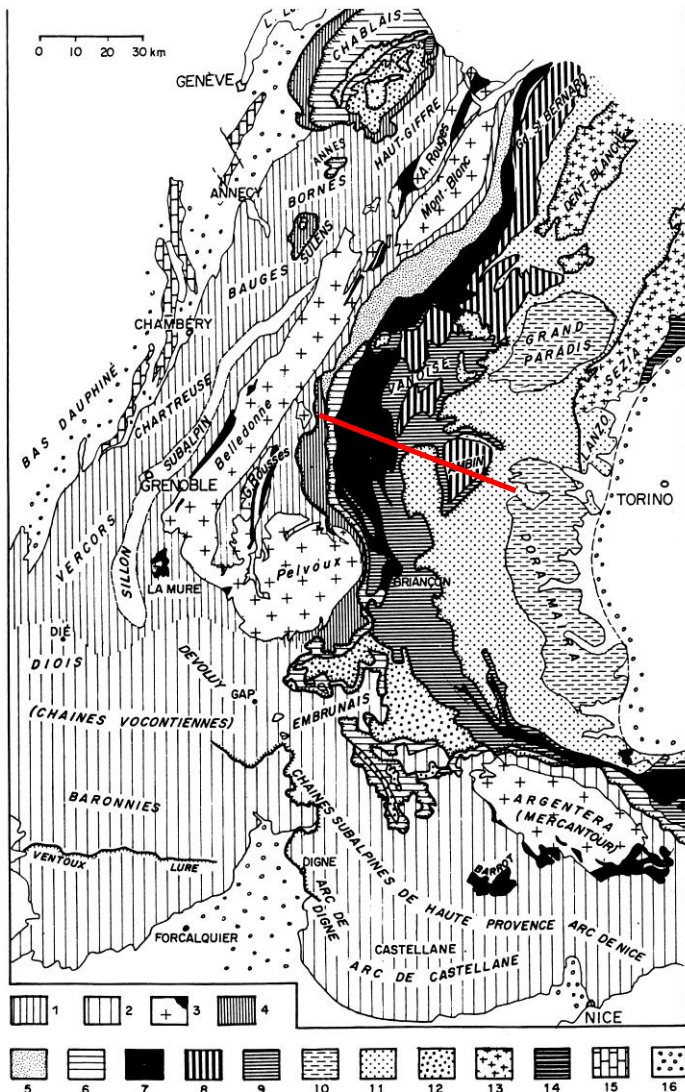
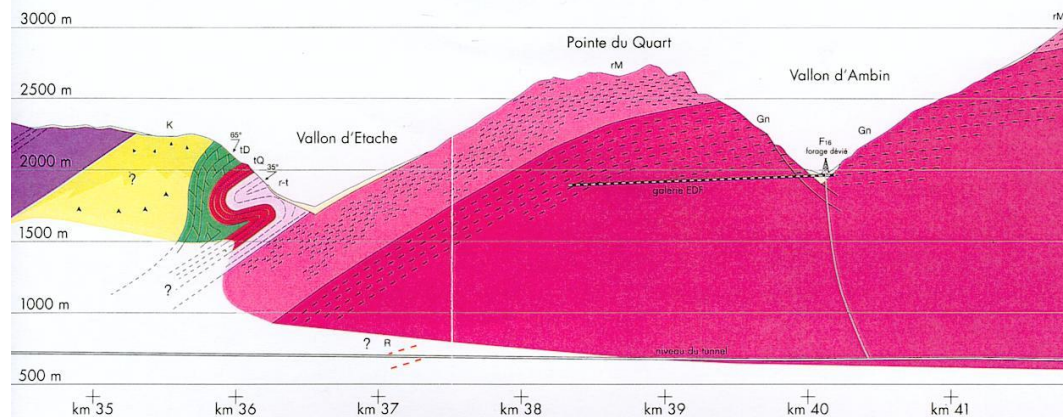


FIG. 1. - Schéma structural des Alpes franco-italiennes.

1. Chaînes subalpines septentrionales. - 2. Chaînes subalpines méridionales.
3. Massifs cristallins externes et bassins permo-houillers. - 4. Zone ultradauphinoise.
5. Zone valaisane. - 6. Zone subbriançonnaise. - 7. Zone houillère briançonnaise.
8. Zone Vanoise - Mont Pourri (Permo-Houiller briançonnais métamorphique).
9. Mésozoïque briançonnais. - 10. Massifs cristallins internes piémontais. - 11. Zone des Schistes lustrés piémontais. - 12. Nappes du Flysch à Helminthoïdes et Flysch de la Simme sl. - 13. Zone Sesia. - 14. Zone d'Ivrée. - 15. Jura. - 16. Bassins molassiques peri-alpins.

