

*Comité Français de Mécanique des Roches –
Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain*

Séance technique du 11 juin 2009

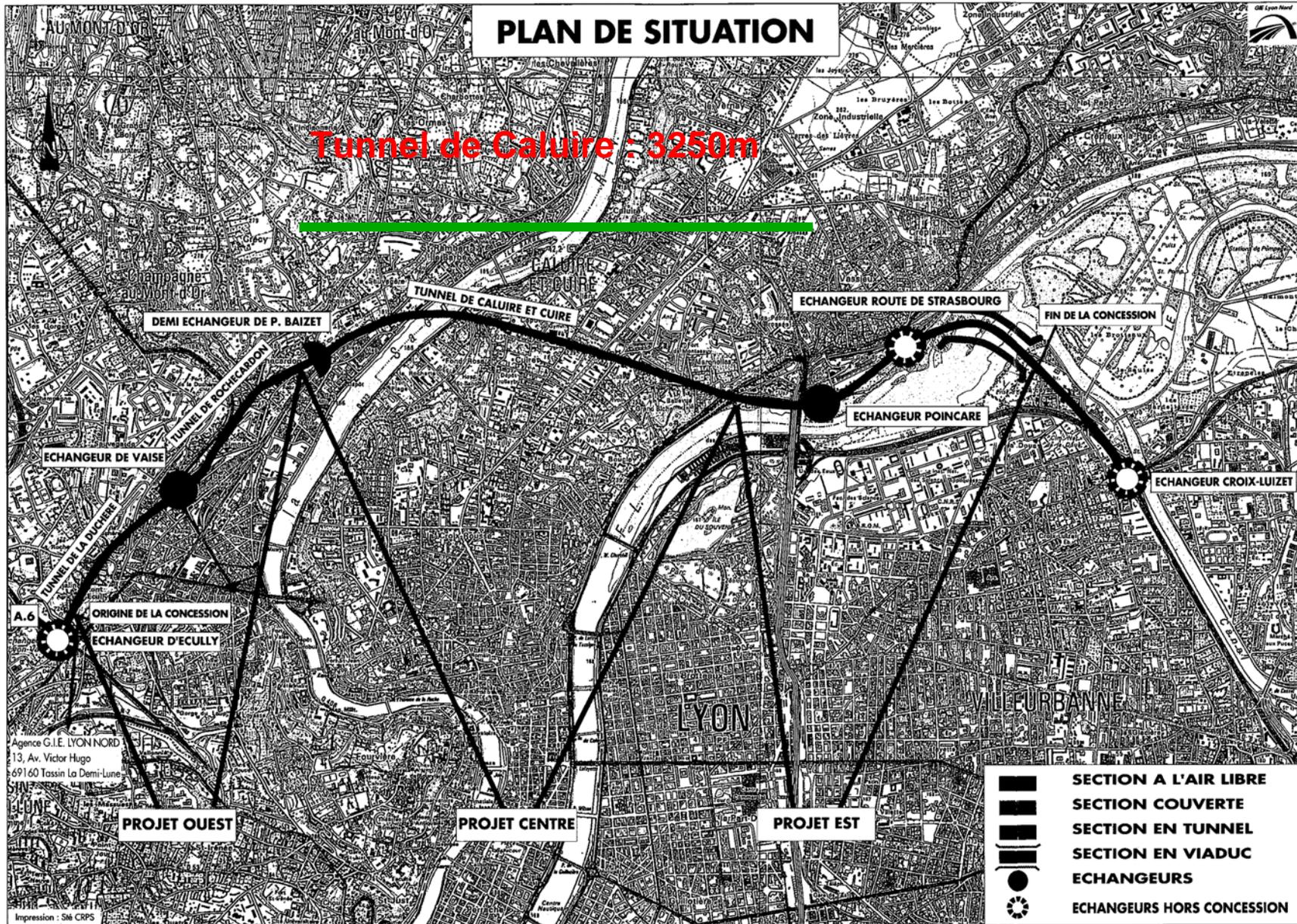
« TUNNELIERS ET MECANIQUE DES ROCHES DURES »

**Retour sur les performances du tunnelier
dans les granites et anatexites
du boulevard périphérique Nord de Lyon**

*Denis FABRE, Conservatoire National des Arts et Métiers – Paris
Alain ROBERT & André SCHWENZFEIER , CETu Lyon-Bron*

PLAN DE SITUATION

Tunnel de Caluire : 3250m



. Type : à pression de terre pour terrain mixte avec injection de boue lourde

. Diamètre de creusement : 11 m

. Poussée : 10200 tonnes

. Puissance : 3515 kW (5750)

. Vitesse rotation : 1,5 à 3 tr/min

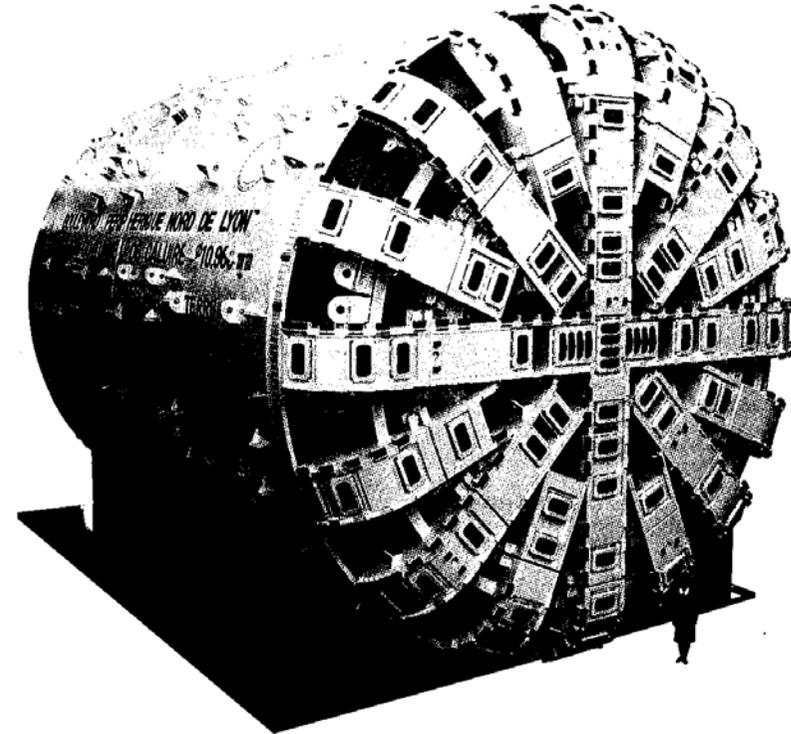
. Couple nominal : 2278 t.m

. Outils de coupe : 256 et 82
molettes simple disque 18'

