



La pratique de la géotechnique, d'hier à demain

Catherine Jacquard

CONFERENCE COULOMB

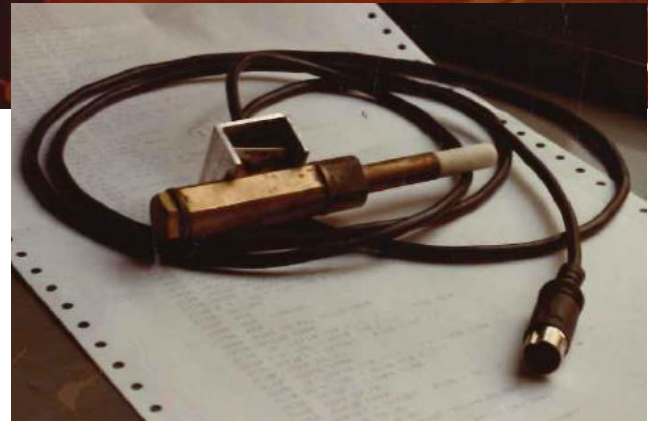
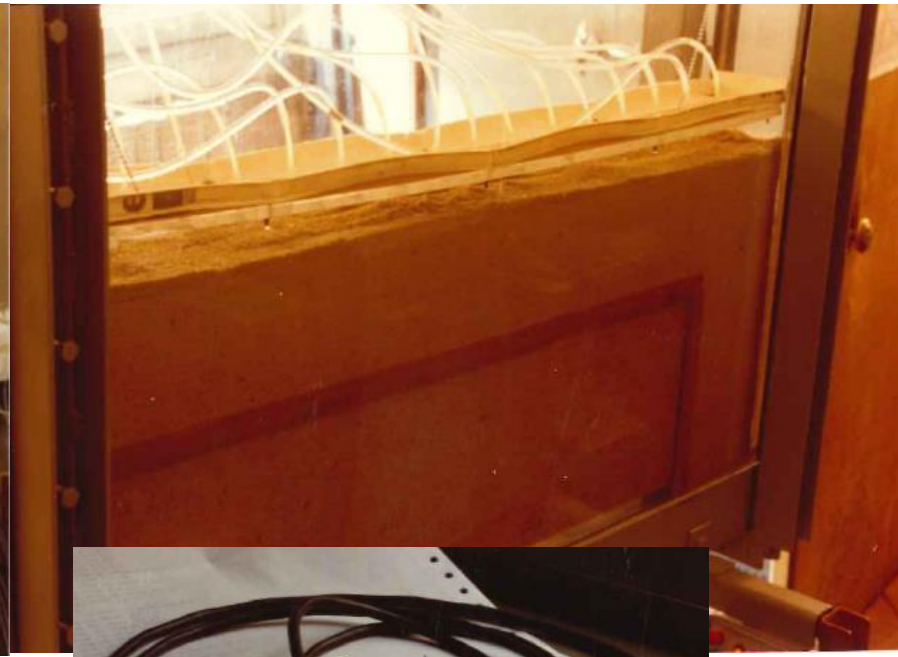
7 juin 2016

sommaire

- **Les missions d'ingénierie géotechnique**
- **L'eau dans le sol**
- Les investigations géotechniques
- L'instrumentation, l'auscultation
- Surveillance des ouvrages ou dimensionnement interactif
- L'évolution de la pratique

Etude expérimentale d'une
barrière capillaire avec un
modèle de laboratoire

- Modèle de laboratoire



Les effets de l'eau dans les sols

Une préoccupation constante:

- Barrages ;
- Constructions en déblai ;
- Constructions en remblai;
- Ouvrages souterrains (parkings, tunnels...);
- Maisons individuelles;

