

19/11/2015



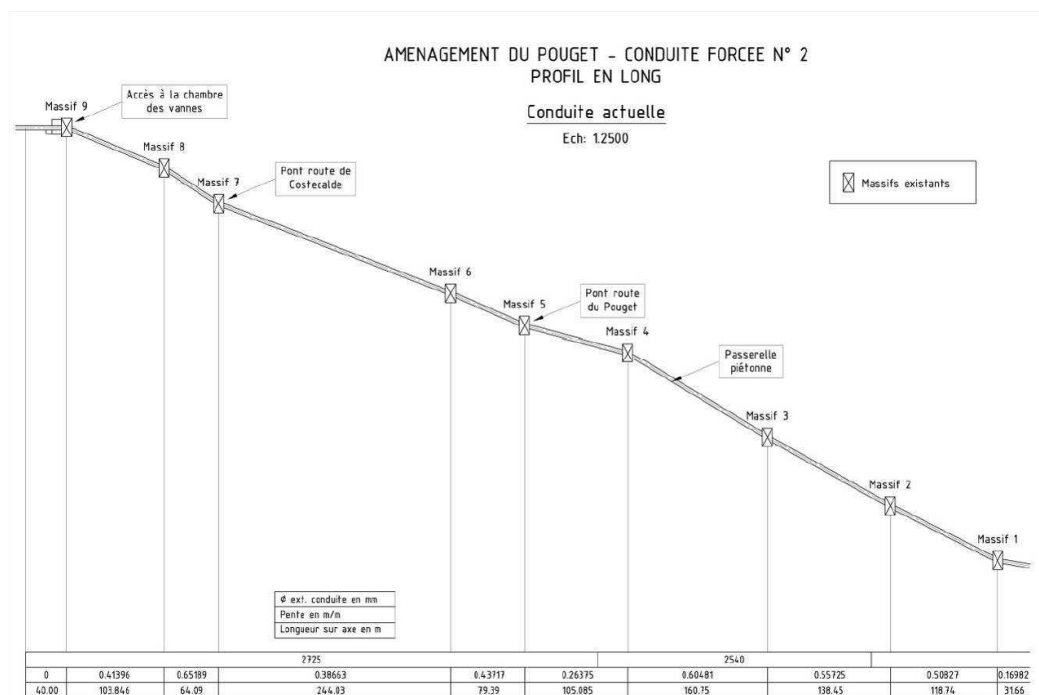
Journée technique du CFMS
« Travaux en montagne »
L. Verzura – E. Vermoote

CONDUITE FORCÉE N°2 DU POUGET



Objectif : remplacer la partie frettée de la CF n°2 de la centrale hydroélectrique du Pouget, sur le Tarn (12),

Problématique : des calculs de stabilité réalisés par EDF ont montré la non stabilité des massifs en situation actuelle alors qu'il n'y a aucun désordre apparent.



LOCALISATION



Aménagement : Caractéristiques des
centrales Hydroélectriques du
POUGET-TRUEL
EDF; GEH Tarn-Agoût

- Aveyron, Nord Ouest de Sainte
Affrique
- La centrale hydroélectrique du
Pouget turbine les apports collectés
dans une série de retenues situées
sur le plateau du Levézou, en rive
droite du Tarn

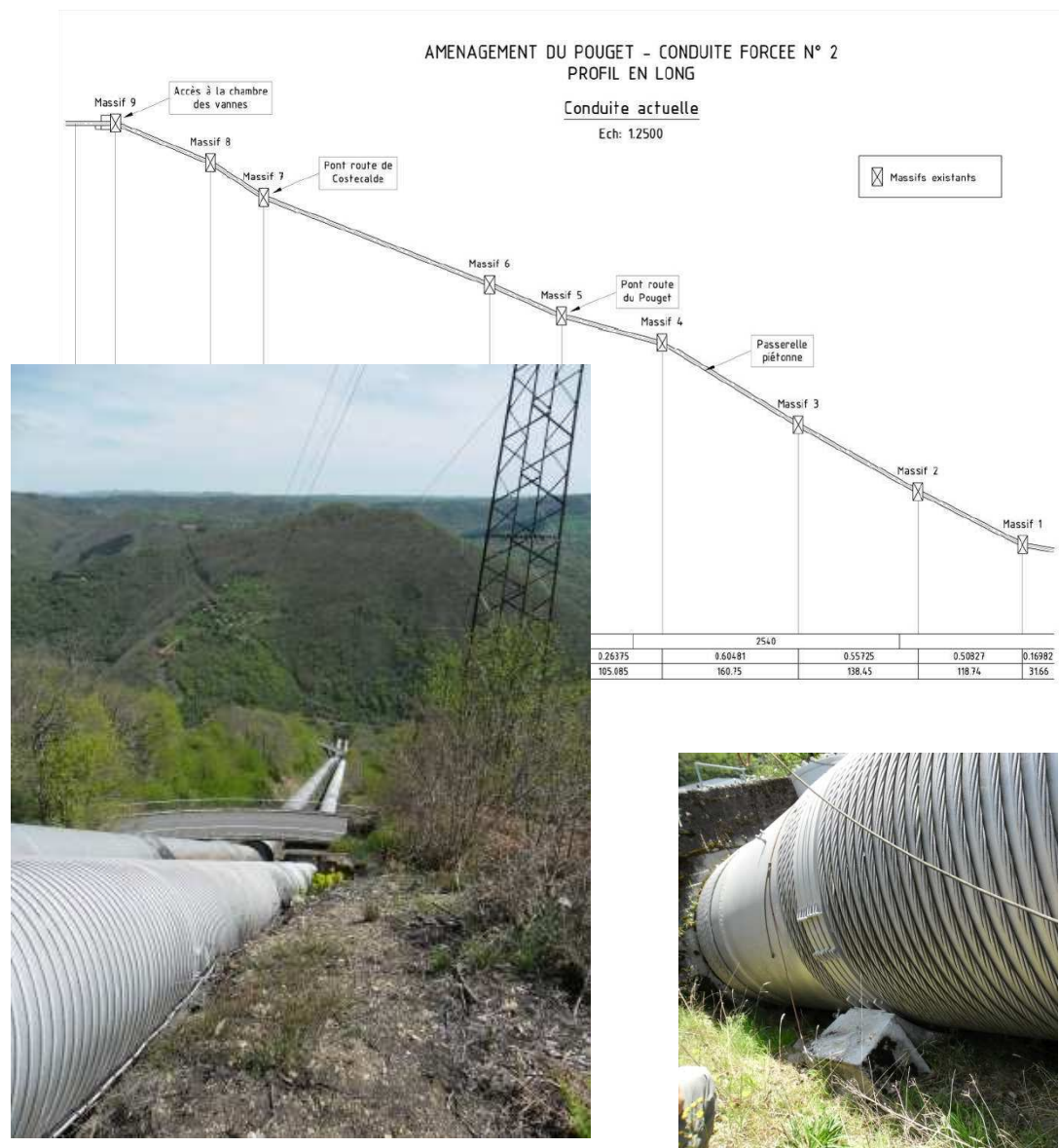


CF1

Retenue du Tru

Centrale du Truel

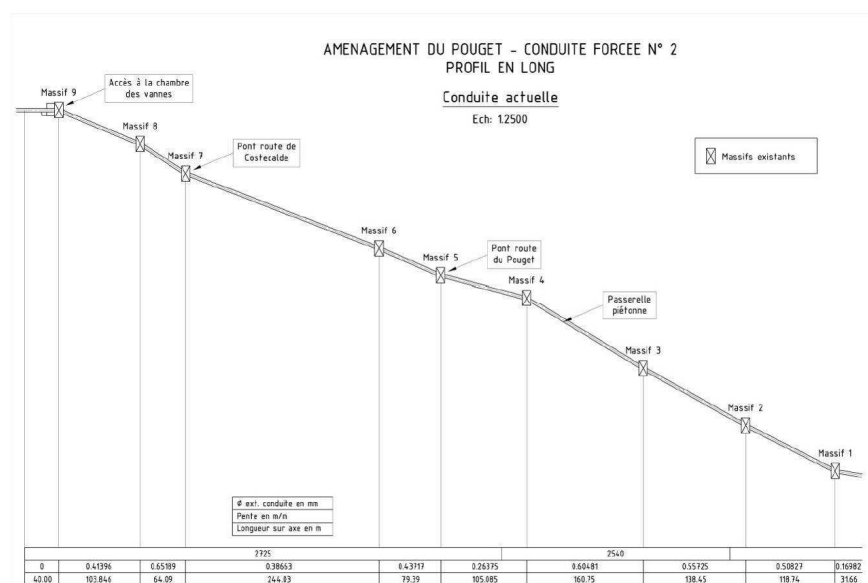
CONTEXTE GENERAL



- CF1 et CF2 entraxe = 5,5m
- CF2 :
 - 9 massifs BA (M1 à M9)
 - 87 selettes en béton
 - Conduite à « coudes bloqués » sans joint de dilatation
 - Linéaire environ 1030m
 - Majorité : Tuyaux auto-frettés au moyen de cables
 - Viroles lisses (M6-M7)
 - Cerces rigides (appuis intermédiaires (sellettes et certains coudes)

INTERVENANTS

- MOA : EDF(MM. Bordat, Domitile)