Géologie

- plusieurs unités structurales majeures
- 14 types de roches
- 5 chevauchements
- nombreuses failles



Extrait de la deuxième coupe géologique 1/25000 (1996)

Une longueur importante pourrait se trouver dans l'anhydrite sous les schistes lustrés....

Reconnaitances (1989-2000)

- Etat géologique actuel

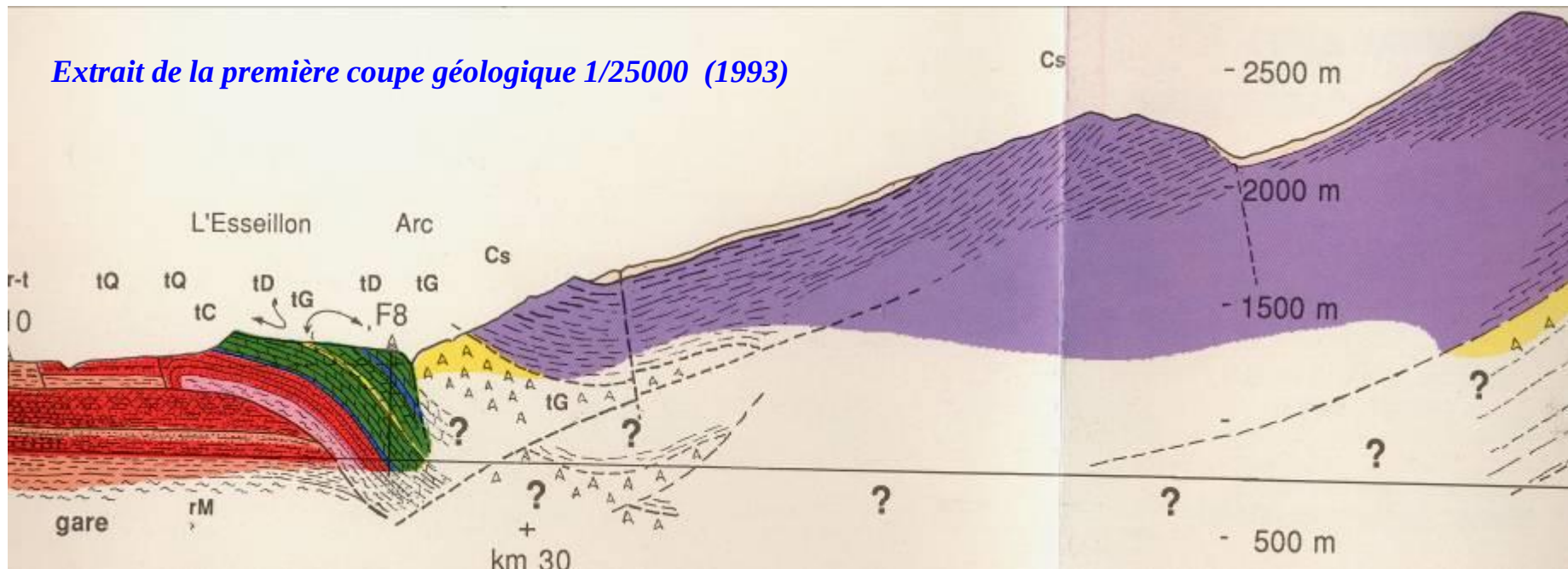
Objectifs : caractériser l'état « initial » du massif rocheux

Nature, structure et propriétés des terrains

Température naturelle

Etat de contraintes naturelles

Extrait de la première coupe géologique 1/25000 (1993)



New transalpine railway connection Torino - Lyon

Types of geological investigations



Documentary research:

Partial (1/10,000) and global (1/25,000) cartography
Structural studies: interpretation of aerial photographs and satellite images

Seismic surveys:

- 120 km of seismic reflection and refraction profile
- 167 seismic profiles of shafts (85 linear km).