. Voussoirs : 8 + 1 , anneaux de
200 cm

Boulevard Périphérique Nord de Lyon

Bouygues-Dumez-GTM BTP



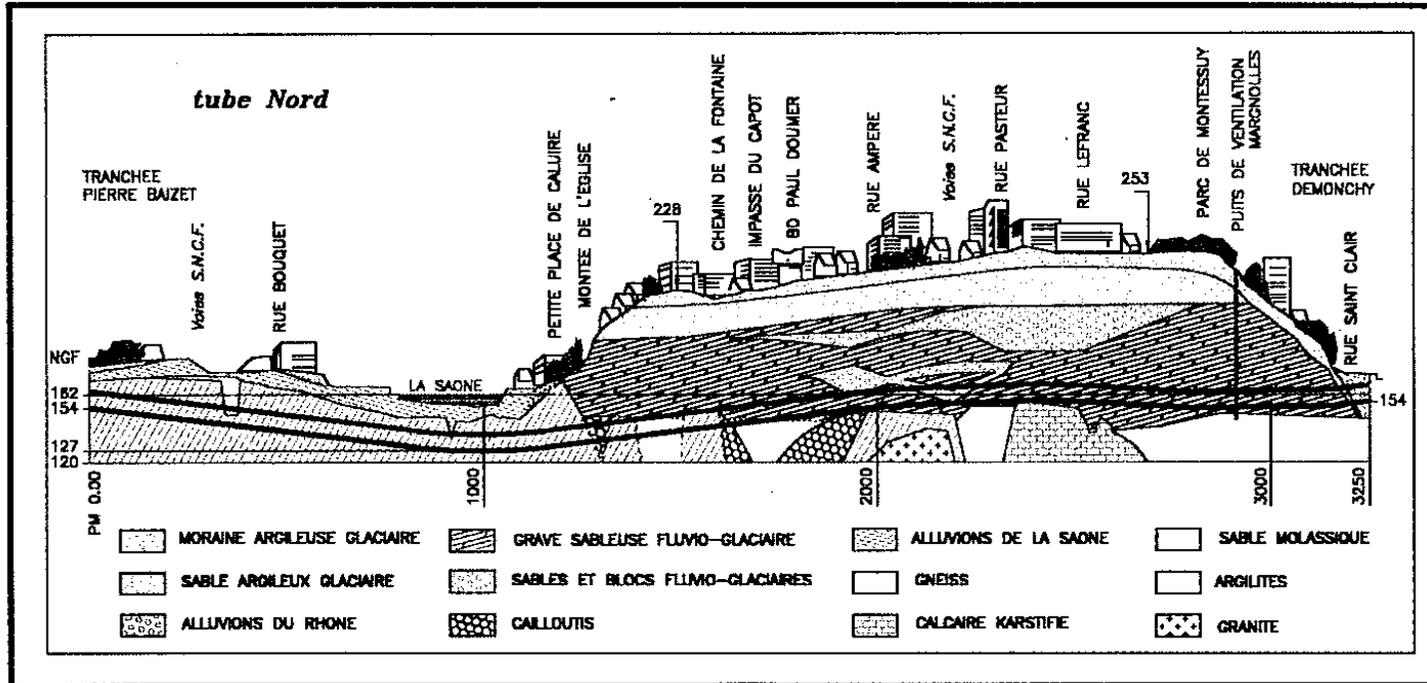
Tunnelier à Pression de Terre de \varnothing 10,96 m
avec injection régulée de boue lourde.

Le plus grand tunnelier de ce type jamais construit.

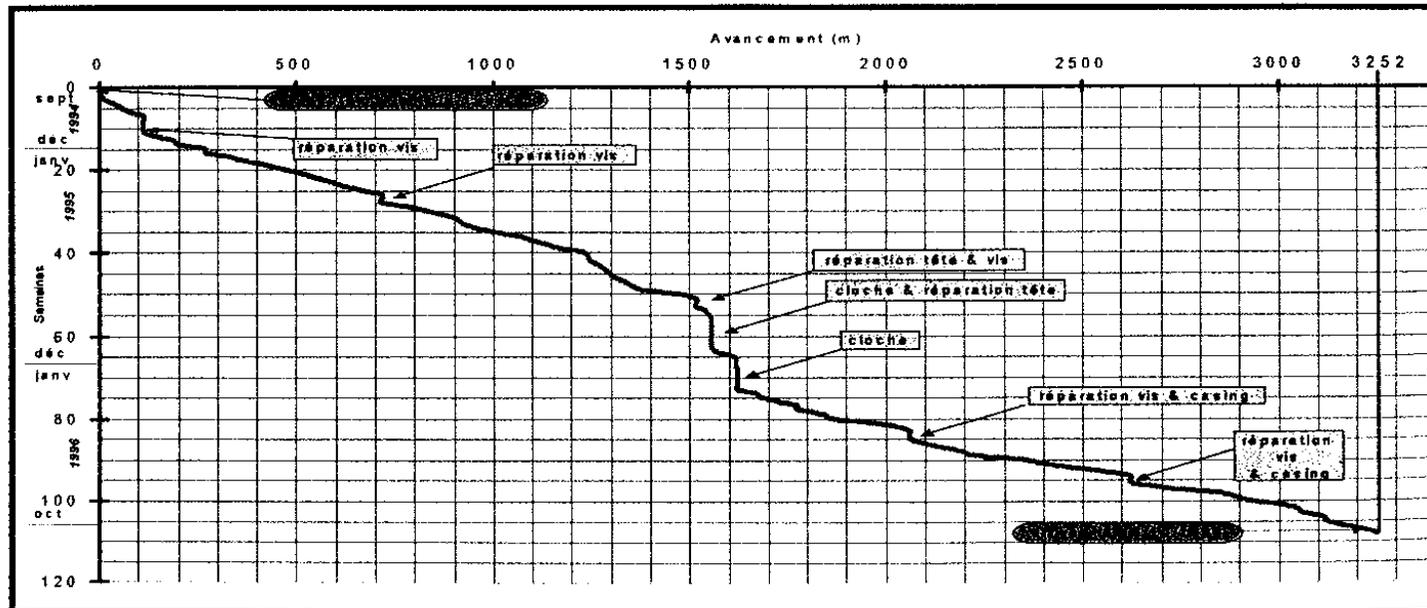
MITSUBISHI Heavy Industries Ltd
en collaboration avec

nfm

PROFIL EN LONG GEOLOGIQUE - Tube Nord -



GRAPHIQUE D'AVANCEMENT



Deux types de roches dures :

- . **Gneiss** (31 % quartz, 34% feldspath, 35% biotite)
- . **Anatexite** (45 % quartz, 50% feldspath, 5% biotite)

ces roches sont \pm altérées...