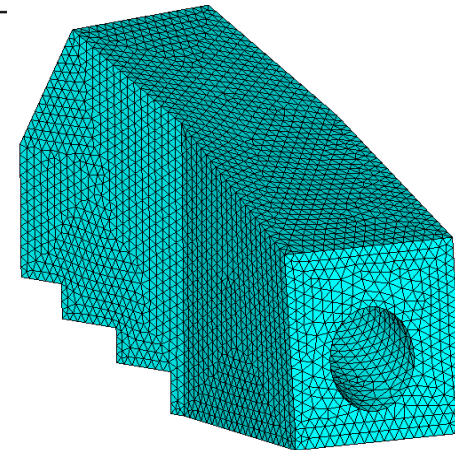
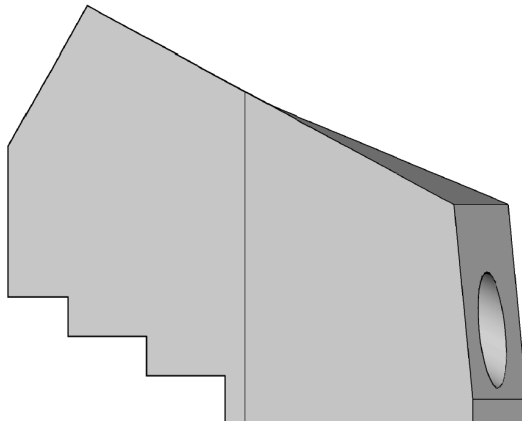
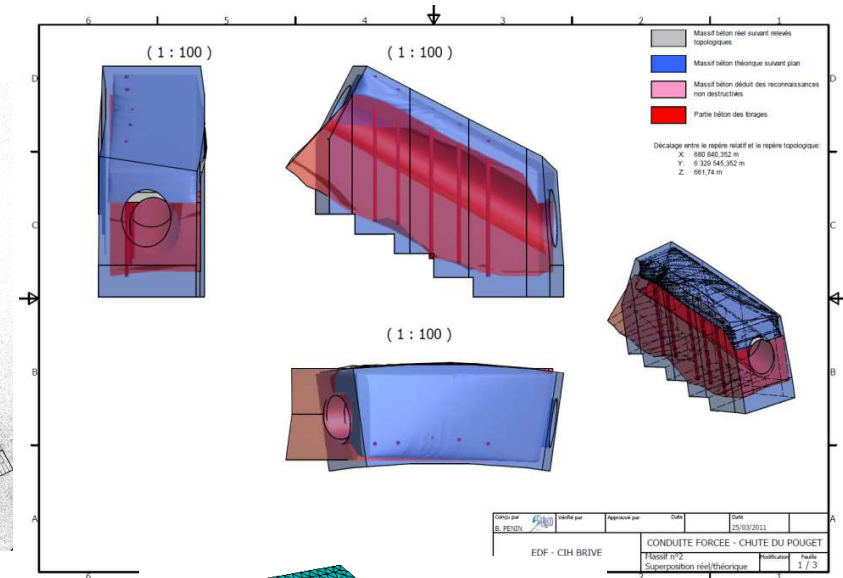
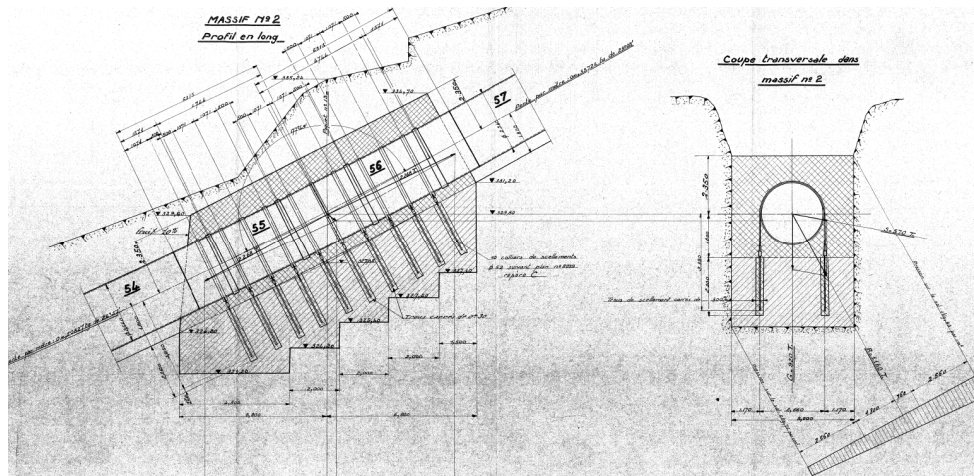


- Modélisation tridimensionnelle via ANSYS de l'ensemble de la CF avec ses 9 massifs d'ancrage (INGEROP)
- Mission géotechnique (GEOS) : détermination des ressorts sur toutes les faces des massifs
- Données :
 - Géométrie : Geoscan, Falco
 - Sondages: HGT
 - Analyse géologique/géotechnique : TEGG

GEOMETRIE DES MASSIFS

DEFINITION DES GEOMETRIES DES MASSIFS

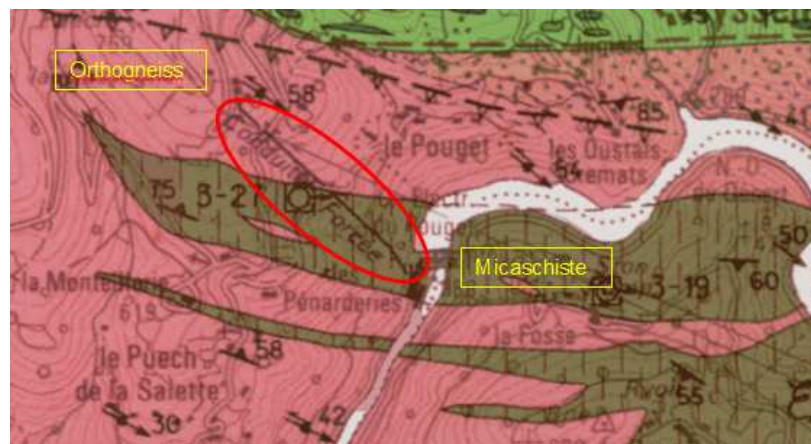
- Massif englobant M2



CONTEXTE GEOLOGIQUE (TEGG)

2 formations d'origine métamorphique :

- Micaschistes entre M1 et M6
 - Orthogneiss entre M7 et M9
- ✓ Sous-découpages en plusieurs faciès d'altération (très altéré : G0f / M-- à peu ou pas altéré : G2/G3 / Ms)



→ modélisation de fondations au rocher (cf. guide du SETRA)

- ⚠ Etude particulière liée aux discontinuités (OK, réalisée par TEGG)
- ✓ Objectif : calcul de l'interaction sol / structure (ressorts) sur chaque face des massifs