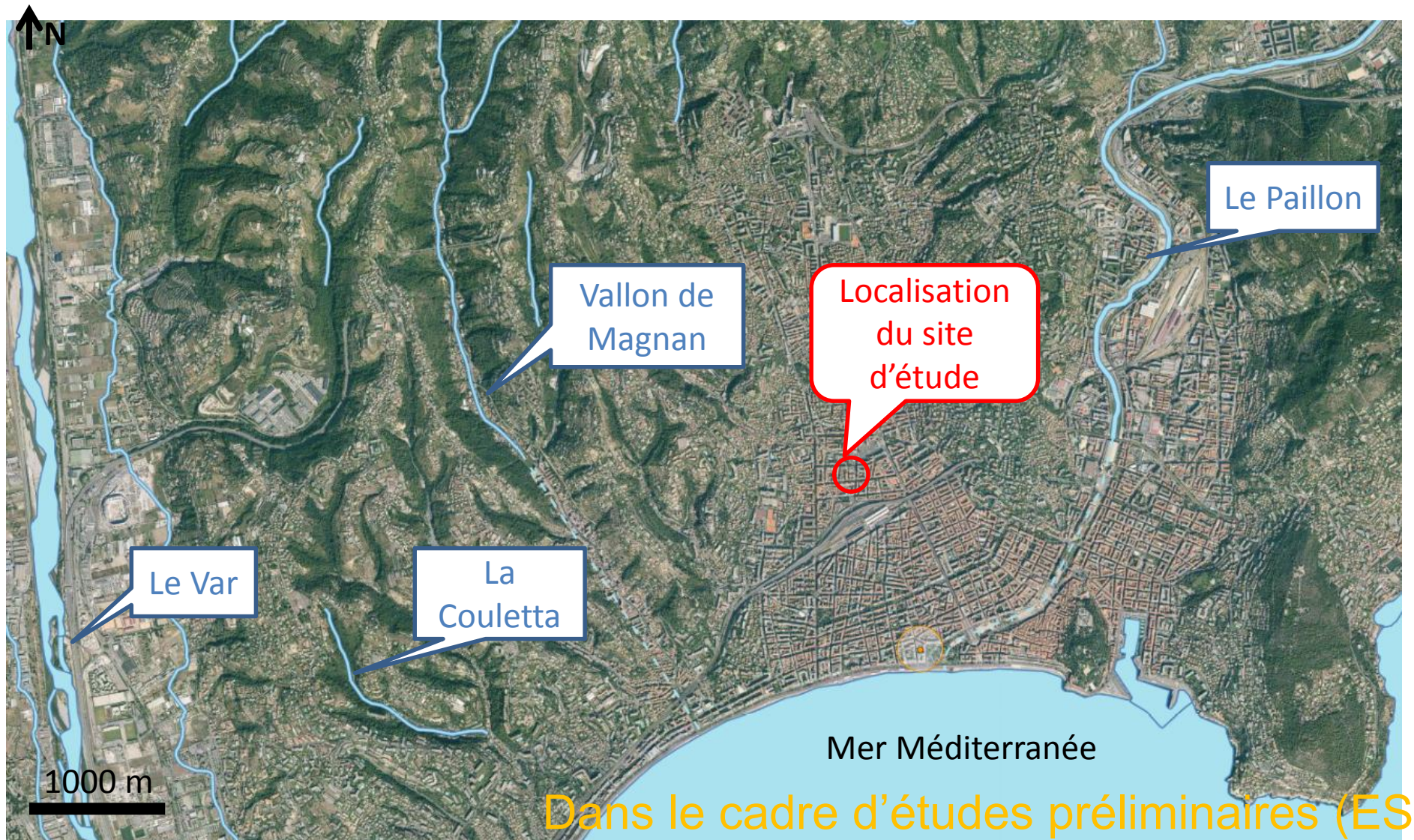
...

➤ Et aussi lors des Expertises

Caractérisation de l'eau dans les sols

- Comment caractérisons-nous le contexte hydrogéologique d'un site?
- Qui le fait?
 - Le géotechnicien: il y a une nappe (parfois plusieurs!) ou il n'y en a pas
 - L'hydrogéologue: raisonne en terme de bassin versant hydrogéologique, d'aquifère, de puissance et de productivité, caractérise ses limites (toit, mur, frontières latérales), son mode d'alimentation

Contexte hydrogéologique



Les niveaux piézométriques

➤ Caractérisation de ces niveaux d'eau vis-à-vis d'un projet?

