



SOCIÉTÉ BELGE DE GÉOLOGIE DE
L'INGÉNIEUR ET DE MÉCANIQUE DES
ROCHES

BELGISCHE VERENIGING VOOR
INGENIEURSGEOLOGIE EN
ROTSMECHANICA



MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DES INFRASTRUCTURES

Administration des ponts et chaussées



JOURNÉE TECHNIQUE

STABILITÉ DES PAROIS ROCHEUSES

1^{er} OCTOBRE 2010

Eboulement de la carrière

RN 27

Michelau



Présentation : Frédéric COLLIN, Roland FOX, Robert MAQUIL, Christian SCHROEDER

GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

PONTS ET CHAUSSEES



DIVISION DES SERVICES SPÉCIAUX
SERVICE GÉOLOGIQUE

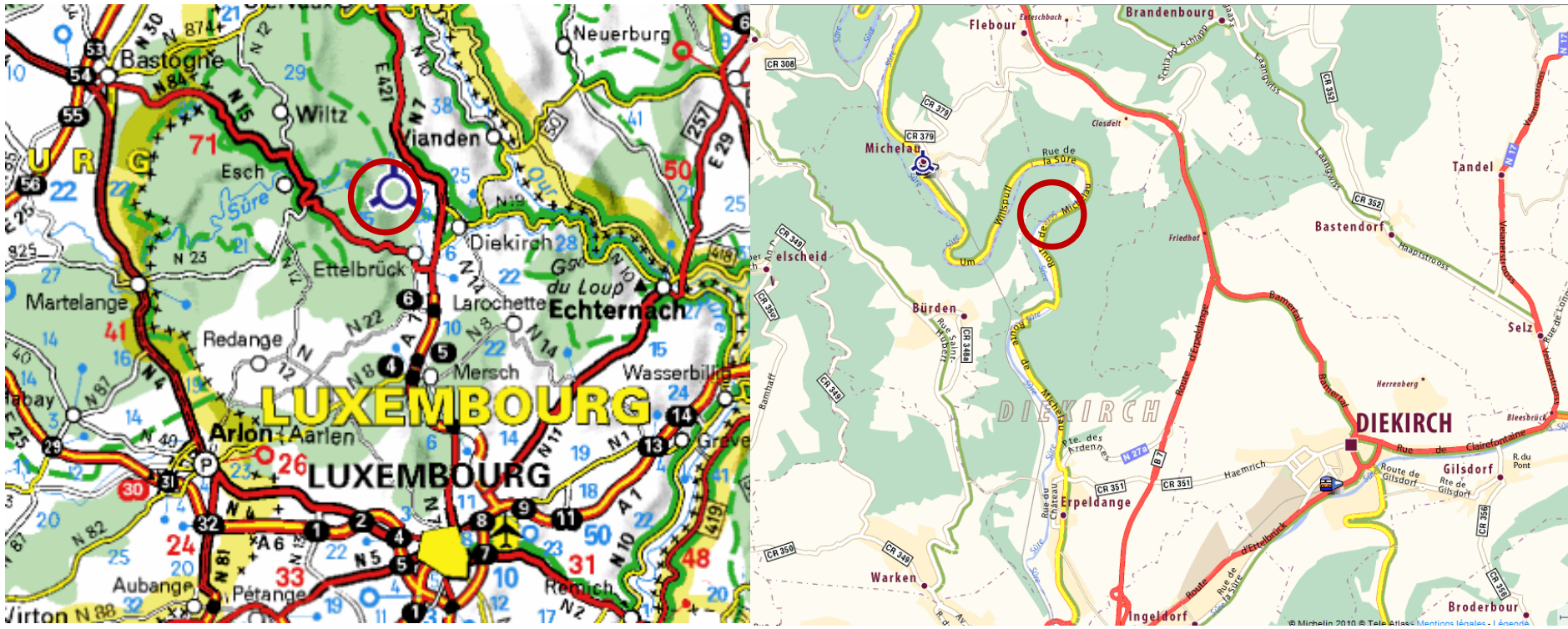


Contenu de la présentation

- introduction
- reconnaissances
- stabilité : étude par différentes méthodes
- éboulement : volume et déplacement
- conclusions

Carrière Walch – Schou

- en rive gauche de la Sûre
- en bordure de la RN 27





451 m

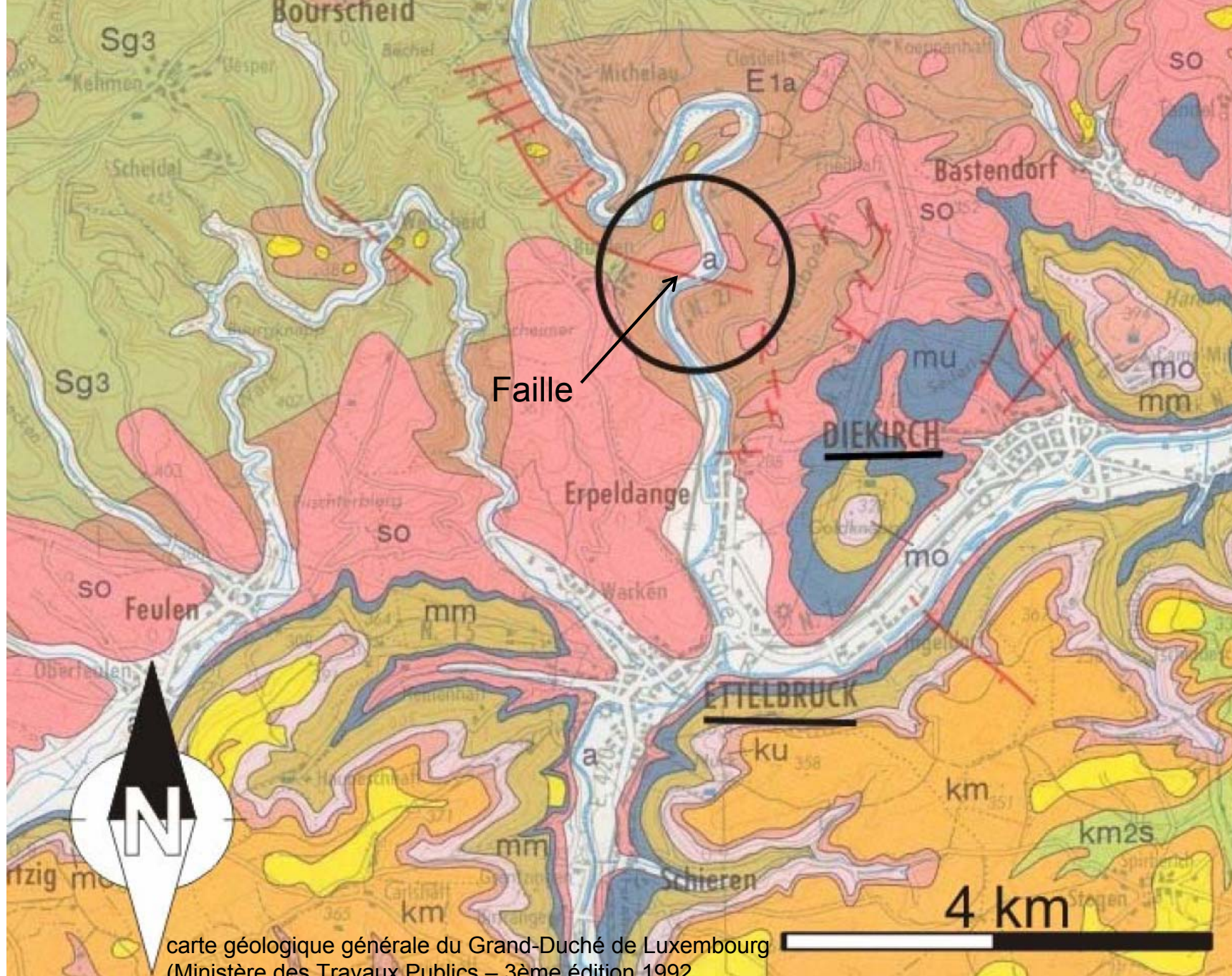
Date des Images satellite : 4 août 2007

© 2010 Europa Technologies
Image © 2010 European Space Imaging
© 2010 Cnes/Spot Image
© 2010 Tele Atlas

lat 49.880559° long 6.110885° élév. 308 m

© 2009 Google

Altitude 1.94 km



carte géologique générale du Grand-Duché de Luxembourg
(Ministère des Travaux Publics – 3ème édition 1992)

Historique

- exploite les quartzites (et schistes et grès) de l'Emsien inférieur depuis 1945 (méthode artisanale : abattage progressif d'une dalle de quartzite subparallèle à la Sûre, ayant un pendage de l'ordre de 70°)
Régulièrement chute de blocs sur la N27
1^{er} sinistre avec fermeture provisoire de la route en 1988 , mise en place du merlon de terre
2^{ième} sinistre en 1997 – fermeture de la route



Eboulements

Classes d'instabilités

Chutes de pierres = volume unitaires < quelques dm^3

Chutes de blocs = blocs isolés volume unitaire de quelques fractions de m^3 à plusieurs m^3 .
Pouvant atteindre ou dépasser une centaine de m^3 dans le cas de formations massives

Éboulement en masse limité = volume total maximal de l'ordre de quelques centaines de m^3
provenant d'une masse rocheuse fragmentée

Éboulement en grande masse = volume total > 1000 m^3 . Jusqu'à 500 000 m^3

Éboulement catastrophique = Volume simultané > 1 000 000 m^3 . Dynamique spécifique

Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux - LCPC 2004

Eboulements

- en 1987
- en 1997 : estimation à +/- 5000 m³ .
Origine vraisemblable : suppression de la dalle de quartzite présente à la surface du versant, entraînant le glissement du colluvium situé à l'arrière de la dalle.
- évolution continue depuis 1997
 - adoucissement du profil
 - comblement du pied de talus contre la risberme
 - trajectoire de gros blocs jusqu'à la Sûre
 - éboulement à la partie ouest
 - la dalle de quartzite dans les parties centrale et ouest, est actuellement dans un état de stabilité précaire,
 - éboulement côté sud environ 1000 m³ en 2005.



