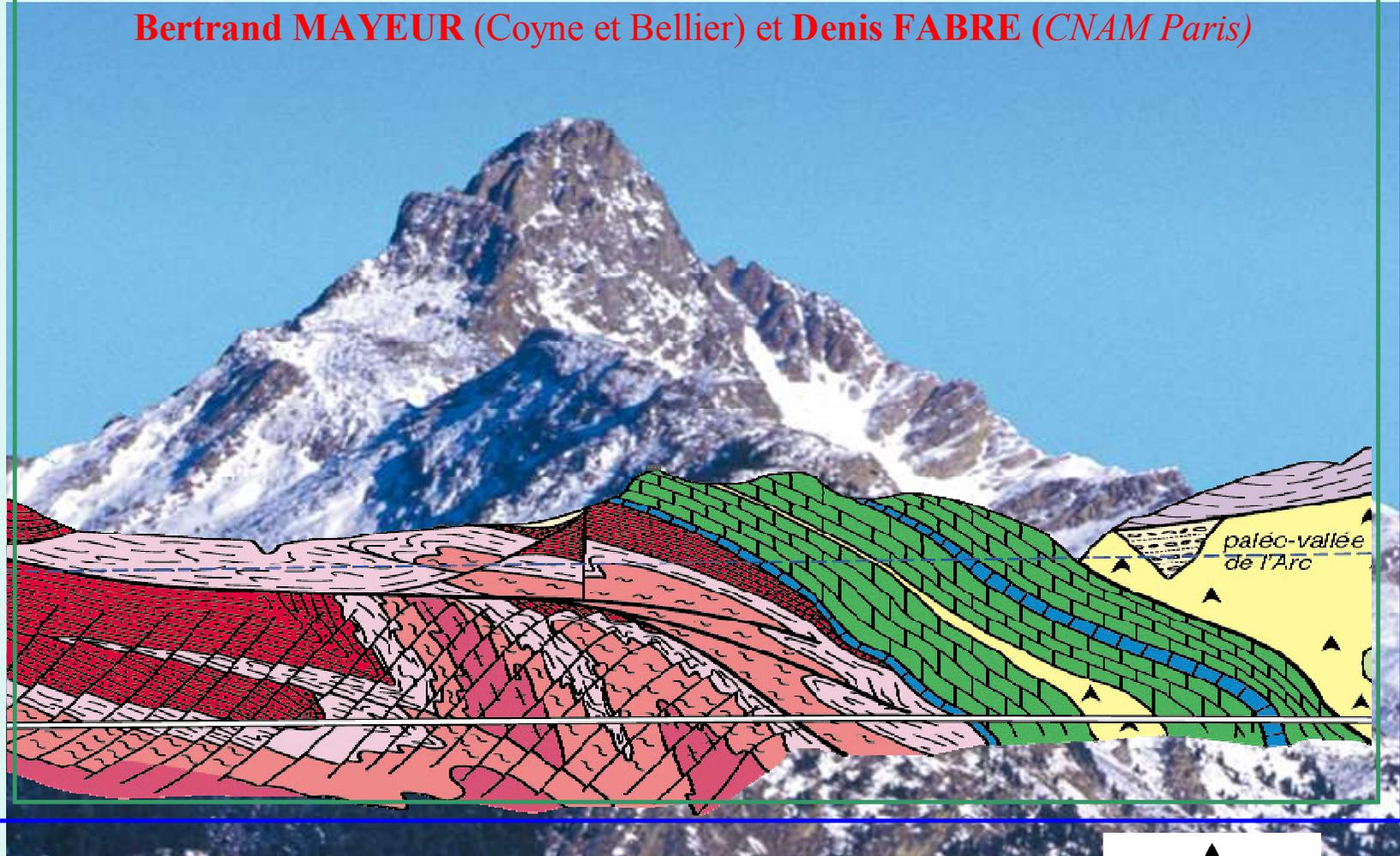


**Mesures de contraintes près de Modane (projet LTF).  
Influences de la topographie et des conditions  
tectoniques sur le champs des contraintes naturelles**

**Bertrand MAYEUR** (Coyne et Bellier) et **Denis FABRE** (CNAM Paris)



## Introduction

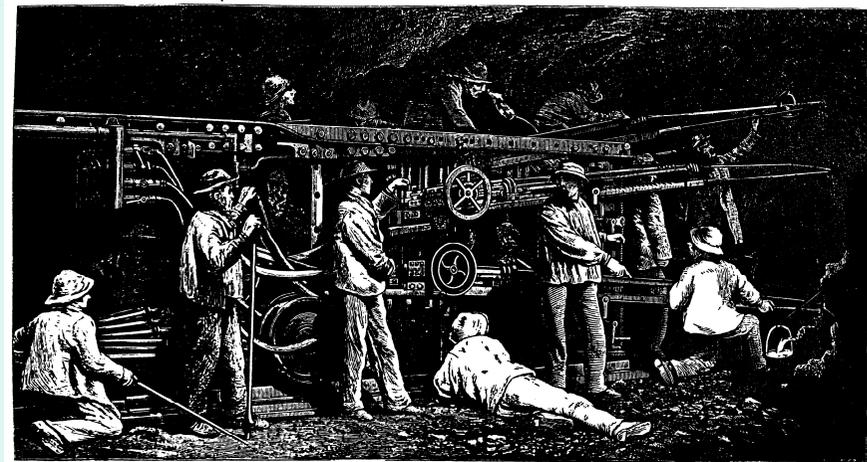
**LTF : le tunnel de base « Maurienne-Ambin » (53 km)  
les reconnaissances engagées  
les travaux en cours**

## Mesures de contraintes

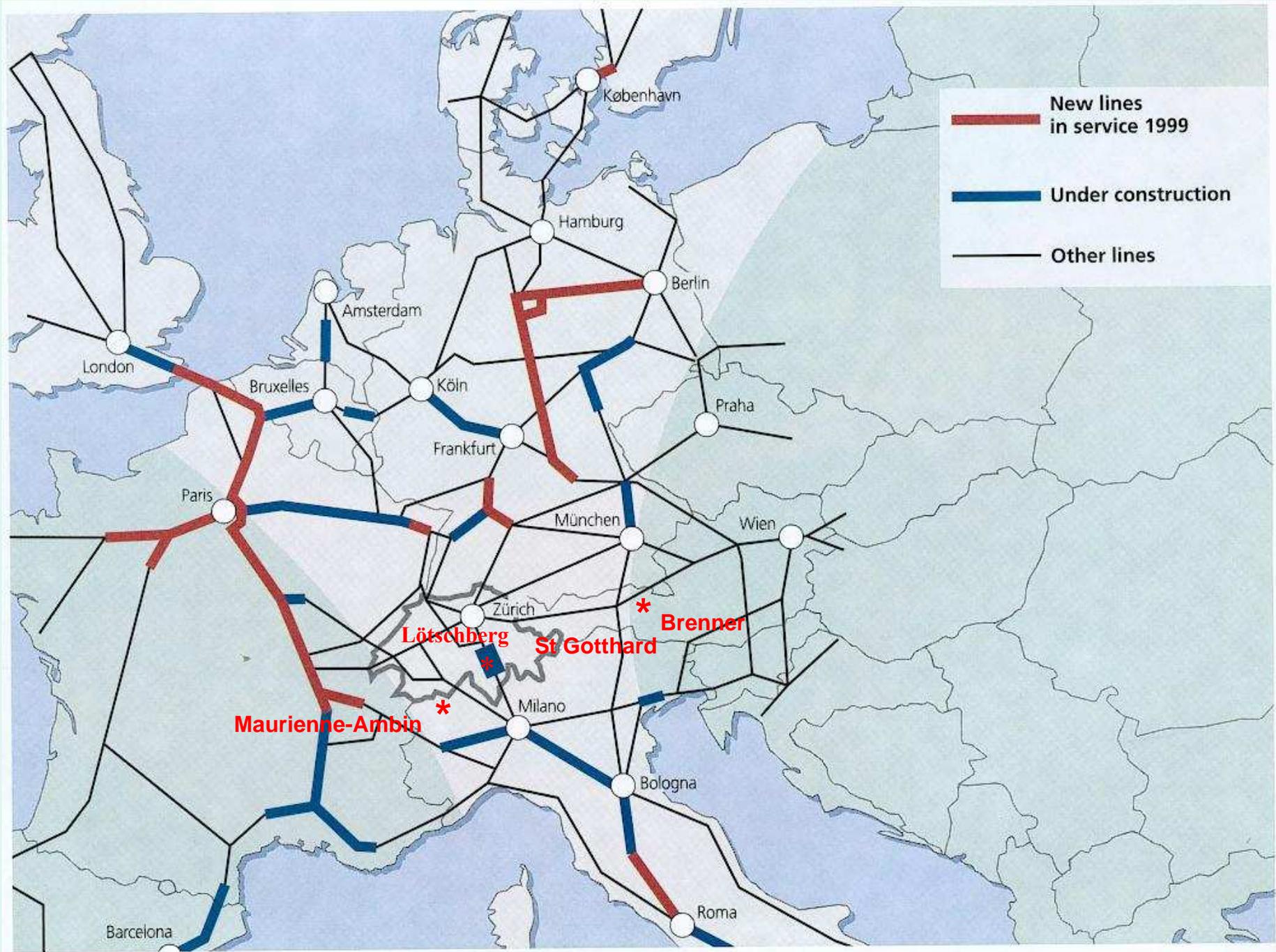
- . présentation générale
- . le cas du sondage S23 sur le versant italien  
(effet de la profondeur)
- . résultats d'ensemble
- . analyse et interprétation