Sujet pas toujours maîtrisé aujourd'hui

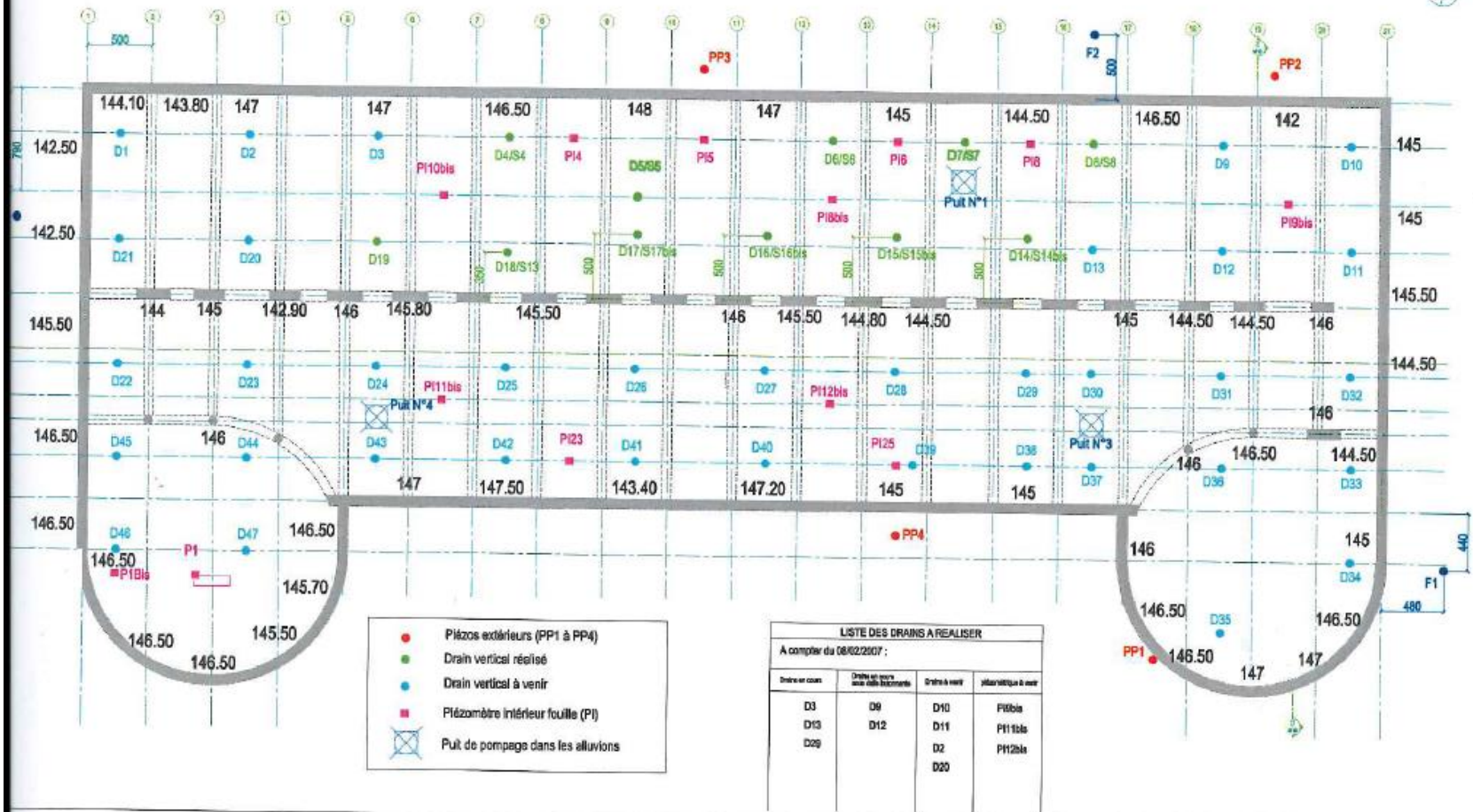
Implication insuffisante du géotechnicien:

« il y aura lieu de suivre les fluctuations de la nappe dans les piézomètres que nous avons posés »

- Des missions spécifiques de caractérisation hydrogéologique d'un site?
 - Selon la norme NFP94-500 (2013), cette prestation est du ressort du géotechnicien
 - Elle devrait être réalisée par des hydrogéologues
 - Enquête documentaire (prélèvements, rejets, ...)
 - Evolution du climat: la grande inconnue
 - Caractérisation des amplitudes de fluctuations des niveaux des aquifères au droit du projet: enquête documentaire ET suivi piézométrique
 - Caractéristiques hydrodynamiques d'un aquifère: pompages d'essai en grand plutôt qu'essais ponctuels,
 - Description lithologique précise (anisotropie ?)