Photo aérienne de 1989

Historique



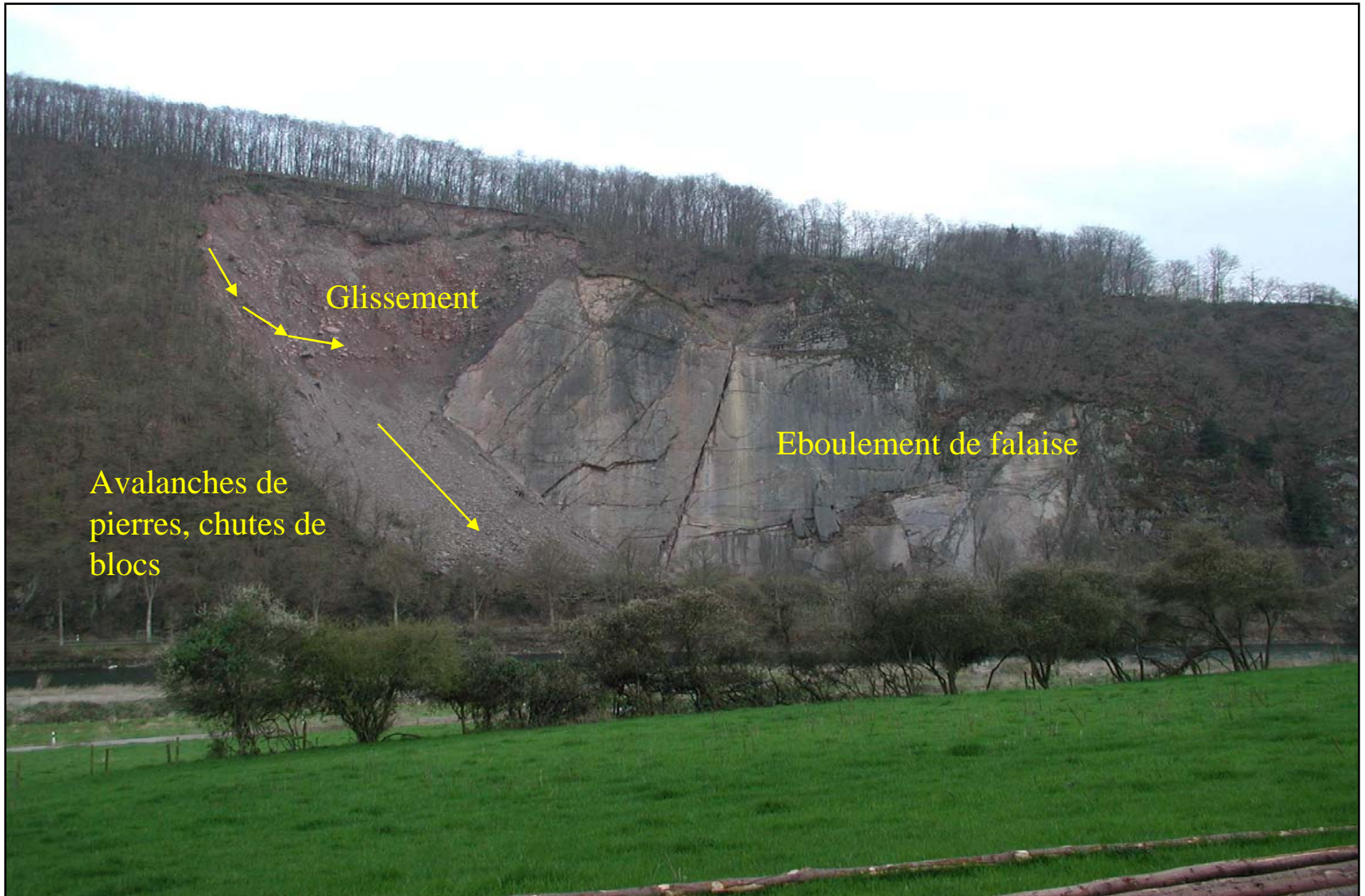
13/07/1997

Historique



07/1997

Historique



08/04/2001

Sinistre: Carrière de Michelau, juillet 1997

Un volume entre
20.000 et 25.000 m³ est
passé par la falaise en
quelques jours

Glissement

Eboulement
de falaise

Projection de la
dalle rocheuse et
du terrain naturel

Chute de blocs
et avalanche de
blocs et pierres

130 mètres





07/1997

Historique



07/1997

Historique



22/05/2005

Historique



Historique



11/04/2006

Historique



25/09/2010

Historique



25/09/2010

Détail de la falaise



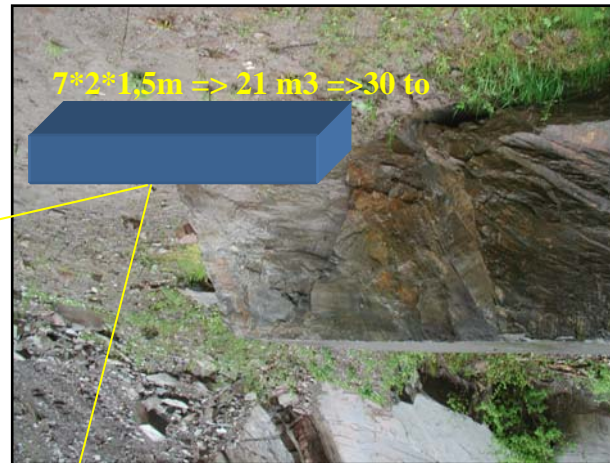
25/09/2010

Détail de la falaise

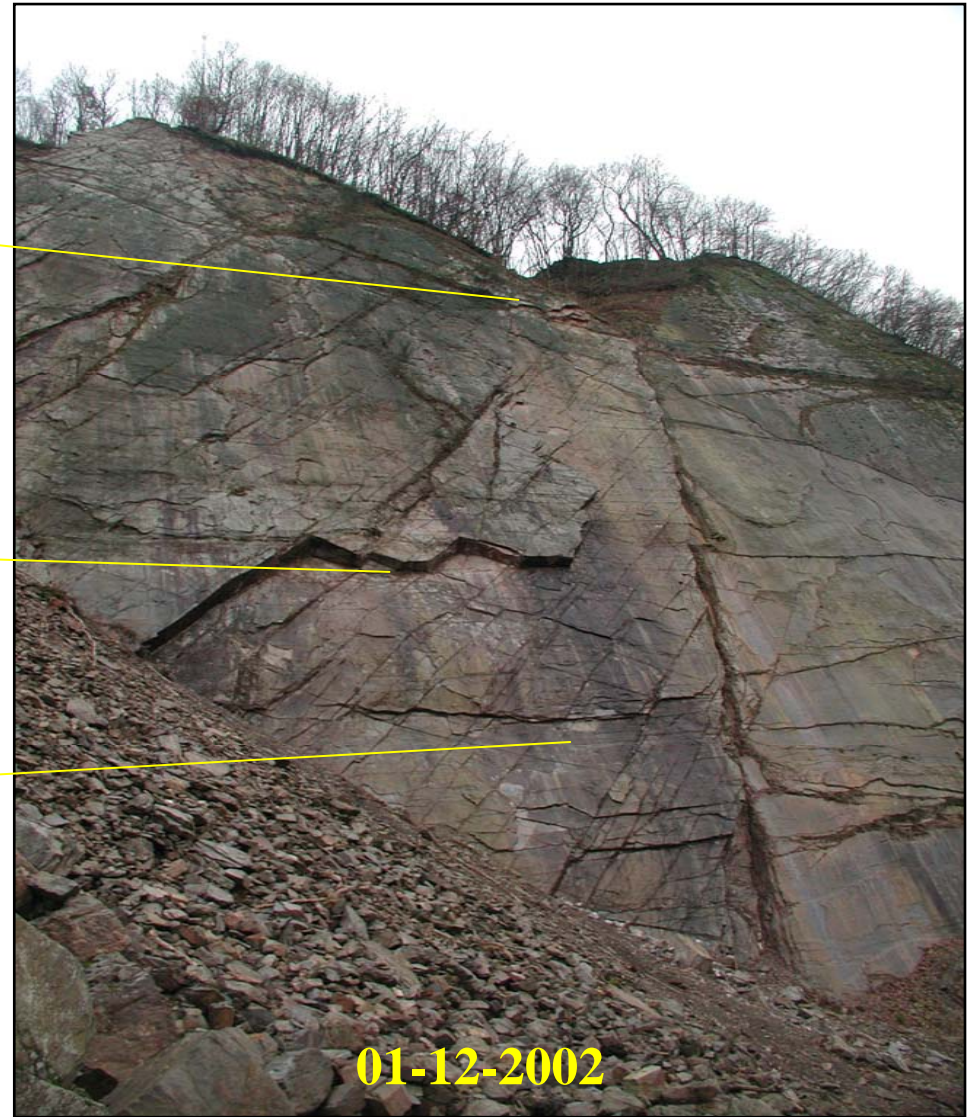
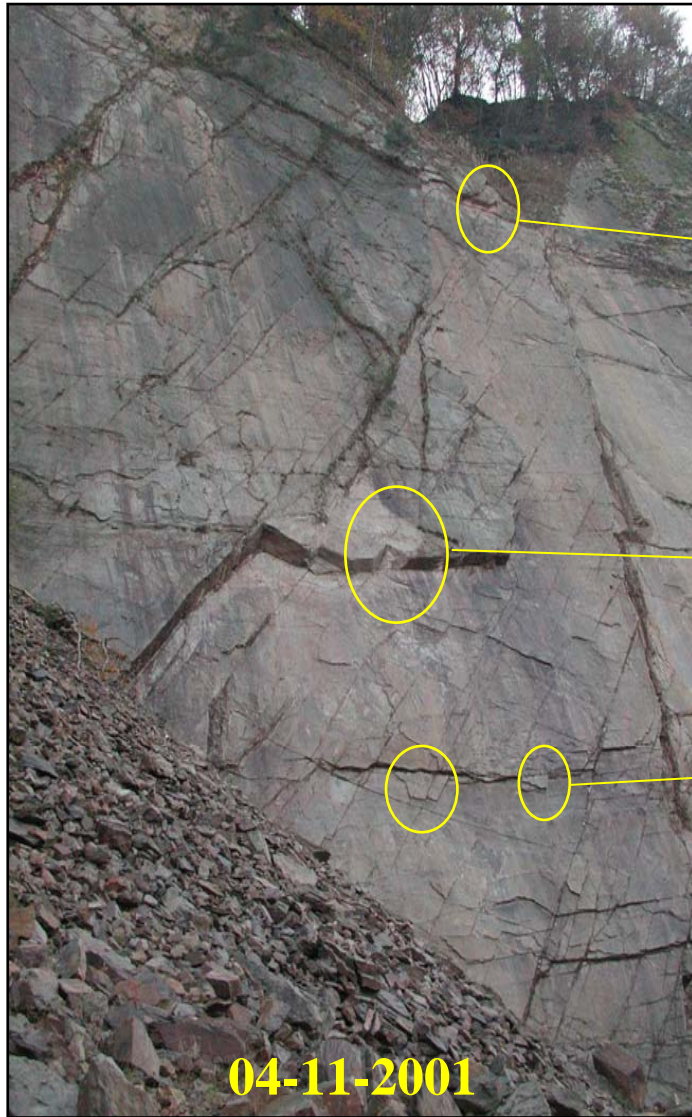


25/09/2010

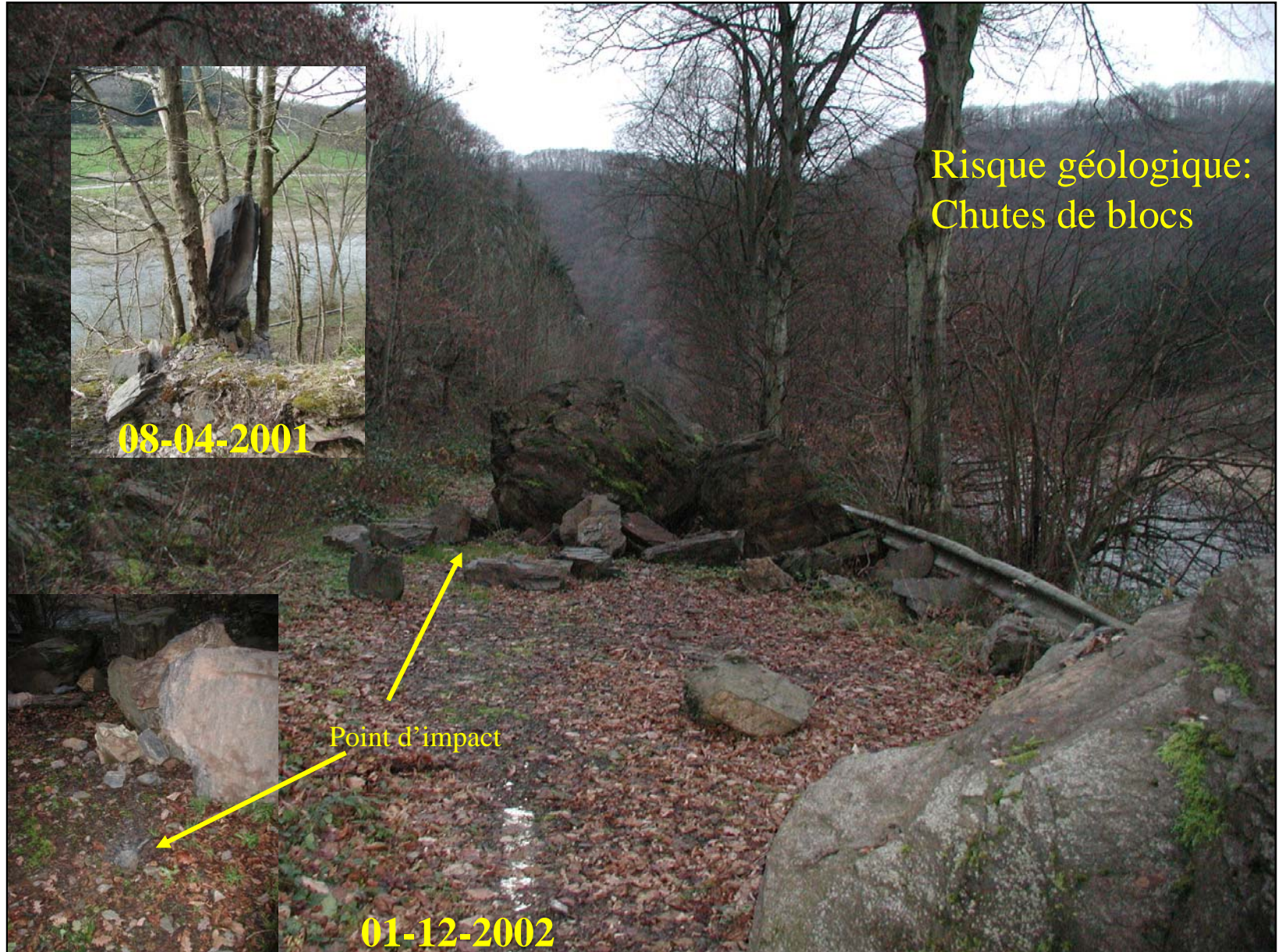
Evolution de la falaise



Evolution de la falaise



Evolution de la falaise



Etudes

- **1997 - 1998**

Objectifs : comprendre et évaluer l'aléa

- forages
- géophysique : sismique réfraction et tomographie sismique

- **2007 - 2009**

Objectifs : Quantifier les possibilités d'éboulement après la suppression de la dalle, évaluer l'aléa et le risque et envisager des remédiations

- campagne de reconnaissances complémentaires :

- forage destructif
- tomographie sismique : préciser la structure et l'état de compacité de la roche située à l'arrière de la dalle de quartzite
- lever topographique

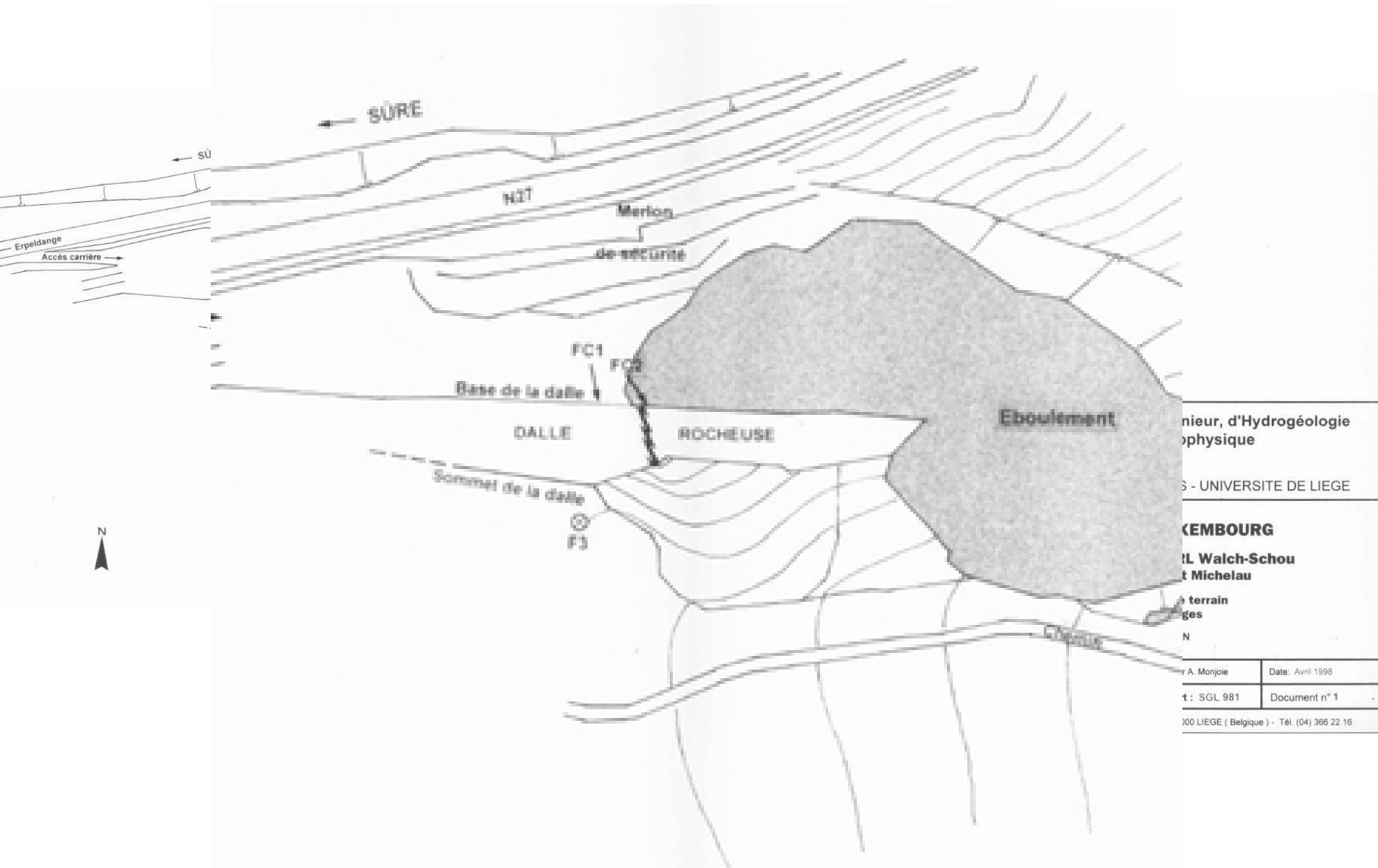
- modélisation du massif

- étude de la stabilité du massif
- quantification des volumes rocheux susceptibles de s'ébouler suite à la suppression de la dalle de quartzite

1997 - 1998

- 2 forages obliques au pied de la dalle de quartzite
- 1 forage vertical
- 10 sondages sismique - réfraction
- 1 tomographie sismique (ULg)
- lever topographique (Service Géologique du Grand-Duché de Luxembourg)

Reconnaitances

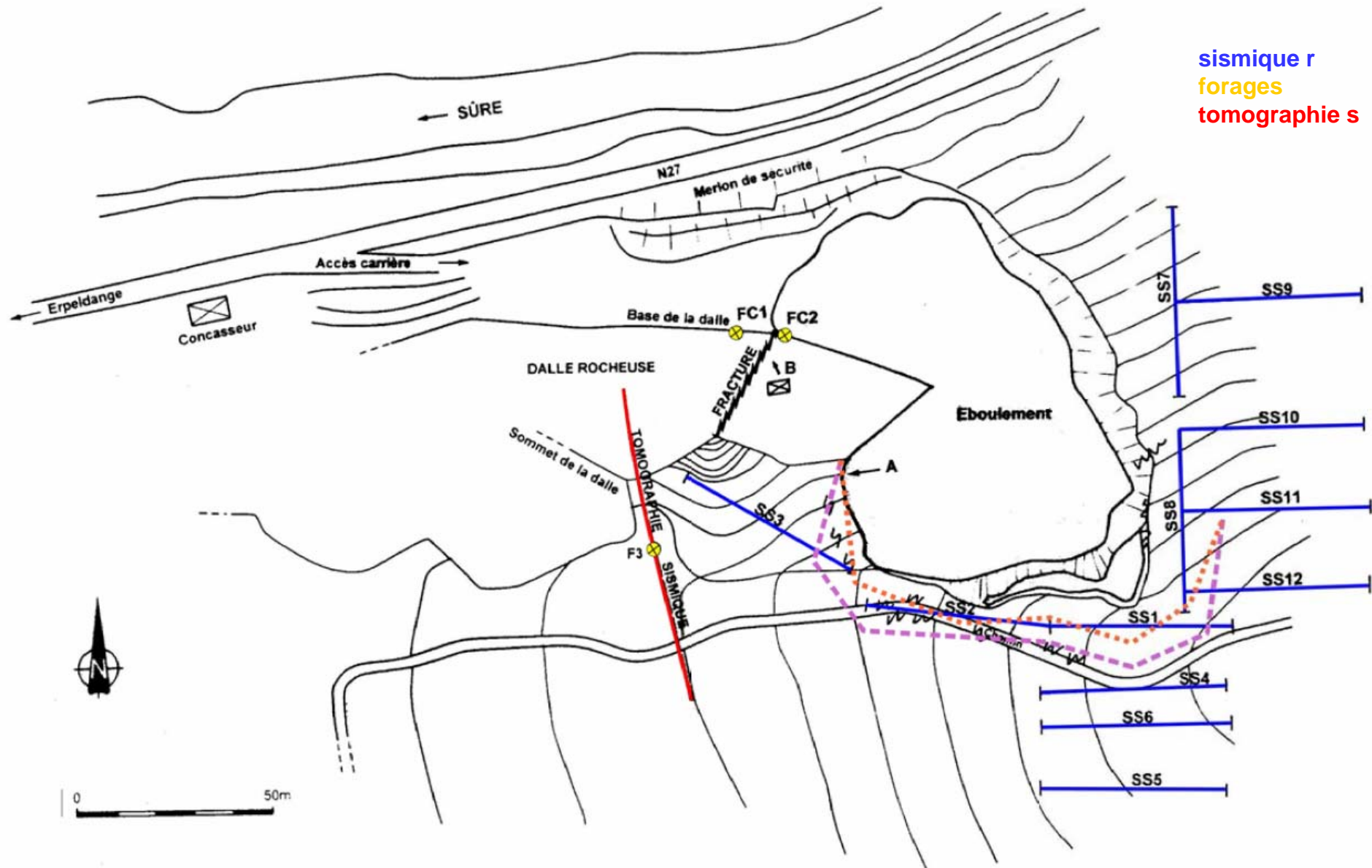


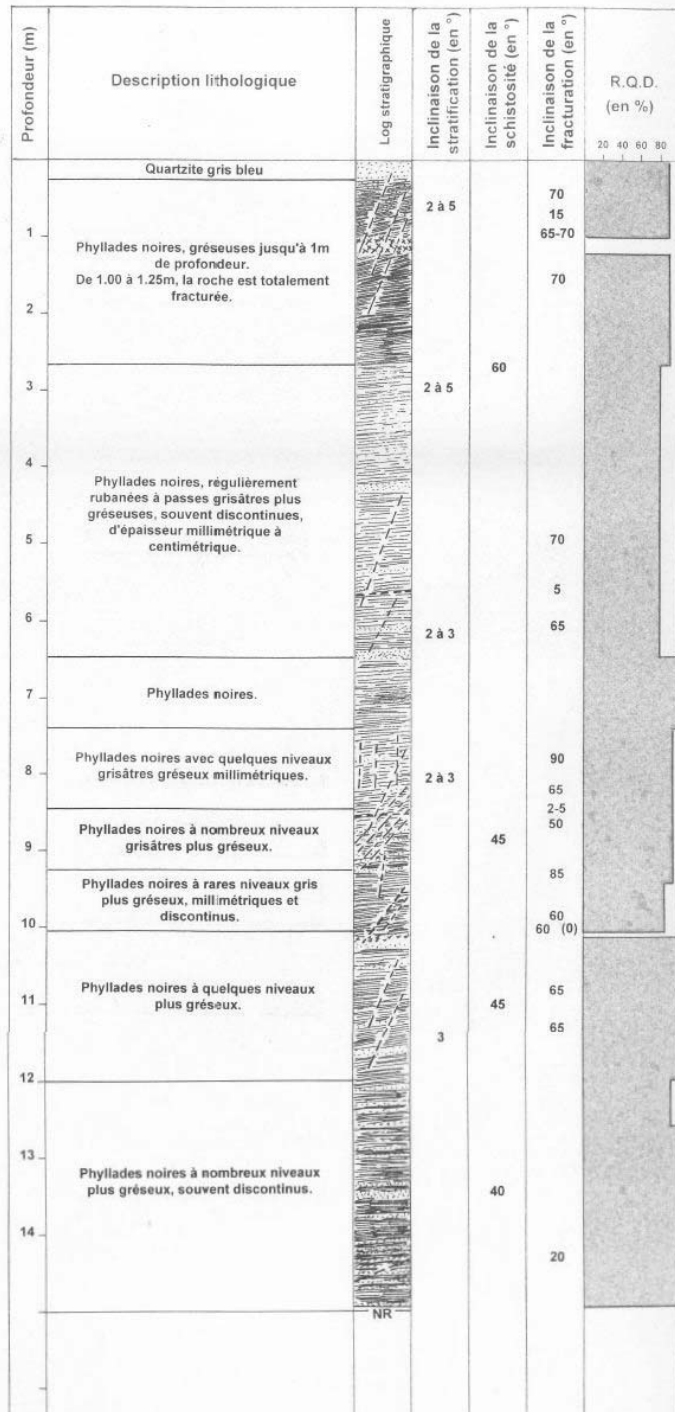
...nieur, d'Hydrogéologie
...physique
...S - UNIVERSITE DE LIEGE
EMBOURG
...L Walch-Schou
...t Michelau
...terrain
...ges
N