## Bilan pour le champs de contraintes

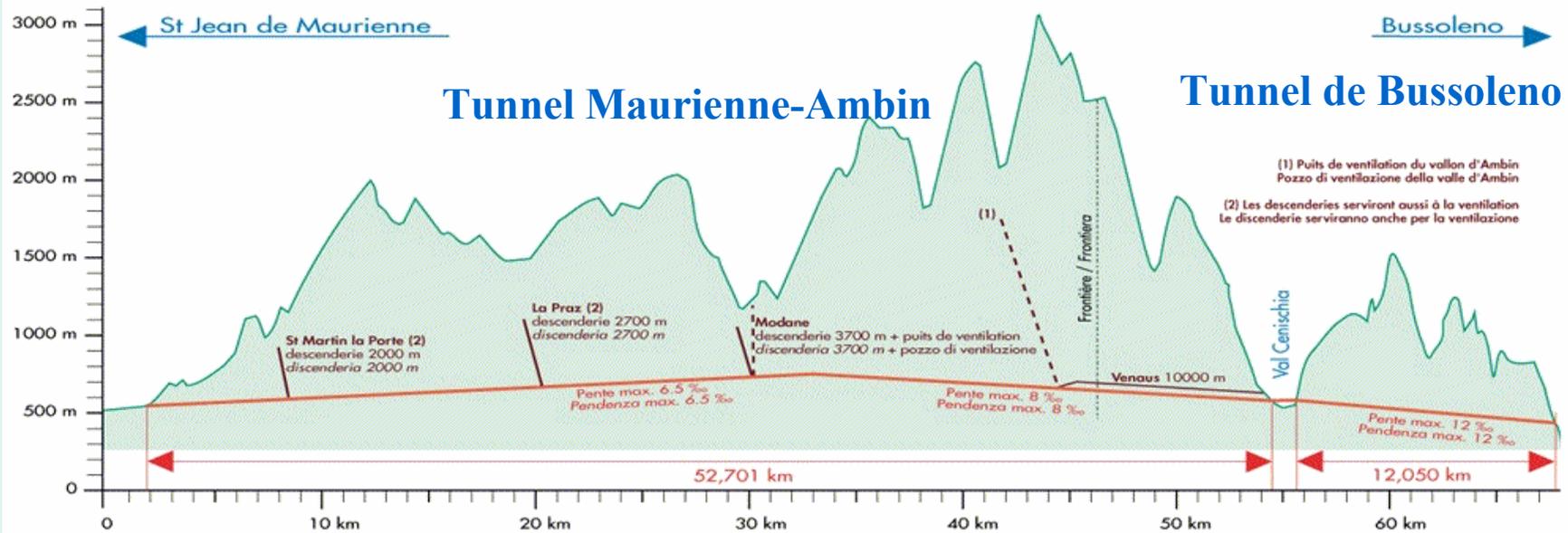
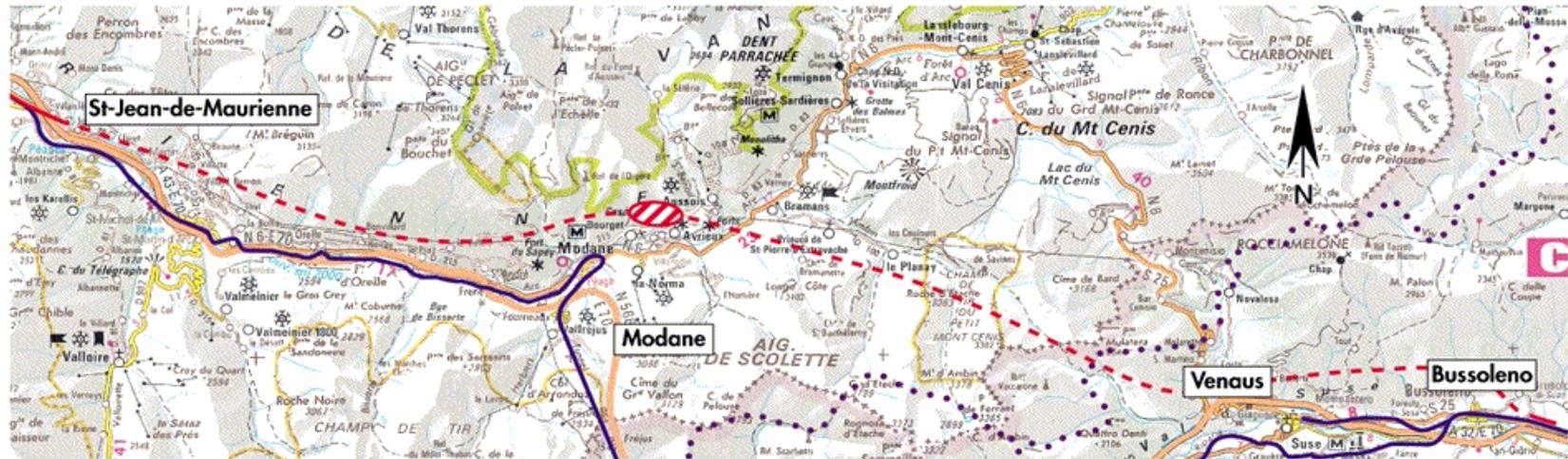
- . modélisations
- . conclusions



Machine perforatrice employée au tunnel des Alpes.