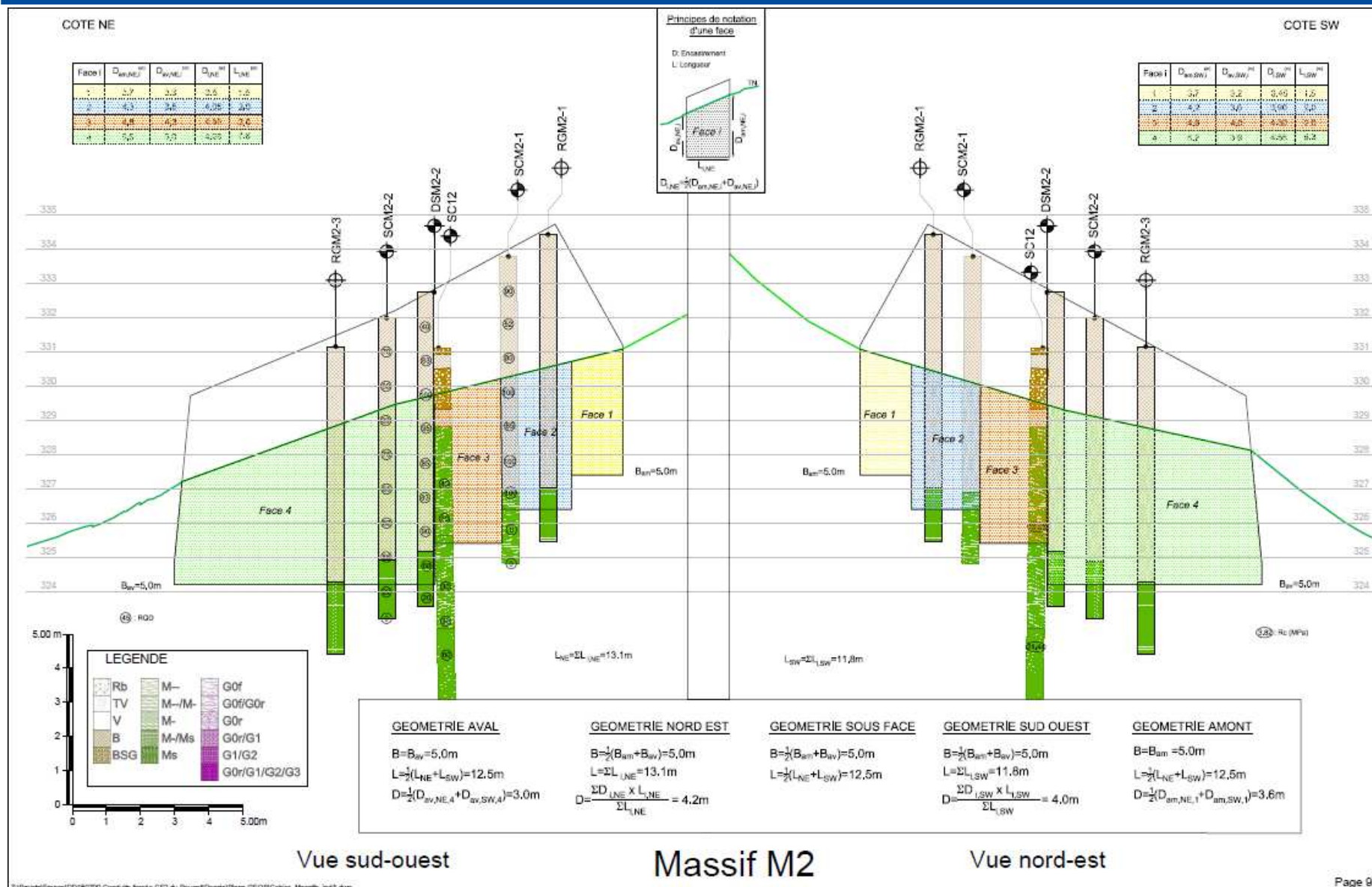
octobre 2009

Fondations au rocher

Reconnaissance des massifs rocheux,
conception et dimensionnement des fondations

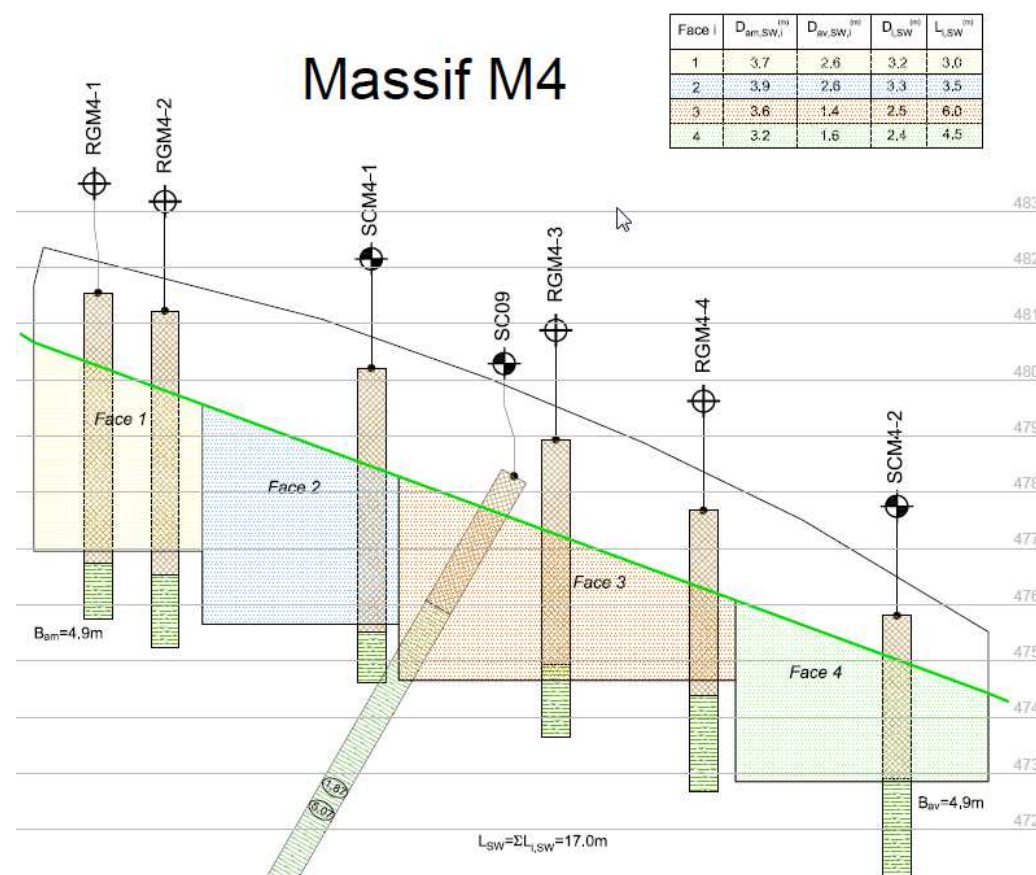


CARACTERISTIQUES DES MASSIFS



CARACTERISTIQUES DES MASSIFS

- Massifs à géométrie complexe : pour chaque face latérale, décomposition en sous-faces
- Pour chaque face, détermination de la longueur L, de la largeur B et de l'encastrement D, moyennes ou sommes de chaque sous-face.
- Importance de la position du TN (à partir duquel sont réalisés les sondages), d'autant plus que la zone est escarpée...
- TN différent côté Sud-Ouest (terrain naturel réel) et Nord-Est (trace de CF1)



GEOMETRIE SOUS FACE

$$B = \frac{1}{2}(B_{am} + B_{av}) = 4,9m$$

$$L = \frac{1}{2}(L_{NE} + L_{SW}) = 17,0m$$

GEOMETRIE SUD OUEST

$$B = \frac{1}{2}(B_{am} + B_{av}) = 4,9m$$

$$L = \sum L_{i,SW} = 17,0m$$

$$D = \frac{\sum D_{i,SW} \times L_{i,SW}}{\sum L_{i,SW}} = 2,8m$$

GEOMETRIE AMONT

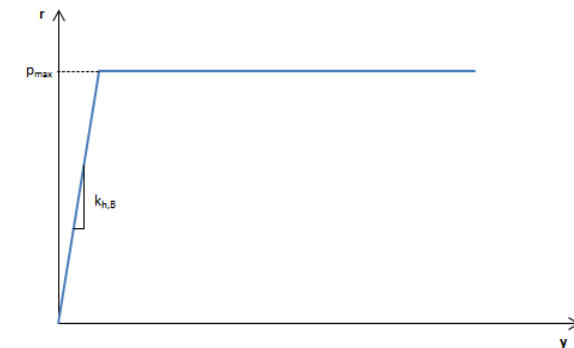
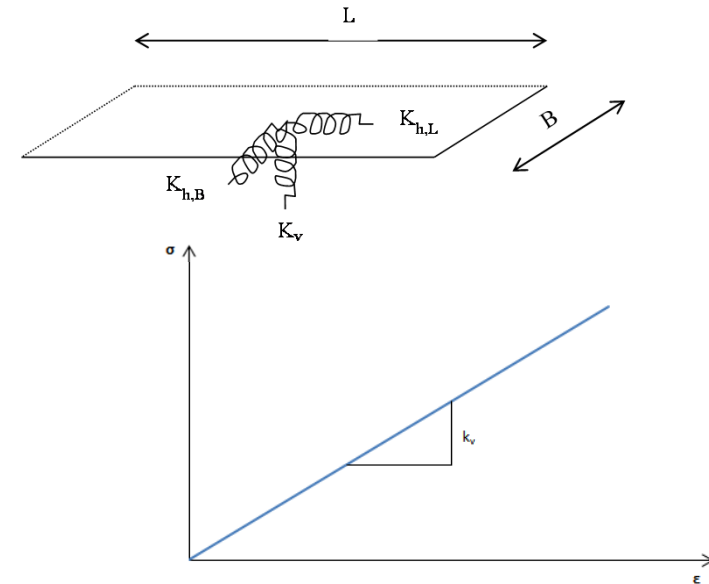
$$B = B_{am} = 4,9m$$

$$L = \frac{1}{2}(L_{NE} + L_{SW}) = 17,0m$$

$$D = \frac{1}{2}(D_{am,NE,1} + D_{am,SW,1}) = 4,2m$$

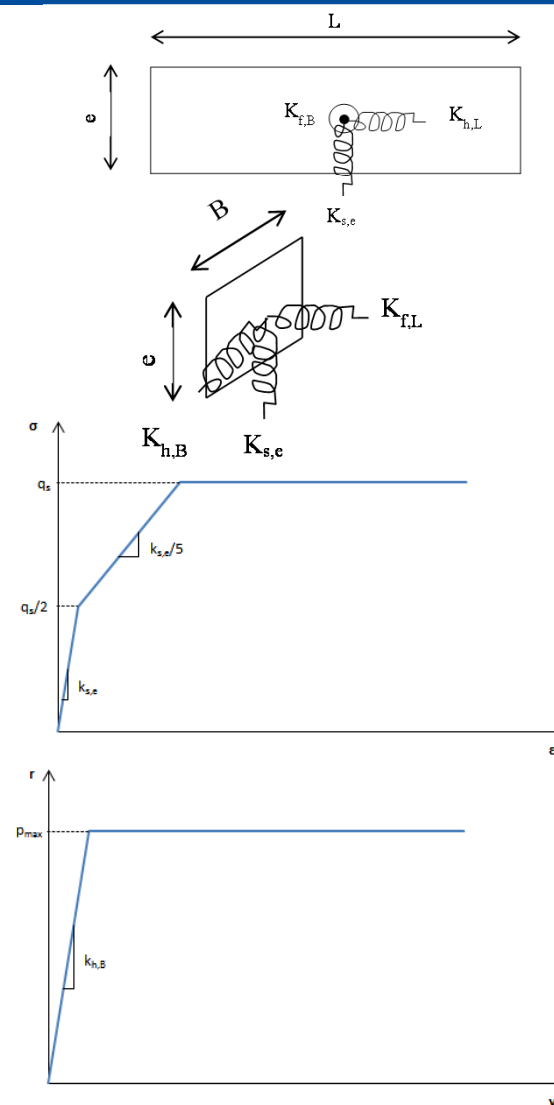
REACTIONS EN SOUS-FACE

- Pour chaque face, 3 ressorts : 1 vertical et 2 horizontaux
- Ressort vertical : K_v
 - Pente : k_v
 - Par le rapport charge sur tassement
 - Selon NF P 94-261
 - Selon FEMA 256
 - Selon SIEFFERT
 - Palier : aucun rentré dans le modèle, mais limité par la capacité portante
- Ressorts horizontaux : $K_{h;B}$ et $K_{h;L}$
 - Pentes : k_v
 - Selon NF P 94-261
 - Selon FEMA 256
 - Selon SIEFFERT
 - Paliers : en fonction de la charge verticale et de la surface comprimée



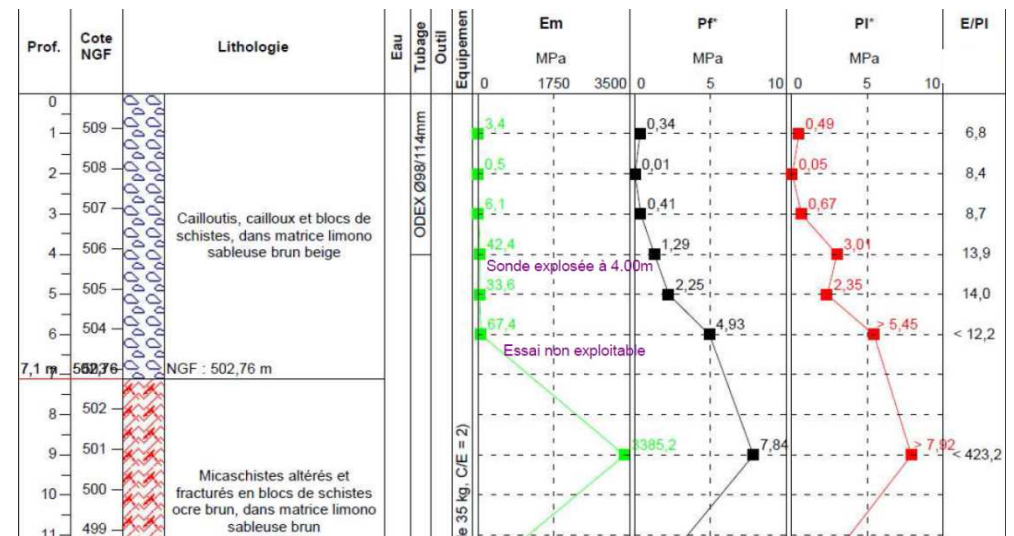
REACTIONS LATÉRALES ET AMONT/AVAL

- Ressort vertical : $K_{s,e}$
 - Pente : $k_{s,e}$
 - Calculé selon Frank & Zhao (comme pour les pieux)
 - Abattement compris entre 50% (au TN) et 0% (à la base du massif) pour tenir compte de la proximité de la surface
 - Palier :
 - q_s pour les sols ; τ_u pour les roches
 - 2 paliers
 - Double abattement compris entre 75% (au TN) et 0% (à la base du massif) pour tenir compte de la proximité de la surface et de la proximité d'un talus
- Réaction frontale : $K_{h,B}$
 - Pentes : $k_{h,B}$
 - Selon VESIC
 - Selon NF P 94-262
 - Paliers :
 - Sols : pression de fluage p_f^*
 - Roche : en fonction de la cohésion et de l'angle de frottement du massif homogénéisé
- Frottement horizontal : $K_{h,L}$
 - Pentes : $K_{h,L} = K_{f,B}$ (NF P 94-262)
 - Paliers : identique à palier de $K_{s,e}$



SYNTHESE DES DONNEES NECESSAIRES

- Éléments géométriques : B, L, D
- Nature de la base et des côtés : sol ou roche ; épaisseurs de couche, fracturation si roche, ...
- Si sol : E , p_i , α , c' , φ'
- Si roche :
 - Paramètres de matrice : γ , R_c , R_{QD} , ...
 - Classification du massif : RMR , GSI , Q_{Barton} , ...
 - Critère de Hoek & Brown : m , s , a
 - Paramètres du massif rocheux homogénéisé : c , φ
 - Déformation du massif rocheux : E_{massif}