A. Monjoie	Date: Avril 1998
t: SGL 981	Document n° 1
300 LIEGE (Belgique) - Tél. (04) 366 22 16	

Reconnaitances

sismique r
forages
tomographie s





Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie
et de Prospection Géophysique

*

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES - UNIVERSITE DE LIEGE

GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG

*

Carrière à ciel ouvert - SARL Walch-Schou

N27 entre Erpeldange et Michelau

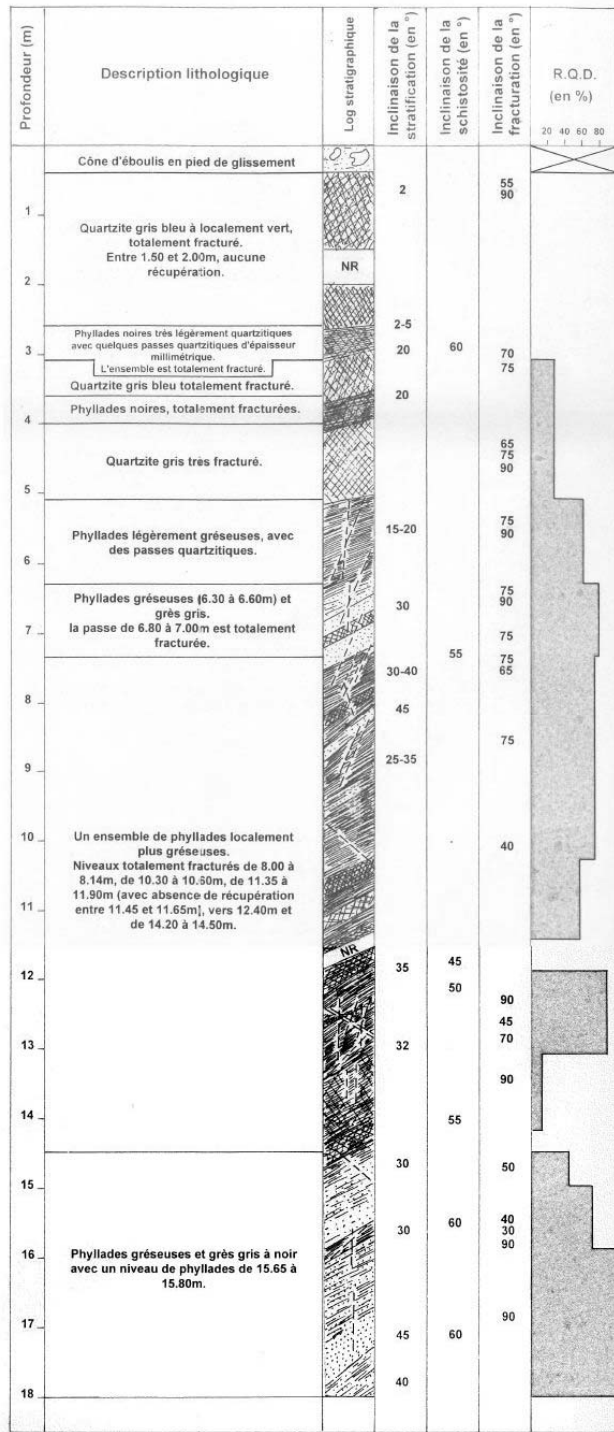
*

Etude du glissement de terrain

Résultats des forages

*

FORAGE CAROTTE FC1



LEGENDE

- Terrains meubles
- Phyllades
- Phyllades gréseuses
- Quartzite ou grès
- Zone totalement fracturée
- Lacune de récupération
- Fracture

Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection Géophysique

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES - UNIVERSITE DE LIEGE

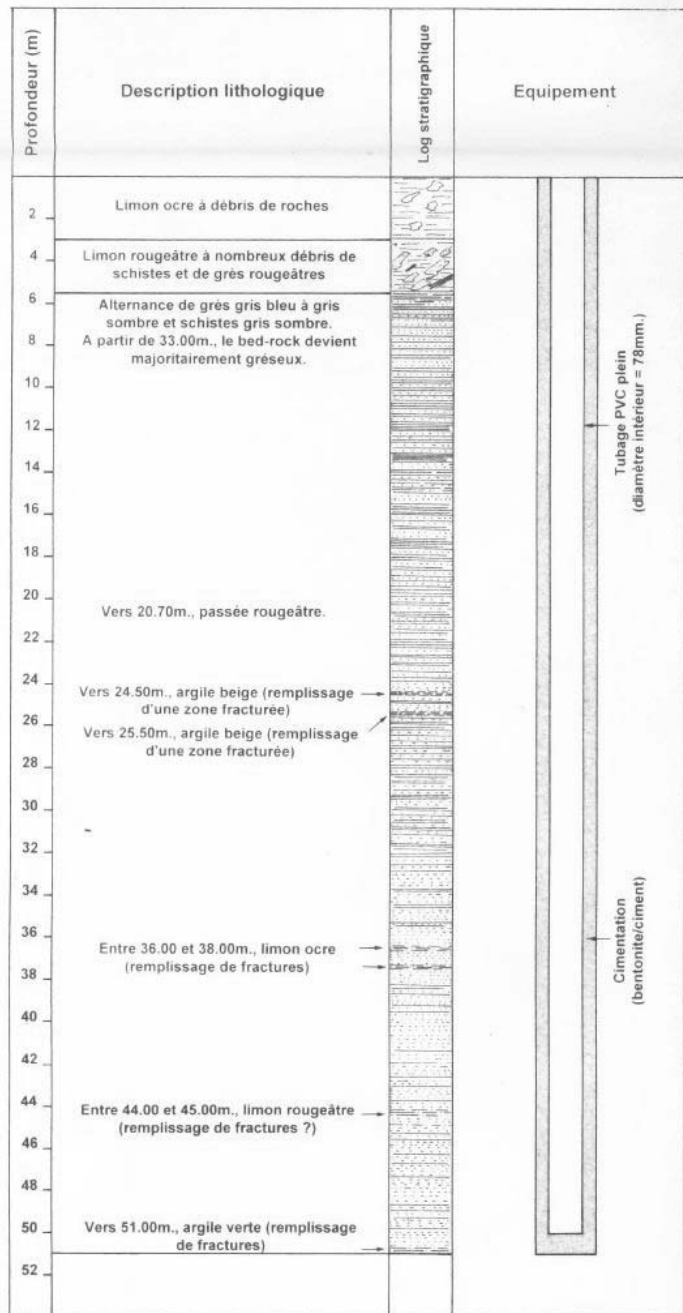
GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG
*
Carrière à ciel ouvert - SARL Walch-Schou
N27 entre Erpeldange et Michelau

*
Etude du glissement de terrain
Résultats des forages






*
FORAGE CAROTTE FC2

Dresse par Ph. Hemroulle Dessiné par R. Thiry Vérifié par A. Monjeu Date: Avril 1998

Echelle: Rapport: **SGL 981** Document n° **3**



LEGENDE

-  Limon à débris de roches
-  Schistes
-  Grès
-  Argile
-  Limon

Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection Géophysique

*

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES - UNIVERSITE DE LIEGE

GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG

*

Carrière à ciel ouvert - SARL Walch-Schou N27 entre Erpeldange et Michelau


*

Etude du glissement de terrain

Résultats des forages

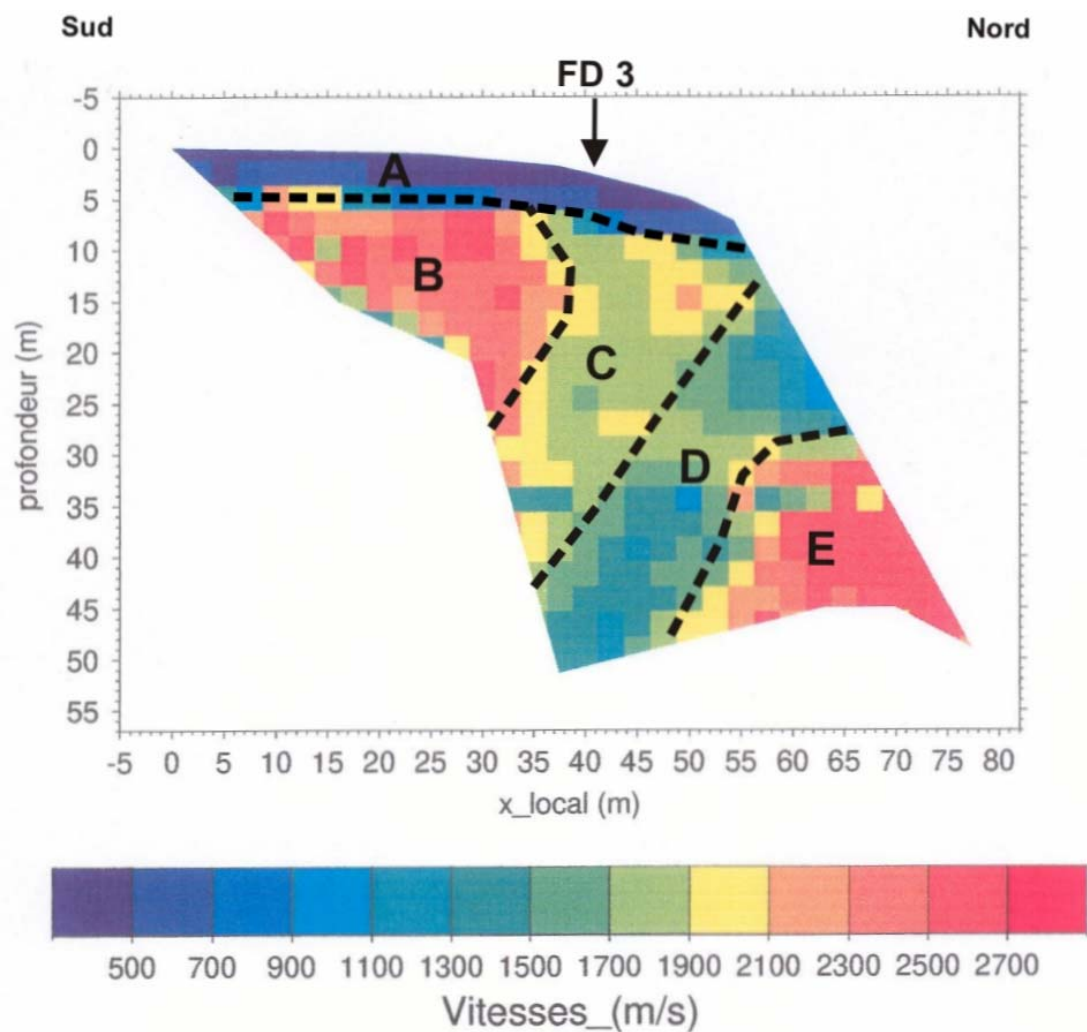
*

FORAGE DESTRUCTIF F3

Dressé par Ph. Hemroulle	Dessiné par R. Thiry	Vérifié par A. Monjoie	Date: Avril 1998
Echelle 	Rapport : SGL 981		Document n° 4

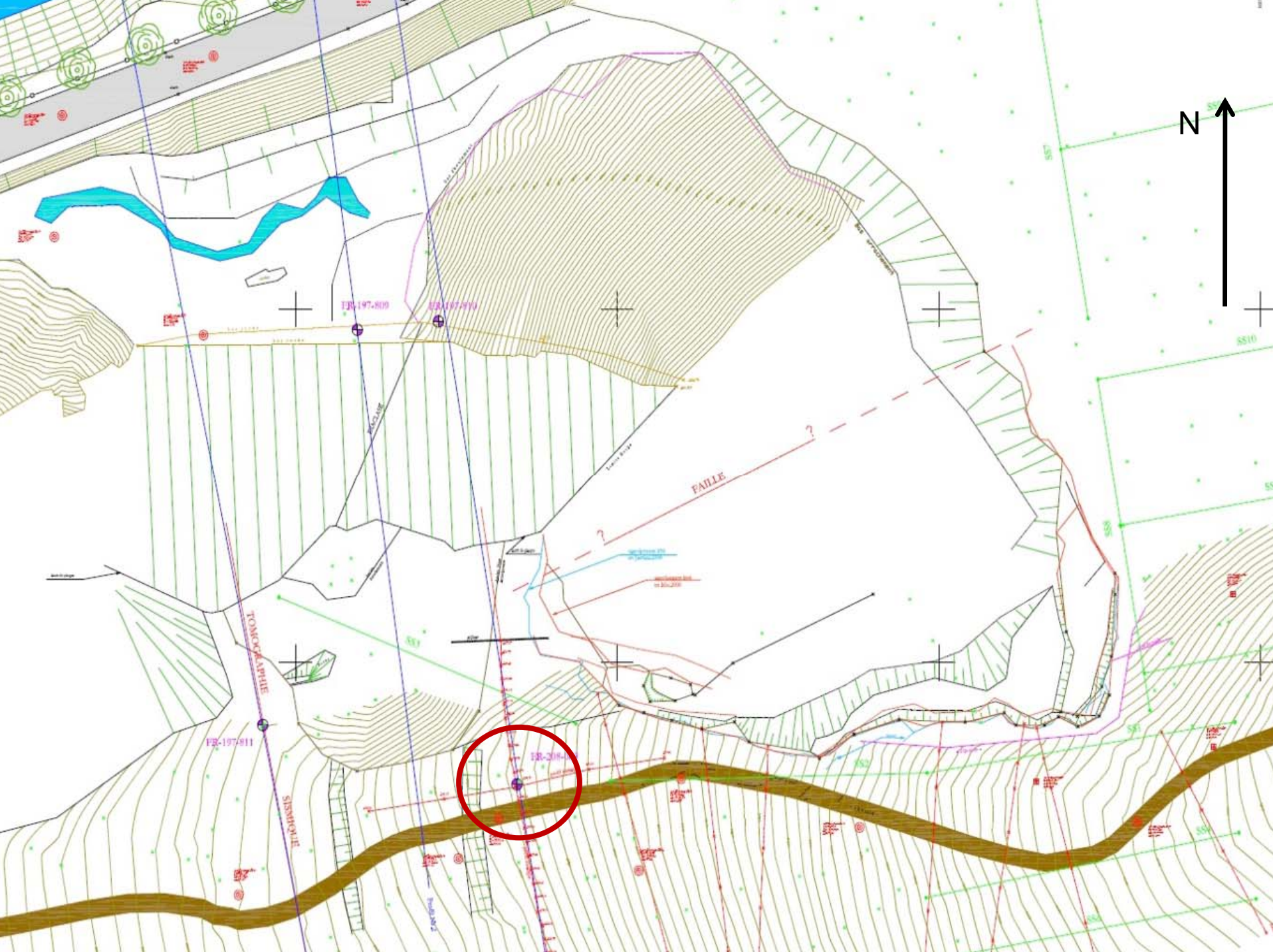
Université de Liège au Sart Tilman - Bâtiment B19 - Parking 36 - 4000 LIEGE (Belgique) - Tél. (04) 366 22 16

Tomographie sismique 1998



2007 - 2009

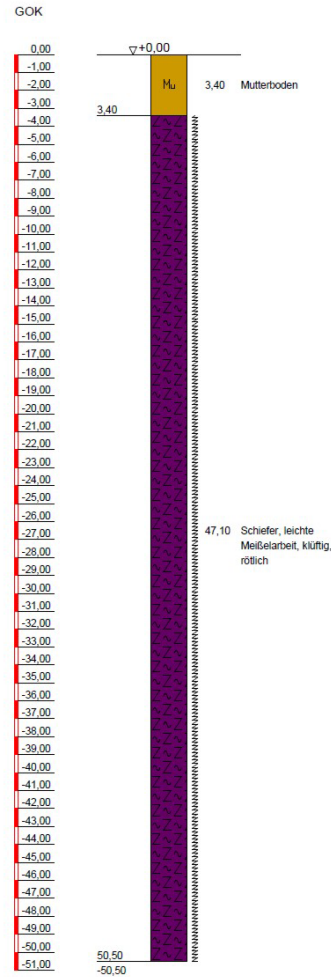
- forage de 55.5 m (Geopartner)
 - diagraphies différées (EGS)
 - gamma-ray
 - gamma-gamma
 - conductivité
 - température
 - équipé en vue de la prospection géophysique
- tomographie sismique (ULg)
- lever topographique (Service Géologique du Grand-Duché de Luxembourg)