# LTF : les tunnels de la section internationale

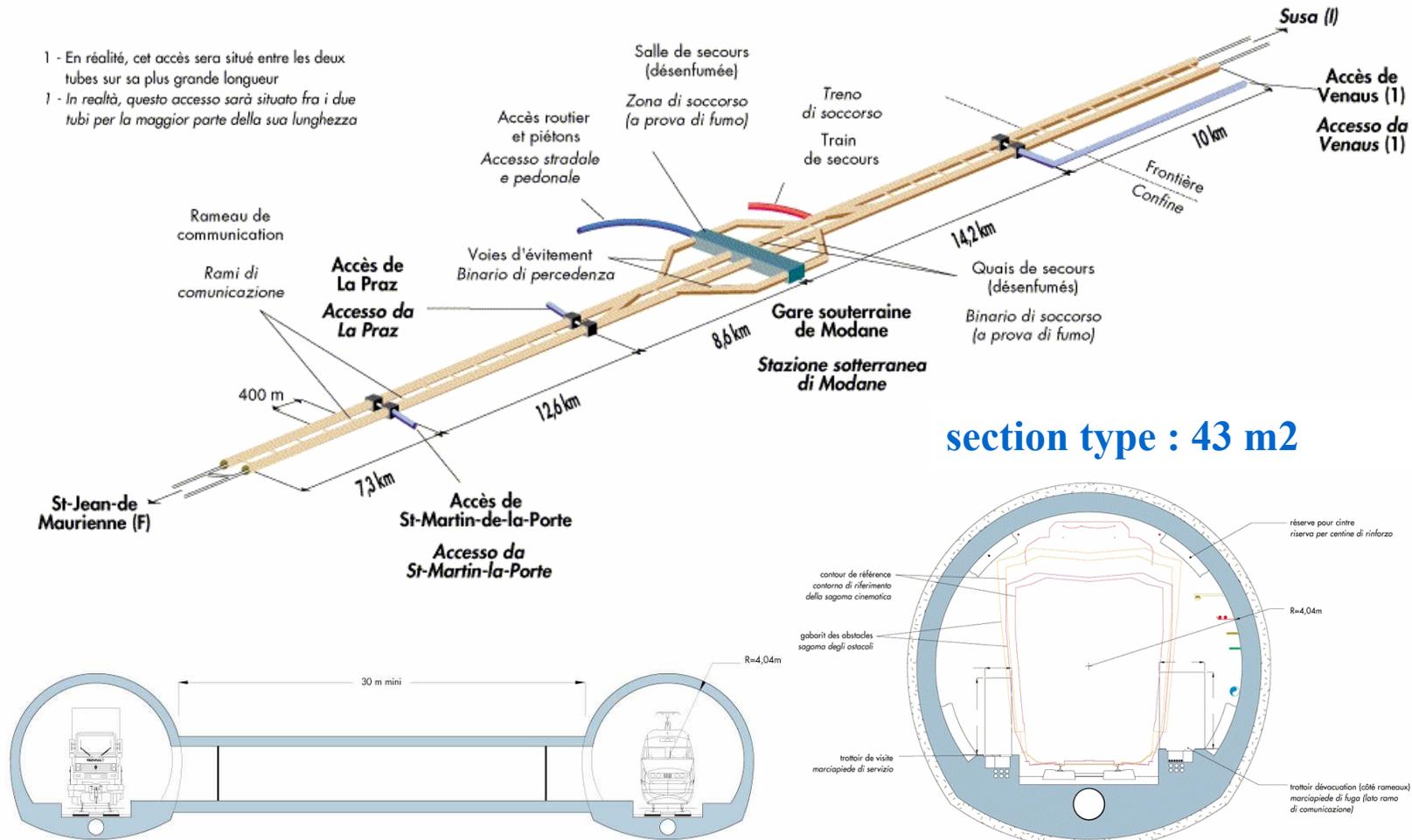


27/02/01

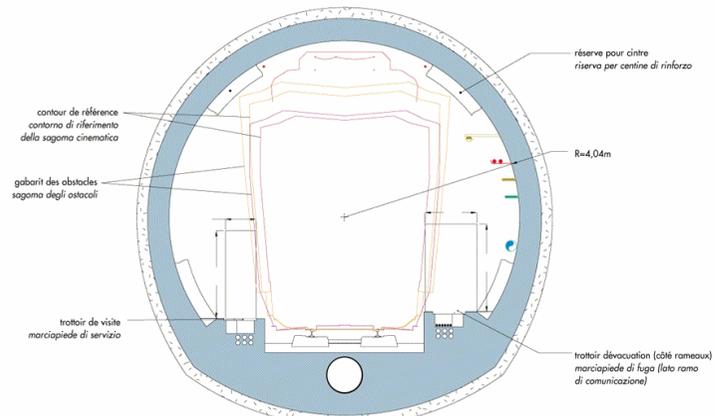


# Tunnel de base Maurienne-Ambin : disposition générale

- 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



section type : 43 m<sup>2</sup>



section d'air 43 m<sup>2</sup>  
sezione d'aria 43 m<sup>2</sup>

# Géologie

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

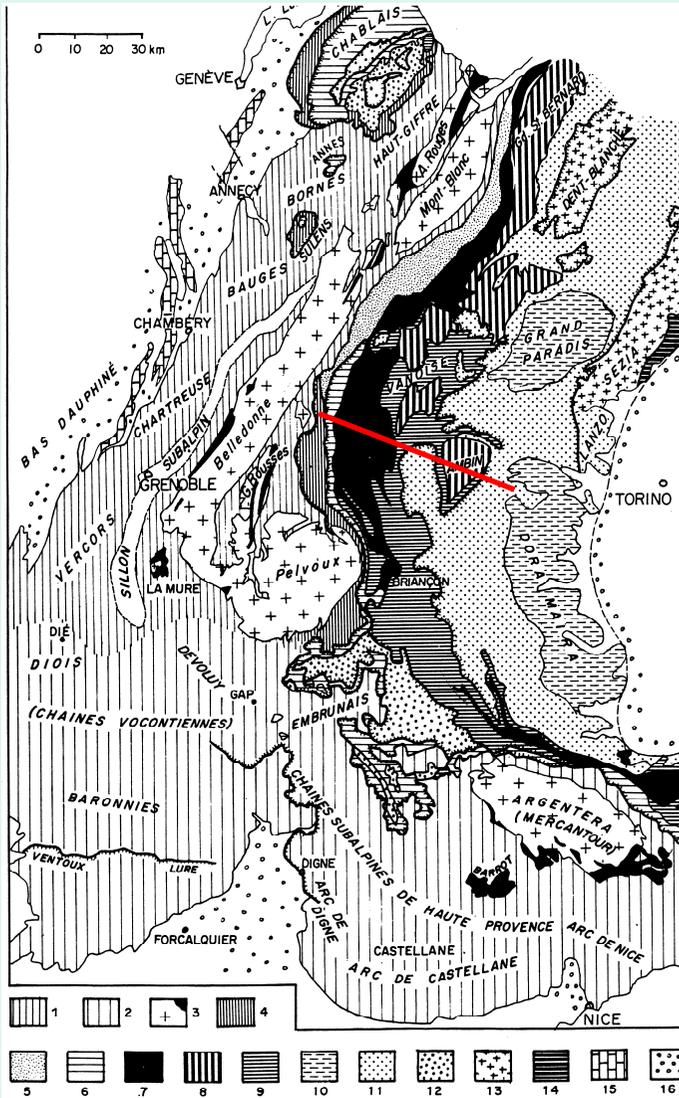
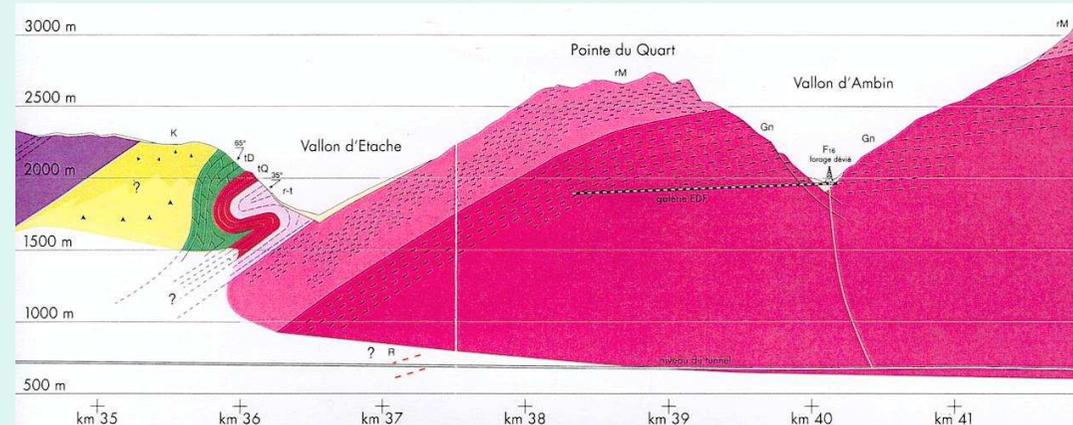


FIG. 1. - Schéma structural des Alpes franco-italiennes.

1. Chaînes subalpines septentrionales. - 2. Chaînes subalpines méridionales.  
 3. Massifs cristallins externes et bassins permio-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.



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

# Méthodes classiques de reconnaissances. Méthodes spéciales

*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:

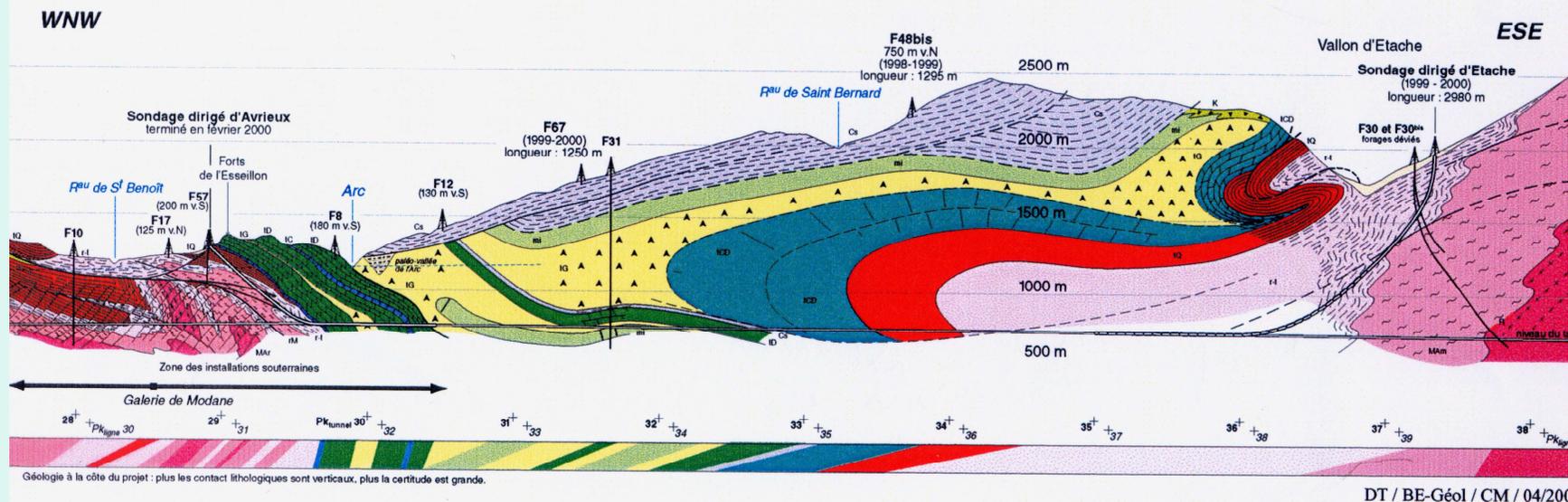
- 132 bore holes (linear total 40 km).  
Lengths vary from 15 to 1,520 m.
- 2 directed bore holes (linear total 4,700 m)  
of which 2000 m horizontal at project depth.

Positioning and monitoring  
of geodesic networks

# Sondages dirigés

## Extract from the provisional geological section of the base tunnel

(G. Ménard 03/2000)



**Sondage d'Avrieux : départ à 45°, 995 m de carottage horizontal continu ( L = 1800 m )**

**Sondage d'Etache : départ vertical , 1000 m de carottage horizontal continu ( L = 2900 m )**

# Etat de contraintes

Carte générale pour l'Europe (Müller et al.)

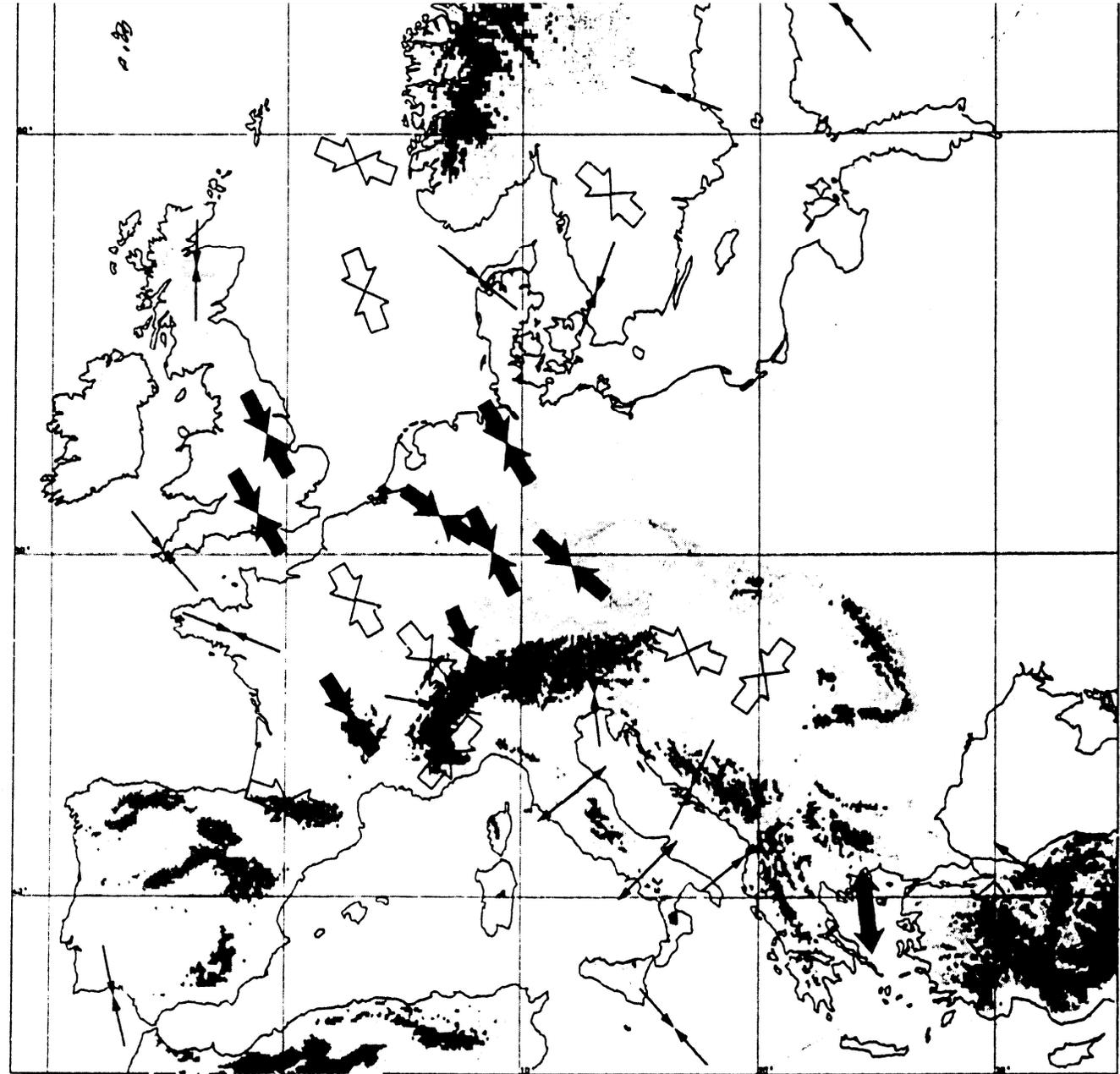
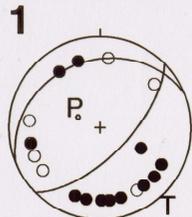