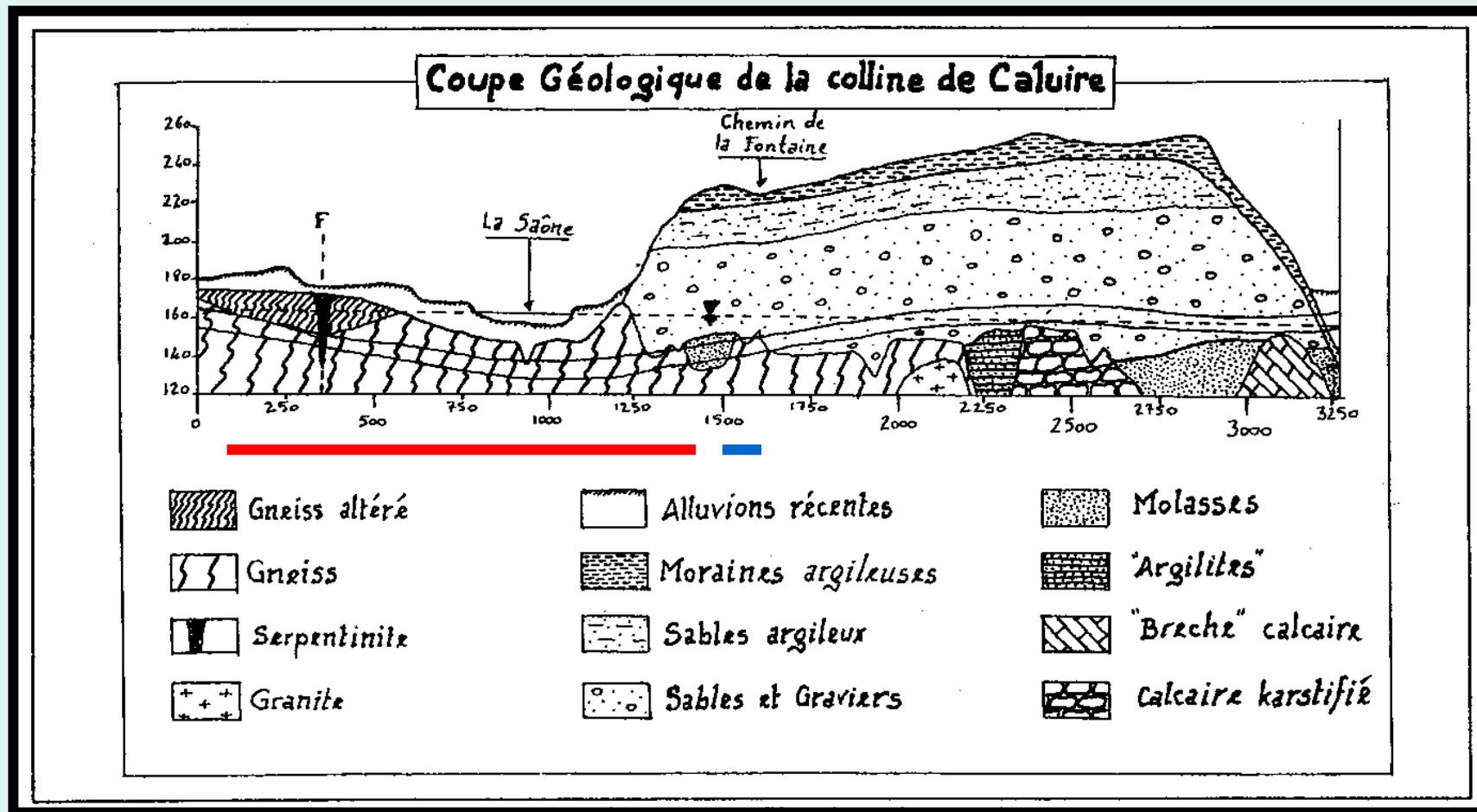
Propriété	σ_c (MPa)	V_p (m/s)	σ_{tb} (MPa)	Dureté	Abrasivité
Gneiss	20 -180 68 (26)	4000-6500 5082 (31)	3 – 12 7,2 (24)	10 -110 34 (15)	1,4 – 3,1 2,4 (15)
Anatexite	40 -170 95 (7)	5500-6500 5626 (7)	9 – 13 10,6 (7)	/ / /	3 - 5/ 3,6/ (3)

D'où la fragilité (σ_c / σ_{tb}) :

- **gneiss** **FR = 9,4**

- **anatexite** **FR = 9,0**

classe AFTES FR 4 = peu fragile



- 1250 ml de gneiss (sans compter les zones de transition)

- 30 ml de granite d'anatexie

Un nombre impressionnant de données machine (123 paramètres !)

NFM 			
354 JD 00 011		Rev. A	Page 17/45
Numéros	Fonctions	Unités	Remarques
1 à 19 20	 Courant des moteurs de tête Puissance totale en tête	A kW	Le courant et la puissance sont directement liés entre eux. On conservera donc la Puissance seule.
21 à 24 25 à 28 107	 Course des vérins de poussée Vitesse instantanée des vérins Pression dans le circuit hydraulique	mm mm/min bar	Les 34 vérins de poussée s'appuient sur les voussoirs pour faire avancer la machine. Ils peuvent être sélectionnés unitairement.
29 à 32 44	Course de l'Articulation Pression de l'Articulation	mm bar	L'articulation, entre le bouclier et la jupe arrière, permet de diriger le tunnelier.
33 à 38 46 et 47	Course des Grippers Pression des Grippers	mm bar	Les Grippers n'ont pas un rôle d'appui sur le terrain. Ils permettent de limiter le roulis.
39 48	Course Outil de surcoupe Pression Outil de surcoupe	mm bar	L'outil de surcoupe se situe en périphérie de la tête. Il alèse le terrain pour prendre des virages.
40	Ouverture de la porte arrière	%	La porte arrière de la Vis permet de gérer l'évacuation des matériaux en cas de débouillage.
41	 Vitesse de rotation de la tête	tr/min	Elle est fixée par le pilote à 1.5 ou 3 tr/min en fonction des terrains.
42 50	Vitesse de rotation de la Vis Pression de la Vis	tr/min bar	La vis convoyeuse permet de gérer l'évacuation des terrains et de réguler pression de terre.
43 51	Vitesse de rotation de l'enveloppe de la Vis Pression de l'enveloppe de la Vis	tr/min bar	L'enveloppe de la Vis convoyeuse permet de créer un bouchon dans la Vis pour éviter un éventuel débouillage.
45	 Force de Poussée Arrière	tonnes	Elle est calculée à partir du nombre de vérins sélectionnés, de la pression dans les vérins et de la surface intérieure des pistons des vérins.
49	Pression du convoyeur à Voussoirs	bar	Le convoyeur apporte les Voussoirs à l'érecteur.
52 et 53	Tangage et Roulis	Degrés	servent à corriger le pilotage de la machine.

Données « tunnelier » analysées (NFM) :

- couple : T (kN.m)
- énergie spécifique : ES (MJ/m³)
- force de poussée arrière : F_a (t)
- vitesse des vérins de poussée (mm/min)
- pression de terre (bars)

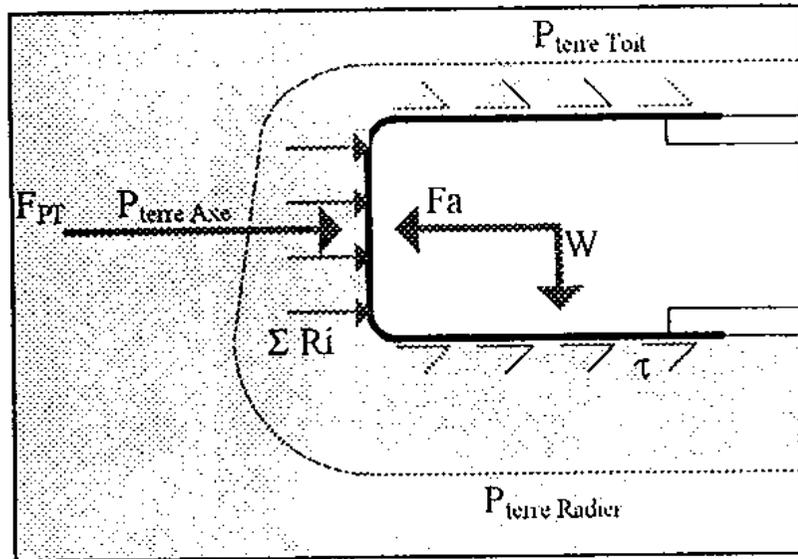
- coefficient ζ (Christophe GIAUFFRET)