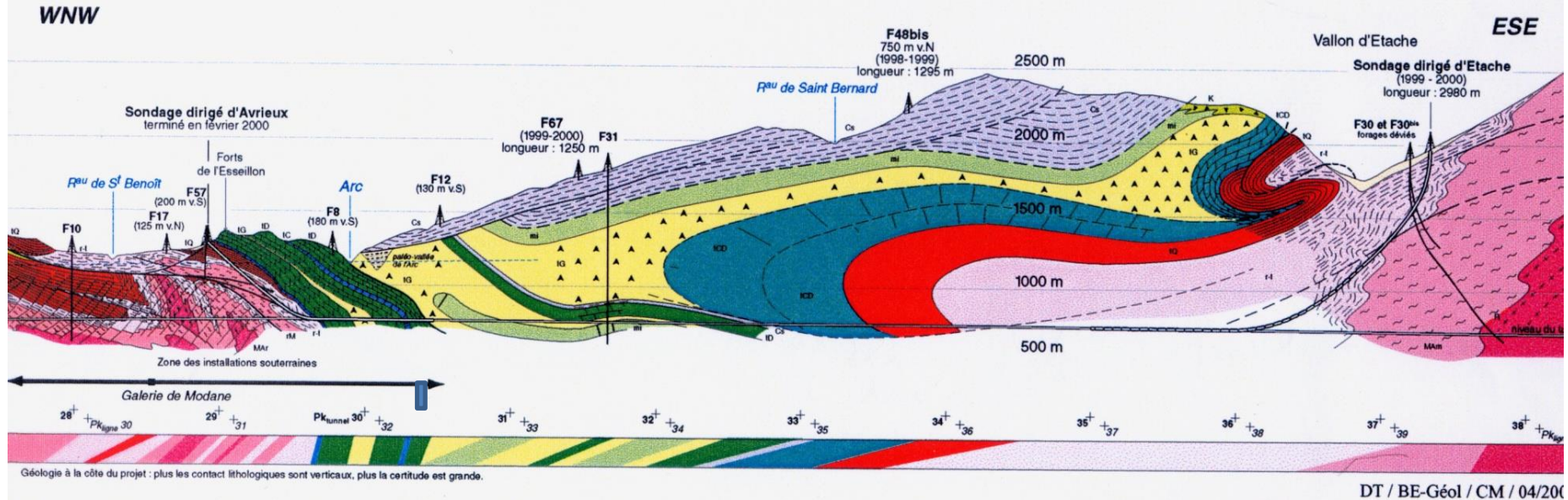
Bore hole surveys:

- 132 bore holes (linear total 40 km).
Lengths vary from 15 to 1,520 m.
- 2 directed bore holes (linear total 4,700 m)
of which 2000 m horizontal at project depth.

Positioning and monitoring
of geodesic networks

Extract from the provisional geological section of the base tunnel

(G. Ménard 03/2000)



DT / BE-Géol / CM / 04/2000

Après l'extraordinaire sondage d'Avrieux
 (départ à 45°, 995 m de carottage horizontal continu pour une longueur totale L = 1800 m)
nous savons que la longueur à creuser dans l'anhydrite
ne devrait pas dépasser 2 km

2-2b : Tunnels routiers

Tunnel du Galibier ...

Tunnels de Tende : ancien tunnel et nouveau tunnel

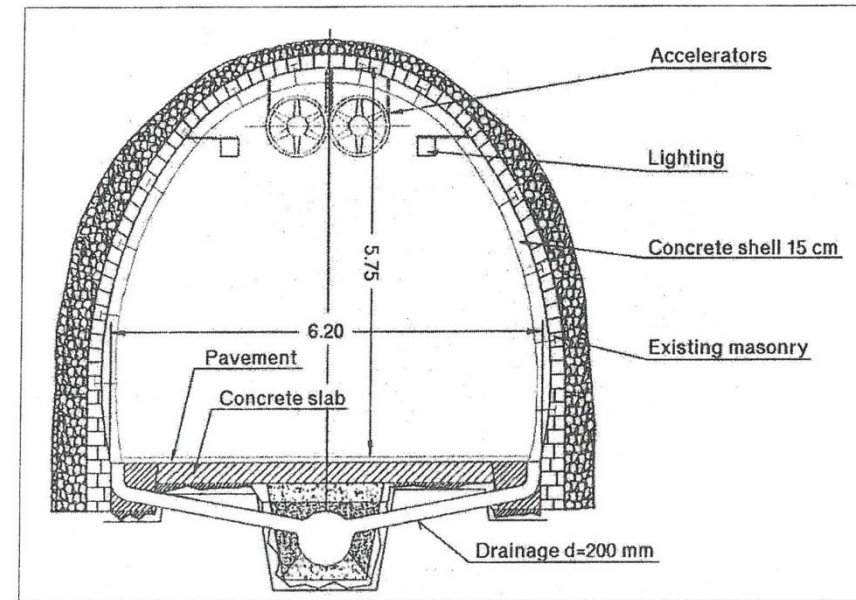


Figure 3.2: Typical cross-section of Tende Tunnel (reinforced concrete shell was realized between 180 and 380 in 1994-95), [CETu, 1978], [CETu Lyon, 1996].

Tunnel de Tende (06)

- Construction à partir de 1878
- Longueur totale : 3186m
(1487 en France)
- Couverture maximale : 580m
- Géologie : flysch (Oligocène),
anhydrite massive (Trias)...

Désordres observés :

- Soulèvement radier PM 350, 640-740, 940-1060
- Ecaillages des piédroits...
- mais aussi des vides de dissolution...