Sondage SC7
6.00 à 7.00m
7.00 à 8.00 m

PARAMÈTRES POUR LES TERRAINS MEUBLES (SOL)

- Concerne uniquement les faces latérales de M5 et une partie des faces latérales de M9 (jusqu'à 2,2m/TN)

- 1 seul sondage pressiométrique par massif : détermination « simple » de E_M , p_l ,

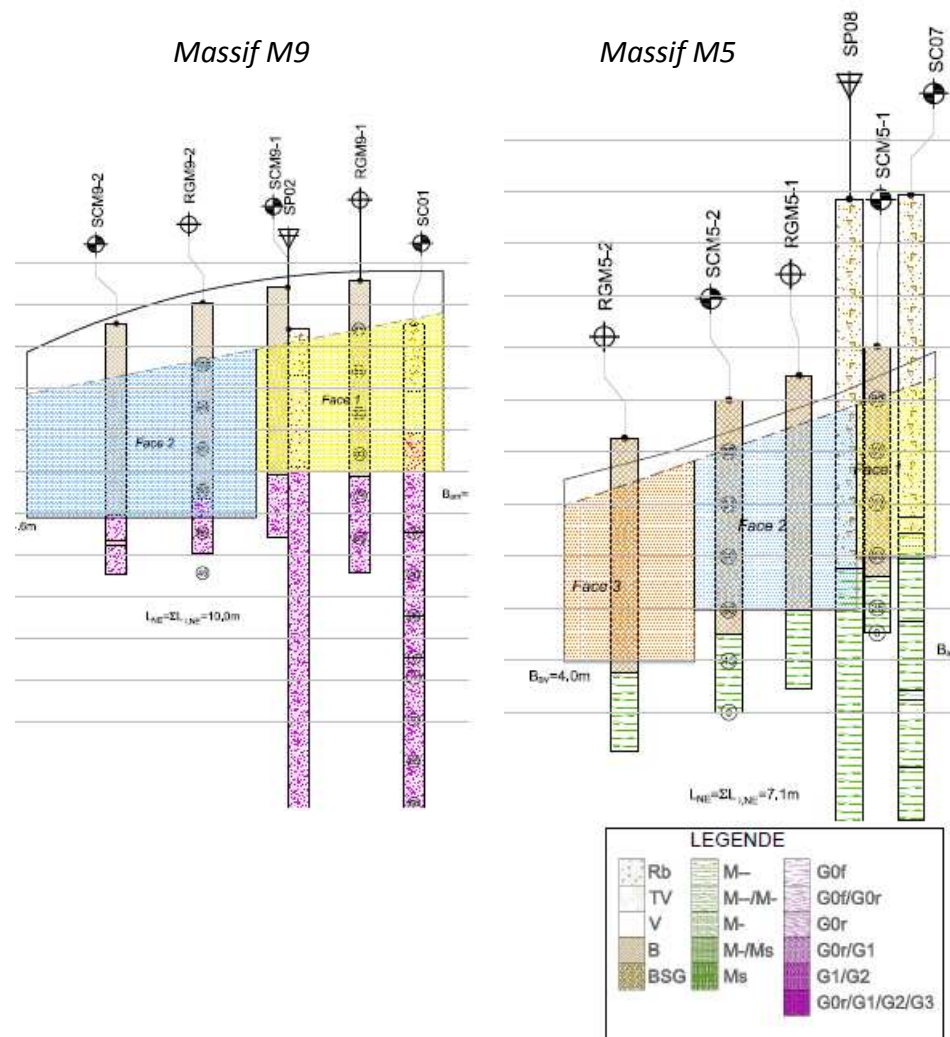
- Approche de φ' par corrélation (qui suppose que $c' = 0$ kPa) :

$$\varphi' = 24 + 4 \cdot \frac{\log\left(\frac{p_l}{2.5}\right)}{\log 2} ; p_l \text{ en bars}$$

- La valeur de α est prise égale à :

- 1/3 pour les schistes
- 2/3 pour les gneiss

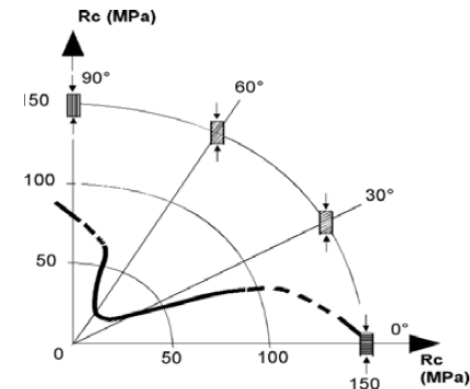
- Le module de déformation est calculé par la relation E_M / α



PARAMÈTRES POUR LES MASSIFS ROCHEUX

Paramètres physiques issus d'essais en laboratoire :

- Teneur en eau, poids volumiques sec (méthode des pesées ou méthode géométrique)
- Résistances à la compression uniaxiale R_c et à la traction R_t (normalement fonction des plans de discontinuités observés sur l'échantillon).
 $4\text{MPa (M4)} < R_c < 15\text{MPa (M2)}$
- Détermination d'un indice de fragilité $FR = R_c/R_t$: généralement $FR < 10$, indiquant une roche peu fragile
- Mesure directe du module d'Young de la matrice et comparaison à R_c , via le ratio des modules MR (logiciel ROCLAB) :
 - Pour des schistes : $MR = 675 \pm 425$
 - Pour des gneiss : $MR = 525 \pm 225$



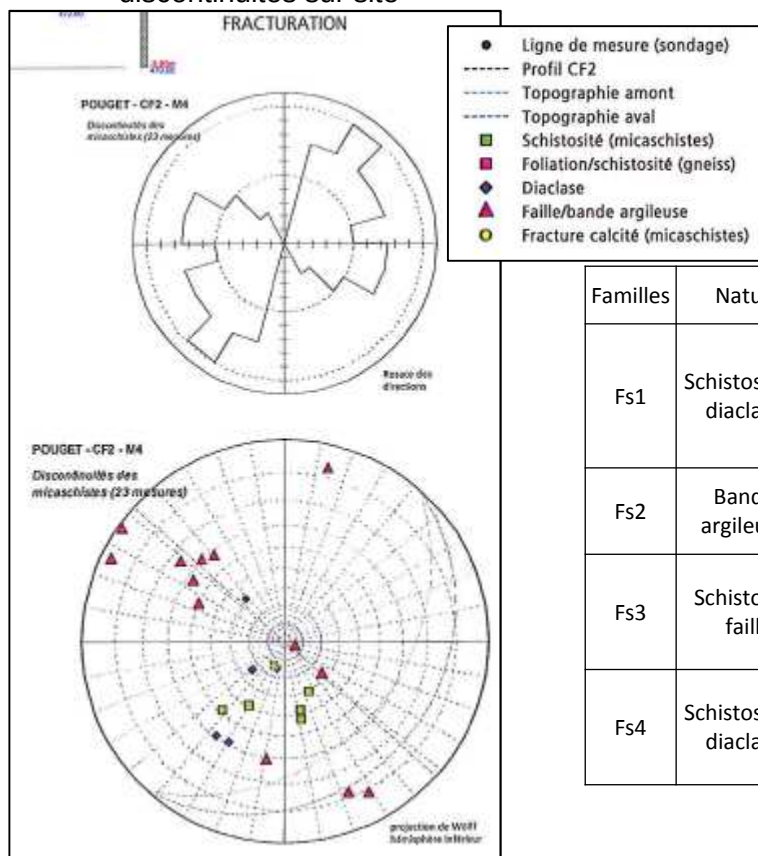
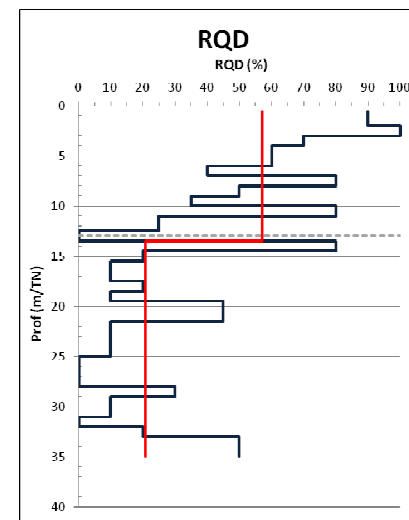
PARAMÈTRES POUR LES MASSIFS ROCHEUX

Paramètres de fracturation :

- Détermination de la valeur de RQD (nombre d'éléments de longueur > 10 cm dans un 1m de carotte)

$$0 (M7) < RQD < 57 (M4)$$

- Utilisation des données de TEGG pour le repérage des familles de discontinuités sur site



Familles	Nature	Orientation/Pendage	Extension estimée	Espacement	Rugosité	Altération des épontes	Ouverture	Remplissage
Fs1	Schistosité et diaclases	b: N115±15°E, 50±10°N	m à pluri-m	schistosité : cm	lisse pour la schistosité	Schistosité altérée	Diaclases : mm Failles : pluri-dm (?)	diaclases argileuses ; failles argileuses à graves
Fs2	Bandes argileuses	a: N30±5°E, 90° b: N40±15°E, 60±10°E	pluri-m	pluri-m	-	-	cm à pluri-cm	Argile
Fs3	Schistosité, faille	a: N65±5°E, 80°N b: N60±20°E, 35±10°N	pluri-m	pluri-m	-	Roche altérée, argilisée, cailloux	failles : pluri-dm	Argile, cailloux
Fs4	Schistosité et diaclases	N120±20°E, 15±10°N	m à pluri-m	-	-	-	schistosité fermée ; diaclases : pluri-mm	diaclases argilisées

Familles de discontinuités rencontrées et RQD au droit du massif M4

PARAMÈTRES POUR LES MASSIFS ROCHEUX

Classifications des massifs rocheux :

- Classification RMR de Bienawski (à partir de Rc et RQD)

$$32 (M5) < RMR < 65 (M4)$$

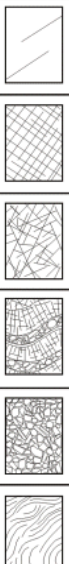
- Indice Q de Barton (plutôt adapté aux tunnels...)