Données « avancement » (Bouygues-Dumez-GTM BTP) :

- **temps de creusement** en minutes pour un voussoir de 200 cm

d'où le calcul de la **vitesse instantanée (V_i)** en cm/min

- coefficient ζ (Christophe GIAUFFRET- NFM)



Efforts connus :

W : Poids du bouclier (14000 kN)

Fa : Force de poussée arrière

P_{terre Axe} : pression de terre à l'axe du bouclier

F_{PT} : Résultante horizontale moyenne de la pression de terre (égale au produit de la pression à l'axe par la surface frontale du bouclier)

Efforts inconnus :

τ : frottements le long du bouclier, dus à la pression des terrains et au poids du bouclier.

ΣRi : Résultante des réactions du terrain au niveau des contacts tête-sol (molettes, outils ou bras)

P_{terre Toit} et P_{terre Radier} : Pression de terre au toit et au radier du tunnel.

$$\zeta = \operatorname{tg}(\Phi_{BS}) + \frac{\sum Ri}{(W + P_{IA} \cdot \pi \cdot D \cdot L)} = \frac{Fa - \left(P_{IA} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \right)}{(W + P_{IA} \cdot \pi \cdot D \cdot L)}$$

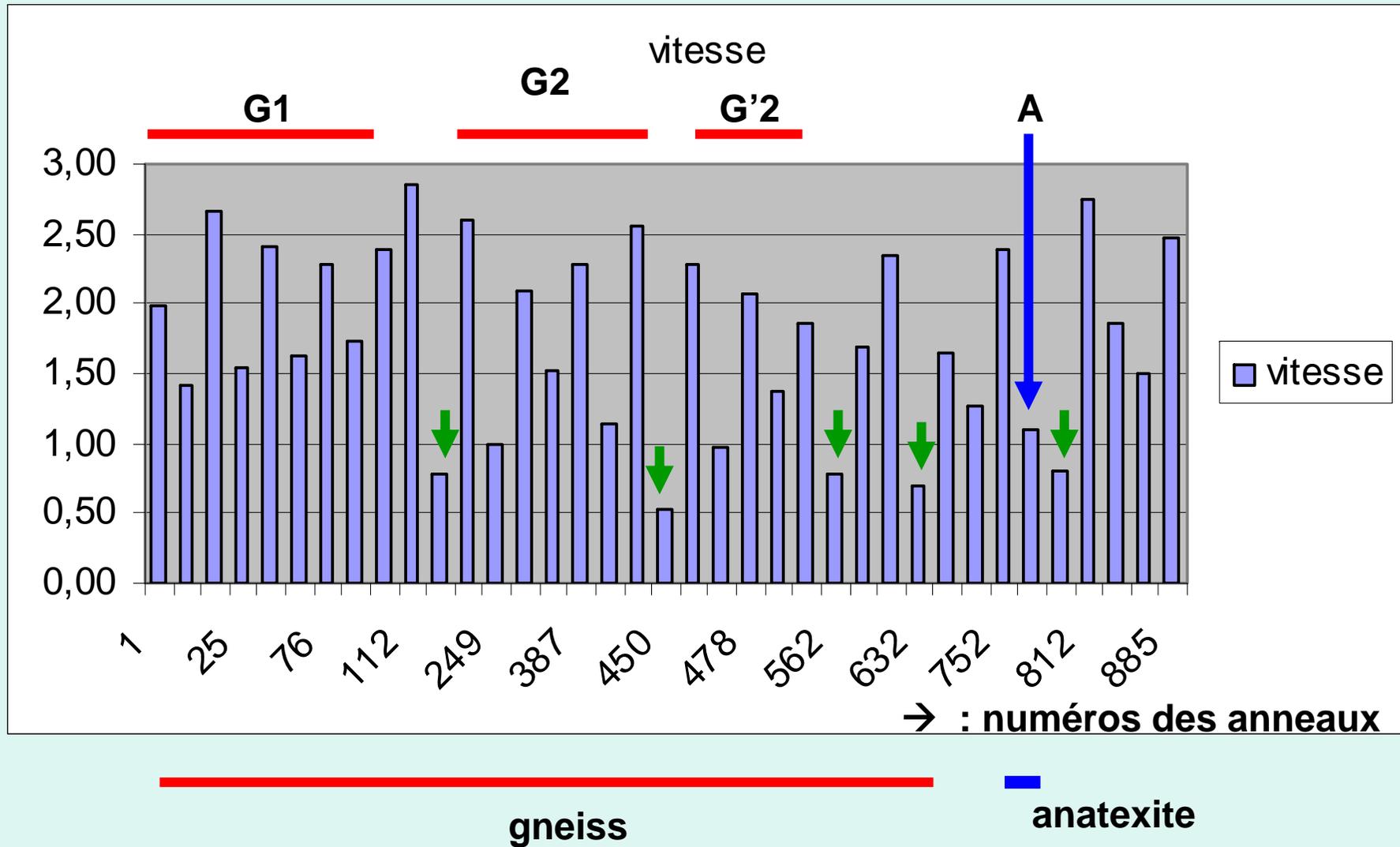
« frottement
latéral »

terme de
« résistance axiale »