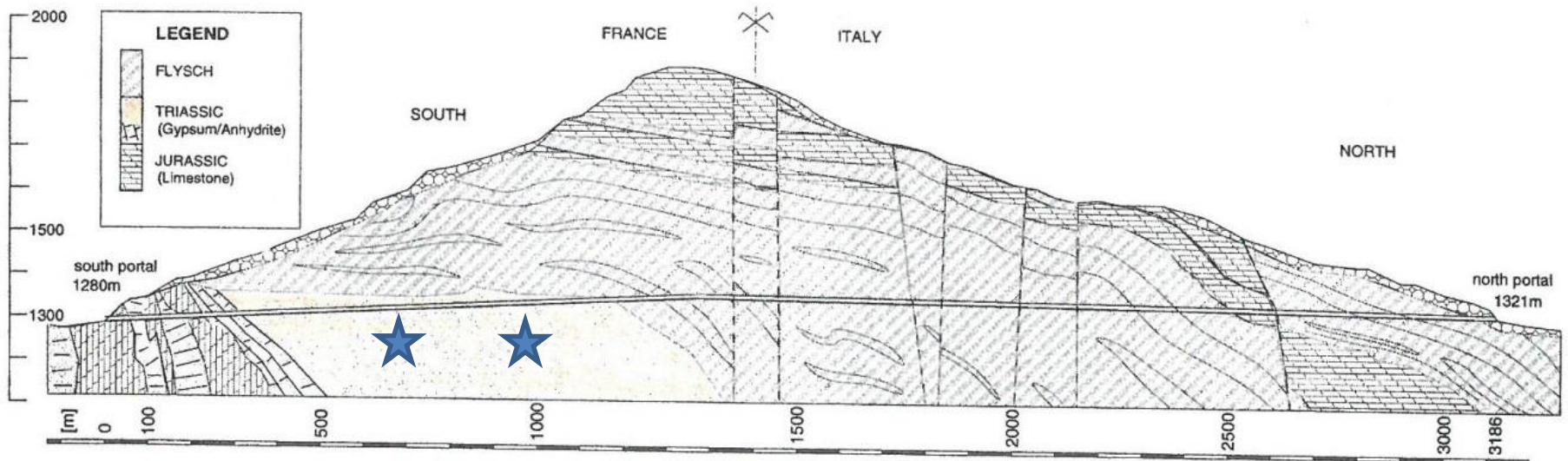


Figure 3.3: Geological profile of The Tende tunnel, [CETu, 1999]



Ante Operam



Post Operam

Travaux au tunnel de Tende (à partir de 2014)

- **Doublément du tunnel**
- **Reprise du soutènement et réalésage du tunnel ancien**



2-3 : Stabilité des pentes

- Deux exemples
 - Secteur de St-Jean-de-Maurienne (73)
 - Brides-les-Bains (73)



De nombreuses instabilités sont observées dans les versants gypseux près de St-Jean-de-Maurienne ce qui a suscité pas mal d'études et ...d'interdiction d'exploiter ... On se souvient de l'effondrement de la RD 926 emportée sur 50 m de long par un glissement de 80 000 m³ , heureusement prévu le 8 mars 1980. Depuis cette date, les exploitations ont été progressivement arrêtées sur la commune de Foncouverte et les sites placées sous surveillance.

Les photos correspondent a une carrière en exploitation sur St-Jean & St-Pancrasse .