Reconnaitssances



B1
Geologisches Profil

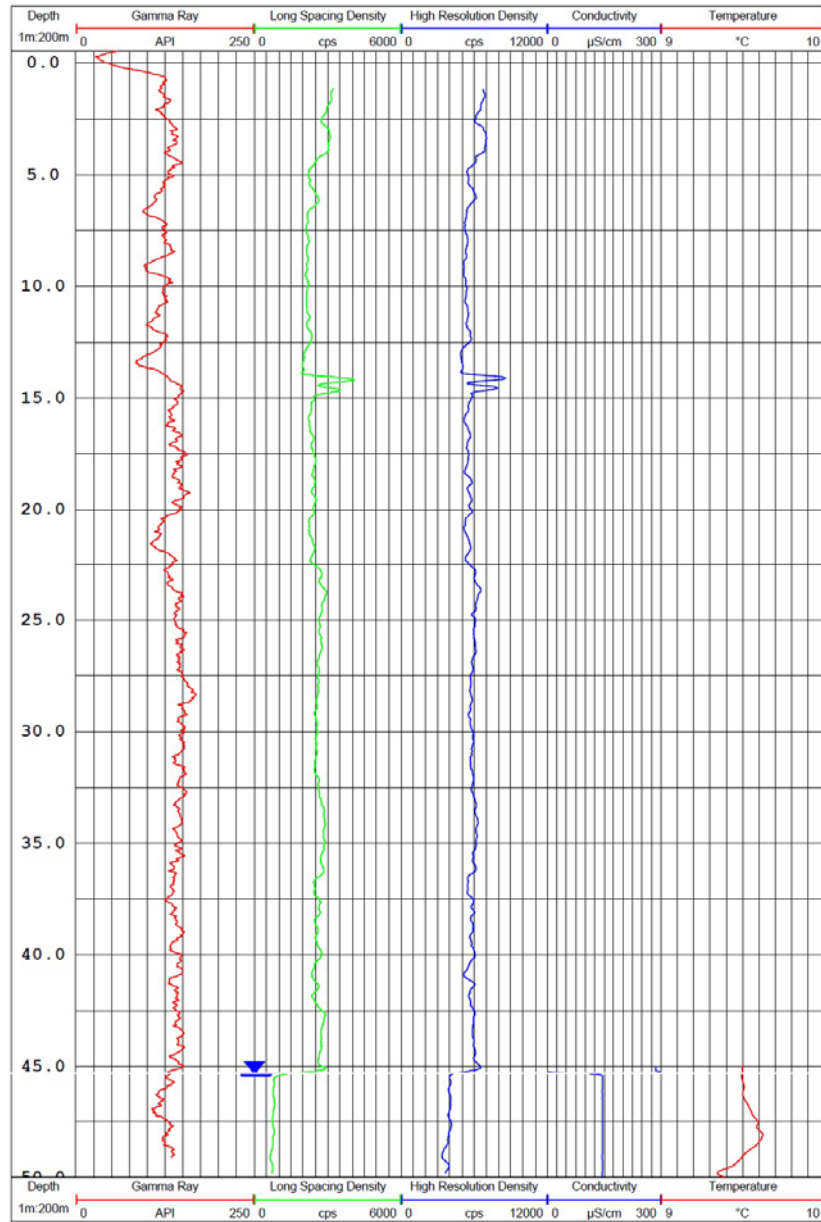
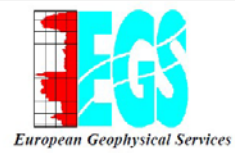


B1
Ausbau der Messstelle

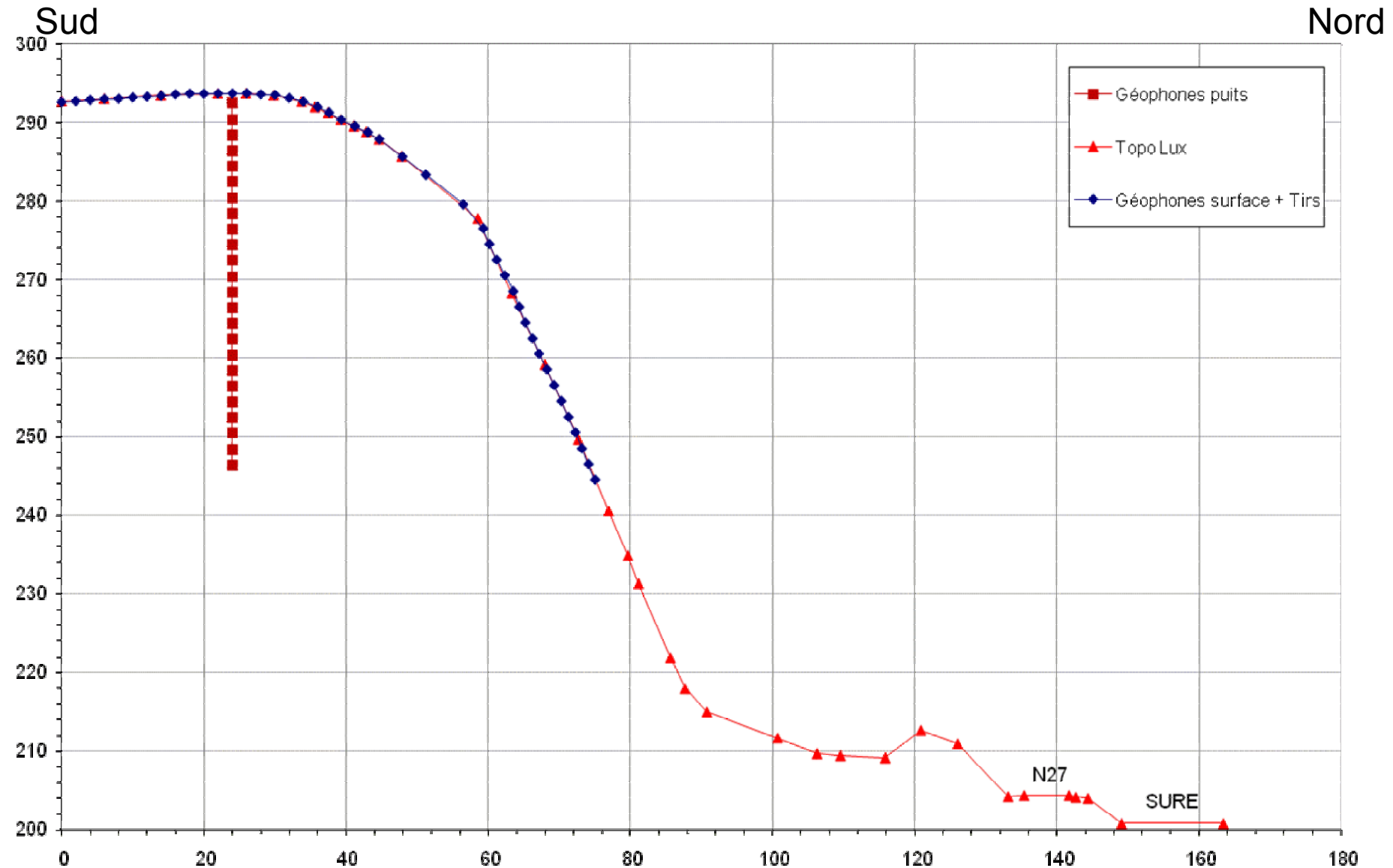


k.GW 09.12.09

FORAGE N° FR-208-069
SITE / PROJET Michellau-SGP-209-002
REFERENCE Sol / Niveau statique : 45,30m
DATE 02/04/2009



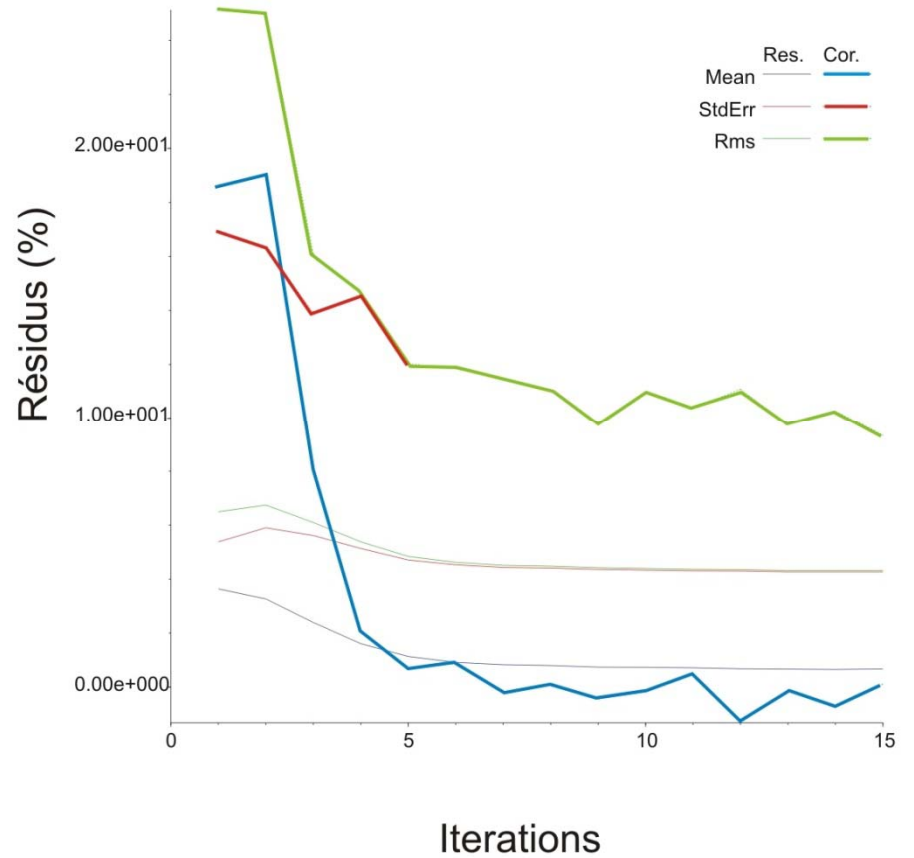
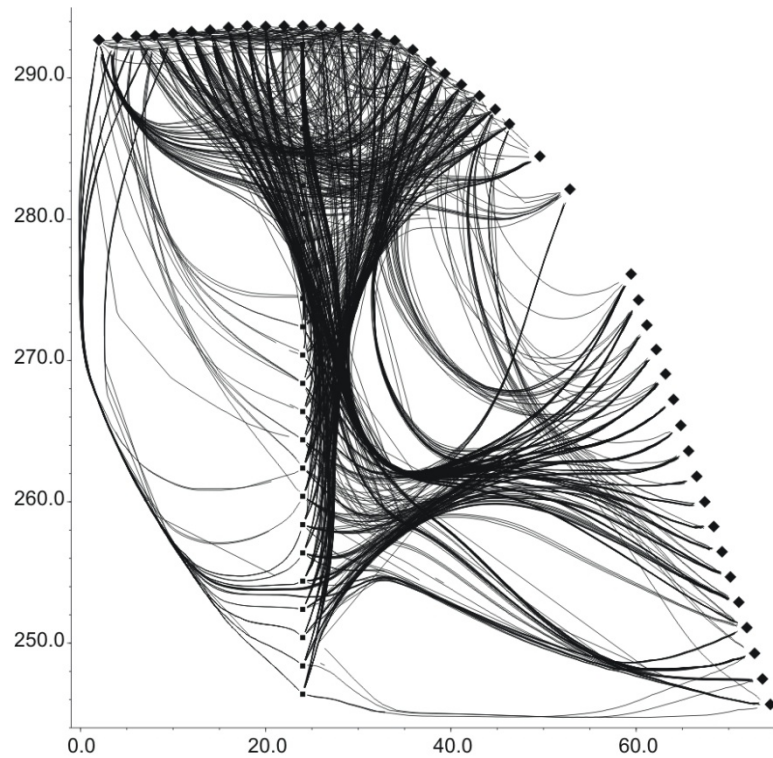
Coupe topographique - position des points de tir



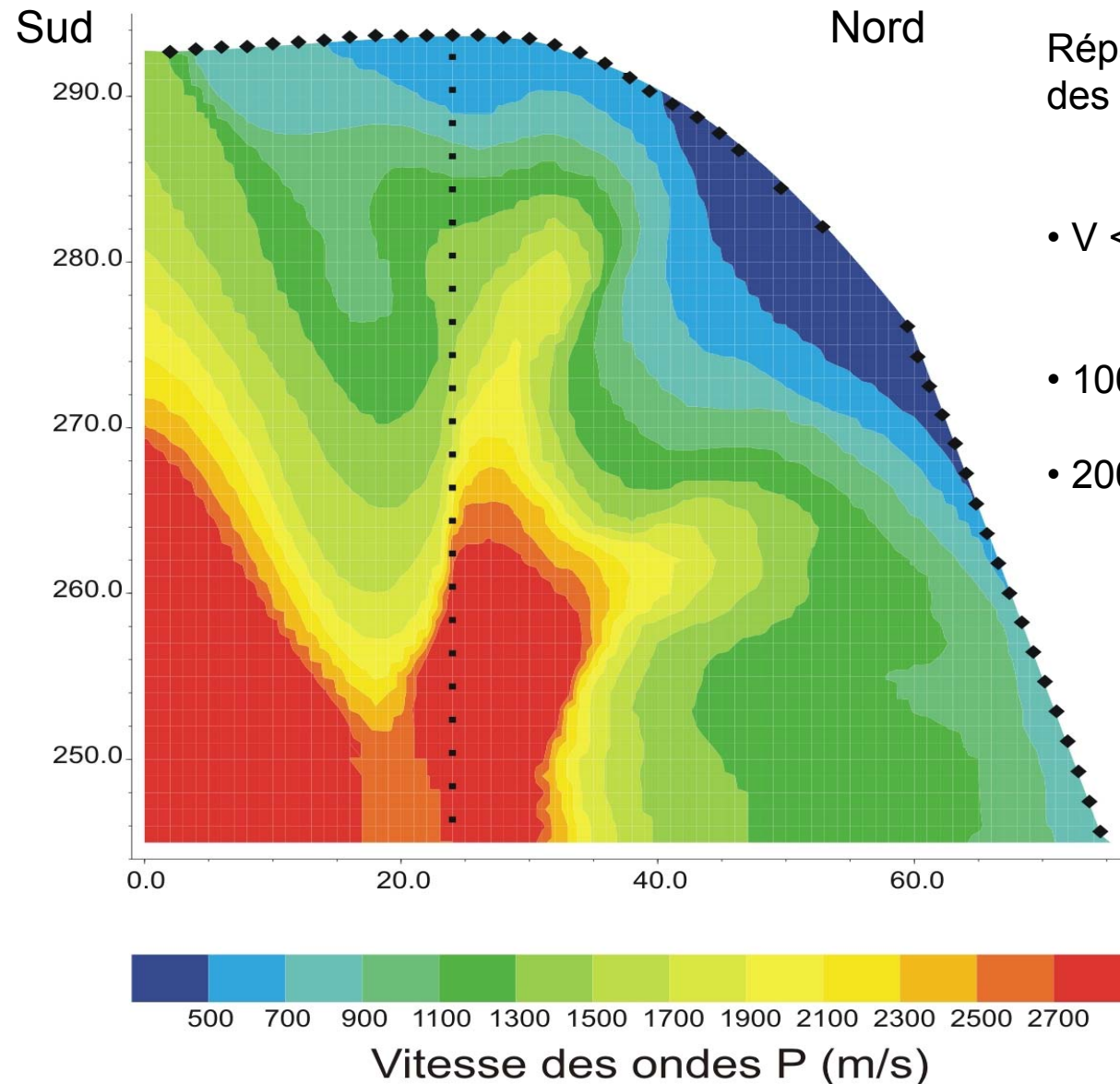
Tomographie sismique - rais - résidus

Sud

Nord



Tomographie sismique



Répartition en 3 catégories en fonction des vitesses des ondes de compression

- $V < 1000$ m/s : colluvium
roche très altérée,
ameublie
- $1000 < V < 2000$ m/s : bed-rock
altéré et fracturé
- $2000 < V$: bed-rock moyennement
compact

Note :

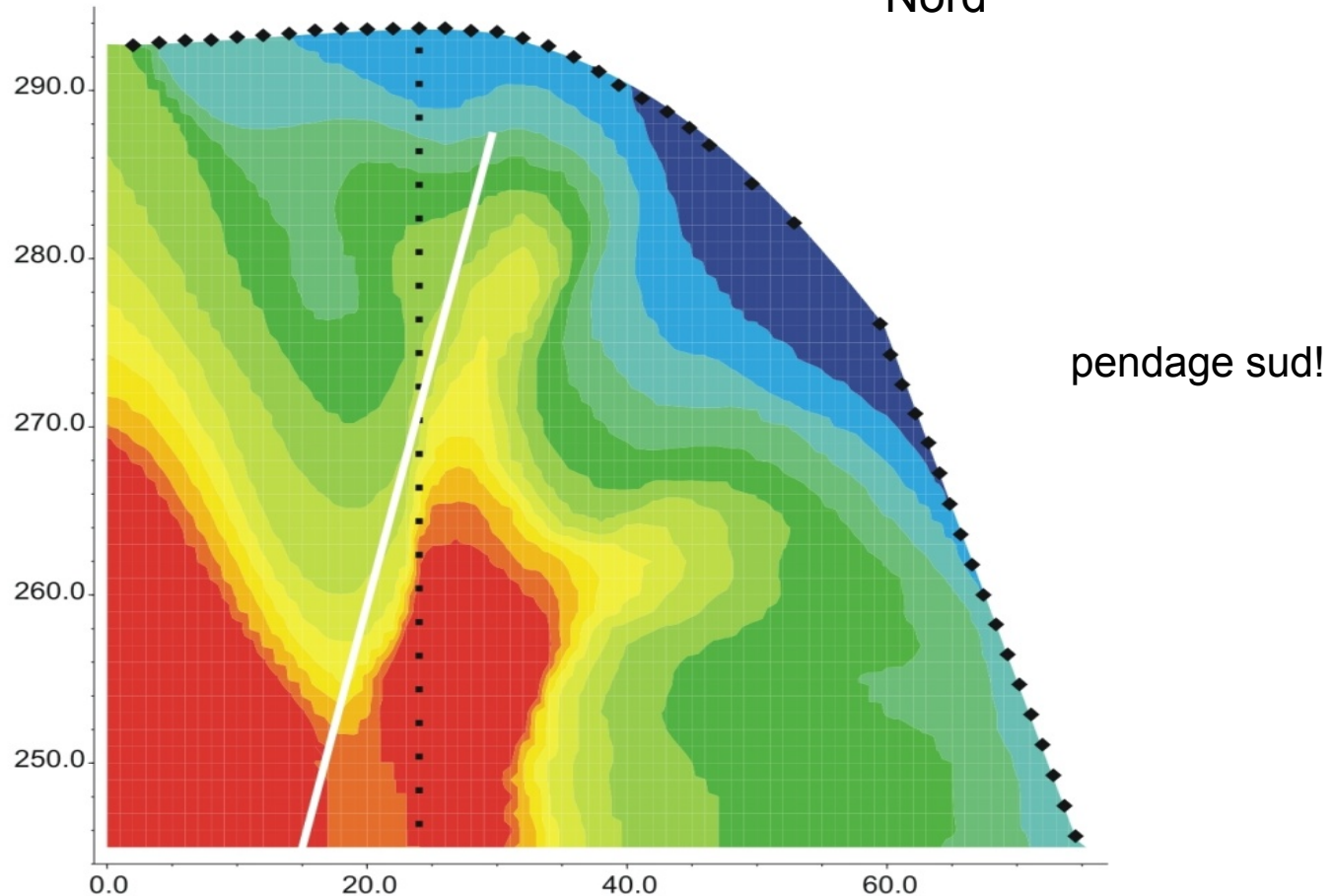
La résolution de la méthode et la disposition des rais ne permettent pas de mettre en évidence la dalle de quartzite