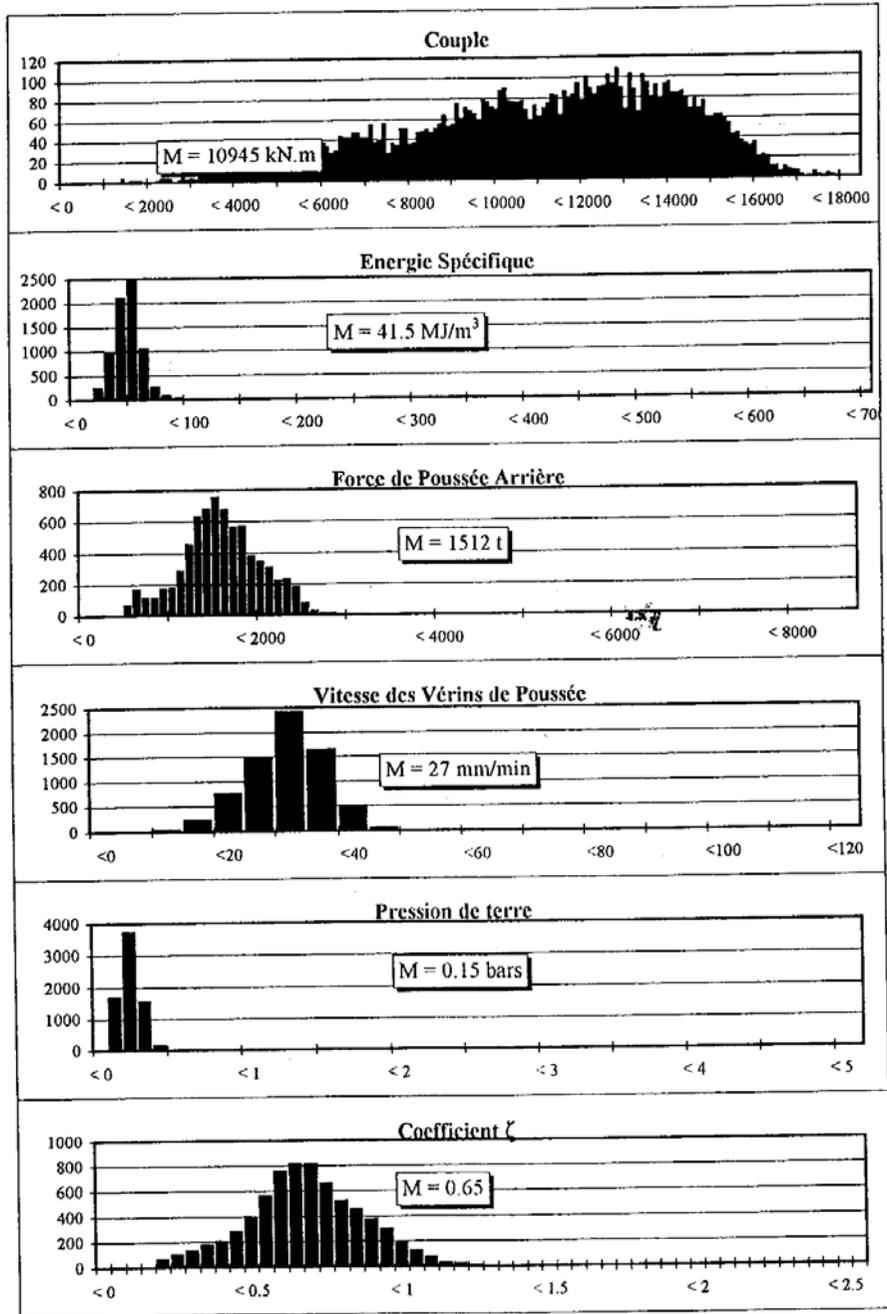
Vitesses instantanées (cm/min)

Vi moyenne (tube Nord) : 1,88 cm/min

↓ : accident



Zone G2
Gneiss localement altéré, fracturé



G2 : Gneiss un peu altéré (PM 216 – 500)

(RQD moyen = 77%)

- T = 10945 kN.m

- ES = 41,5 MJ/m³

- Fa = 1512 t

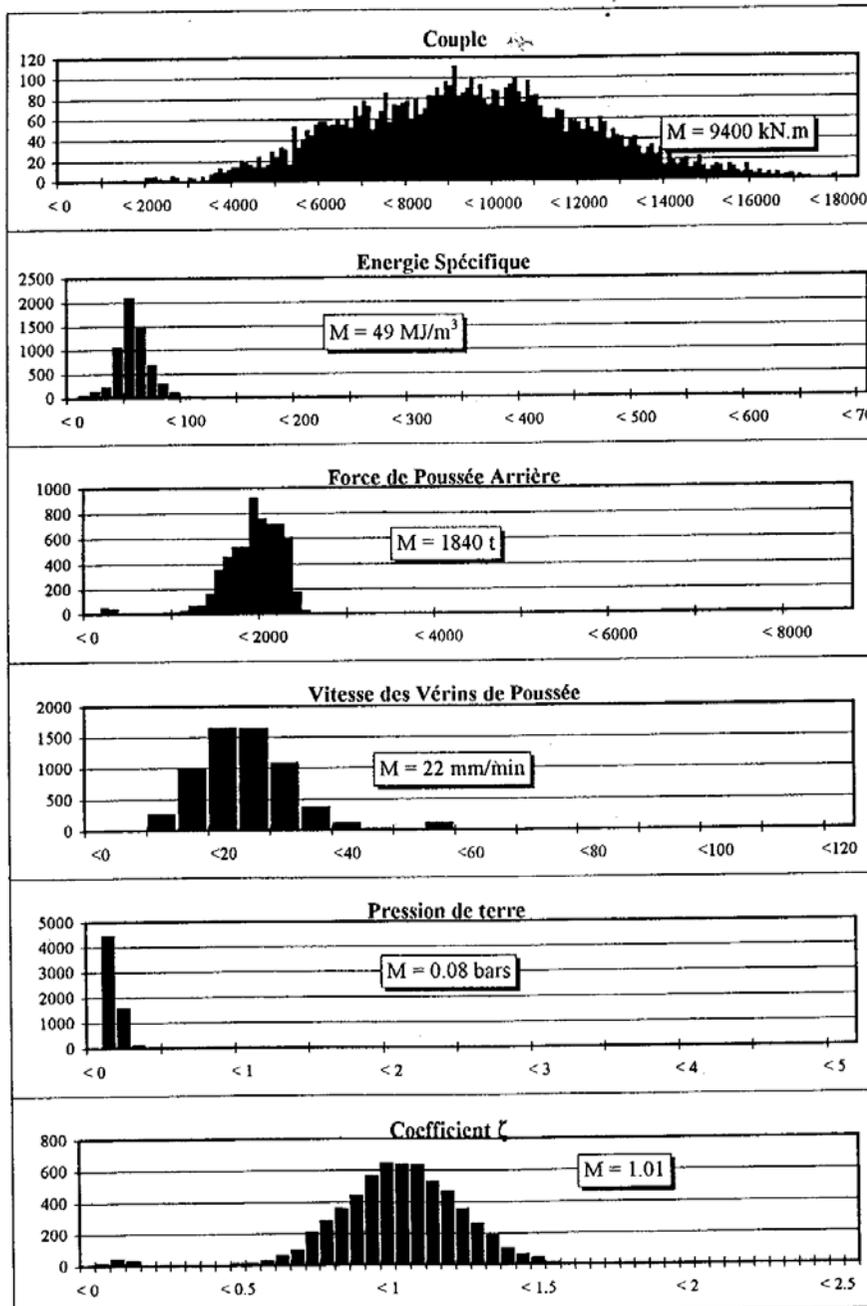
- Vvp = 27 mm/min

- $\zeta = 0,65$

Vitesse moyenne de creusement (par anneau) :

2,60 cm/min

Zone G1
Gneiss sain peu fracturé



G1 : Gneiss peu fracturé (PM 12 – 215)
(RQD moyen = 85%)