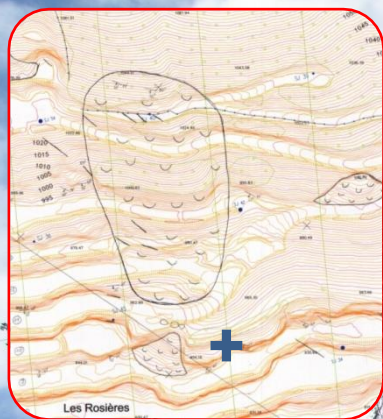




Arrachement
sommital



Glissoire



Gypse altéré

Plan ondulé

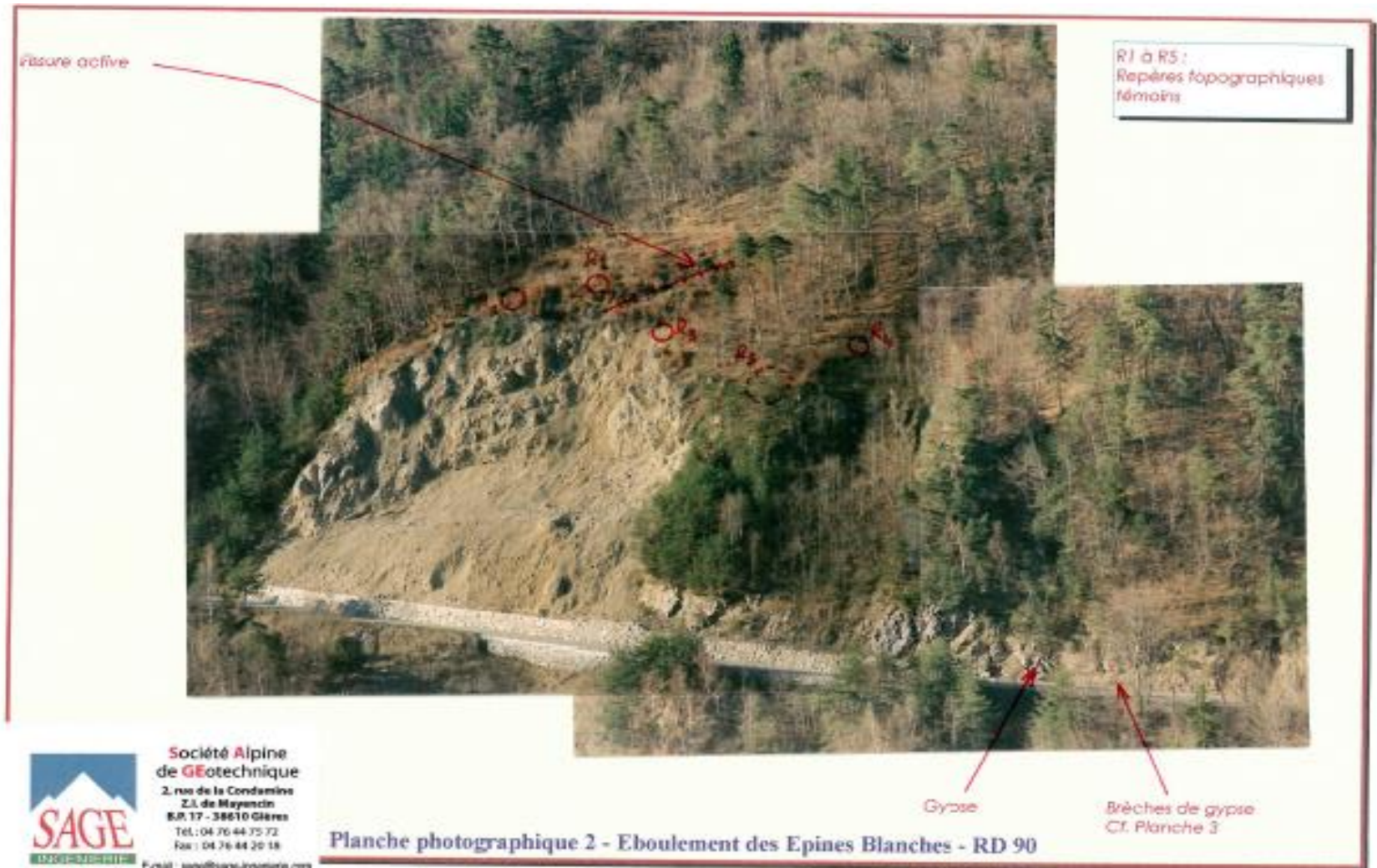
Cannelures de dissolution

Gypse « sain »

Les Epines Blanches (73)

Ce second cas est un exemple de traitement efficace (14 ans de recul) pour stabiliser un versant gypseux sur la commune de Brides-les-Bains.

Plusieurs chutes de quelques dizaines de m³ avaient attiré l'attention sur le versant et permis l'identification d'une masse instable d'environ 20 000 m³



La solution réalisée a consisté au terrassement de 60000 m³ de gypse altéré et à l'installation d'une centaine de tirants actifs de 25 ml (avec un système de liernes métalliques 3 par 3). Les plates formes et les talus ont été par la suite revégétalisés.



Malgré un léger fluage au niveau des ancrages dans l'anhydrite, la solution donne satisfaction...