- Détermination du GSI (Geological Strength Index) de Hoek

$$25 (M5) < GSI < 60 (M4)$$

- A partir du RMR : $GSI = RMR' - 5$ ($RMR' > 23$)
- A partir d'abaques

A. PARAMETRES DE CLASSIFICATION ET NOTATIONS CORRESPONDANTES									
Paramètres			Plages de valeurs						
1	Résistance de la roche (matrice)	Indice Franklin I_s Résist. compr. unilat. σ_c	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Pour les faibles valeurs de la résistance en compression unilatérale		
		> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa	
	Notation		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90% - 100%	75% - 90 %	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Notation		20	17	13	8	3		
3	Espacement des discontinuités		> 2 m	0,6 m - 2 m	200 mm - 600 mm	60 mm - 200 mm	< 60 mm		
	Notation		20	15	10	8	5		
4	Nature des discontinuités (voir E)		Surfaces très rugueuses Non convexes Epaves en contact Epaves non abîmées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Epaves faiblement abîmées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Epaves faiblement abîmées	Surfaces lustrées ou Remplissage < 5 mm ou Epaisseur de 1 à 5 mm Joint continu	Remplissage mou > 5 mm ou Epaisseur > 5 mm Joint continu		
	Notation		30	25	20	10	0		
5	Eau	Débit sur 10 m de longueur de tunnel (l/min)	Aucun	< 10 l/min	10 à 25 l/min	25 à 125 l/min	> 125 l/min		
		Ratio : pression eau / contr. press. σ_c	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Conditions générales	Complètement sec	Humide	Mouillée	Saturée	Détrempée		
	Notation		15	10	7	4	0		
RMR = Somme des notations des paramètres 1 à 5									
B. AJUSTEMENT DE LA VALEUR DE RMR EN FONCTION DE L'ORIENTATION DES DISCONTINUITES (voir F)									
Notation	Direction et pendage		Très favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très défavorable		
	Tunnels		0	- 2	- 5	- 10	- 12		
	Fondations		0	- 2	- 7	- 15	- 25		
	Talus		0	- 5	- 25	- 50	- 60		
C. CLASSES DE MASSIF ROCHEUX DETERMINEES PAR LE RMR									
Valeur du RMR		100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21			
Classe		I	II	III	IV	V			
Description		Très bon rocher	Bon rocher	Rocher moyen	Rocher médiocre	Rocher très médiocre			
D. PROPRIETES GLOBALES ATTRIBUEES AU MASSIF ROCHEUX EN FONCTION DES CLASSES									
Classe		I	II	III	IV	V			
Temps de tenue sans soutènement		20 ans pour une portée de 15 m	1 an pour une portée de 10 m	1 semaine pour une portée de 5 m	10 h pour une portée de 2,5 m	30 mn pour une portée de 1 m			
Cohésion du massif rocheux (kPa)		> 400 kPa	300 à 400 kPa	200 à 300 kPa	100 à 200 kPa	< 100 kPa			
Angle de frottement du massif rocheux (°)		> 45°	35° à 45°	25° à 35°	15° à 25°	< 15°			

		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		60	50		
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			40	30	
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity				20	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces					10
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			

PARAMÈTRES POUR LES MASSIFS ROCHEUX

Paramètres de cisaillement du massif :

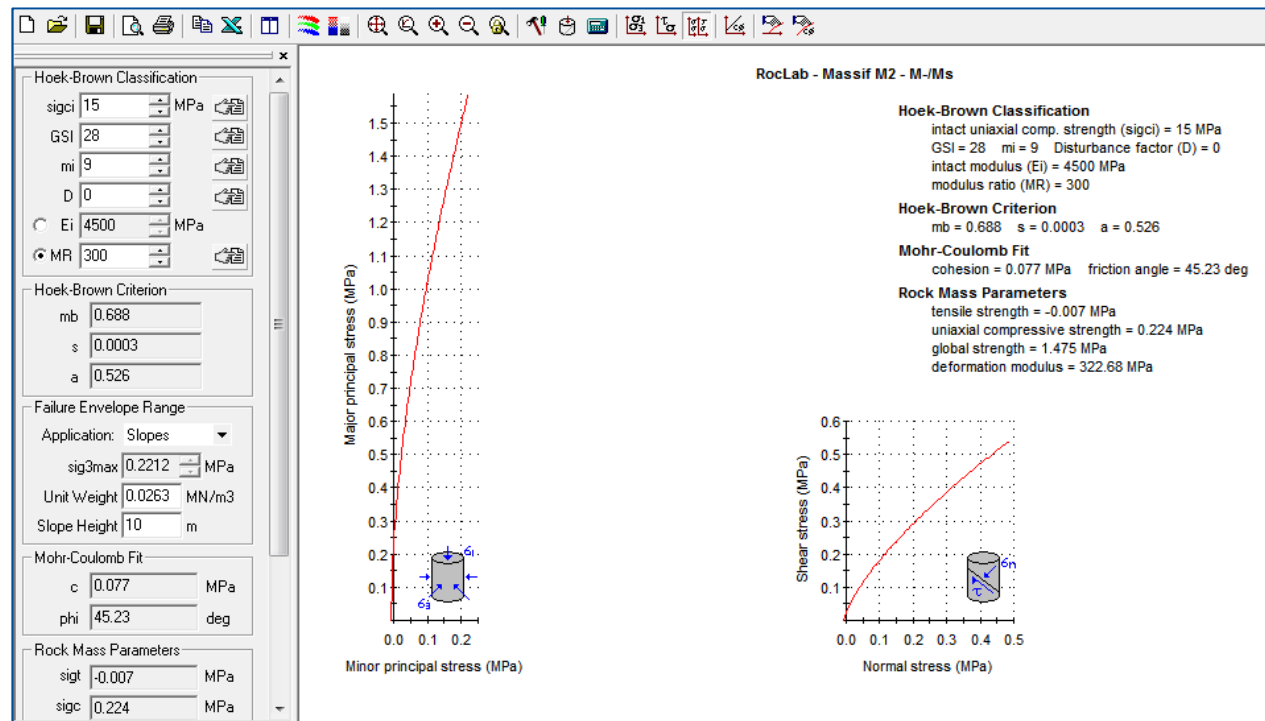
- Paramètres de Hoek & Brown (m_b , s , a) pour le calcul de la contrainte ultime du rocher

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{100 \cdot GSI}{28}\right)}$$

$$s = e^{\left(\frac{100 \cdot GSI}{9}\right)}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-20/3} \right)$$

- Paramètres de cisaillement c' et ϕ' (linéarisation du critère de Hoek & Brown)
- En pratique, utilisation du logiciel ROCLAB, de Rocscience



PARAMÈTRES POUR LES MASSIFS ROCHEUX

Paramètres de cisaillement du massif (résultats) :

		MASSIF M2	MASSIF M3	MASSIF M4	MASSIF M5
		M- / Ms	M-	M-	M--
Stratigraphie	Profondeur (m/TN)	0 à 7	0 à 19	0 à 13	3,2 à 9,5
Critère Hoek & Brown	m_b	[0,688 - 1,308]	[0,793 - 1,804]	[0,949 - 2,157]	0,618
	s	[0,0003 - 0,0023]	[0,0005 - 0,0067]	[0,0009 - 0,0117]	0,0002
	a	[0,508 - 0,526]	[0,504 - 0,520]	[0,503 - 0,514]	0,531
Cisaillement massif homogénéisé	c'	[100 - 140] kPa	[140 - 190] kPa	[70 - 100] kPa	[50 - 80] kPa
	ϕ'	[43 - 48] °	[47 - 51] °	[37 - 43] °	[35 - 40] °
		MASSIF M6	MASSIF M7	MASSIF M8	MASSIF M9
		M--	G0f/G0r	G0r	G0r
Stratigraphie	Profondeur (m/TN)	0 à 23	0 à 5,3	0 à 20	2,2 à 11,5
Critère Hoek & Brown	m_b	[0,852 - 1,870]	[2,028 - 3,591]	[2,512 - 4,952]	[2,257 - 4,611]
	s	[0,0007 - 0,0075]	[0,0005 - 0,0031]	[0,001 - 0,0084]	[0,0007 - 0,0067]
	a	[0,504 - 0,517]	[0,507 - 0,520]	[0,504 - 0,513]	[0,504 - 0,516]
Cisaillement massif homogénéisé	c'	[90 - 130] kPa	[80 - 130] kPa	[90 - 140] kPa	[70 - 100] kPa
	ϕ'	[41 - 46] °	[44 - 49] °	[47 - 52] °	[47 - 53] °

Les paramètres finalement retenus sont les c' , ϕ' moyens.

(65 kPa ; 37,5°) (M5) < (c' ; ϕ') < (115 kPa ; 49,5°) (M8)

PARAMÈTRES POUR LES MASSIFS ROCHEUX

Déformabilité du massif rocheux : différentes formulations

- Cording et al. (1971) : $E = f(RMR) \text{ } RMR > 50$
- Cording et al. (1971) : $E = f(RQD) \text{ (si } RQD > 60)$
- Fujita (1977) : $E = f(\ln(Q)) \text{ (si } Q > 1)$
- Serafim et Pereira (1983) : $E = f(RMR) \text{ (si } 25 < RMR < 85)$
- Bieniawski (1989) : $E = f(E_i, RQD)$
- Grimstad et Barton (1980) : $E = f(RMR)$
- Hoek & Brown (1997) : $E = f(Rc, GSI)$
- Hoek (ROCLAB) : $E = f(E_i, GSI)$

Module retenu = Moyenne des modules calculés
en écartant les valeurs « aberrantes » (en gris)

		G0f/G0r	
Auteurs		E _{mas} (MPa)	
Cording et al (1971)			
Cording et al (1971)			
Fujita (1977)			
Serafim et Pereira (1983)	RMR = 37	4732	
	RMR = 53	11885	
Bieniawski (1989)	E _i = 1,5 GPa	0	
	E _i = 2,6 GPa	0	
	E _i = 3,7 GPa	0	
Grimstad & Barton (1980)	RMR = 37	19640	
	RMR = 53	29300	
Hoek & Brown (1997)	GSI = 32	785	
	GSI = 40	1245	
	GSI = 48	1973	
Hoek (ROCLAB)	E _i = 1,5 GPa	GSI = 32	139
		GSI = 40	239
		GSI = 48	407
	E _i = 2,6 GPa	GSI = 32	241
		GSI = 40	415
		GSI = 48	706
	E _i = 3,7 GPa	GSI = 32	343
		GSI = 40	591
		GSI = 48	1004