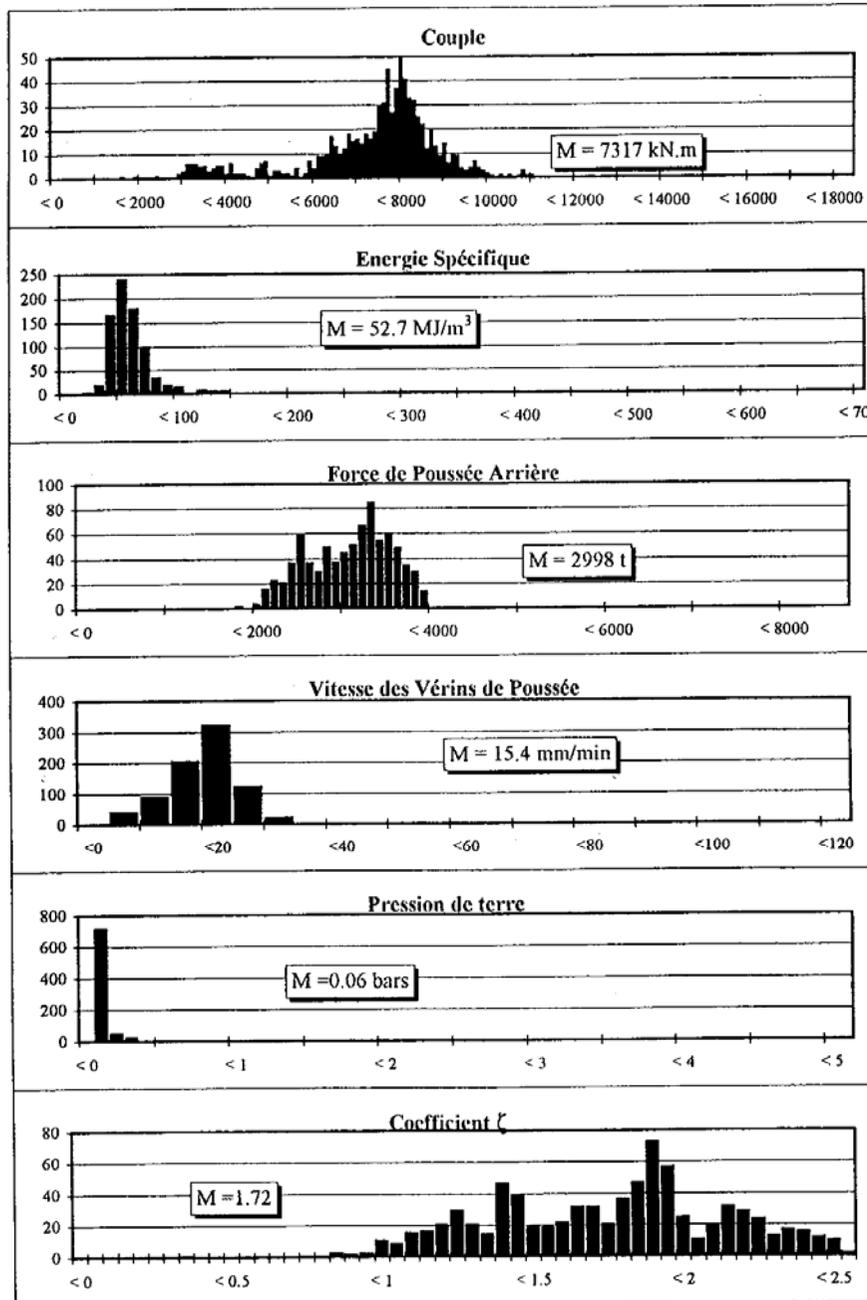
- $T = 9400 \text{ kN.m}$
- $ES = 49 \text{ MJ/m}^3$
- $Fa = 1840 \text{ t}$
- $V_{vp} = 22 \text{ mm/min}$
- $\zeta = 1,01$

Vitesse moyenne de creusement (par anneau) :

1,90 cm/min

Zone G9

Anatexite très dure



**A : Anatexite saine
très peu fracturée
(PM 1512 – 1546)**

- $T = 7317 \text{ kN.m}$

- $ES = 52,7 \text{ MJ/m}^3$

- $Fa = 2998 \text{ t}$

- $V_{vp} = 15,4 \text{ mm/min}$

- $\zeta = 1,72$

**Vitesse moyenne
de creusement
(par anneau) :**

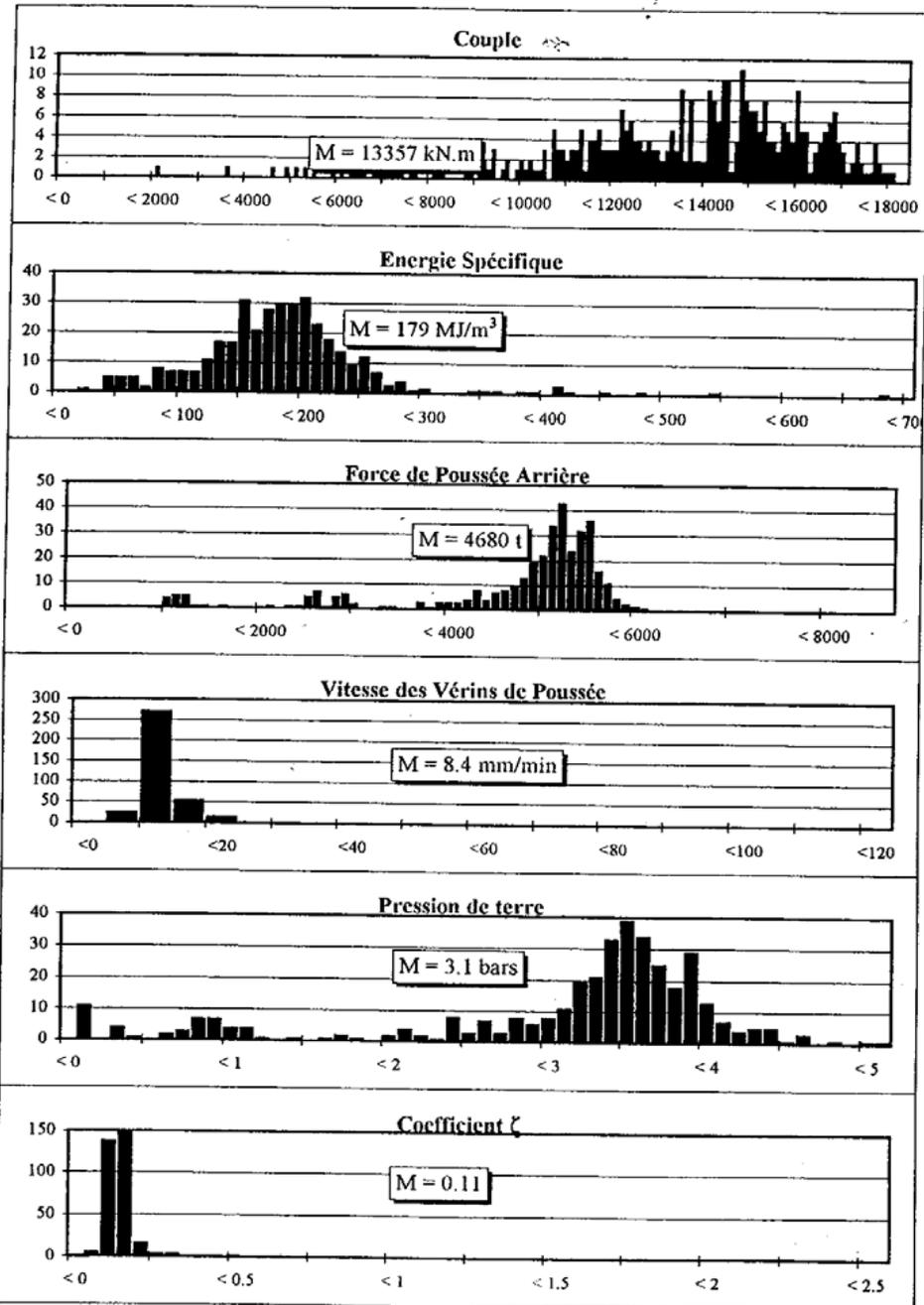
1,09 cm/min

Bilan

Roche	T kN.m	ES MJ/m ³	Fa t	Vvp mm/min	ζ	Vi cm/min
Gneiss 2	10945	41,5	1512	27	0,65	2,60
Gneiss 1	9400	49	1840	22	1,01	1,90
Anatexite	7317	52,7	2998	15,4	1,72	1,09

Accident A1

Faille serpentinisée



En conclusion ...