2-4 : Les karsts gypseux et la problématique des affaissements

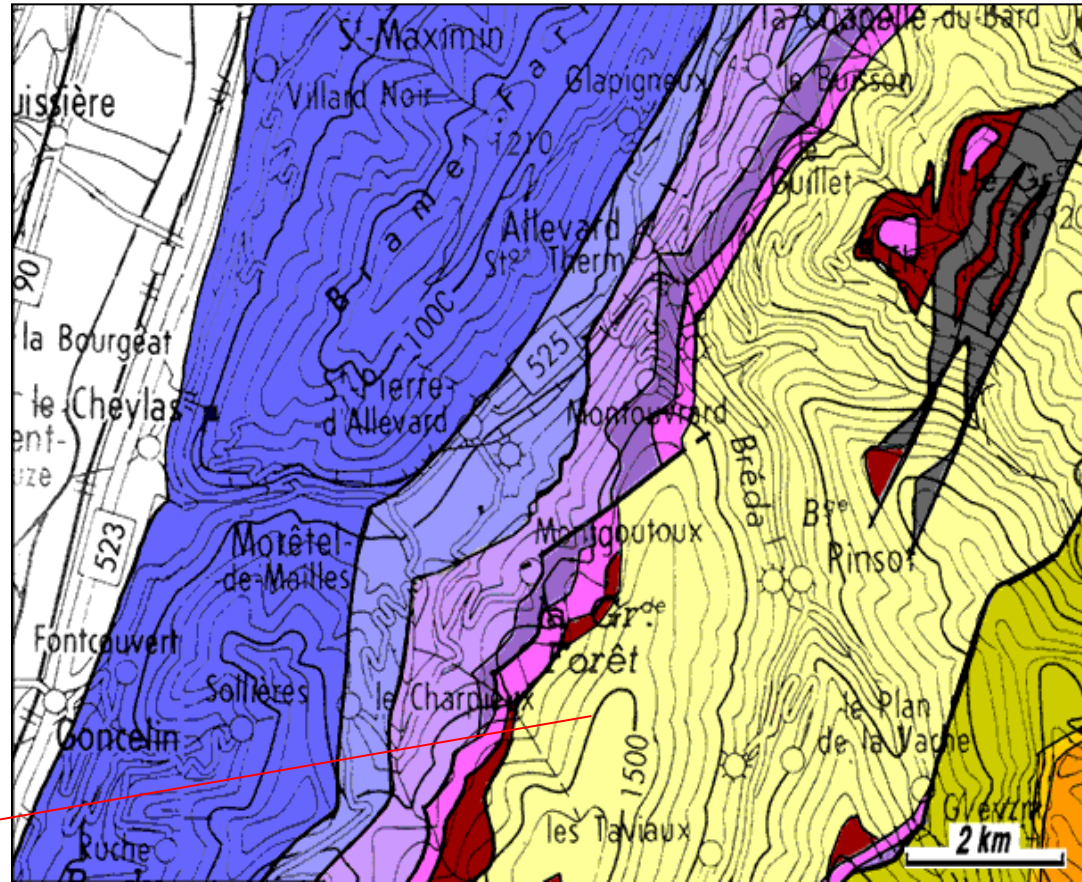
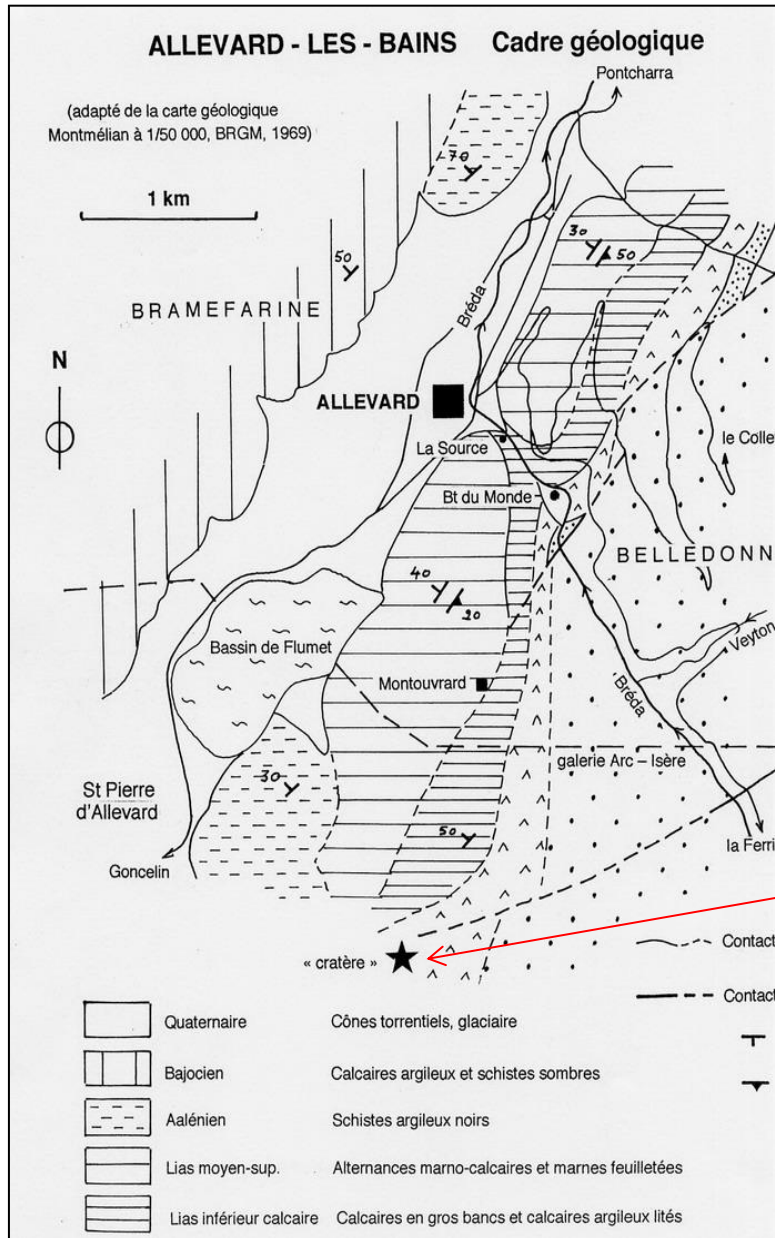
- Allevard (38)
- Bassin Parisien
- *Malbosc (30)*
- *Tourette (83)*
- *Bargemon (83)*