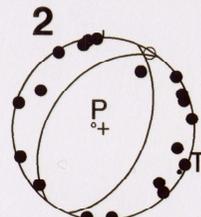
Fig. 3. Generalized stress map for Europe. This map is a simplified version of Figure 2a based on visual averaging of clusters of data. Inward directed arrows indicate the maximum horizontal compression directions in regions of dominantly compressive stress regimes (either thrust or strike-slip faulting). Outward directed arrows indicate the least horizontal stress in regions of extension. Thick arrows are shown for average stress directions which are based on numerous (>10) stress observations (preferentially from different types of stress indicators) with uniform orientations.

## - séismes pour le secteur de Modane

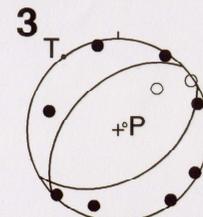
### Mécanismes au foyer (C. Sue, 1998)



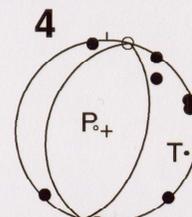
01/08/94  
z=1.05 M=2.1



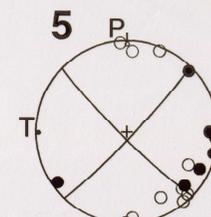
25/10/96  
z=7.64 M=2.0



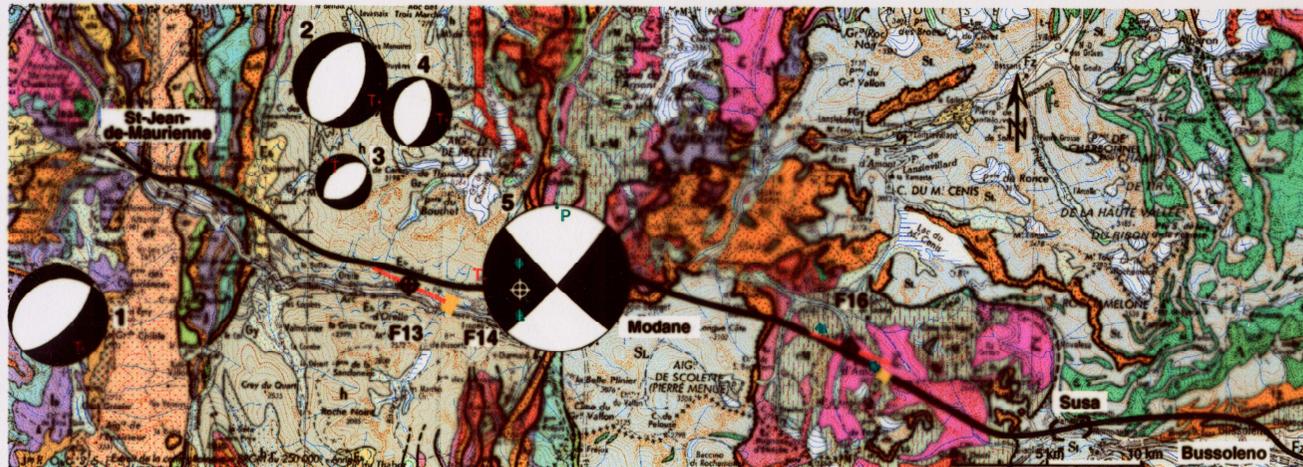
05/11/96  
z=7.97 M=1.2



19/02/97  
z=6.86 M=1.5



15/05/97  
z=9.43 M=3.1



$\sigma_H$  (contrainte in situ)

Direction de déviation  
de puits

Direction de déplacement actuel

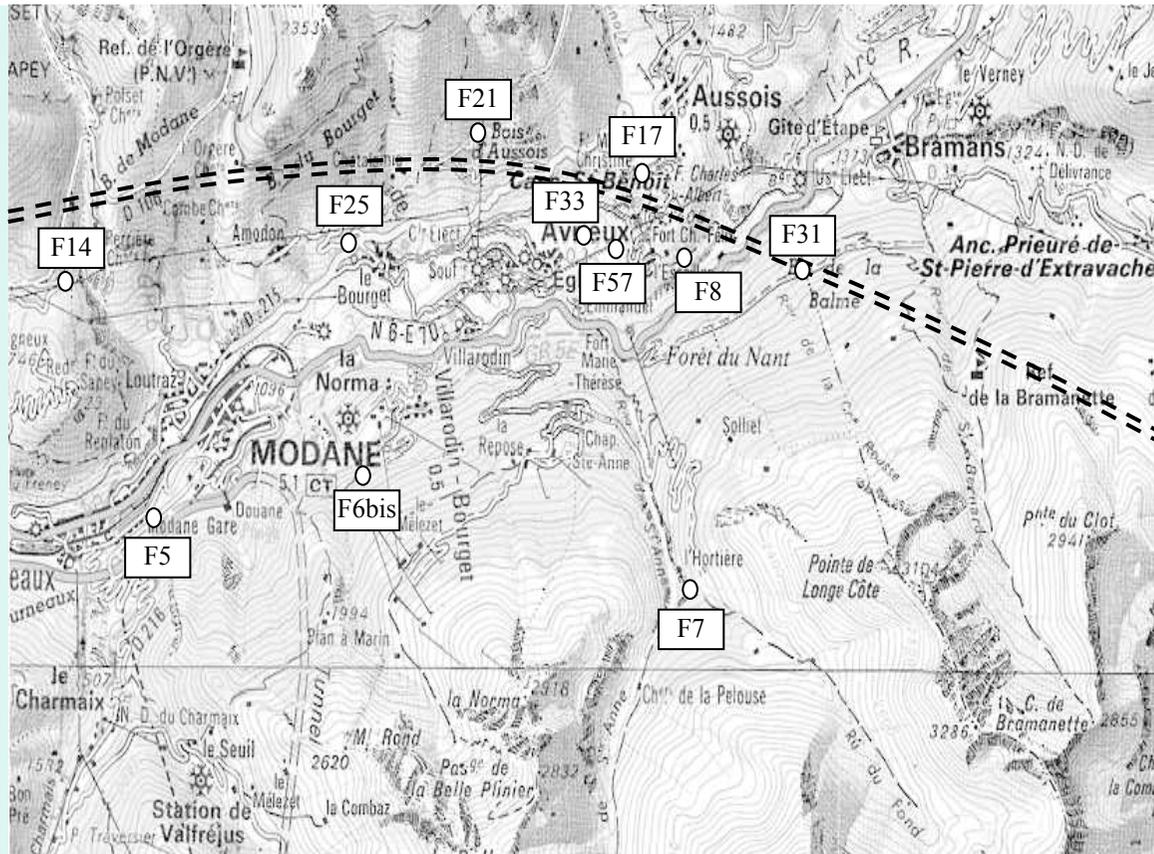
CD2000

- sondages : discage des carottes ; ovalisation...