Tomographique sismique - interprétation

Interprétation possible : passage d'une faille
(rejet dans terrains compacts, pas dans le colluvium)

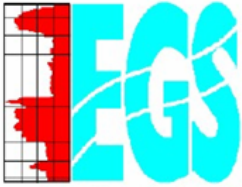
Sud

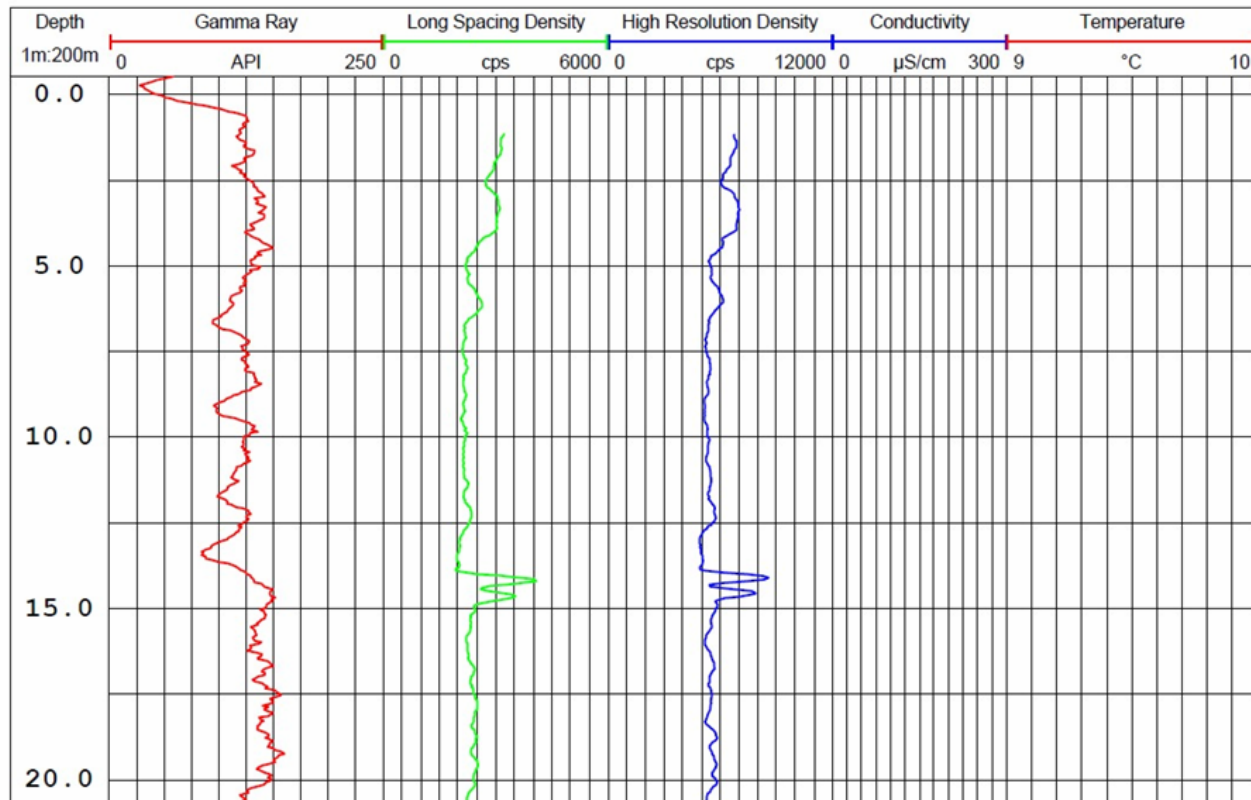
Nord



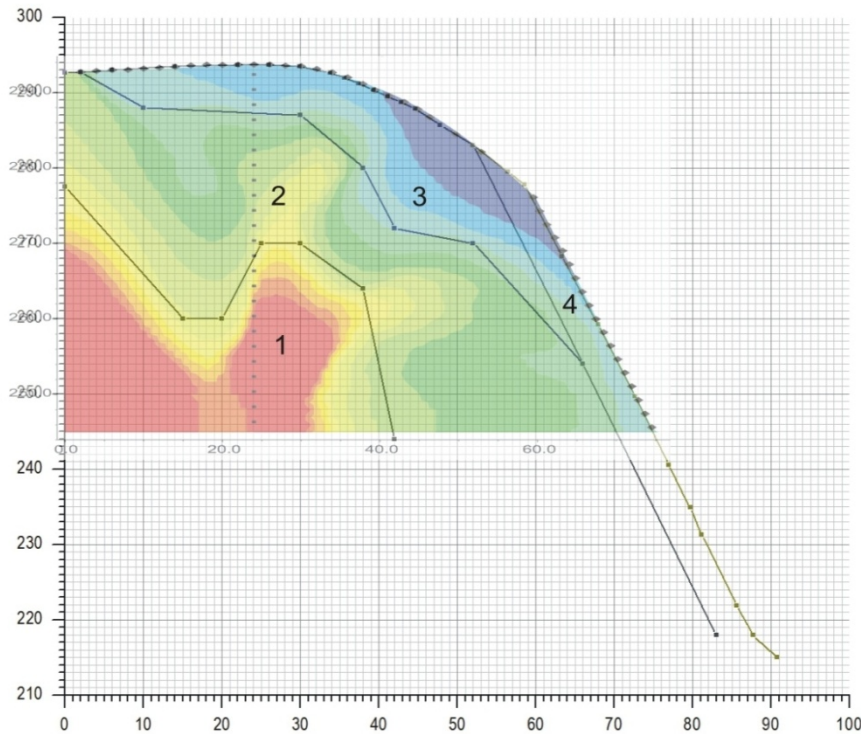
Tomographique sismique - interprétation

présence d'une faille : explication possible de l'anomalie observée en diagraphie?

<i>FORAGE N°</i>	<i>FR-208-069</i>	 <i>European Geophysical Services</i>
<i>SITE / PROJET</i>	<i>Michelau-SGP-209-002</i>	
<i>REFERENCE</i>	<i>Sol / Niveau statique : 45,30m</i>	
<i>DATE</i>	<i>02/04/2009</i>	



Résultats des reconnaissances - structure du massif



Modélisation

4 matériaux

- propriétés déterminées sur base de
 - observations de terrain
 - données existantes
 - paramètres de RocLab
- c et phi définis via le critère de Hoek & Brown (et RocLab®)

matériau		c	phi	gamma
		kPa	°	kN/m ³
1	bedrock sain	10000	60	25
2	bedrock altéré	320	36	25
3	colluvium	10	30	23
4	quartzite	1800	58	27
5	terrain remanié	50	10	25
6	diacalse dans quartzite	380	31	n.a.

Stabilité

- méthodes

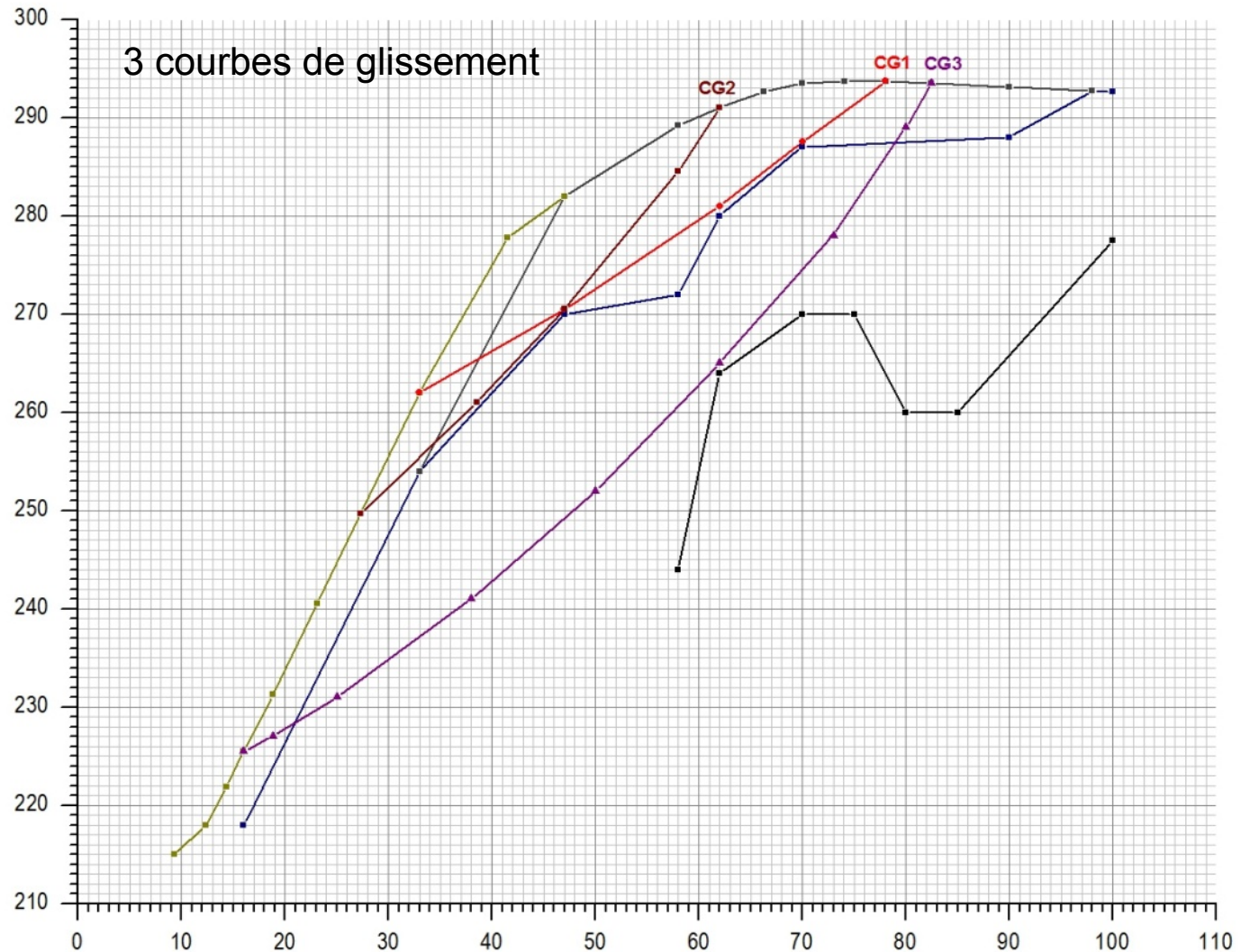
- méthodes de stabilité des pentes classiques (Fellénius, Bishop, Janbu)
"à la rupture - tranches"
- méthode aux éléments finis
- méthode analytique de stabilité des blocs rocheux

- cas considérés

- talus avec présence de la dalle de quartzite
- talus après suppression de la dalle de quartzite
- talus avec dalle de quartzite et passage de la ligne de glissement dans la dalle de quartzite sur une surface avec les caractéristiques mécaniques des diaclases

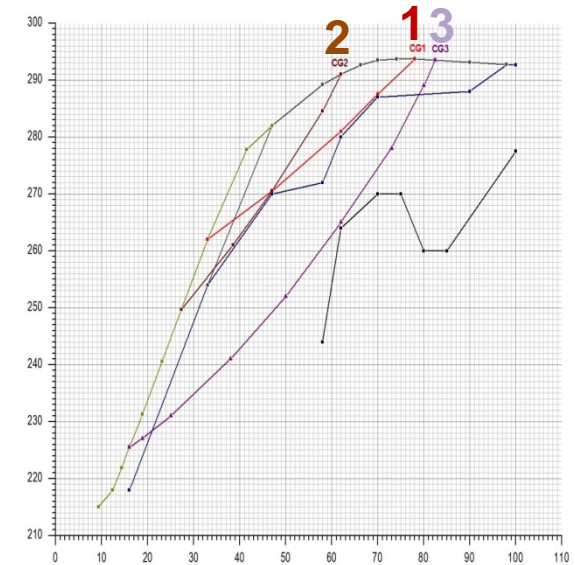
(pas de séisme, pas de nappe)

Calculs de la stabilité - méthodes classiques "à la rupture - tranches"



Méthodes "des tranches" - résultats

		Coefficient de sécurité			
		Fellenius	Bishop	Janbu 1ère it.	Janbu
cas 1	CG1	3.52	3.19	3.01	3.74
<u>avec</u>	CG2	4.35	3.75	3.06	n.c.
dalle quartzite	CG3	2.30	2.28	1.98	n.c.
cas 2	CG1	0.94	0.95	0.93	0.92
<u>sans</u>	CG2	0.65	0.67	0.60	n.c.
dalle quartzite	CG3	2.00	2.00	1.75	n.c.
cas 3	CG1	1.46	1.47	1.41	1.43
<u>avec diaclase</u> dans	CG2	1.36	1.38	1.15	1.20
dalle quartzite	CG3	1.95	1.96	1.73	1.76



cas 1 : le massif est **stable** si la dalle de quartzite se maintient

cas 2 : la disparition de la dalle de quartzite déstabilise fortement le colluvium.
 Une **rupture** se produira d'abord selon les courbes de glissement CG2 et CG1.
 La courbe profonde passant dans le bed-rock altéré reste **très stable**.

cas 3 : la présence d'une discontinuité dans la dalle de quartzite réduit les coefficients de sécurité à des valeurs faibles (1.15 à 1.20 pour la courbe CG2)
mais encore supérieurs à l'unité.

Cependant, une action déstabilisante complémentaire (présence d'eau par exemple) sera susceptible de faire passer le coefficient de sécurité en dessous de l'unité.

Il est possible que la rupture de 1997 ait suivi le mécanisme décrit au cas 3 avec l'aggravation provoquée par les précipitations des jours précédant l'événement.

Concepts théoriques:

- Conservation de la quantité de mouvement (Quasi-static condition)

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \rho g_i = 0$$

- Loi de comportement



$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

$$f \equiv \sigma_1 - \sigma_3 - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi - 2c \cos \phi = 0$$

► Détermination du coefficient de sécurité

Application du poids propre

Diminution des paramètres de résistance jusqu'à non convergence
(Méthode 'phi-c reduction')

Pas de définition d'une ligne de rupture à priori !

Code de calcul utilisé: Code aux éléments finis Lagamine, développé à l'Université de Liège depuis une trentaine d'années.

► Calculs effectués:

Caractéristiques du colluvium sont si faibles qu'il n'est pas possible de les diminuer.

Tous les calculs ont été réalisés avec **une dalle de quartzite sans diaclase**.

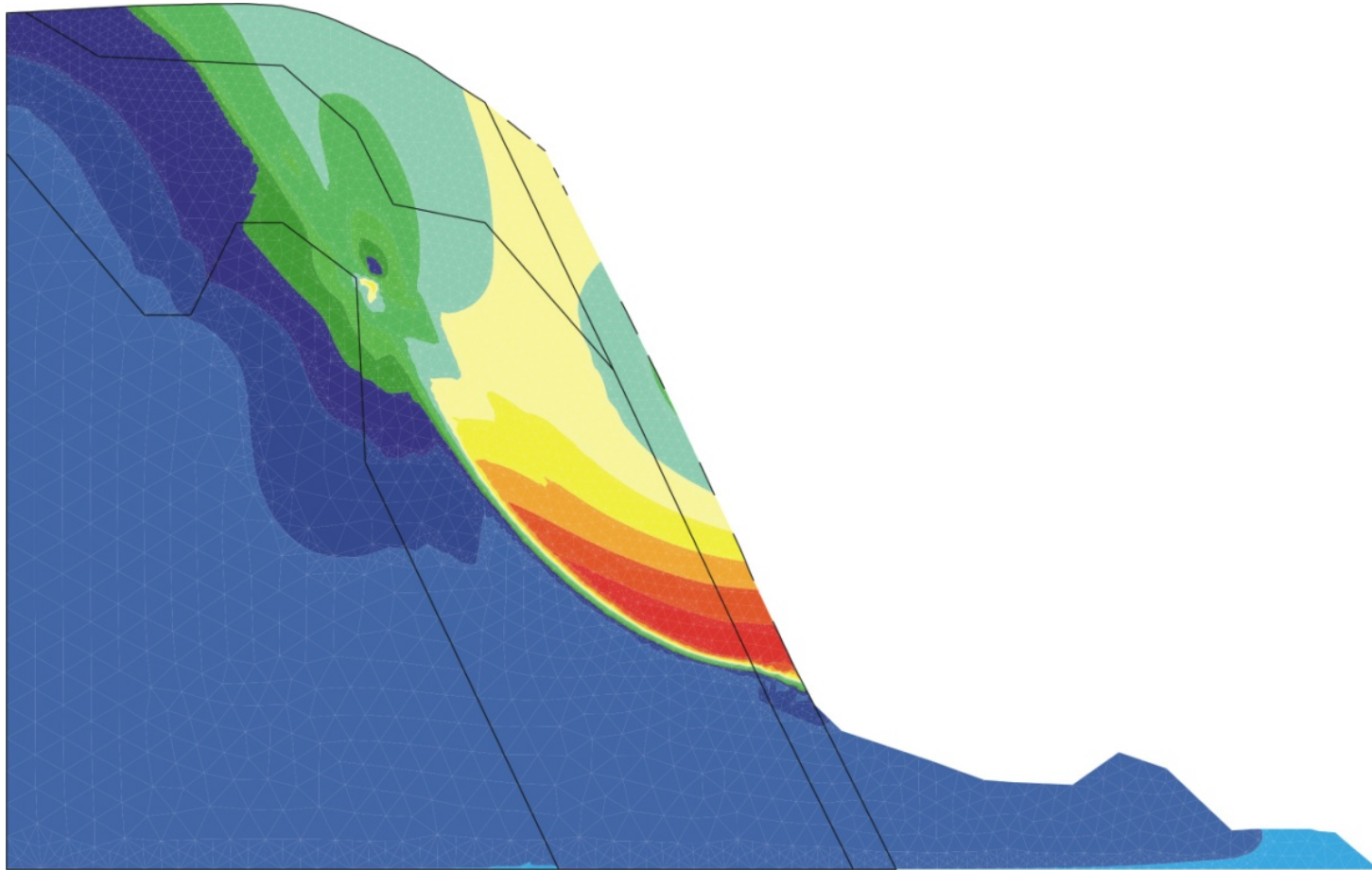
Cas 1_3: Réduction de la résistance uniquement dans le bedrock altéré et la dalle de quartzite.