Modules de déformation calculés au droit de M7

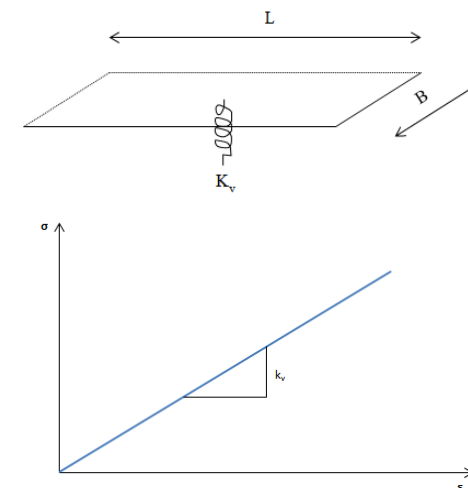
PARAMÈTRES POUR LES MASSIFS ROCHEUX

Déformabilité du massif rocheux : résultats

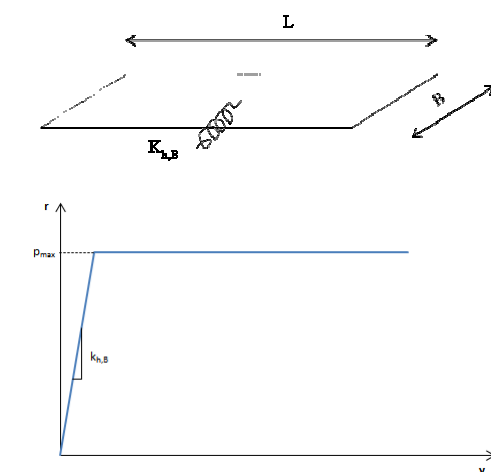
		MASSIF M2	MASSIF M3	MASSIF M4	MASSIF M5	
		M- / Ms	M-	M-	Rb	M--
Stratigraphie	Profondeur (m/TN)	0 à 7	0 à 19	0 à 13	0 à 3,2	3,2 à 9,5
Déformabilité massif	E _{mas}	[900 - 4000] MPa	[1100 - 6000] MPa	[500 - 2000] MPa	-	[120 - 700] MPa
	E _{mas, retenu}	2000 MPa	3 000 MPa	1 100 MPa	112,5 MPa	350 MPa
		MASSIF M6	MASSIF M7	MASSIF M8	MASSIF M9	
		M--	G0f/G0r	G0r	G0f	G0r
Stratigraphie	Profondeur (m/TN)	0 à 23	0 à 5,3	0 à 20	0 à 2,2	2,2 à 11,5
Déformabilité massif	E _{mas}	[200 - 4000] MPa	[140 - 2000] MPa	[120 - 2000] MPa	-	[500 - 2000] MPa
	E _{mas, retenu}	1 500 MPa	700 MPa	800 MPa	20 MPa	1 100 MPa

CALCUL DES REACTIONS SOL/MASSIF

Massif M6		Hypothèses
Pente	$k_{h,B}$ (MN / m)	
Calculé par le rapport contrainte apportée sur tassement	9973	$L = 7,0$ m $B = 4,6$ m
Calculé selon la NF P 94-261	11084	$E = 1500$ MPa $R_c = 7,9$ MPa $s = 0,0041$ $m = 1,361$ $v = 0,3$
Calculé selon FEMA 356	11084	
Calculé selon SIEFFERT	11167	
Valeur moyenne	10827	
Valeur retenue	10800	
Palier	P_{max} (kN)	$C_{BL} = 1,058$ $C_f = 1,182$ $C_d = 1,157$
Contrainte ultime de l'assise	3,42	
Valeur retenue	3,42	



Massif M6	Valeur	Hypothèses
Pente	$k_{h,B}$ (MN / m)	
Calculé selon la NF P 94-261	8846	$L = 7,0$ m $B = 4,6$ m
Calculé selon FEMA 356	8846	$E = 1500$ MPa $R_c = 7,9$ MPa $s = 0,0041$ $m = 1,361$ $v = 0,3$
Calculé selon SIEFFERT	9040	
Valeur moyenne	8911	
Valeur retenue	8900	
Palier	P_{max} (kN)	$C_{BL} = 1,040$
Effort maximal admissible	$0,79 V_d + 73,33 A'$	
Valeur retenue	$0,79 V_d + 73,33 A'$	



CALCUL DES REACTIONS SOL/MASSIF

Tableau de synthèse des réactions (massifs M2, M3 et M4) :

			Massif M2				Massif M3				Massif M4					
Réactions en sous-face	Caractéristiques géométriques	B =	5m				4,7m				4,9m					
		L =	12,5m				8m				17m					
	Réaction verticale Kv	pende kv =	20700 MN/m				23500 MN/m				13600 MN/m					
	Contrainte ultime pour vérification capacité portante	q'u =	2020 kPa				7410 kPa				1910 kPa					
			Frottement horizontal transversal	pende kh,B =	16700 MN/m				19200 MN/m				10800 MN/m			
					0,85. Vd + 80,00.A'				0,96. Vd + 110.A'				0,70. Vd + 56,67.A'			
					A' : surface comprimée				A' : surface comprimée				A' : surface comprimée			
	Frottement horizontal longitudinal	palier Pmax (kN)=	Vd : composante verticale de la DDC en kN				Vd : composante verticale de la DDC en kN				Vd : composante verticale de la DDC en kN					
			Frottement horizontal longitudinal	pende kh,L =	18100 MN/m				20300 MN/m				12000 MN/m			
					0,85. Vd + 80,00.A'				0,96. Vd + 110.A'				0,70. Vd + 56,67.A'			
A' : surface comprimée					A' : surface comprimée				A' : surface comprimée							
Frottement horizontal longitudinal	palier Pmax (kN) =	Vd : composante verticale de la DDC en kN				Vd : composante verticale de la DDC en kN				Vd : composante verticale de la DDC en kN						

Réactions latérales			<u>Réactions latérales côté CF1</u>	<u>Réactions latérales côté montagne</u>	<u>Réactions latérales aval</u>	<u>Réactions latérales amont</u>	<u>Réactions latérales côté CF1</u>	<u>Réactions latérales côté montagne</u>	<u>Réactions latérales aval</u>	<u>Réactions latérales amont</u>	<u>Réactions latérales côté CF1</u>	<u>Réactions latérales côté montagne</u>	<u>Réactions latérales aval</u>	<u>Réactions latérales amont</u>
	Caractéristiques géométriques	B =	5m	5m	5m	5m	4,7m	4,7m	4,7m	4,7m	4,9m	4,9m	4,9m	4,9m
		L =	13,15m	11,8m	12,5m	12,5m	8m	8m	8m	8m	17m	17m	17m	17m
		D =	4,2m	4,0m	3,0m	3,6m	0,3m	2,1m	0m	2,3m	3,3m	2,8m	1,8m	4,2m
	Frottement vertical	pende 1 : ks,e =	450 MPa/m	500 MPa/m	1200 MPa/m	1200 MPa/m	1120 MPa/m	1120 MPa/m	-	1910 MPa/m	190 MPa/m	190 MPa/m	670 MPa/m	670 MPa/m
		palier 1 : qs / 2 =	160 kPa	160 kPa	160 kPa	215 kPa	180 kPa	180 kPa	-	240 kPa	80 kPa	80 kPa	80 kPa	110 kPa
		pende 2 : ks,e / 5 =	90 MPa/m	100 MPa/m	240 MPa/m	240 MPa/m	224 MPa/m	224 MPa/m	-	382 MPa/m	38 MPa/m	38 MPa/m	134 MPa/m	134 MPa/m
		palier 2 : qs =	320 kPa	320 kPa	320 kPa	430 kPa	360 kPa	360 kPa	-	480 kPa	160 kPa	160 kPa	160 kPa	220 kPa
	Réaction frontale	pende kf,B =	2680 MPa/m	2320 MPa/m	500 MPa/m	500 MPa/m	2770 MPa/m	2770 MPa/m	-	1040 MPa/m	1620 MPa/m	1620 MPa/m	230 MPa/m	230 MPa/m
		palier pmax =	1280 kPa	1260 kPa	1150 kPa	1630 kPa	1280 kPa	1510 kPa	-	2050 kPa	770 kPa	730 kPa	650 kPa	1120 kPa
	Frottements horizontaux	pende kh,L =	2680 MPa/m	2320 MPa/m	500 MPa/m	500 MPa/m	2770 MPa/m	2770 MPa/m	-	1040 MPa/m	1620 MPa/m	1620 MPa/m	230 MPa/m	230 MPa/m
		palier pmax =	320 kPa	320 kPa	320 kPa	430 kPa	360 kPa	360 kPa	-	480 kPa	160 kPa	160 kPa	160 kPa	220 kPa

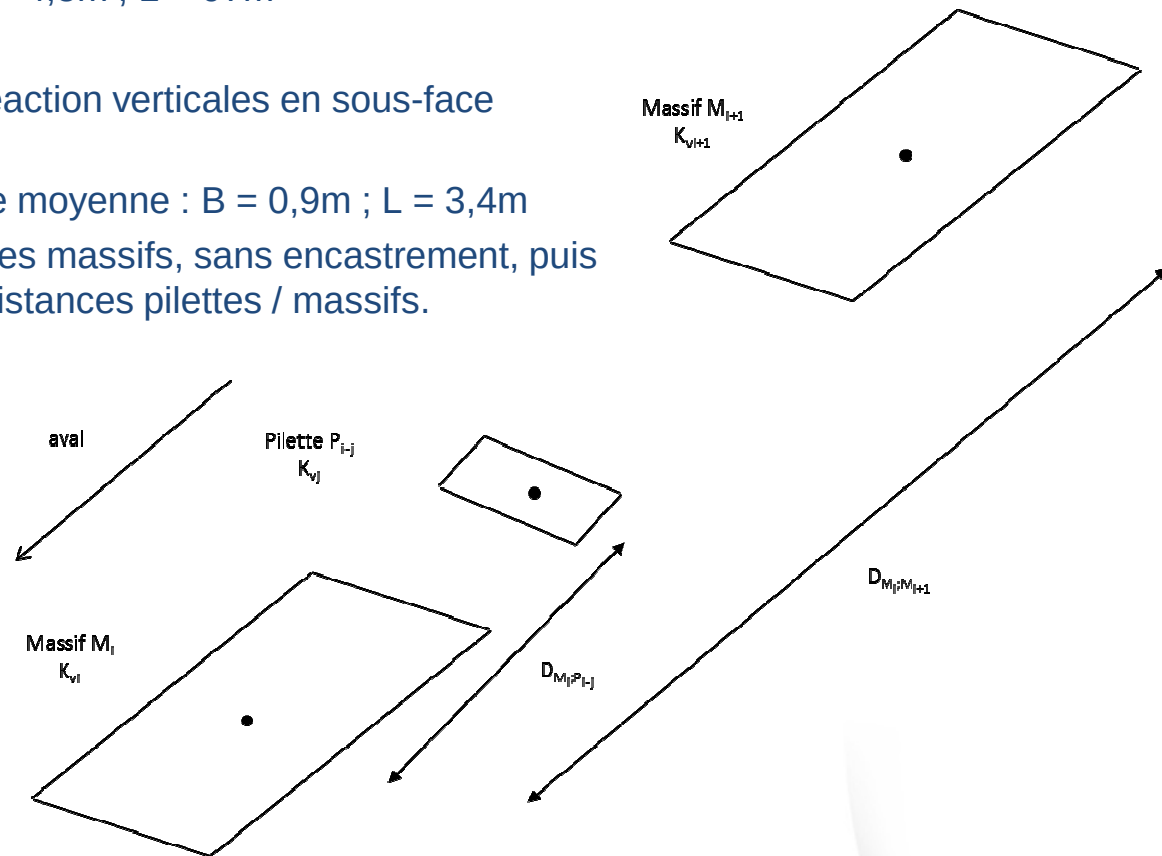
REACTIONS SOL/PILETTE ET SOL/SARCOPHAGE

Sarcophage : ressorts en sous-face uniquement

- Modèle de sol : identique à M2
- Dimensions du « massif » : $B = 4,5\text{m}$; $L = 97\text{m}$