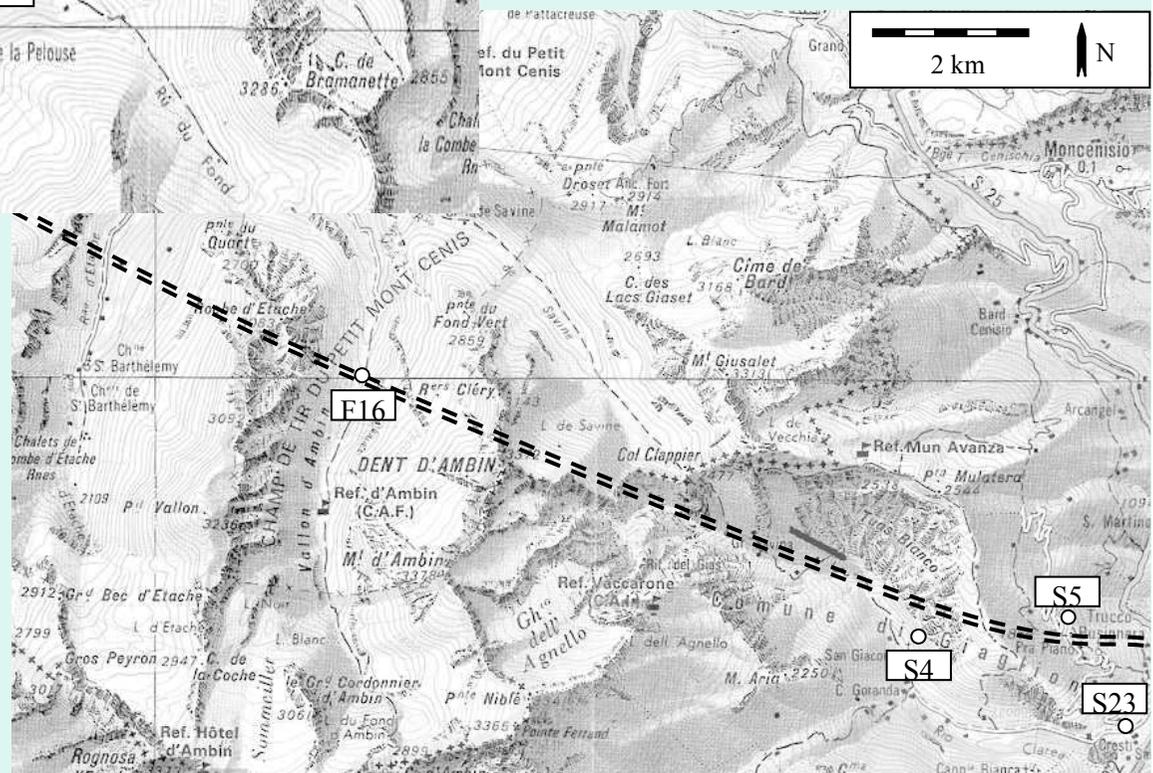
# Mesures de contraintes

- **Récentes mesures dans les Alpes (méthode H.T.P.F)**
  - **Mercantour (1 sondage)**
  - **Lötschberg (3 sondages)**
  - **Maurienne-Ambin (16 sondages)**

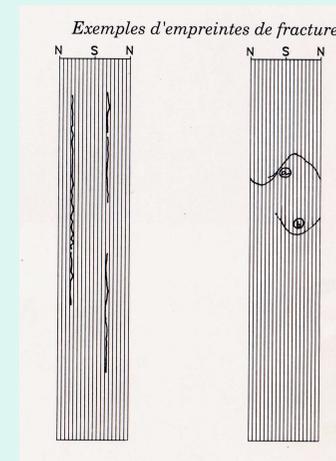
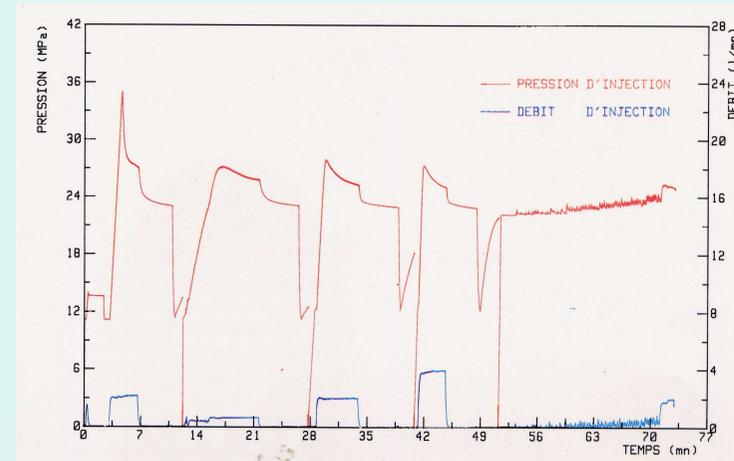
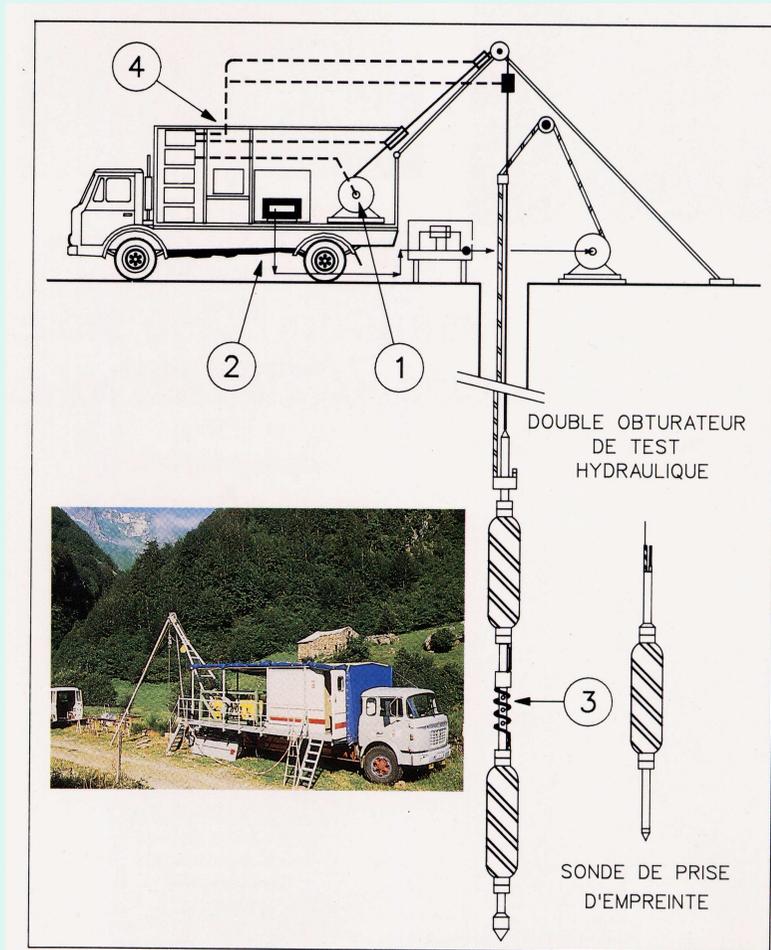
# Localisation des sondages



- A : Versant italien (2)**
- B : Ambin (3)**
- C : Arc rive G et vallée (8)**
- D : Nord de Modane (3)**



# Mesure des contraintes : méthode H.T.P.F.



## Interprétation des mesures

- **Il est nécessaire de disposer de 6 à 7 mesures (10 si possible) dans la même zone de profondeur**
- **La qualité de la détermination du tenseur des contraintes (inversion) dépend :**
  - du nombre de tests
  - de la diversité des orientations des fractures testées
  - de l'intervalle entre les cotes des mesures
  - du nombre moyen de fractures par test
- **3 classes de qualité proposées par Mayeur (1999)**  
**classe A , classe B, classe C .**

*Remarque : sur l'hypothèse de la verticalité d'une des directions principales*

# Le forage S23 (De Ruine)

- S23 (1040 m d'altitude) au dessus du confluent de la Clarea et de la Dora Riparia, longueur de 500 m, vertical
- 30 tests répartis en trois groupes :
- 10 dans un intervalle **supérieur** (altitude  $z = 699$  à  $775$  m) de hauteur  $Dz = 76$  m ;
- 10 dans un intervalle **médian** ( $z = 597$  à  $685$  m) de hauteur  $Dz = 88$  m.
- 10 dans un intervalle **inférieur** ( $z = 546$  à  $592$  m) de hauteur  $Dz = 46$  m.
- Chacun des trois groupes de tests est inversé séparément ; le champ de contraintes peut ainsi être supposé constant sur chaque intervalle, mais aucune hypothèse a priori n'est faite sur les directions principales.
- La qualité de chacune des trois mesures est bonne (**classe A**).

## S 23 : Résultats

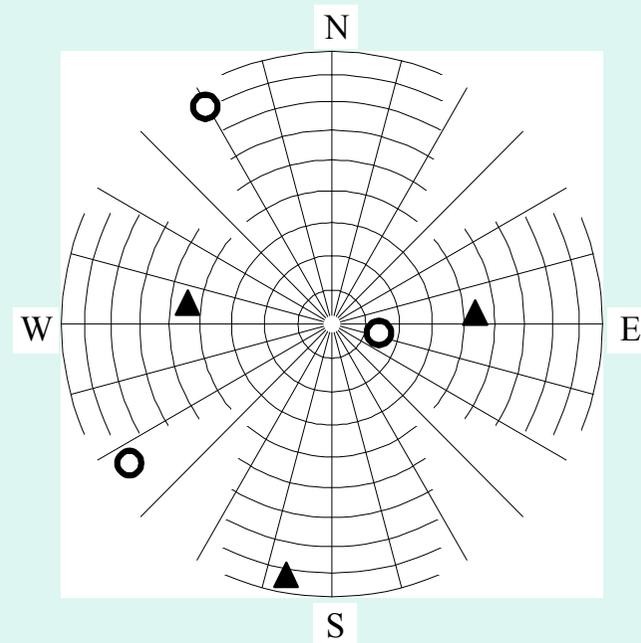
**Tableau 1 : Etat de contraintes mesuré dans le forage S23.**

$z$  : altitude milieu zone de test ;  $\gamma.h$  : contrainte lithostatique ;  $\delta$  : azimut ;  $\mu$  : inclinaison

intervalle	$z$ (m)	$\gamma.h$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa) $\delta_1 / \mu_1$	$\sigma_2$ (MPa) $\delta_2 / \mu_2$	$\sigma_3$ (MPa) $\delta_3 / \mu_3$
SUP	738	8	7 279° / 45°	5 192° / 6°	3 86° / 44°
MED	641	11	10 162° / 20°	8 264° / 31°	5 44° / 52°
INF	569	13	14 97° / 77°	9 237° / 10°	7 329° / 9°

**Orientations des contraintes principales mesurées dans le forage S23.**

Stéréogramme de Schmidt, hémisphère inférieure. SUP. : triangles ; INF : cercles.