Etude de la rupture globale d'ensemble (CG3)

Cas 1_2: Réduction de la résistance uniquement dans la dalle de quartzite.

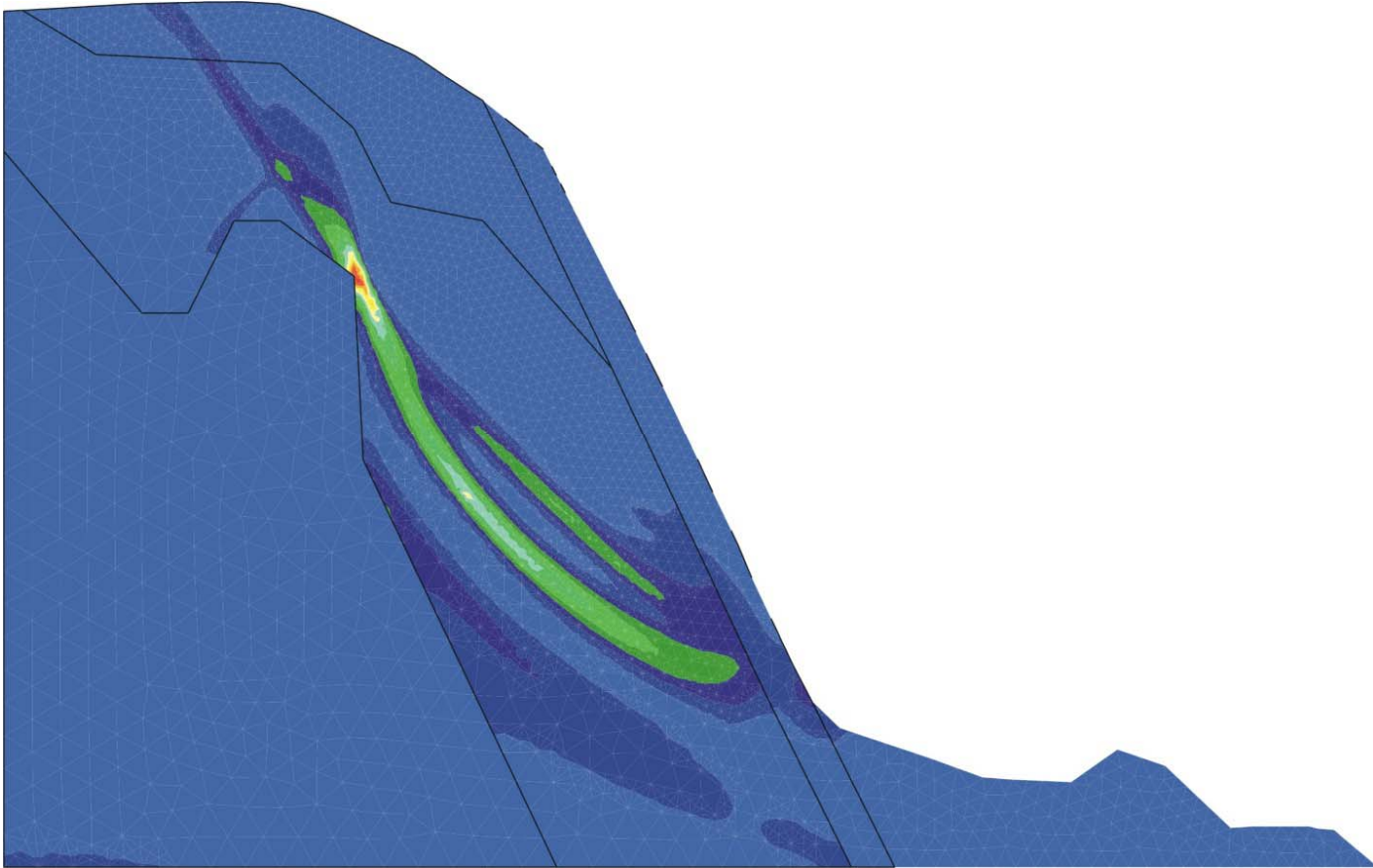
Etude de la rupture dans le colluvium (CG2)

► Cas 1_3: réduction dans bed rock altéré et quartzite



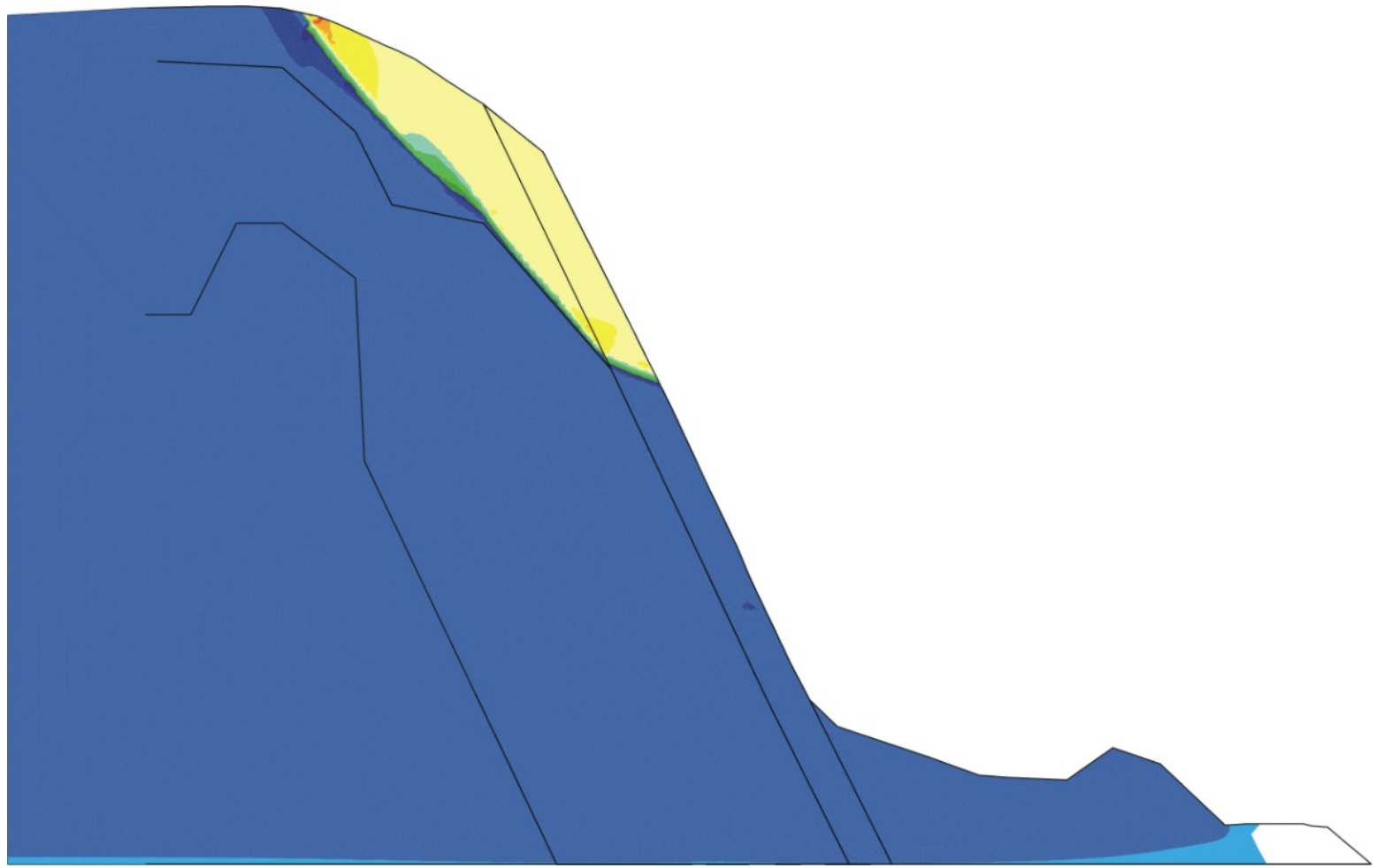
Norme des vitesses de déplacements

► Cas 1_3: réduction dans bed rock altéré et quartzite



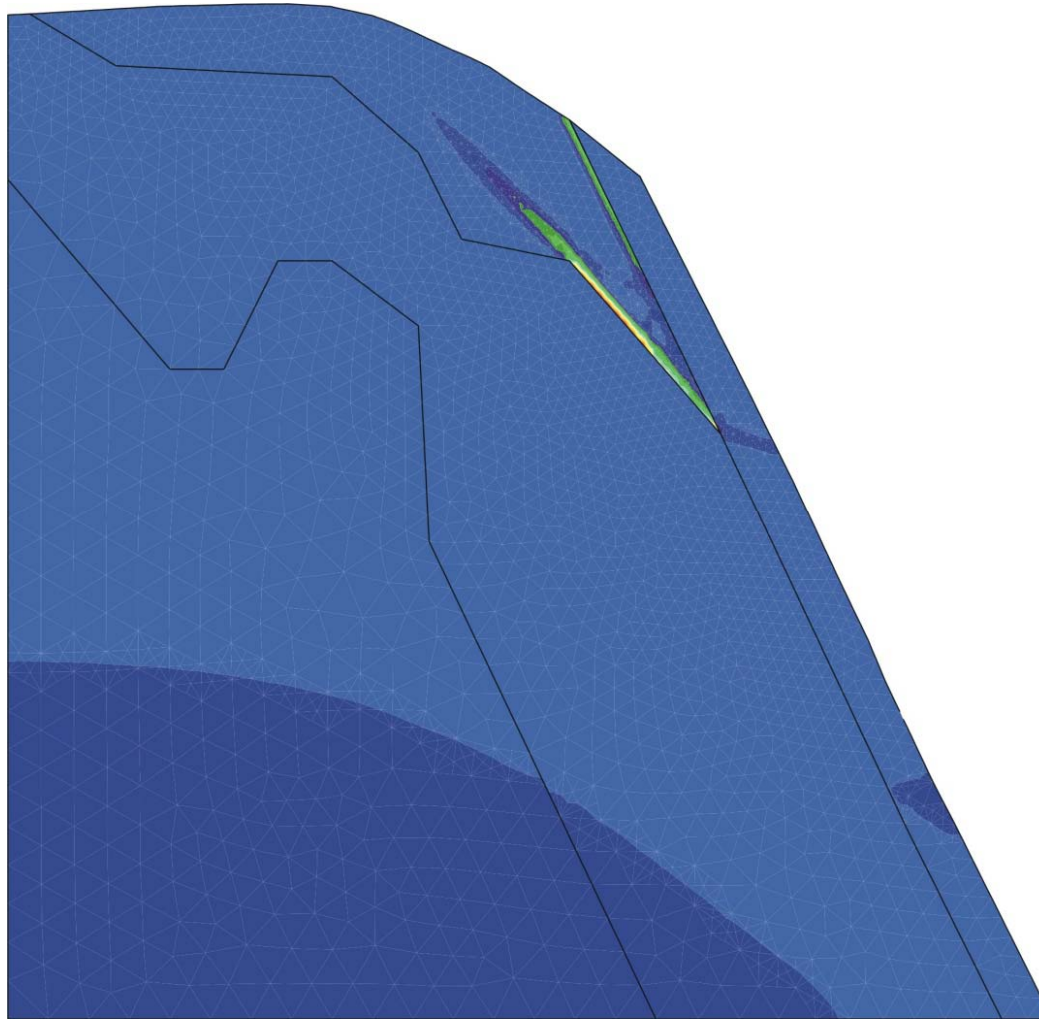
Déformation de cisaillement

► Cas 1_2: réduction dans quartzite



Norme des vitesses de déplacements

► Cas 1_2 : réduction dans quartzite



Déformation de cisaillement

Comparaison Méthode des tranches - EF

		Coefficient de sécurité			
		Fellenius	Bishop	Janbu 1ère it.	<i>El. Finis</i>
<u>Cas avec</u>	CG2	4.35	3.75	3.06	<u>5.21</u>
dalle quartzite	CG3	2.30	2.28	1.98	<u>2.27</u>

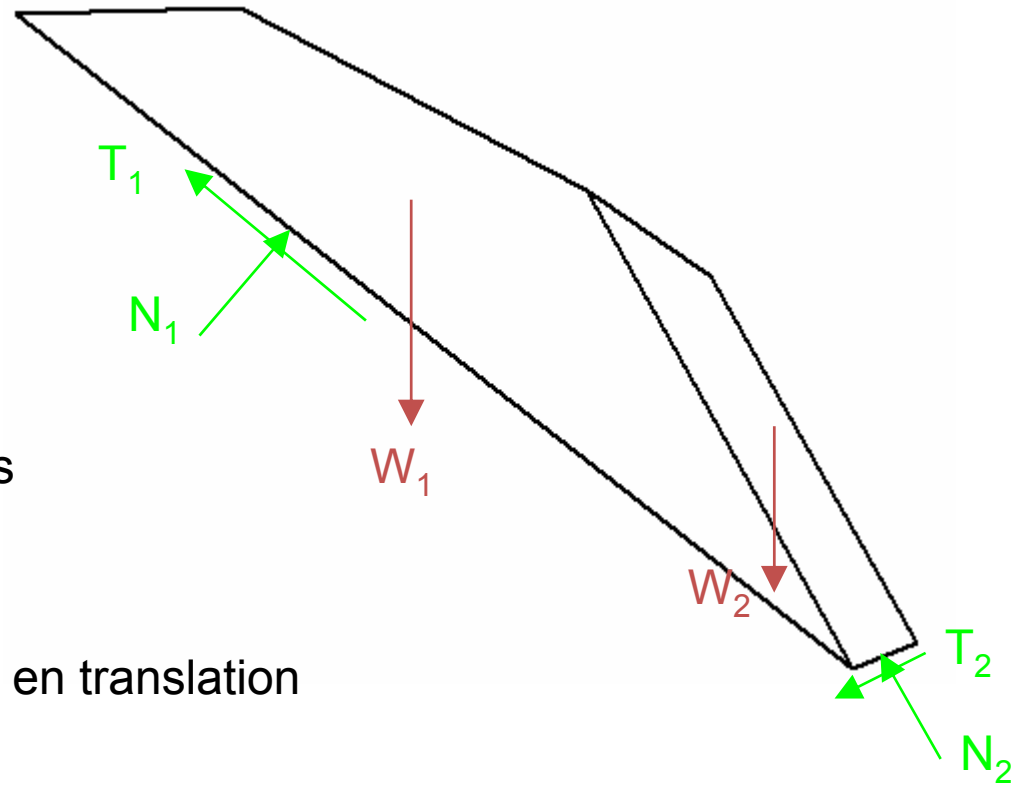
Très bonne concordance entre les deux approches

Lignes de rupture très proches

Coefficient de sécurité du même ordre de grandeur

Concepts théoriques:

1. Efforts sollicitants: W_1 et W_2
2. Efforts résistants: R_1 et R_2
3. Effort d'interaction entre blocs



Equations d'équilibre en translation

Direction de la rupture dans la dalle
perpendiculaire à la stratification

► Calculs effectués:

Etude de la rupture dans le colluvium (CG2)

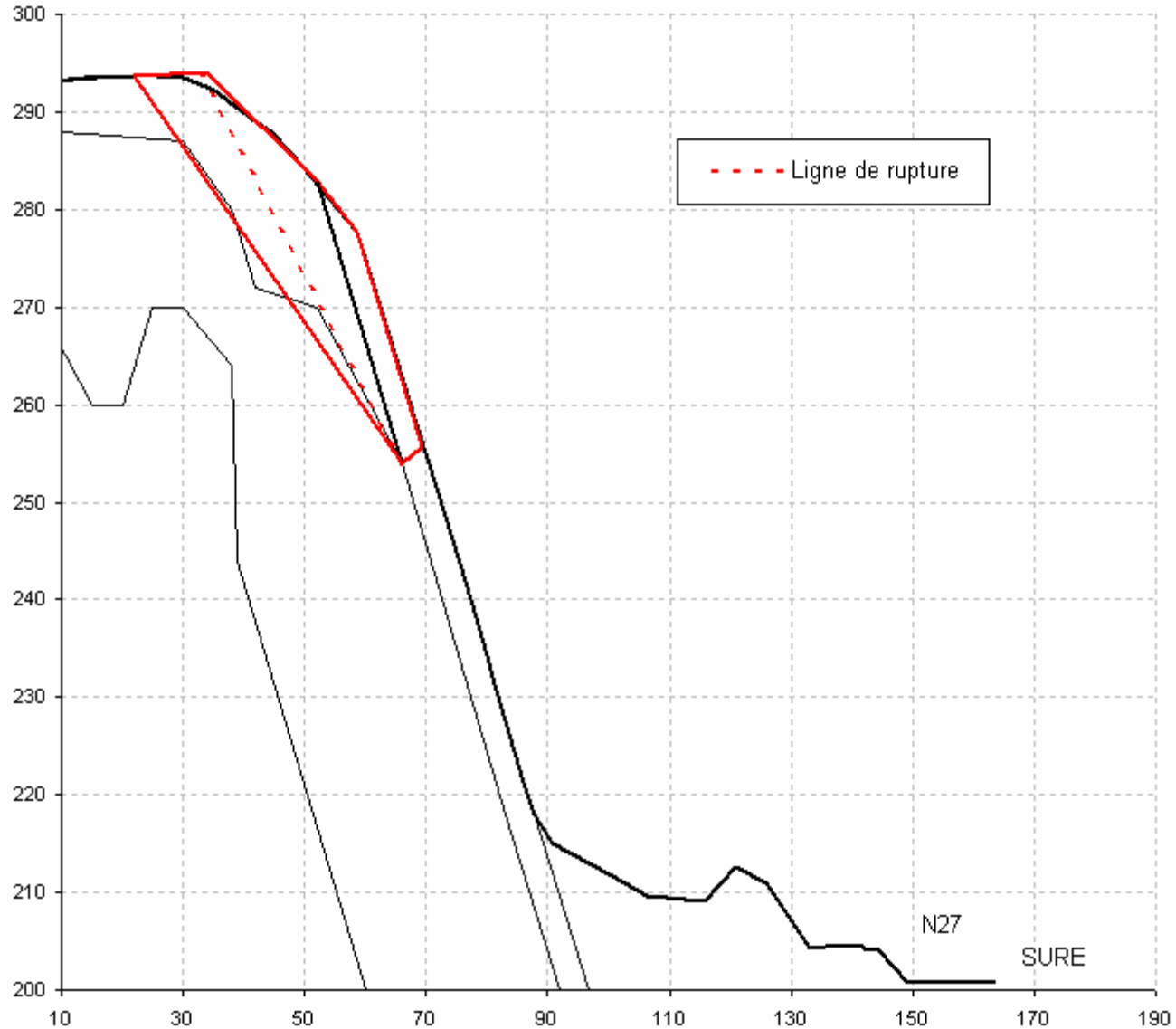
Avec dalle de quartzite
Sans dalle de quartzite
Avec diaclase dans la dalle