Pilettes (appuis entre massifs) : réaction verticales en sous-face uniquement

- Géométrie retenue : géométrie moyenne : $B = 0,9\text{m}$; $L = 3,4\text{m}$
- Réactions calculées au droit des massifs, sans encastrement, puis interpolation en fonction des distances pilettes / massifs.



$$K_{vj} = \frac{K_{vi+1} - K_{vi}}{D_{M_i, M_{i+1}}} \cdot D_{M_i, P_{i-j}} + K_{vi}$$

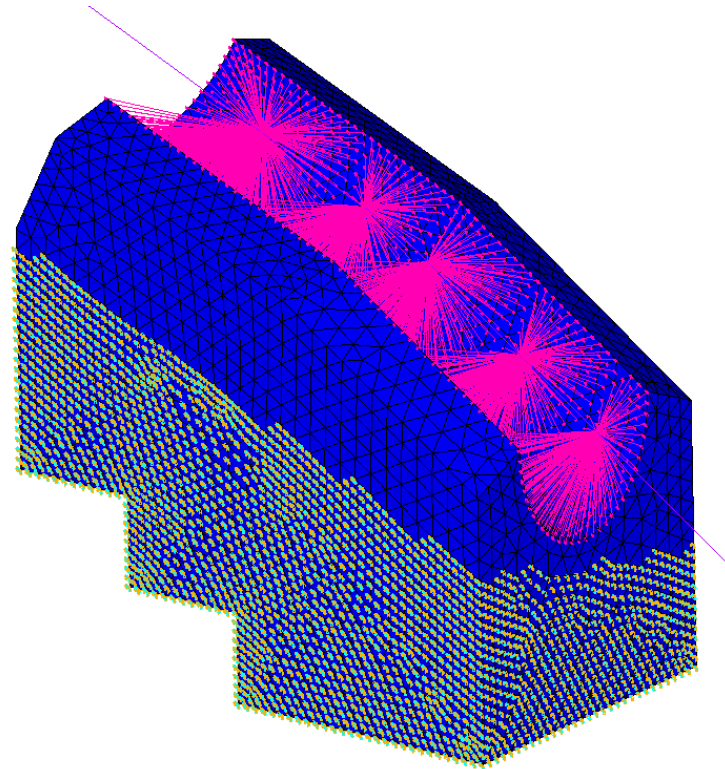
Sarcophage et pilettes : résultats

			Sarcophage	Massif M2	Massif M3	Massif M4	Massif M5	Massif M6	Massif M7	Massif M8	Massif M9	
Réactions en sous-face (calcul pilettes)	Caractéristiques géométriques	B =	4,5m	0,9m								
		L =	97,2m	3,4m								
	Hypothèses	E _{assise} =	2000 MPa	2000 MPa	3000 MPa	1100 MPa	112,5 MPa	1500 MPa	700 MPa	800 MPa	20 MPa	
		v =	0,3									
		Rc _{assise} =	15 MPa	15 MPa	18,5 MPa	4 MPa	-	7,9 MPa	4,9 MPa	5,2 MPa	-	
		c' =	120 kPa	120 kPa	165 kPa	85 kPa	-	110 kPa	105 kPa	115 kPa	-	
		φ' =	45,5°	45,5°	49°	40°	-	43,5°	46,5°	49,5°	-	
		m _b =	0,493	0,493	1,2985	1,553	-	1,361	2,8095	3,732	-	
		s =	0,0004	0,0004	0,0036	0,0063	-	0,0041	0,0018	0,0047	-	
		Réaction verticale K _{vi}	pente k _v =	92100 MN/m	4800 MN/m	7200 MN/m	2600 MN/m	270 MN/m	3600 MN/m	1700 MN/m	1900 MN/m	40 MN/m
	Contrainte ultime pour vérification capacité portante	q' _u =	1820 kPa	1960 kPa	6890 kPa	1890 kPa	2160 kPa	3120 kPa	2060 kPa	3250 kPa	1100 kPa	
	Frottement horizontal transversal	pente k _{h,B} =	51000 MN/m									
		palier P _{max} (kN)=	0,85. Vd + 80,00.A'									
			A' : surface comprimée									
			Vd : composante verticale de la DDC en kN									
	Frottement horizontal longitudinal	pente k _{h,L} =	63800 MN/m									
palier P _{max} (kN) =		0,85. Vd + 80,00.A'										
		A' : surface comprimée										
		Vd : composante verticale de la DDC en kN										

CALCUL ANSYS TRIDIMENSIONNEL

- Interaction sol / massifs :
 - Ressorts non-linéaires avec caractéristiques définis ci-avant.
 - Altitude de la droite du terrain naturel (TN) pour chaque face verticale
 - pour chaque face verticale toute la hauteur de terrain (jusqu'au TN) participe aux interactions sol-massifs

Première approche : Encastrement



CALCUL ANSYS TRIDIMENSIONNEL

Seconde approche : Ressorts de sol en sous-face et face amont

Pour chaque nœud situé sous le TN, trois ressorts sont créés : un agissant dans la direction normale à la face et deux tangentiels.

Principe de modélisation de l'ISS en sous-face de massif:

Objectif : Tenir compte du **décollement**, de la **friction** et d'une **contrainte de cohésion**:

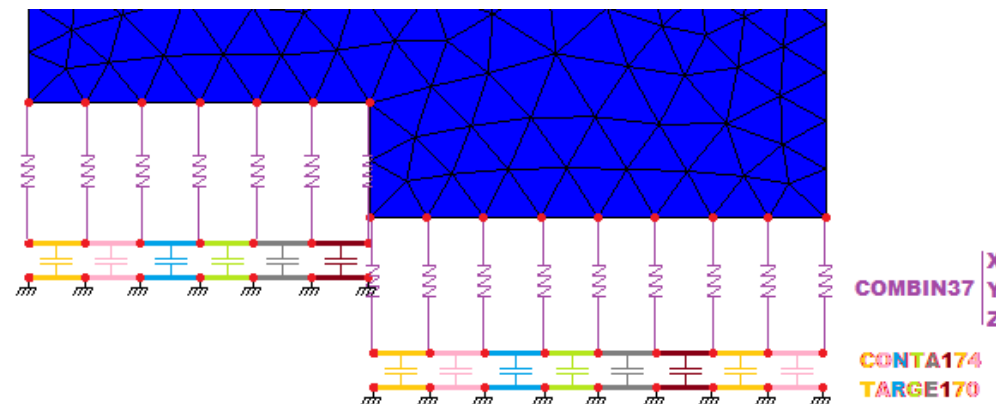
Mise en série de:

- 3 ressorts (1 normal et 2 tangentiels) par nœud, se désactivant si $\Delta Z > 0$.

avec

- Des éléments de contact avec cible encastré, dont les paramètres permettent de modéliser la friction (avec le coefficient μ) et une contrainte de cohésion σ_{COHE} :

$$\text{Glissement si } \tau_{max} > \mu \sigma_N + \sigma_{COHE}$$

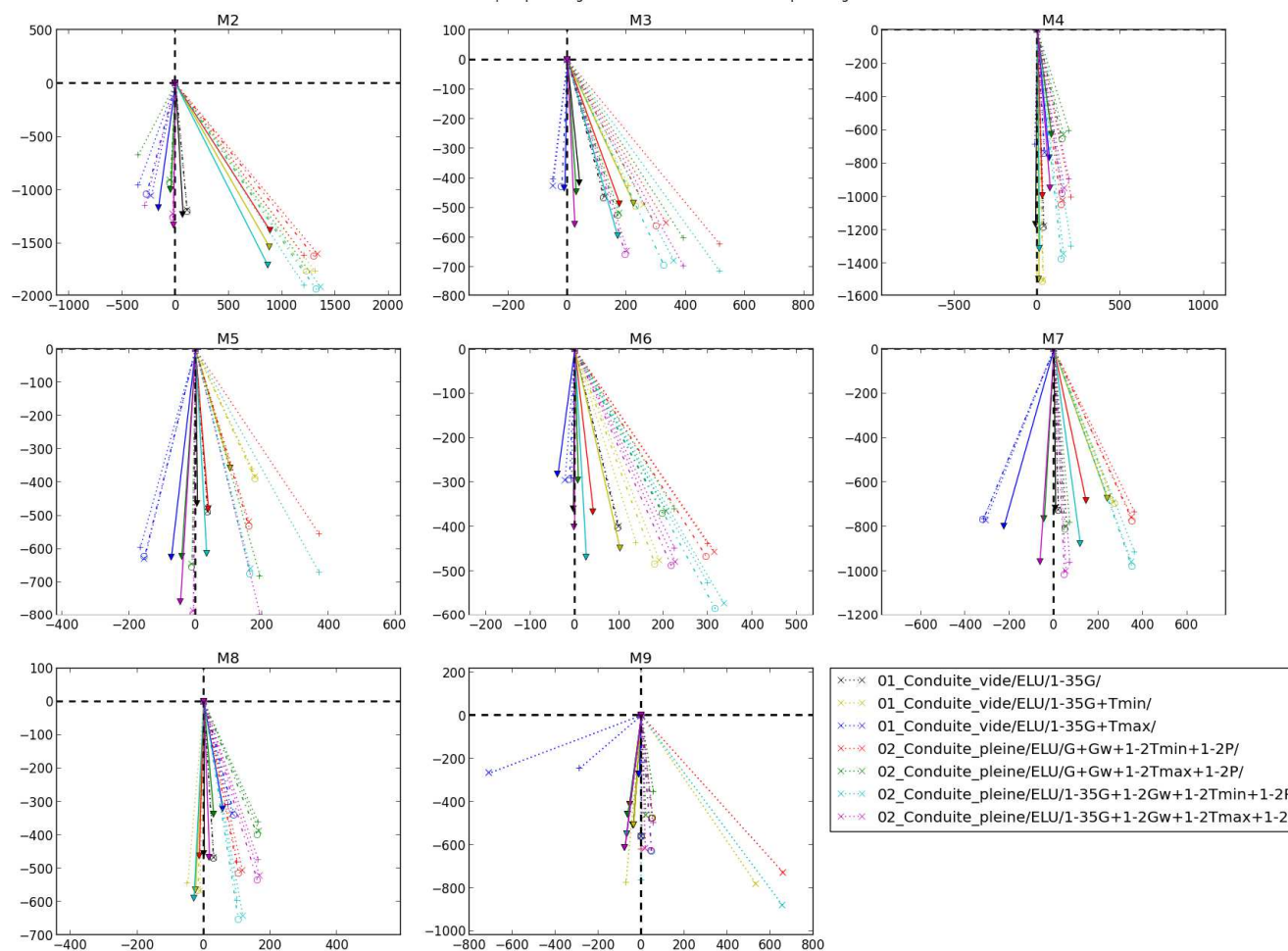


CALCUL ANSYS TRIDIMENSIONNEL

Résultantes ELU appliquées aux massifs après application des DDC :