Ce qui paraît déterminant pour prédire
l'avancement d'un tunnelier en roche dure :

- Les propriétés de la matrice rocheuse :

. la **résistance en compression σ_c** , oui mais ...

. la dureté...

. l'essai Franklin

. la **FRAGILITE**

. l'altération
(vitesses, IC)

Et l'**abrasivité... (autre problème !)**

- La fracturation du massif (?) :

. Moins d'importance que pour les méthodes conventionnelles,
mais quand même : **G2 « meilleur » que G1** ;

. Pas trop de fracturation : pb de la traversée des accidents
→ **« optimum »**

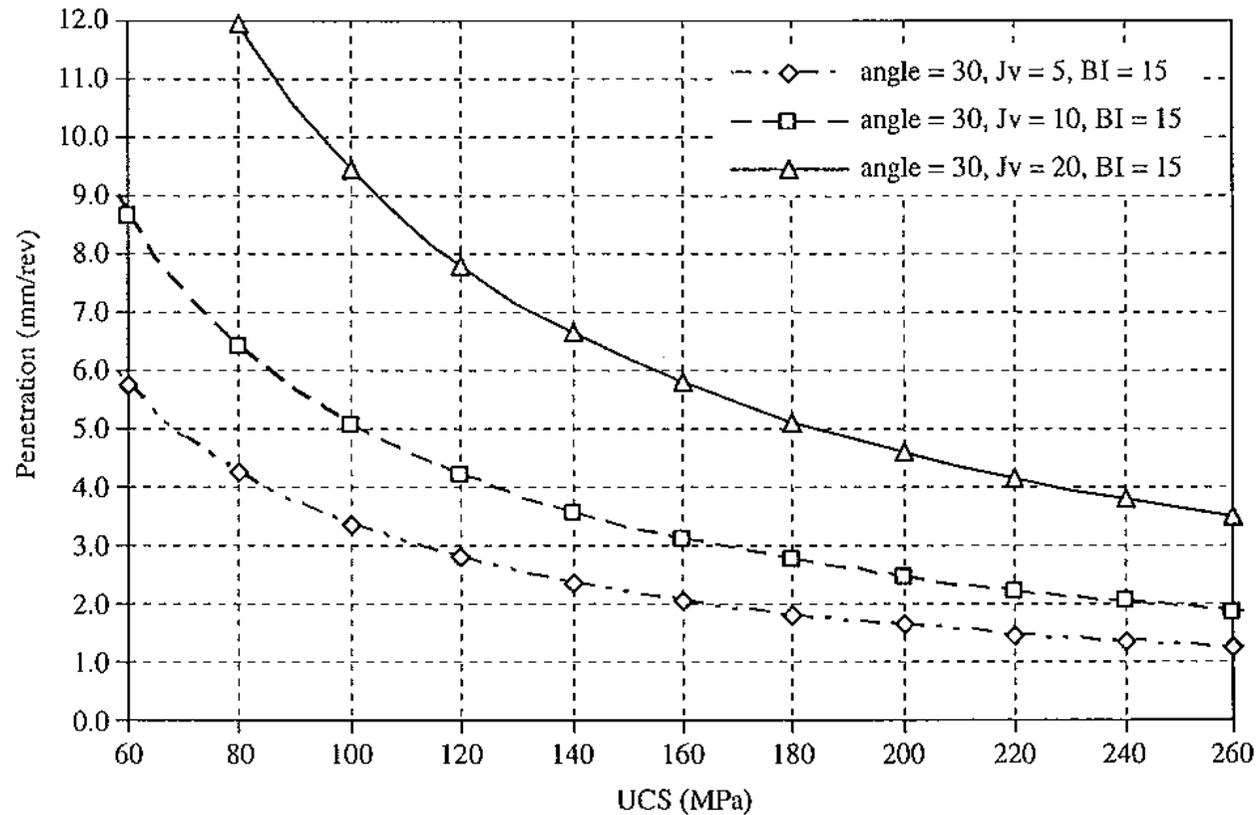


Fig. 8. Penetration variation with different rock strengths at thrust force of 200 kN/cutter.

**Travaux de
J. Zhao
Tunnels Singapour
(granites)**

**Article
Int. J. Rock. Mech.
& Min. Sc. 2008**

Taux de pénétration = f (σ_c , FR, Jv, α)