## S23 : interprétation

- état de contraintes assez anisotrope :  $\sigma_1/\sigma_3 = 2$  sur les trois intervalles
- état de contraintes moyen faible : dans chaque intervalle, une contrainte principale mesurée est proche de la contrainte lithostatique et les deux autres lui sont nettement inférieures
- rotation des directions principales avec la profondeur : dans les zones supérieure et médiane (altitude 600 à 775 m), aucune direction principale n'est inclinée de plus de 50° par rapport à l'horizon tale, tandis que **dans la zone inférieure** (altitude 550 à 590 m) **la direction principale majeure est presque verticale**
- *On retrouve les mêmes tendances pour le forage voisin S5 (20 mesures en 2 zones de profondeur )*

**Tableau 2 : Résultats de la détermination du tenseur des contraintes pour 16 forages profonds (reconnaisances du tunnel de base Maurienne-Ambin)**

p et z : profondeur et altitude de la zone de mesure ;  $\gamma \cdot h$  : poids des terres (calculé) ;  $\sigma_v$  : valeur de la contrainte verticale mesurée ;  $\sigma_h$  (resp.  $\sigma_H$ ) : valeur de la contrainte horizontale mineure (resp. majeure) mesurée ; l'azimut  $\alpha$  de  $\sigma_H$  est précisé entre parenthèses.

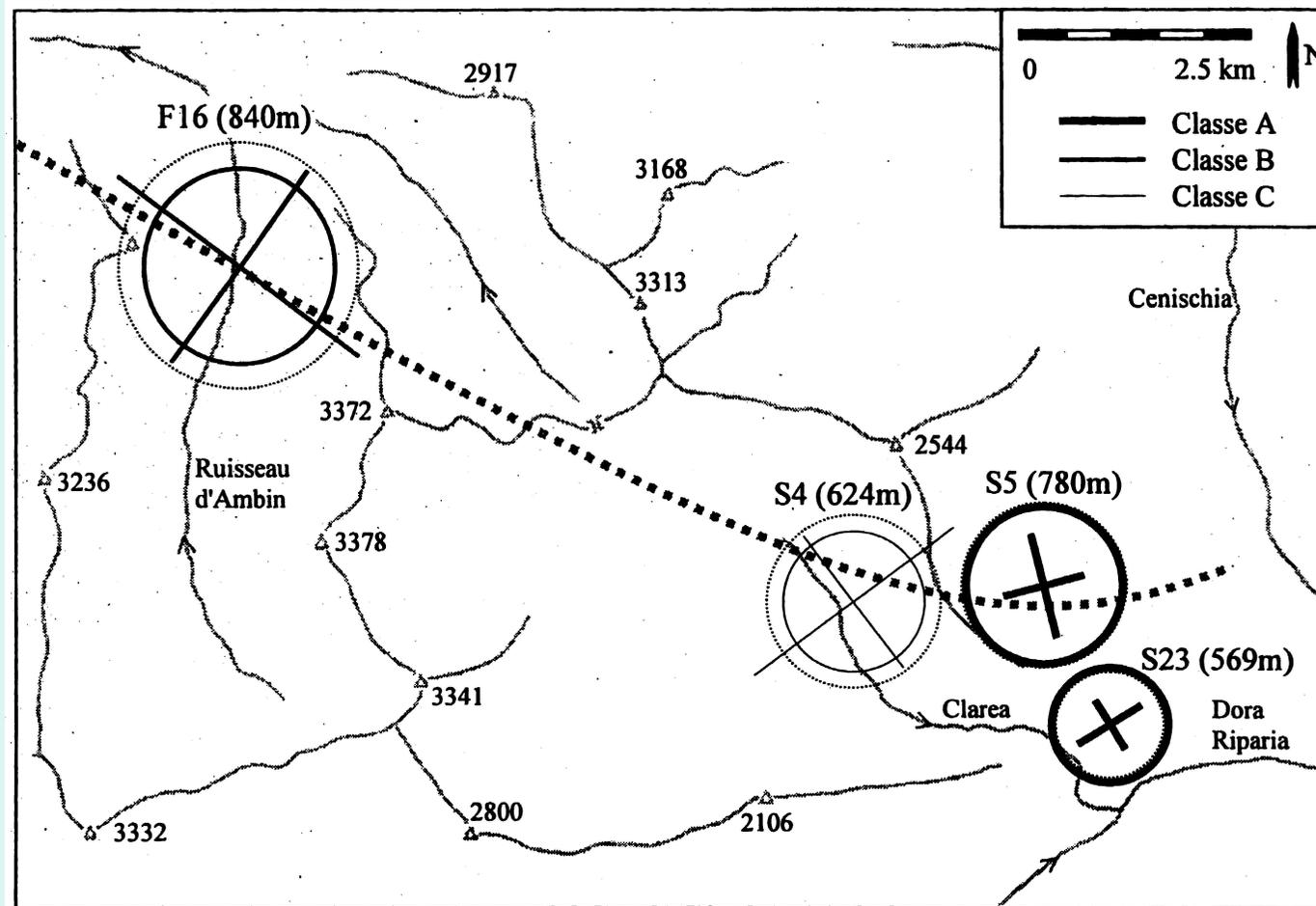
Domaine	Forage	p (m)	z (m)	$\gamma h$ (MPa)	$\sigma_v$ (MPa)	$\sigma_h$ (MPa)	$\sigma_H$ (MPa)
A	<b>S5</b>	740	780	20	19	10	30 (N53)
A	<b>S23</b>	473	569	13	14	7	9 (N58)
B	F16	1141	840	29	23	28	36 (N126)
B	S4	535	624	21	17	20	30 (N53)
B'	F7	1099	753	29.7	21.4	20.2	23.5 (N97)
C	F5	161	894	4.3	8.7	5.3	8.5 (N172)
C	F8	391	839	10.6	15.3	7.2	13.5 (N145)
C	F17	516	735	13.9	18.1	8.5	13.6 (N181)
C	F31	912	864	24.6	37.4	8.1	22.8 (N133)
C	F67	1150	675	30	25.2	13.0	28.8 (N157)
C	F33	408	751	11.0	15.5	15.3	28.3 (N123)
C	F57	414	831	11.2	12.0	10.0	15.4 (N211)
D	F14	818	795	22.1	21.3	14.5	37.1 (N1)
D	F21	709	824	19.1	20.4	10.4	17.1 (N114)
atyp.	F6bis	923	629	24.9	8.5	15.1	48.7 (N125)
atyp.	F25	298	1018	8.0	3.0	3.9	12.8 (N45)

## Résultats généraux présentés sur 2 cartes

*Pour la représentation graphique des contraintes:*

- cercle en trait continu :  $\sigma_v$
- cercle en trait pointillé : poids des terres ( $\gamma.h$ )
- grand trait horizontal :  $\sigma_H$
- petit trait horizontal :  $\sigma_h$

# Contraintes mesurées : Massif d'Ambin (secteurs A et B)

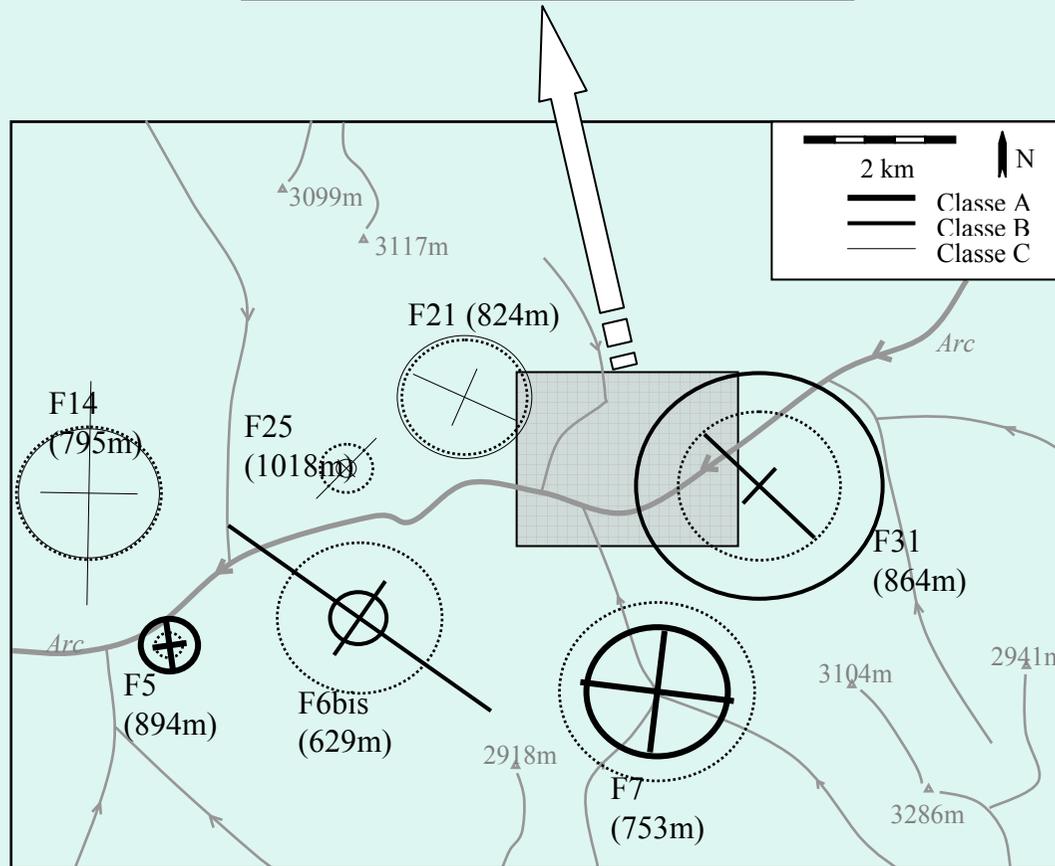
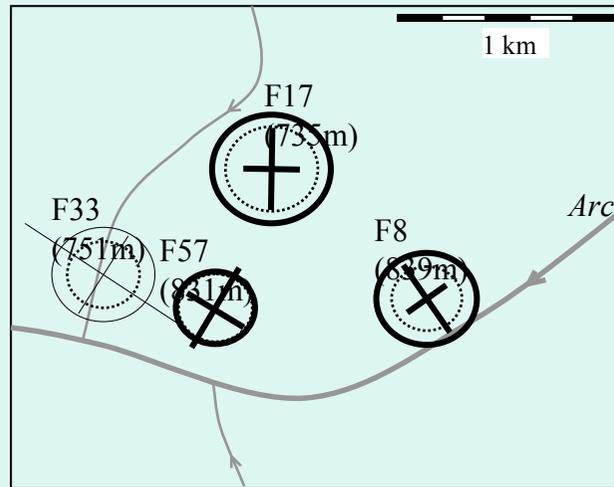