Etude de la rupture globale d'ensemble (CG3)

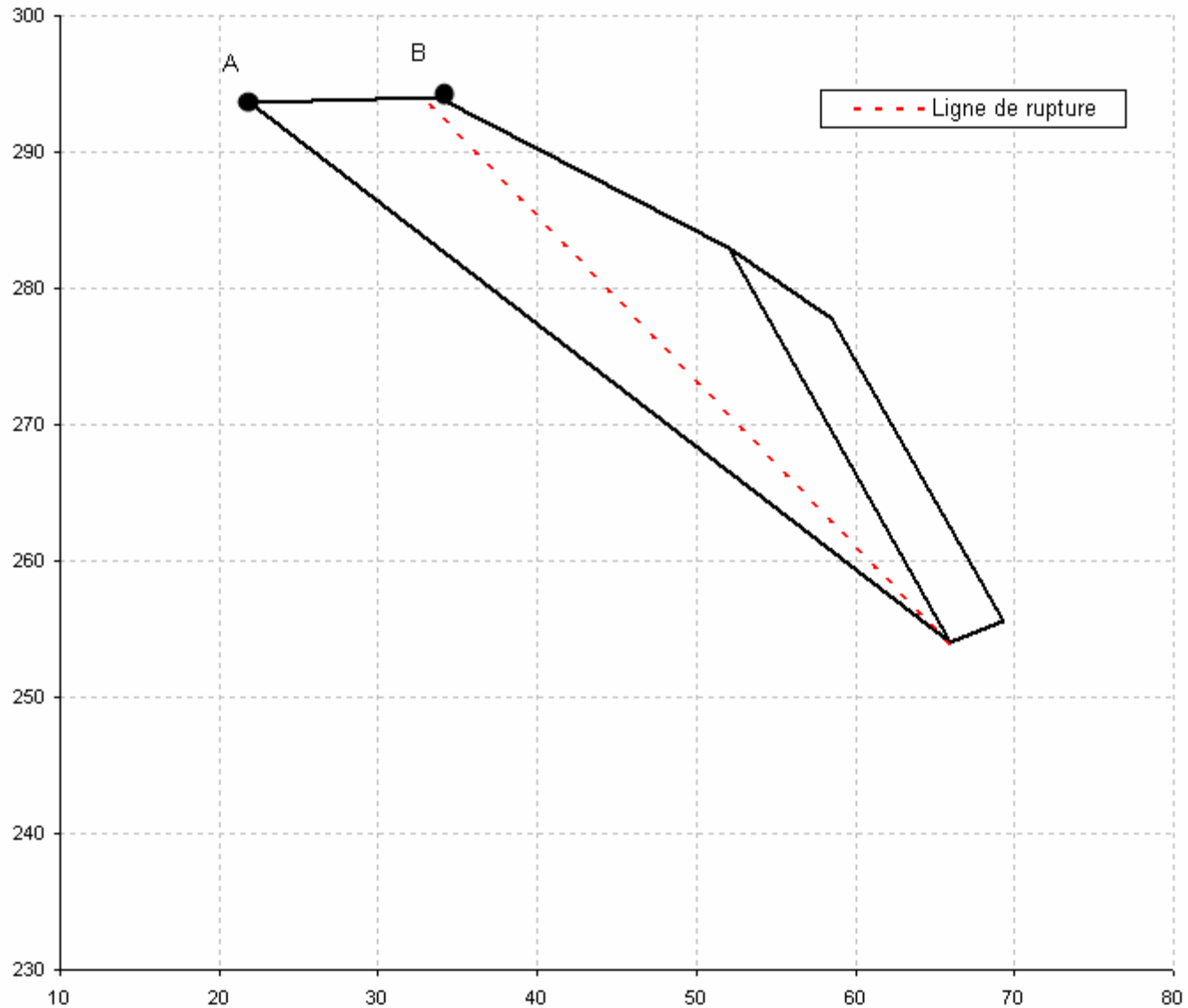
Avec dalle de quartzite
Sans dalle de quartzite
Avec diaclase dans la dalle

Définition d'une ligne de rupture à priori !