Effondrement d'Allevard 2001



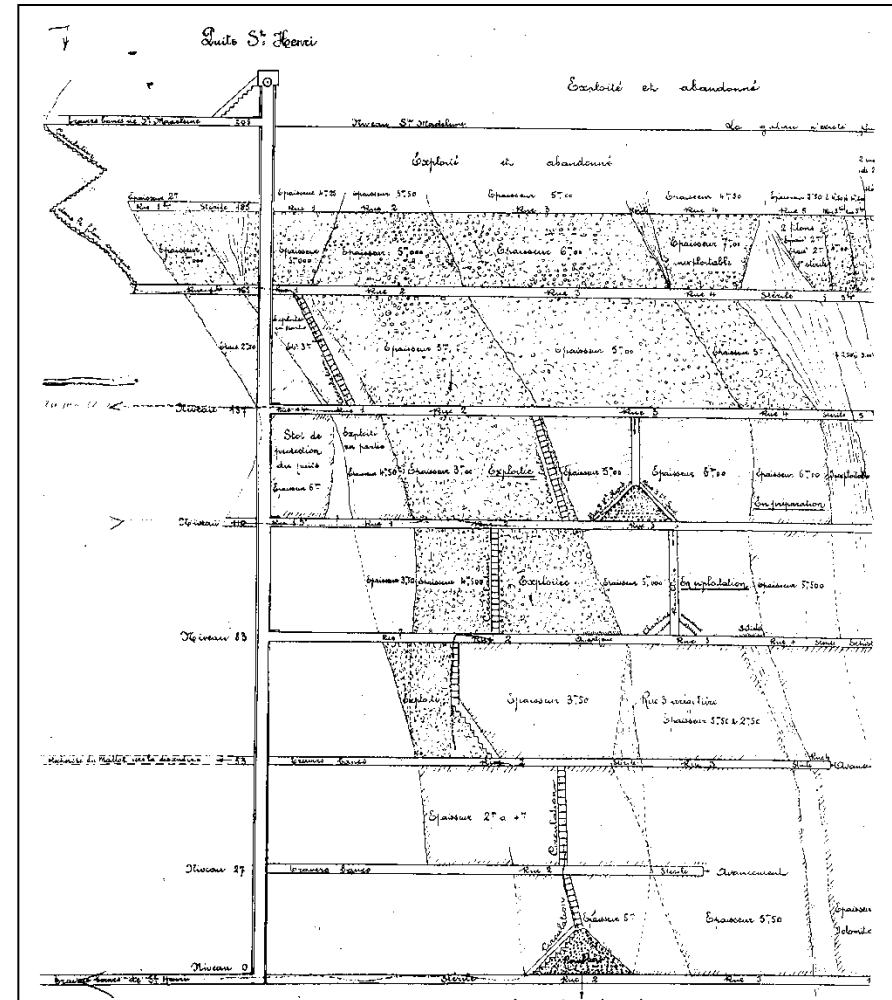
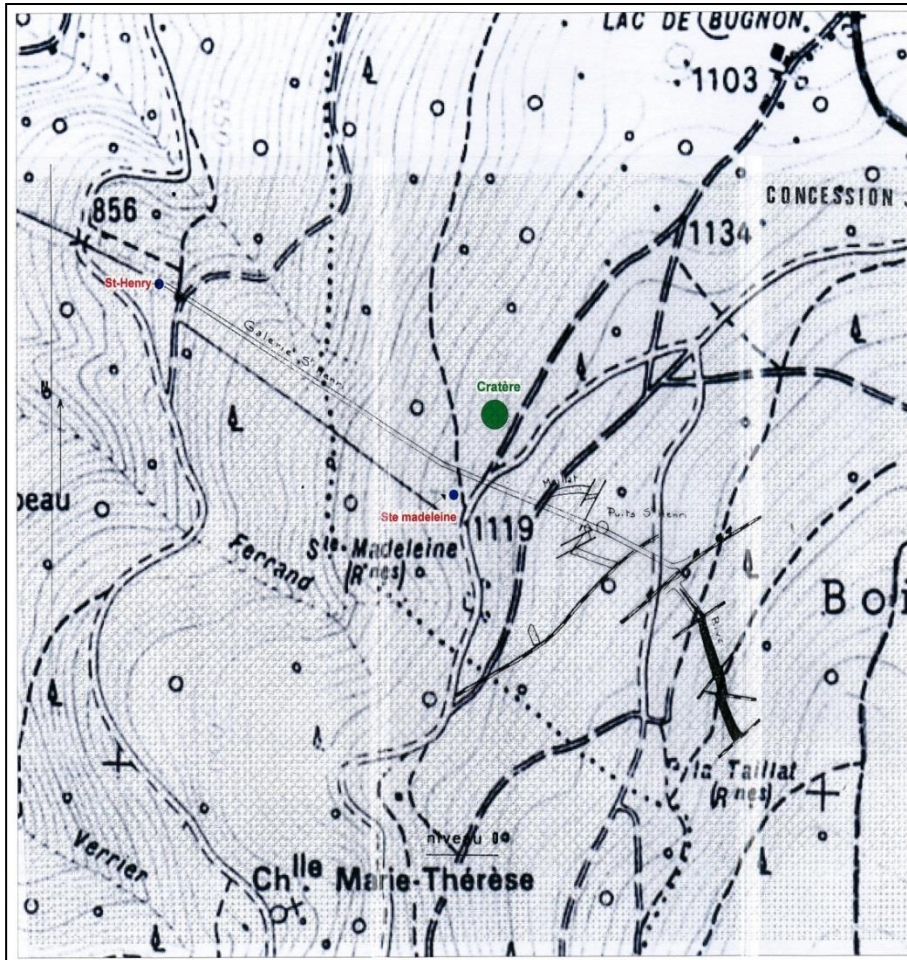
**Un TROU de 150 m de diamètre et de 60 m de profondeur s'ouvre brutalement dans la Forêt au dessus d'Allevard (38) le dimanche 26 août 2001 en fin d'après midi.
Ni victime , ni témoin...**