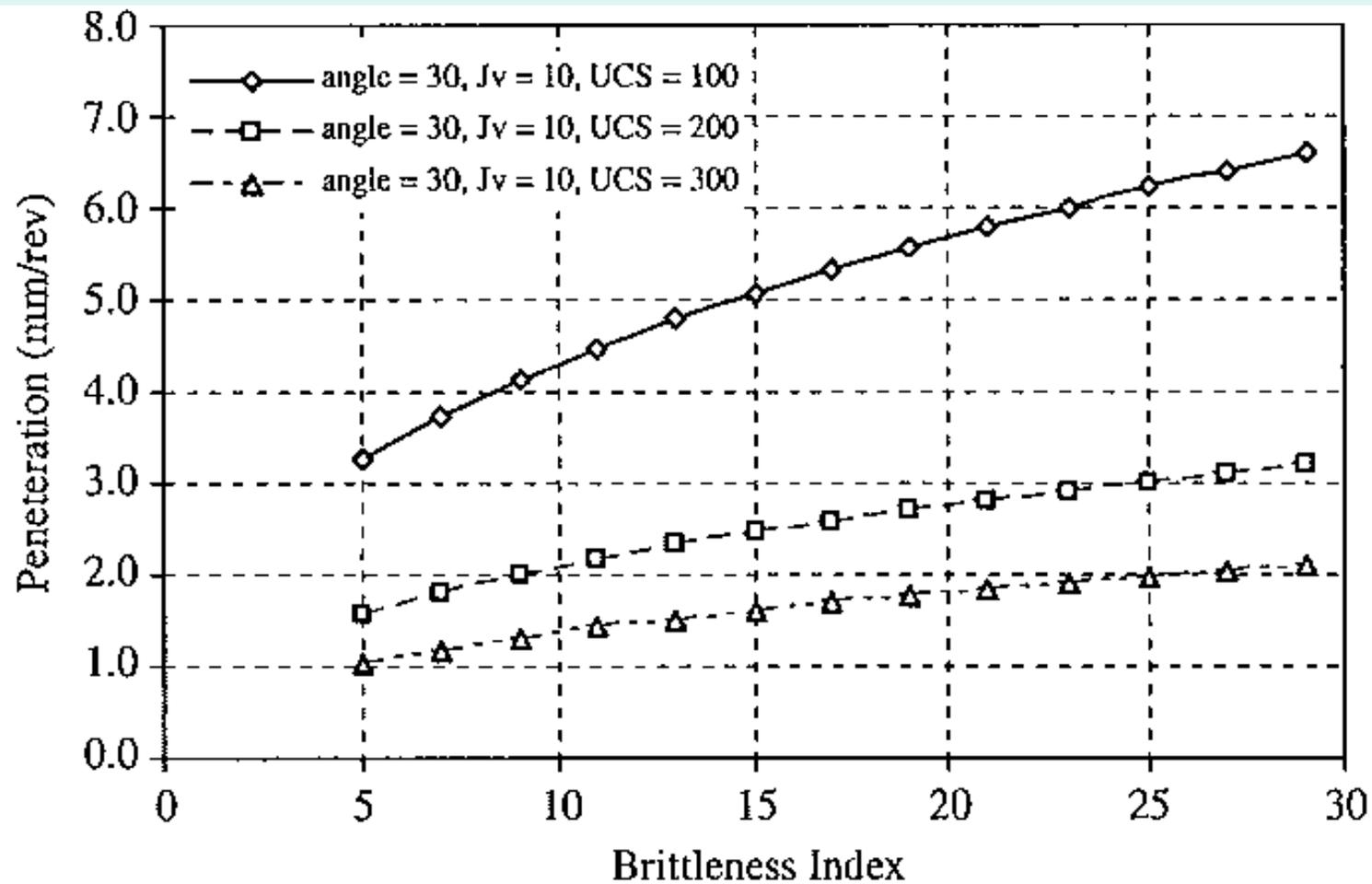


Fig. 9. Penetration variation with different rock brittleness indices at thrust force of 200 kN/cutter.

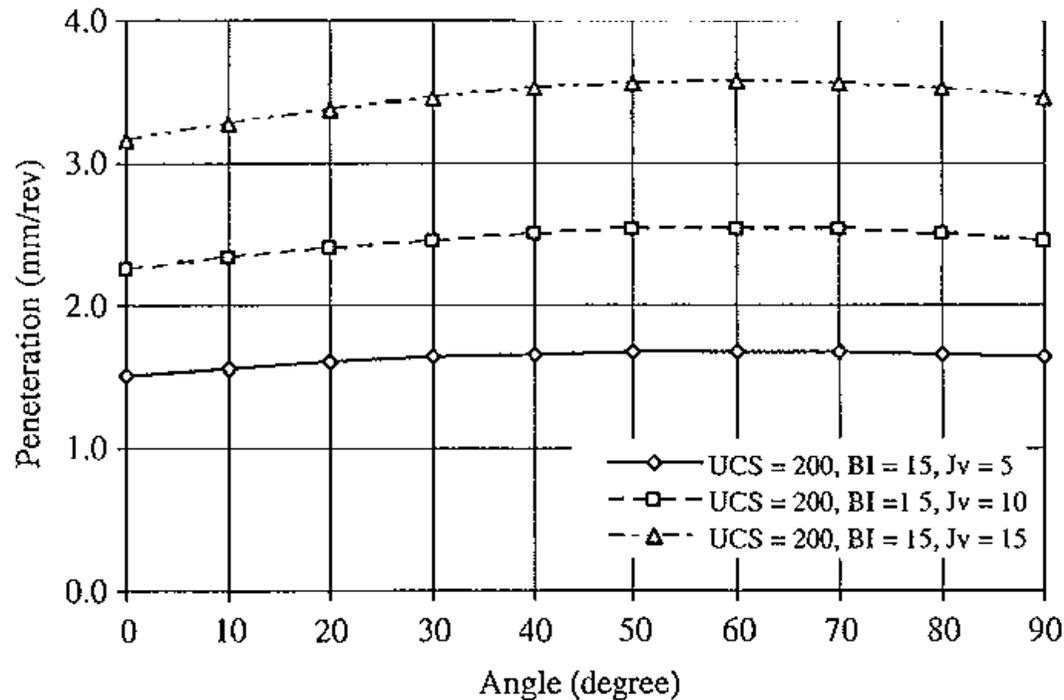
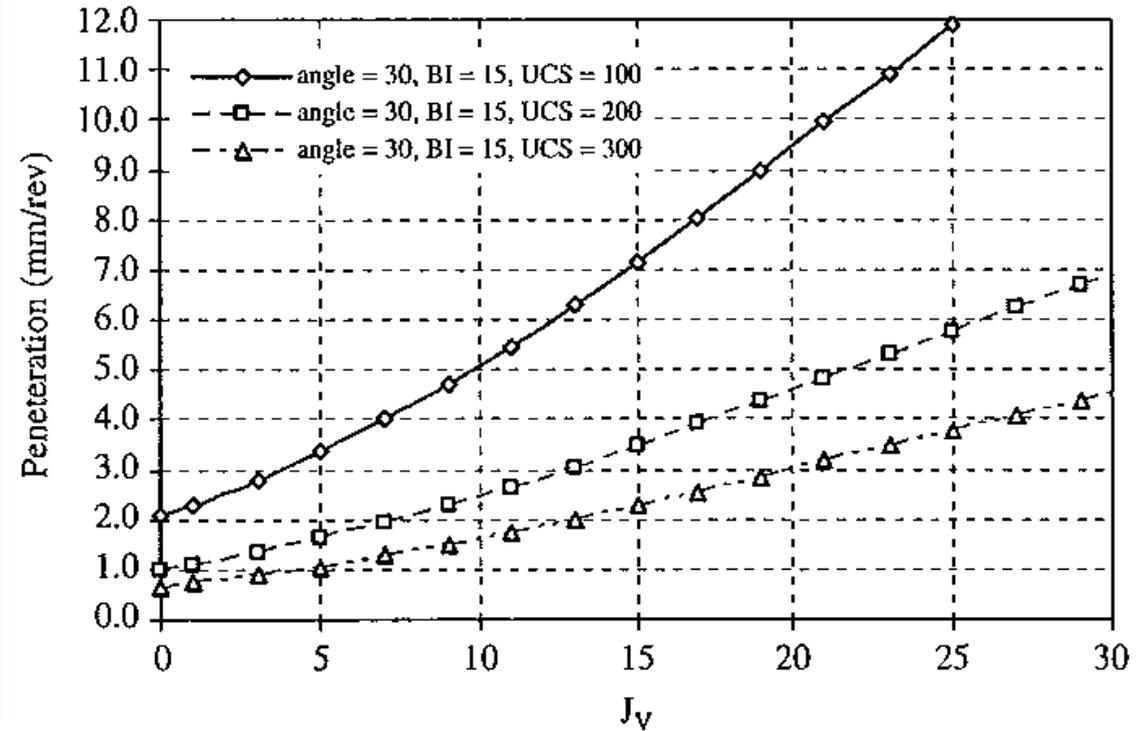
Effets de la fragilité FR :

article Gong et Zhao, *Tunnel Underground Space Tech.*, 2007:317-324

Rôle de la fracturation :

- intensité : OUI

- orientation : pas tellement !



Gong et Zhao
2006, 2007, 2008

Conclusion de la conclusion ...

- retour sur les classifications géomécaniques...

Merci de votre attention !