**Secteur A :**  
S5, S23

**Secteur B :** S4, F16

*MAYEUR, 1999*

## Contraintes mesurées : Vallée de l'Arc (secteurs C et D)



**F7 → secteur B**

**Secteur C : F5, F8, F17,  
F31, (F67), F33, F57**

**Secteur D :  
F14, F21**

**F6bis et F25  
atypiques  
(singularités géologiques)**

# Contraintes : synthèse des résultats

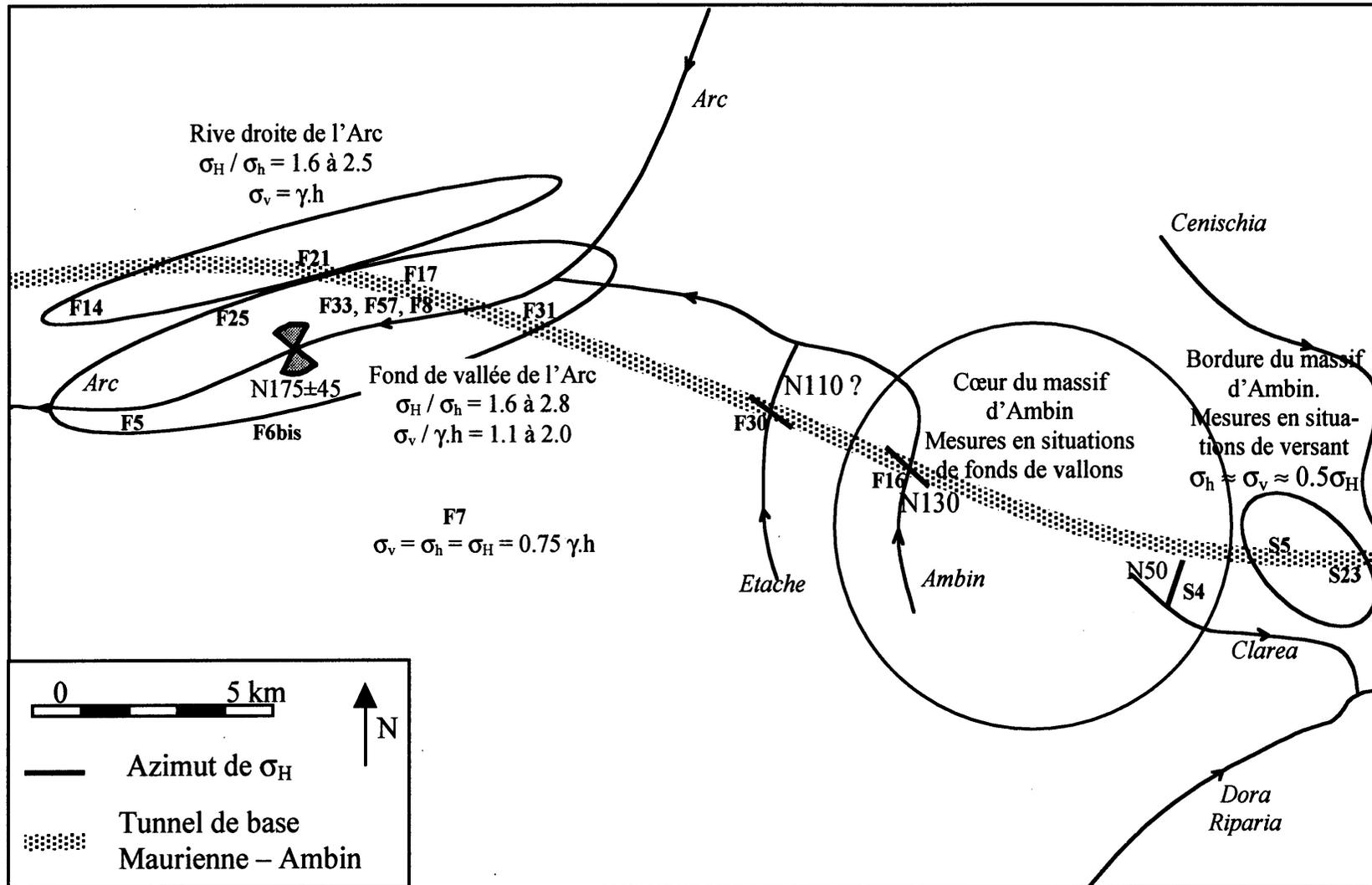


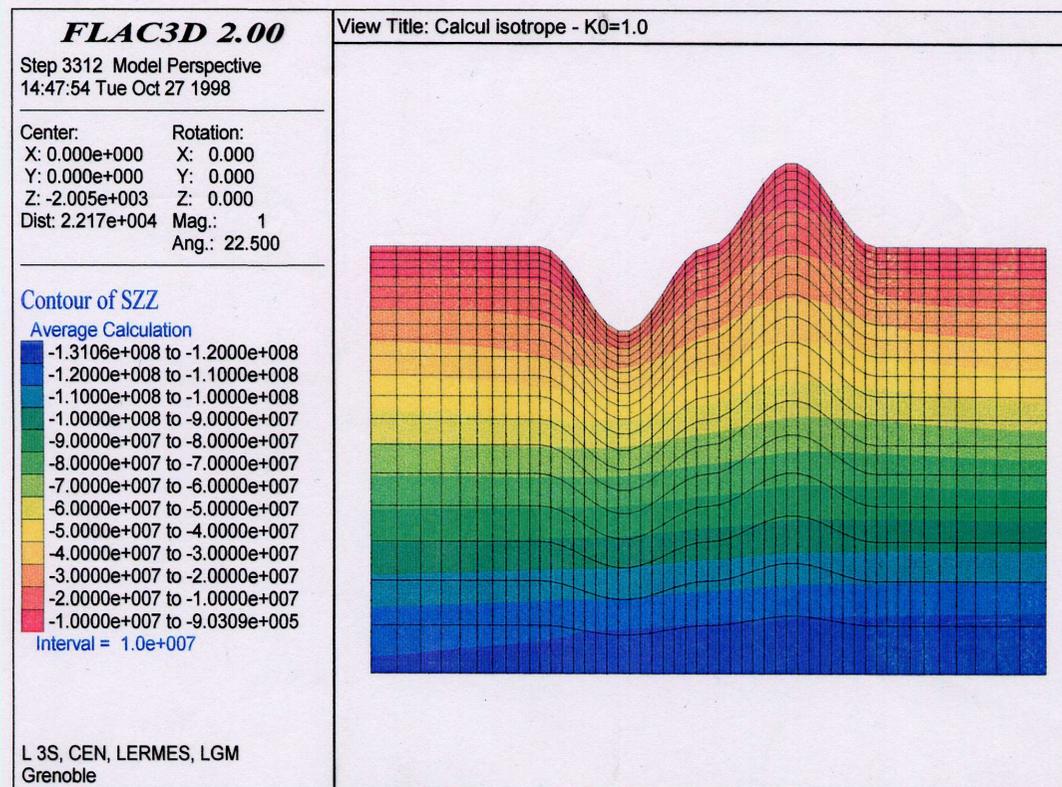
Figure 3 : Tunnel Maurienne-Ambin : caractérisation des domaines de contraintes identifiés après les mesures HTPF dans les secteurs de Modane et du Massif d'Ambin