Effondrement d'Allevard 2001



Des cavités karstiques ont donc « absorbé » d'un seul coup un volume d'environ 500 000 m³ ...!

Effondrement d'Allevard 2001 TB St Henry – rôle de drain ?



- Un cas énigmatique ...

Lochwiller : Un village menacé d'effondrement en raison d'un forage géothermique

Le Monde.fr avec Reuters | 06.07.2013 à 11h42 • Mis à jour le 06.07.2013 à 14h49

Le village de Lochwiller, à une quarantaine de kilomètres à l'ouest de Strasbourg, est menacé d'effondrement en raison des soulèvements de terrain provoqués par un forage géothermique.



Le désordre géologique qui menace Lochwiller trouverait son origine sur la colline, un ancien verger qui a cédé la place à un lotissement en 2008.

Un forage réalisé à 140 mètres de profondeur pour l'installation d'une pompe à chaleur dans une de ces nouvelles maisons a provoqué une fuite d'eau qui a inondé, pendant plusieurs mois, une propriété située en contrebas.

Il a surtout mis l'eau en contact avec une couche gonflante (nappe captive du Muschelkalk mise en communication avec le Keuper constitué de marnes anhydritiques ...)

Denis FABRE : *Géologie du gypse et de l'anhydrite. Aspects appliqués : dissolution & gonflement ; tunnels et pentes*

Conclusions

Gonflement de l'anhydrite

Ce phénomène n'est pas courant : l'anhydrite est rare et son hydratation ne peut se produire que dans des conditions particulières (hydrogéologie, état de contraintes). Les désordres en tunnel liés à la présence d'anhydrite peuvent être dus aussi à la dissolution ou au fluage...

Ceci est particulièrement vrai pour les anhydrites massives « imperméables ».

Les conditions favorables au gonflement sont plus réunies, lorsque l'anhydrite est associée à des argiles comme dans le Trias germanique (Genevreville, Lochwiller).

Dissolution

C'est vraiment le point faible des matériaux gypseux au sens large. Leur solubilité élevée rend possible la formation de réseaux karstiques de grande ampleur et à évolution rapide, comme beaucoup d'exemples présentés nous l'ont montré.

Dans tous ces cas, et une fois encore, la règle d'or pour le géotechnicien sera de comprendre et de maîtriser les circulations d'eau souterraine, qu'elles soient naturelles ou anthropiques.

*Merci spécial à : Yves Paquette, Alain Robert, Patrick Thiaudière,
Georges Rovera, Lionel Lorier, Alexandre Buffet ...*

et à vous pour votre attention_B!