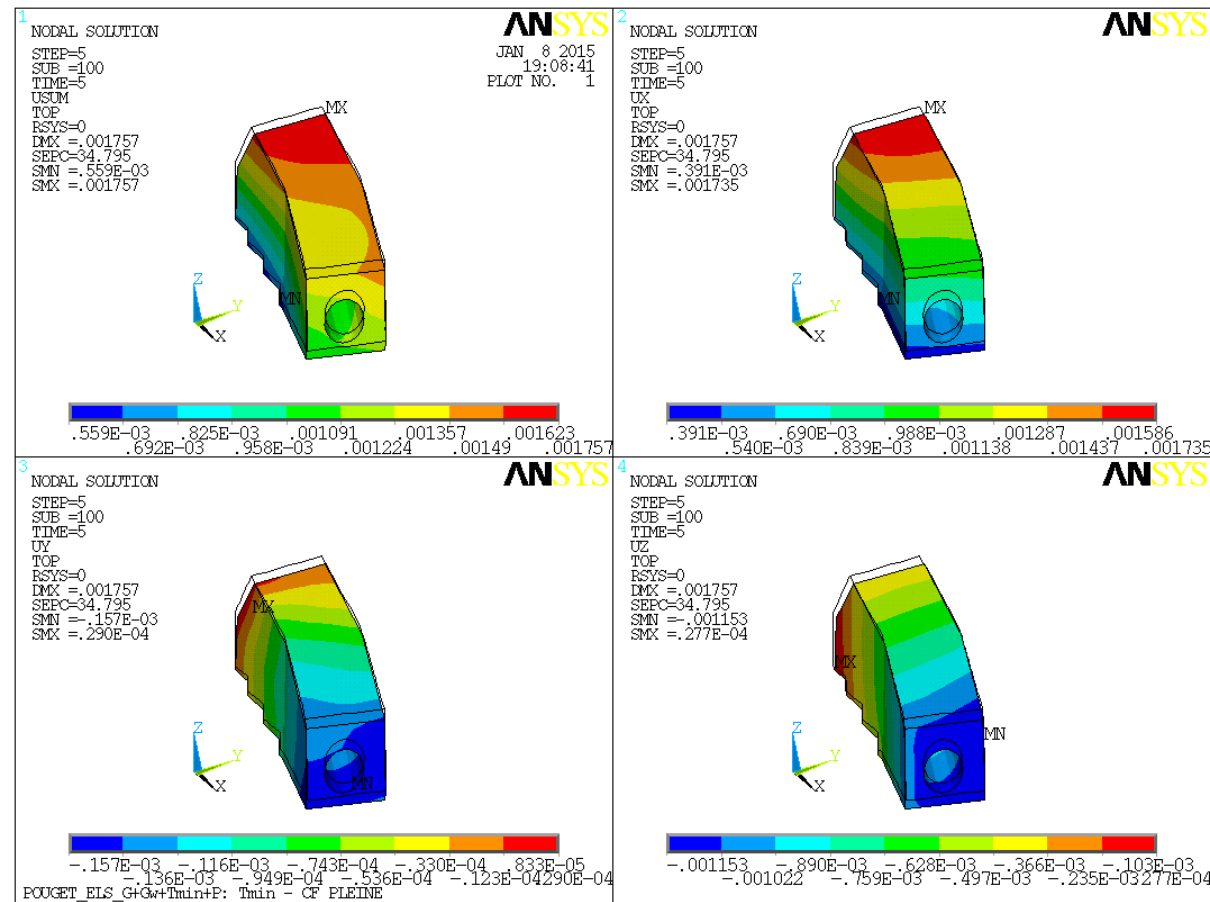
Efforts appliqués aux coudes en tonne-force [MN*100] dans le plan X-Z - AVEC LE POIDS PROPRE DES MASSIFS

Combinaisons ELU
...+:CONFORM ...x:Coudes bloques pilettes glissantes -.-o:Massifs encastres pilettes glissantes --v:ISS



CALCUL ANSYS TRIDIMENSIONNEL

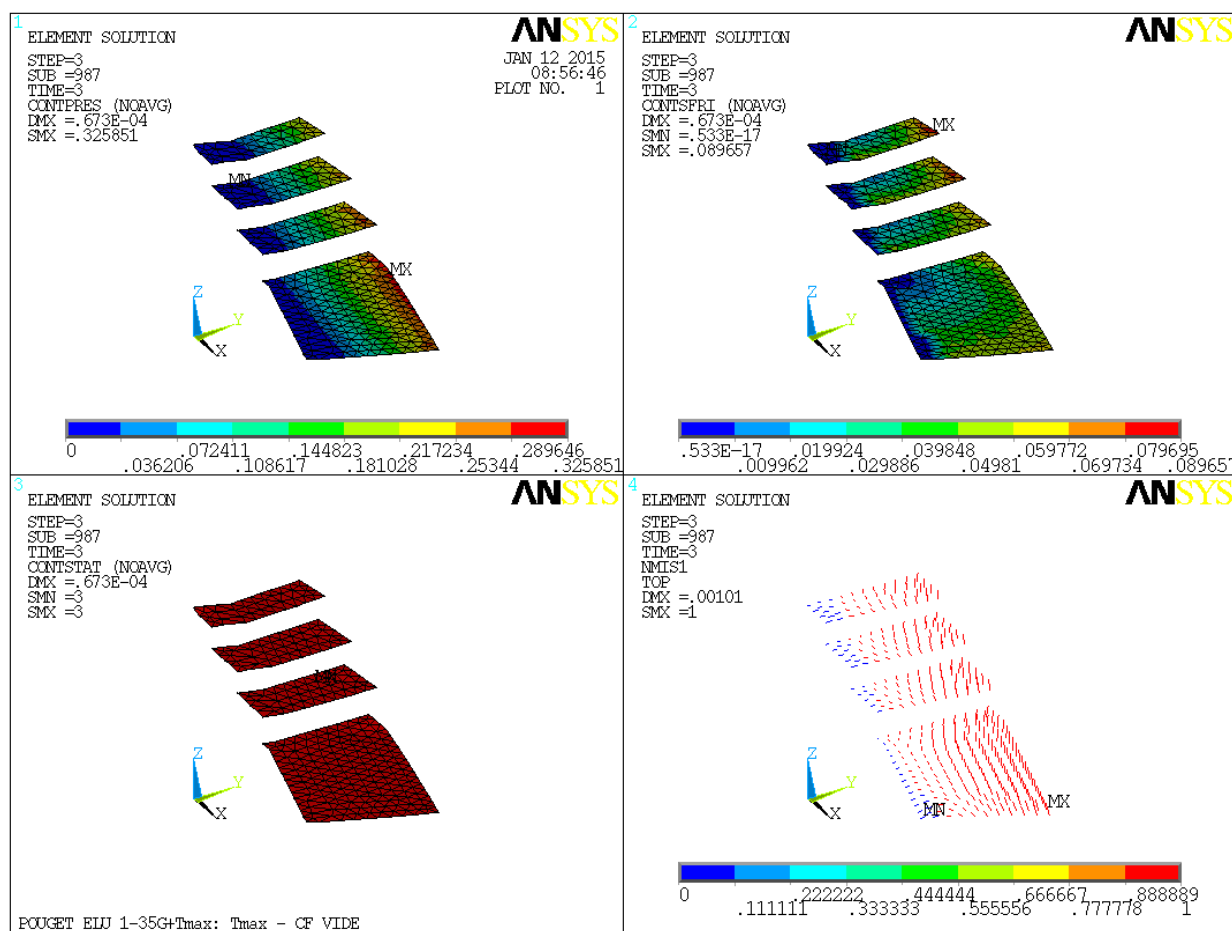
Déformée de chaque massif pour chaque étape de chargement :

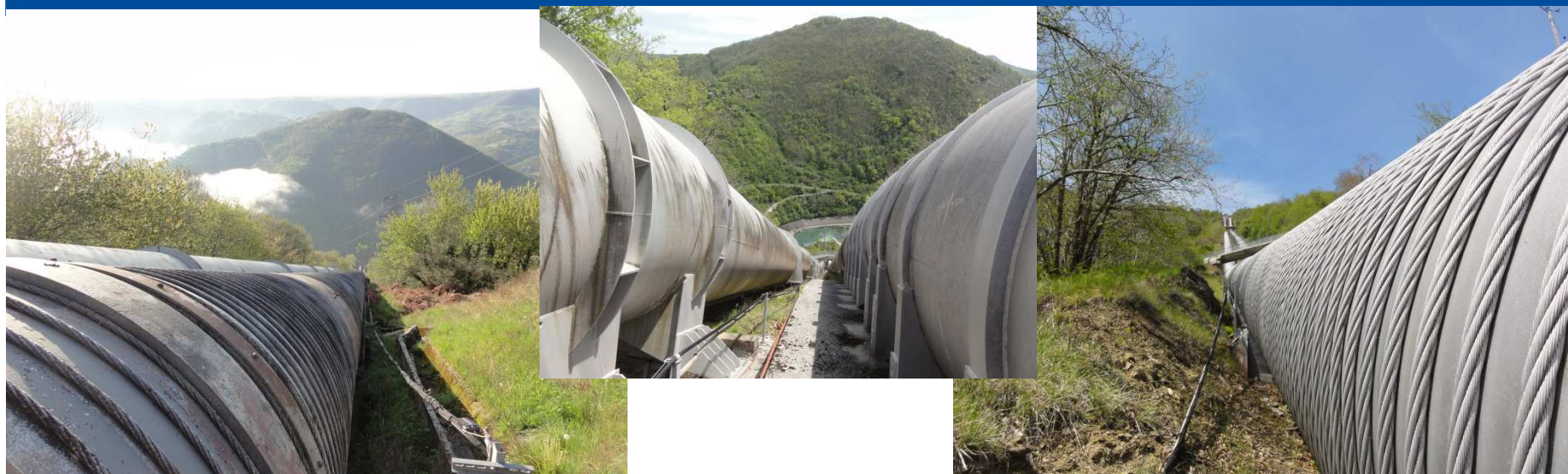


CALCUL ANSYS TRIDIMENSIONNEL

Vérification de l'état de la sous-face des massifs :

- Pour M2 (le plus décollé, du fait de son coude) : 76 % de surface comprimée à l'ELS, 82 % à l'ELU





Merci de
votre attention