## Contraintes : bilan des résultats

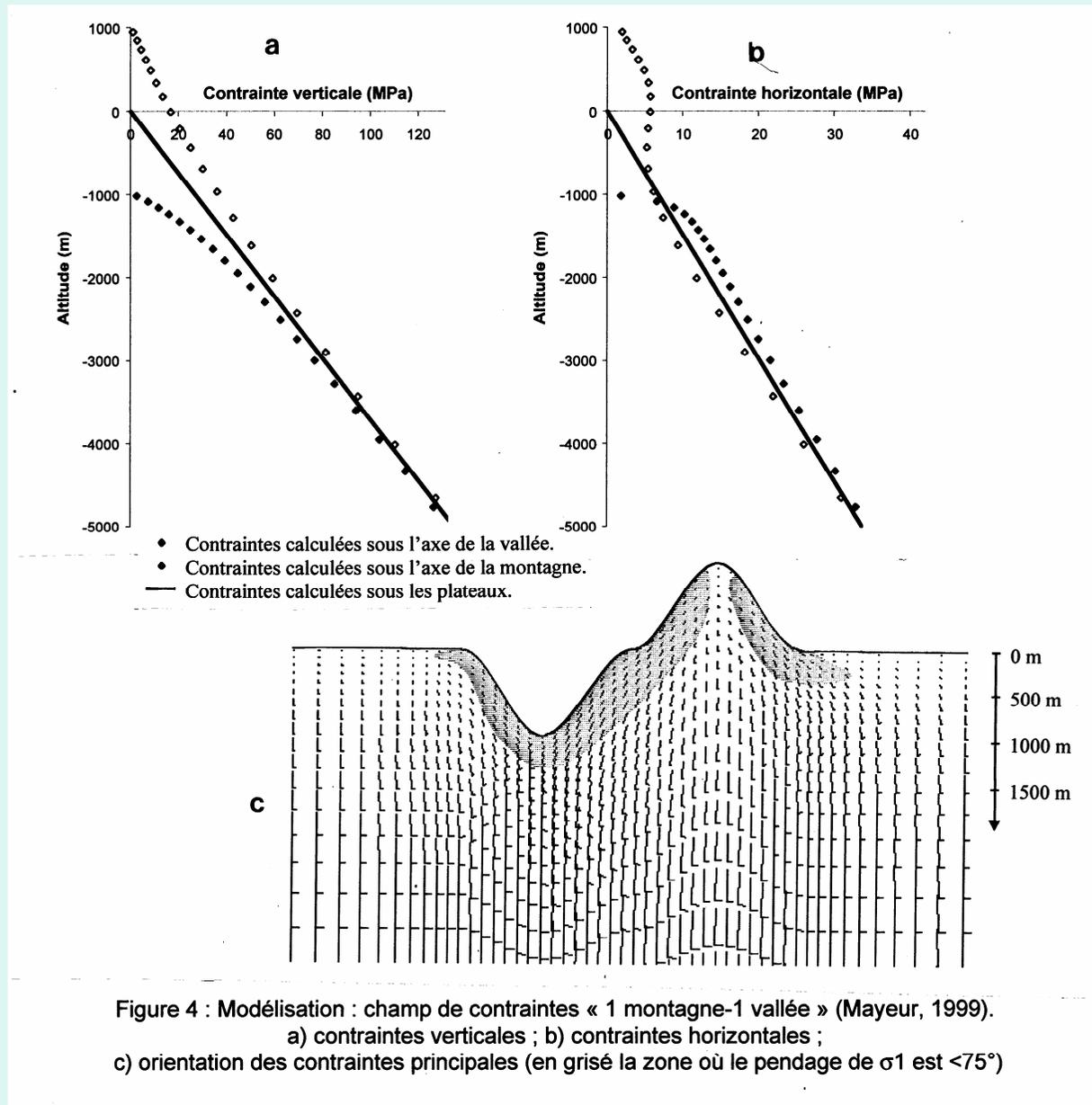
- Hétérogénéité et anisotropie du champs de contraintes
- Une contrainte principale est proche de la verticale à partir d'une certaine profondeur (450 m)
- La contrainte  $\sigma_H$  est le plus souvent perpendiculaire à la direction des vallées
  
- A (versant italien) :  $\sigma_h \# \sigma_H \# 0,5 \sigma_v$
- B (Massif d'Ambin) : déficit de  $\sigma_v$
- C (Vallée de l'Arc) :  $\sigma_v$  et  $\sigma_H$  élevés
- D (Nord de Modane) :  $\sigma_H$  élevé

# Contraintes : un mot des modélisations (thèse Mayeur 1999)

Modèle FLAC utilisé en 2D  
Exemples de calcul pour le modèle  
« 1 montagne -1 vallée »

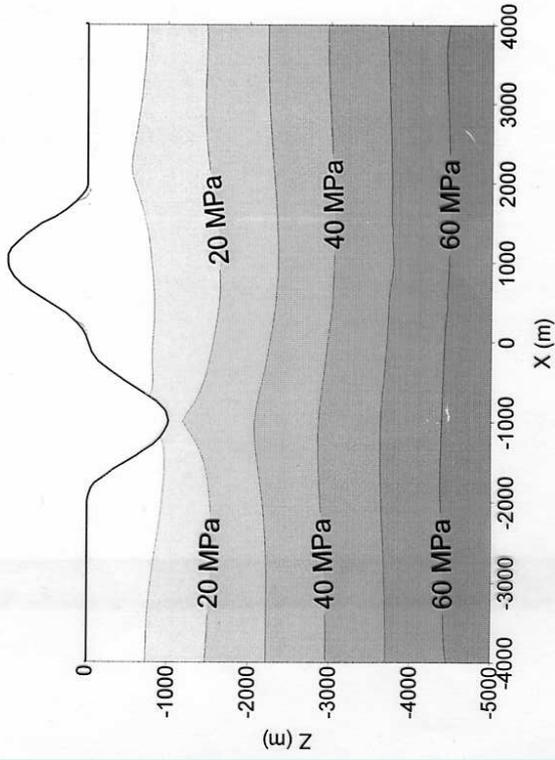


# Contraintes $\sigma_v$ et $\sigma_H$

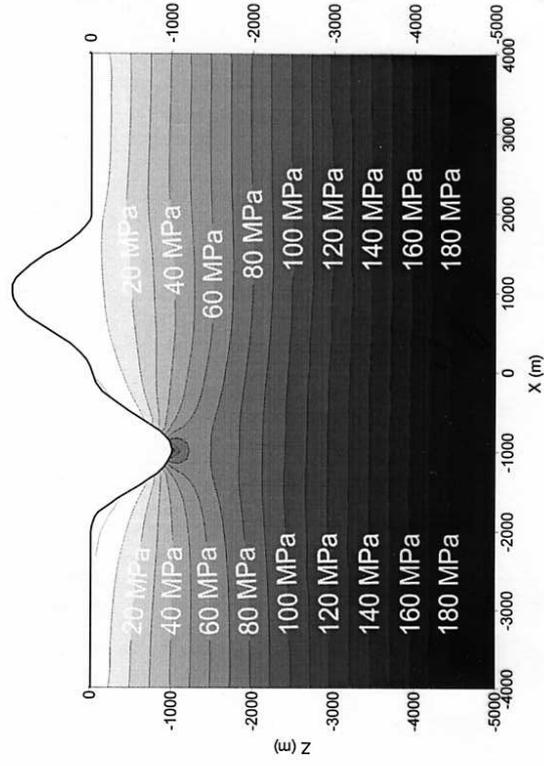


# Répartition des contraintes horizontales pour différents champs de contraintes régionaux

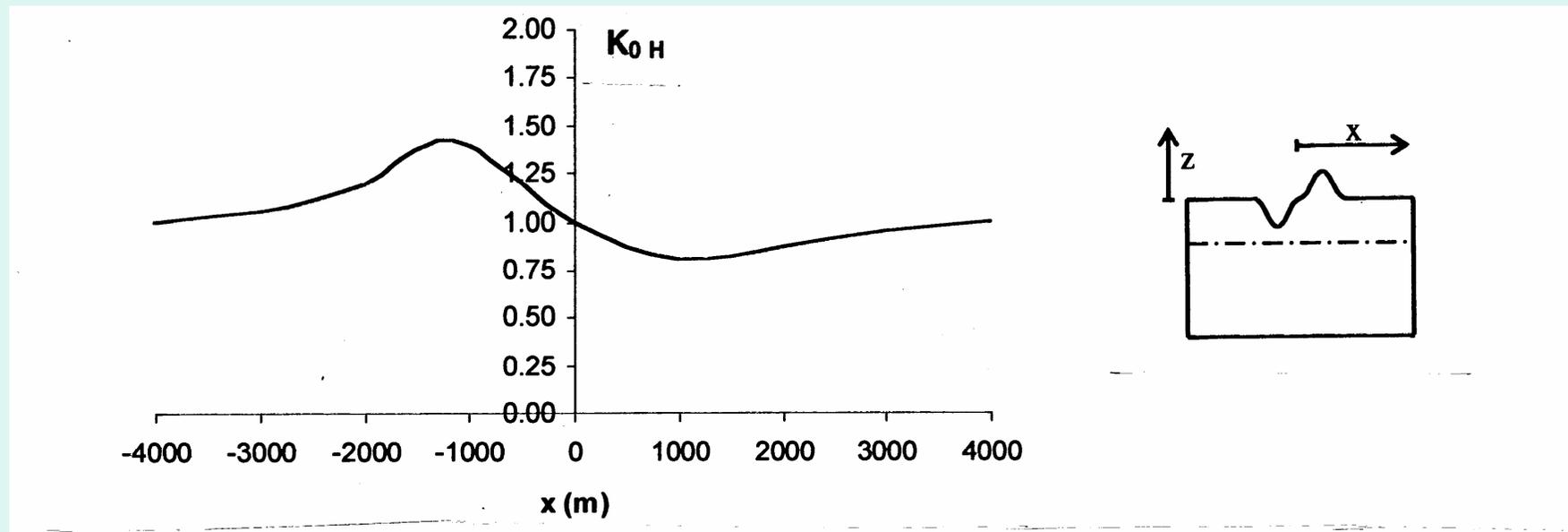
$K=0.5$



$K=1.5$



## Augmentation de $K_{0H}$ sous la vallée



# Champs des contraintes : conclusions

- Loin de la surface (ou sous un relief subhorizontal),  $\Sigma_0$  a une direction principale horizontale et une bonne homogénéité dans le plan horizontal ;  
**5 paramètres** (liés au contexte tectonique) le définissent :
  - 1 angle (azimut de  $\sigma_H$ ),
  - 2 coefficients ( $K_{0h}$  et  $K_{0H}$ )
  - et 2 contraintes horizontales de surface  $\sigma_{h0}$  et  $\sigma_{H0}$ .
- $\Sigma_0$  est beaucoup plus complexe dans la partie superficielle d'un massif montagneux (champ anisotrope et hétérogène); les effets de relief sont importants, notamment en fond de vallée (fortes contraintes horizontales) et en flanc de vallée (forte inclinaison des axes principaux du tenseur). Le « serrage tectonique » influence les contraintes horizontales et même la verticale.