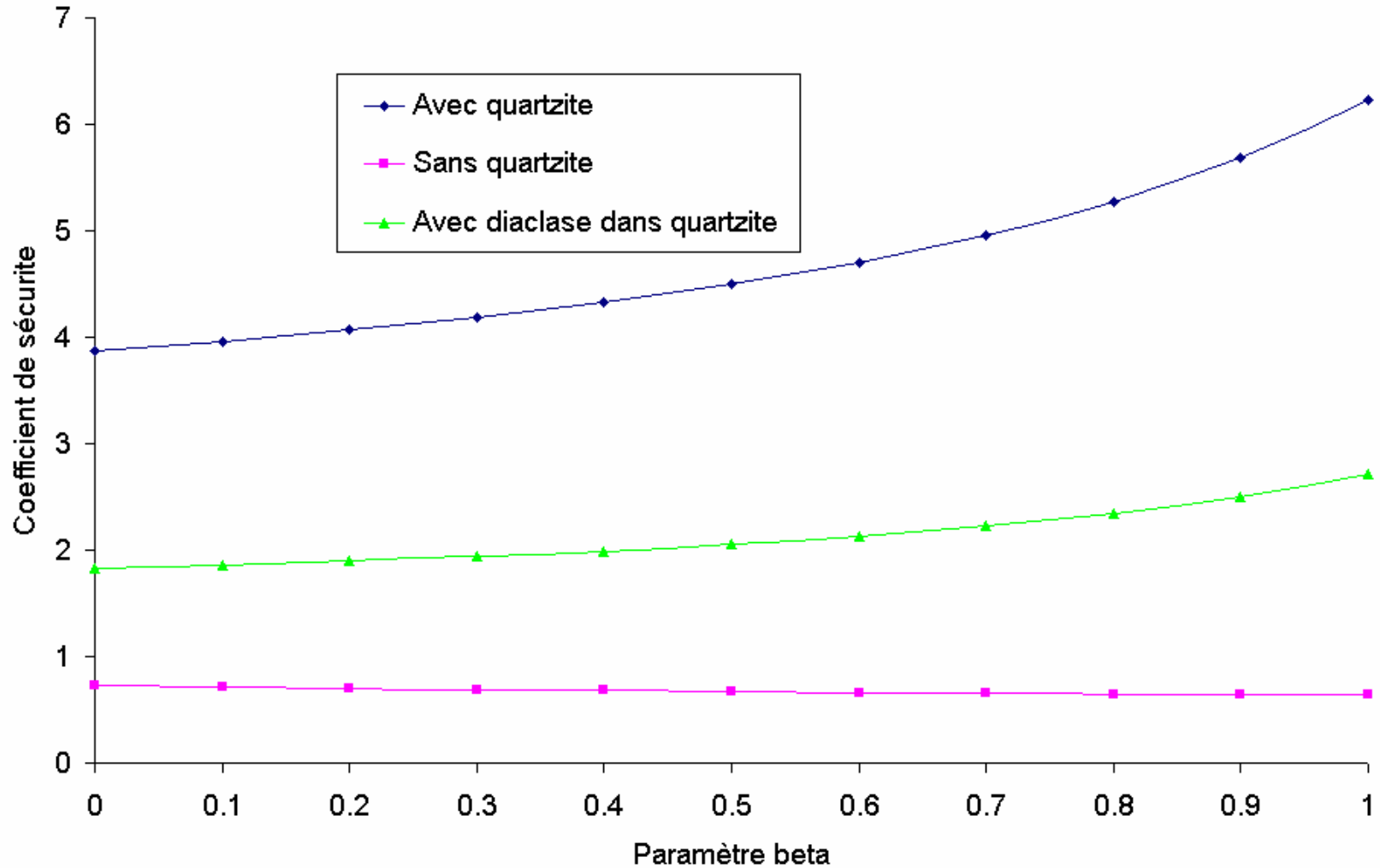
► Cas 1



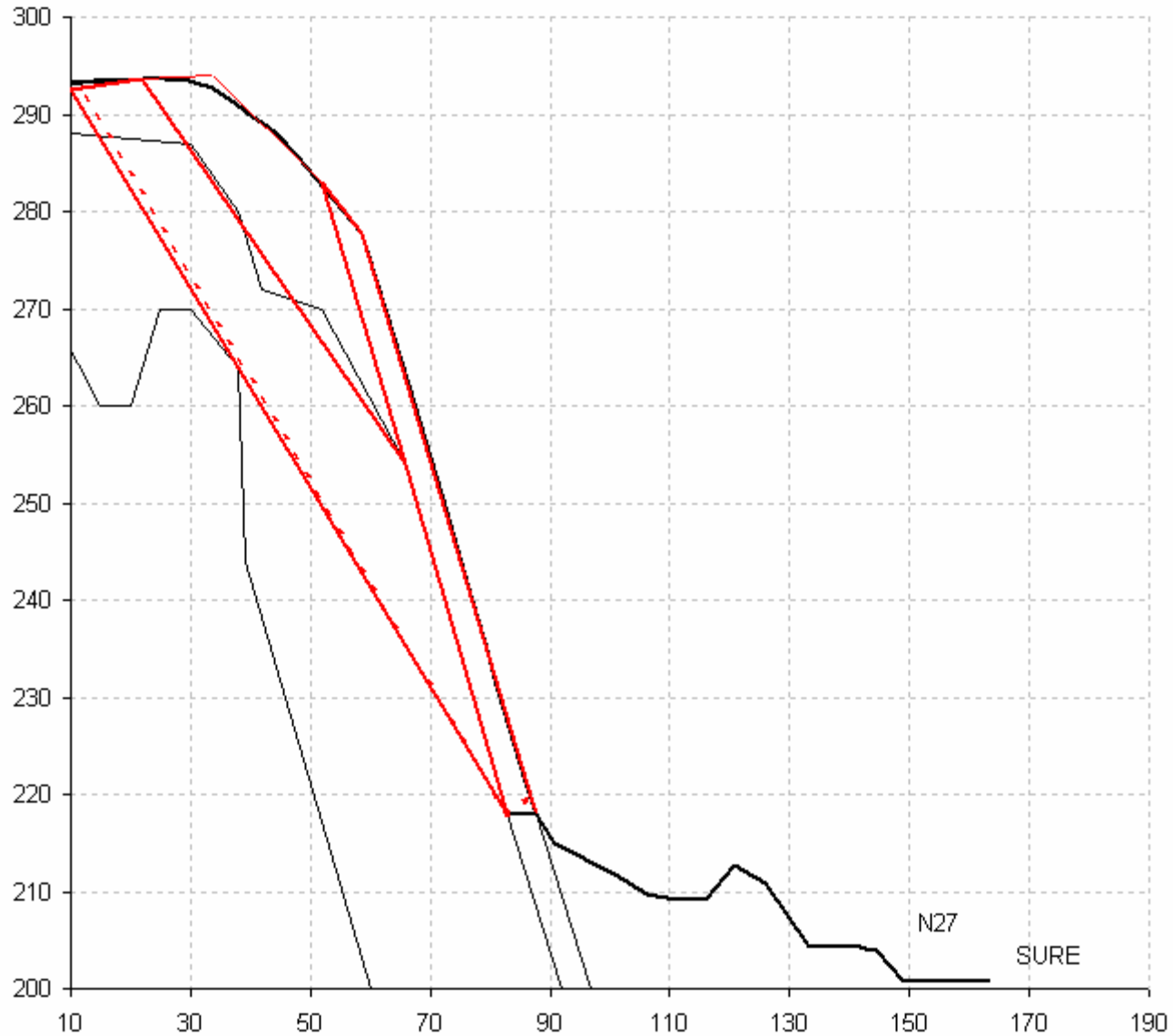
► Cas 1



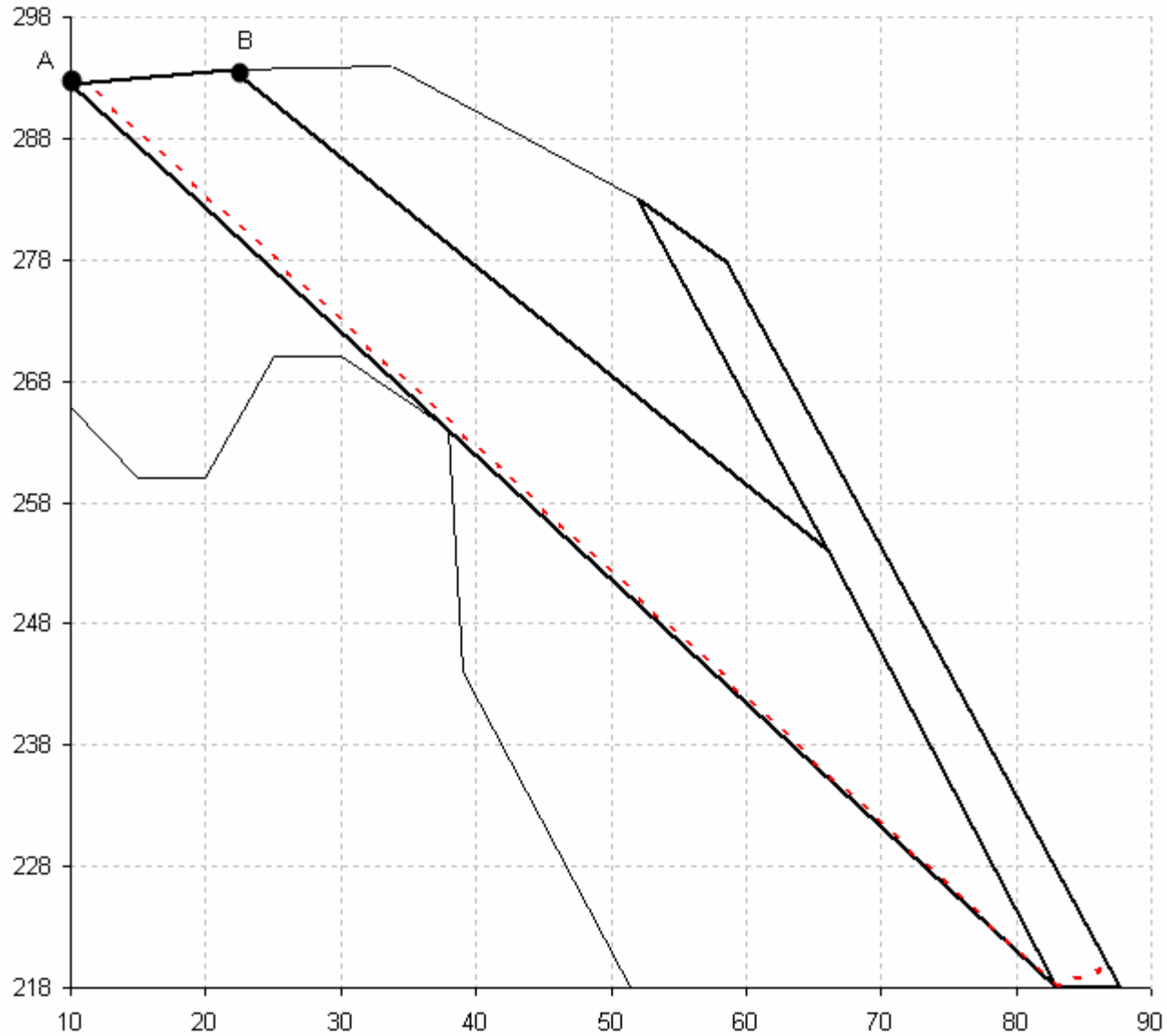
► Cas 1



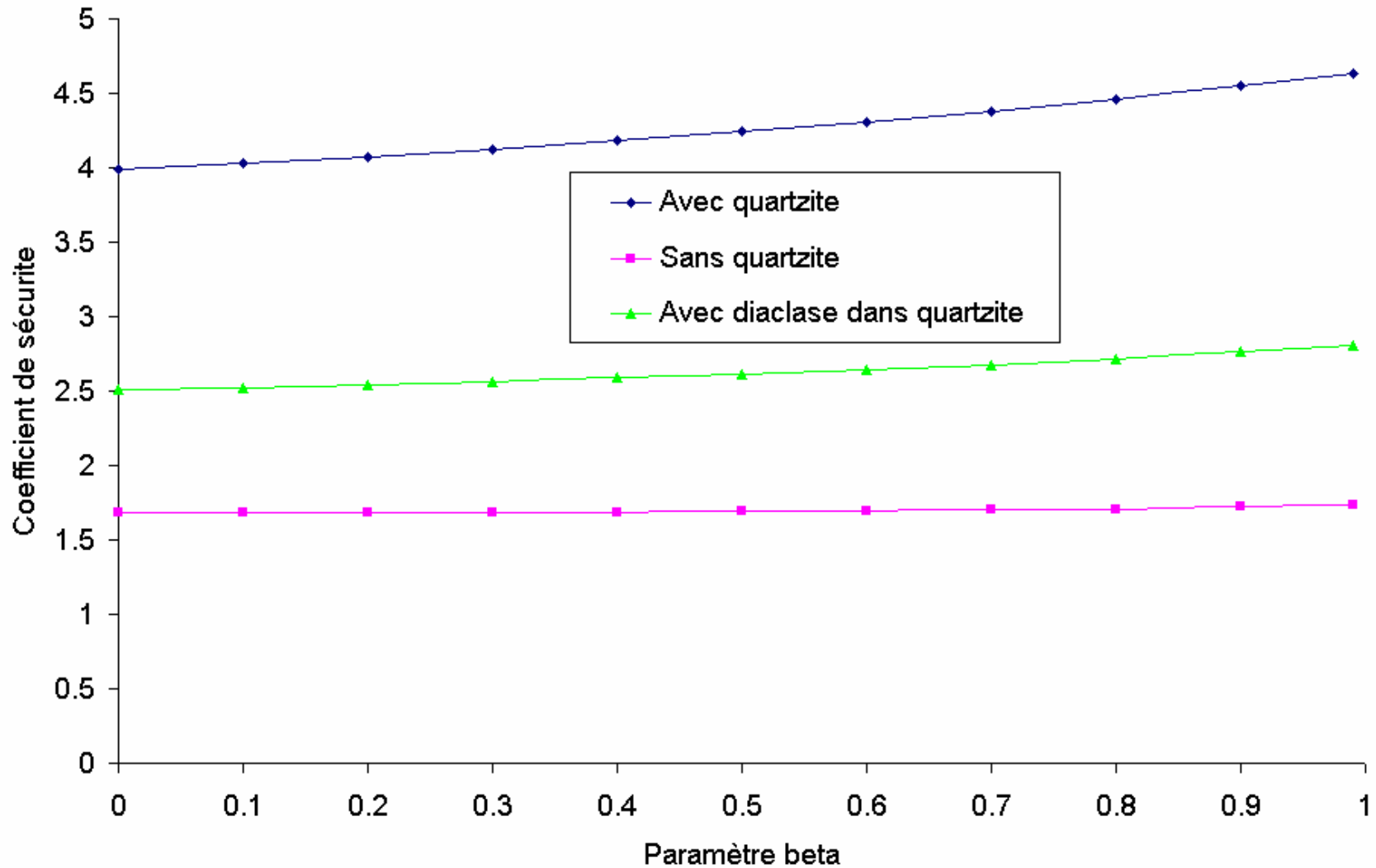
► Cas 2



► Cas 2



► Cas 2



Comparaison Méthode des blocs – Méthode des tranches

		Coefficient de sécurité			
		Fellenius	Bishop	Janbu 1ère it.	<i>Méthode des blocs</i>
<i>cas 1</i>					
<u>avec</u>	CG2	4.35	3.75	3.06	<u>3.87</u>
dalle quartzite	CG3	2.30	2.28	1.98	<u>3.99</u>
<i>cas 2</i>					
<u>sans</u>	CG2	0.65	0.67	0.60	<u>0.64</u>
dalle quartzite	CG3	2.00	2.00	1.75	<u>1.69</u>
<i>cas 3</i>					
<u>avec diaclase</u> dans	CG2	1.36	1.38	1.15	<u>1.83</u>
dalle quartzite	CG3	1.95	1.96	1.73	<u>2.51</u>

L'étude de stabilité a été effectuée par différentes approches (méthode des tranches, Méthodes des éléments finis, Stabilité de blocs), dont les résultats sont concordants.

Cas 1 : Présence de la dalle de quartzite

le massif est **stable** si la dalle de quartzite se maintient

Cas 2 : Absence de la dalle de quartzite

la disparition de la dalle de quartzite déstabilise fortement le colluvium.

Une **rupture** se produira d'abord selon les courbes de glissement CG2 et CG1.

La courbe profonde passant dans le bed-rock altéré reste **très stable**.

Cas 3 : Présence de diaclase dans la dalle de quartzite

la présence d'une discontinuité dans la dalle de quartzite réduit les coefficients de sécurité à des valeurs faibles (1.15 à 1.20 pour la courbe CG2)

mais encore supérieurs à l'unité.

Cependant, une action déstabilisante complémentaire (présence d'eau par exemple) sera susceptible de faire passer le coefficient de sécurité en dessous de l'unité.

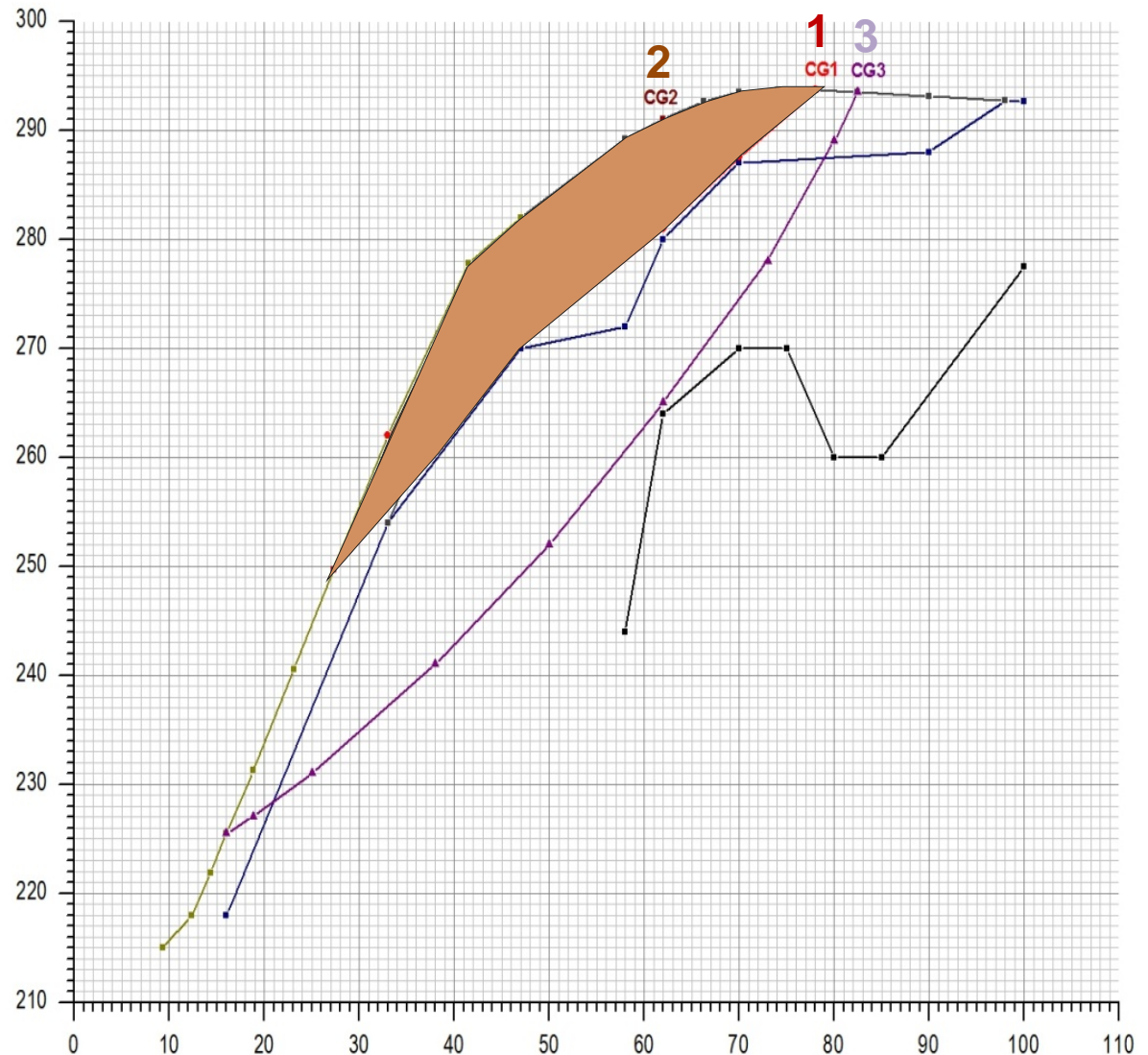
Détermination du volume et de l'extension possible d'un éboulement

Volume

déterminé par les courbes
CG1 et CG2
+/- 430 m²/m

soit sur 40 m d'extension
+/- 20000 m³ maximum

en se limitant à CG2 :
+/- 11000 m³



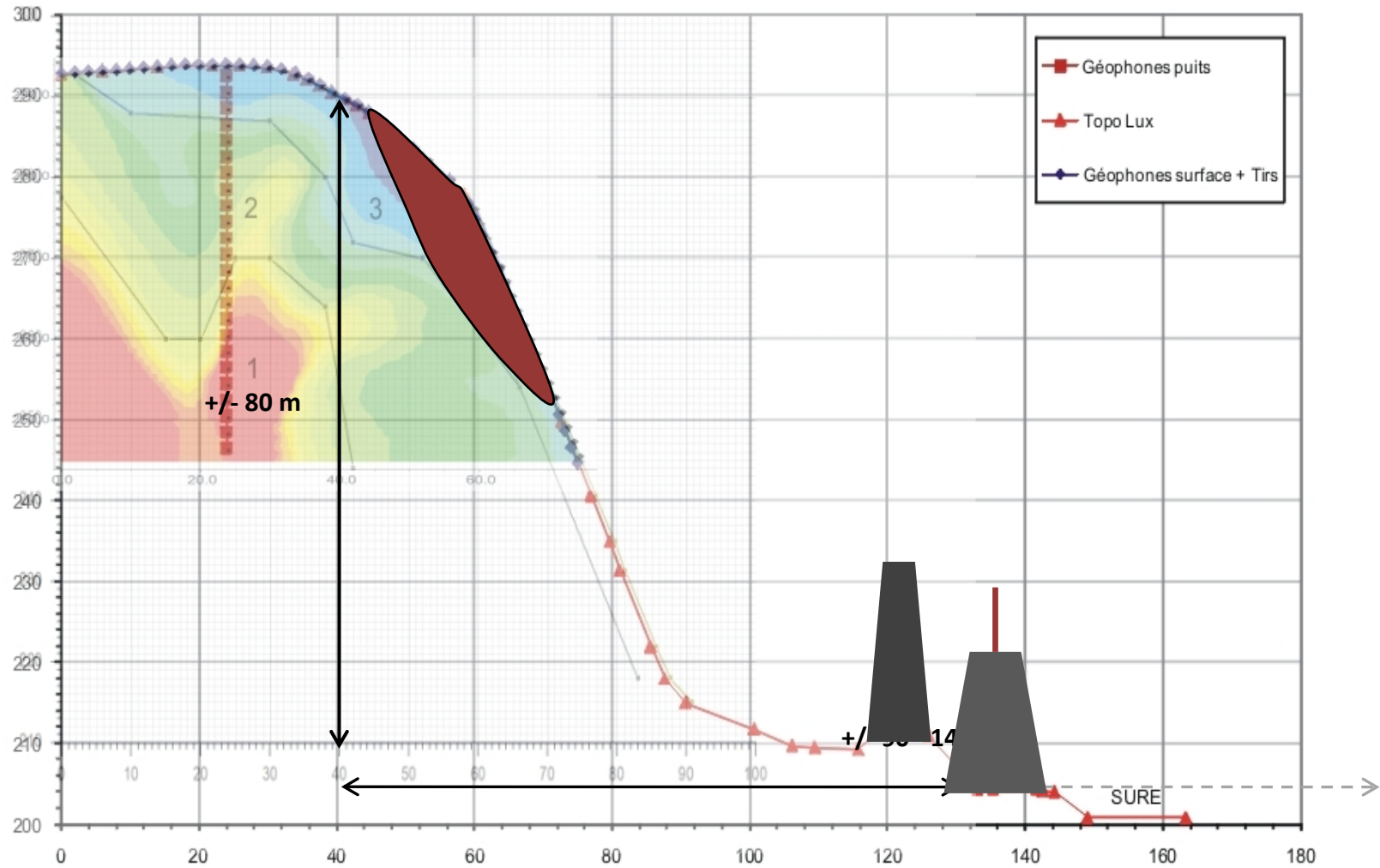
Distance

méthode du "Fahrböschung" (Heim, 1932)

- hauteur maximum du talus, $H : 80 \text{ m}$
- volume de l'éboulement : 20000 m^3
- valeur de α :
 - selon Scheidegger : $\text{tg } \alpha = 0.87$ ($\alpha = 41^\circ$)
 - selon Corominas, en considérant une chute de roches (tous types),
 $A = 0.210$, $B = -0.109$, $\alpha = 29^\circ$

=> distance de parcours, L , comprise entre 90 m et 145 m

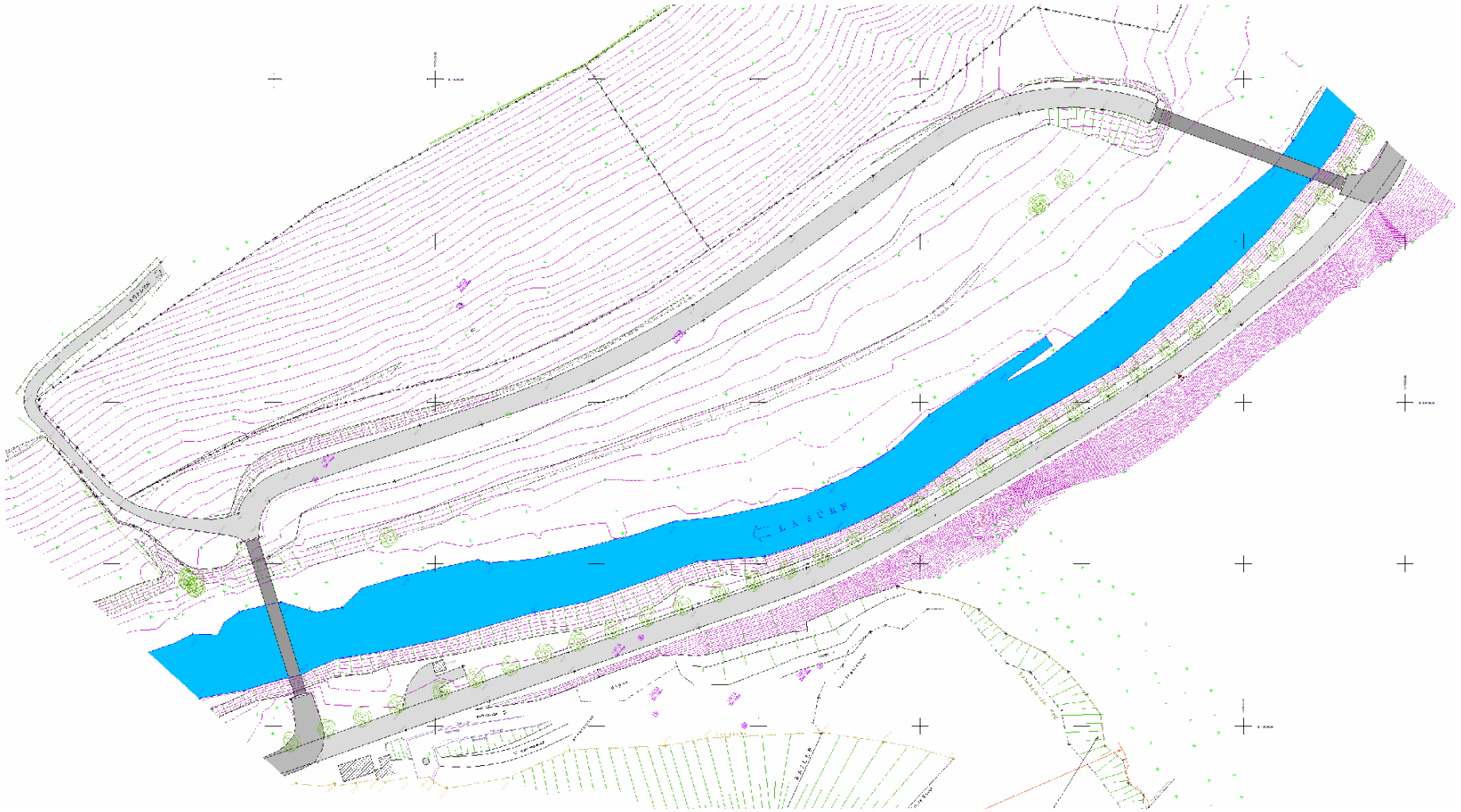
Extension d'un éboulement



Conclusions

- les reconnaissances effectuées, en 1998 et 2007 - 2009 ont permis de
 - déterminer la structure du massif
 - quantifier les paramètres des différentes formations
- les calculs de stabilité effectués par trois méthodes différentes, "tranches", "éléments finis", "analytique par blocs" (sans considérer l'effet d'un séisme et en supposant que le massif ne renferme pas de nappe au niveau des lignes de glissement)
 - ont donné des résultats cohérents
 - permettent de conclure que, dans les hypothèses faites,
 - lorsque la dalle de quartzite est en place, la stabilité est assurée, même en considérant une surface de glissement passant par une diaclase traversant entièrement la dalle de quartzite
 - la suppression de la dalle de quartzite entraîne une forte instabilité du colluvium
- le volume d'un éboulement pourrait atteindre 10000 à 20000 m³
- la distance parcourue par cet éboulement pourrait être de l'ordre de 90 à 145 m (en supposant l'éboulement instantané)
- parmi les solutions possibles, la construction d'un merlon surmonté d'un filet destiné à retenir les gros blocs pourrait être intéressante

Projet d'assainissement



Projet d'assainissement