Exemple de problématique liée à l'eau

Plan d'avancement et de suivi des réalisations des forages



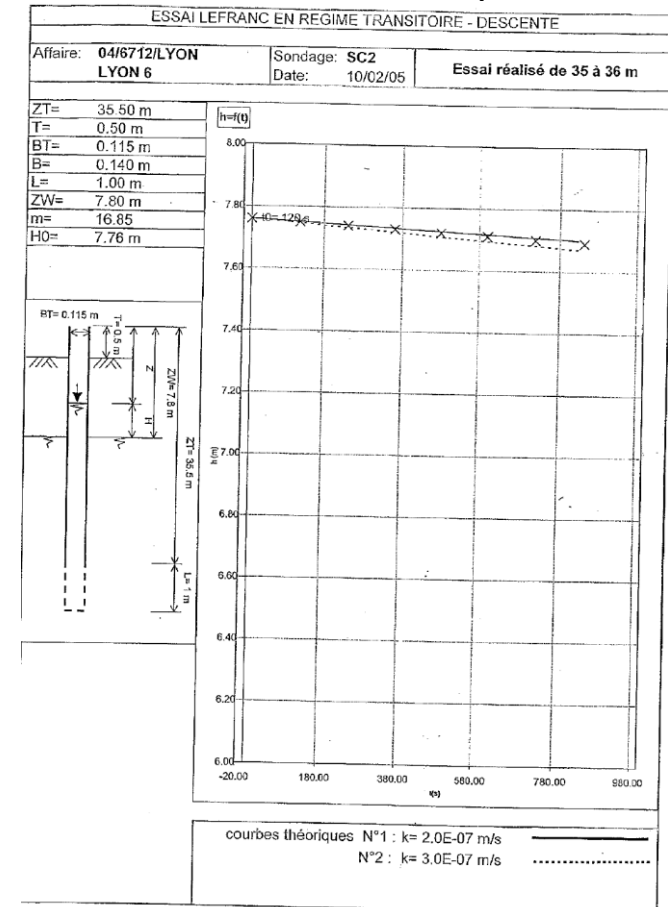
Étude G12

Cote NGF	Profondeur	Ouvrage	SC1	SC2B
170,6	0	TN		
169,6	1			
168,6	2			
167,6	3			
166,6	4	nappe exceptionnelle		
165,6	5	nappe hautes eaux		
164,6	6			
163,6	7			
162,6	8	nappe moyenne		
161,6	9			
160,6	10			
159,6	11			
158,6	12			
152,6	18			
151,6	19			
150,6	20			
149,6	21	cote terrassement 01/2007		
148,6	22			
147,6	23	Dalle Dernier niveau		
146,6	24	Fond de fouille		
145,6	25	Molasse (info panneaux) (142 à 148) moyenne 145,5 scénario envisagé K faible		
		transition	1.10-7	3.10-7
		K plus élevée		1.10-7
			3.10-7	
135,6	35			
134,6	36			
133,6	37	Base de la PM (134,4)	6.10-7	
132,6	38			1.10-6
131,6	39		4.10-7	
130,6	40			
129,6	41			
128,6	42			
127,6	43			
126,6	44			
125,6	45			
124,6	46			

Sables et graviers
(alluvions)

Sables jaunes
Avec niveaux plus
argileux
(molasse)

Tous les essais Lefranc sont
réalisés en descente uniquement



- Débits donnés par l'étude G12: 50 m³/h
avec $k = 6 \cdot 10^{-6}$ m/s
- Débits donnés par le Moe géotechnicien: 400 m³/h,
avec $k_v = 6 \cdot 10^{-5}$ m/s, et $k_h = 1$ à $3 k_v$
- Adaptations en cours de chantier
 - Aléa qu'il a fallu gérer: pressions élevées en pied de parois; nécessité de drains de décharge, d'où quelques m³/h supplémentaires
- Débits constatés: près de 500m³/h
- Faut-il continuer à réaliser des essais d'eau ponctuels?
 - Tous les essais Lefranc présentaient des phénomènes de colmatage

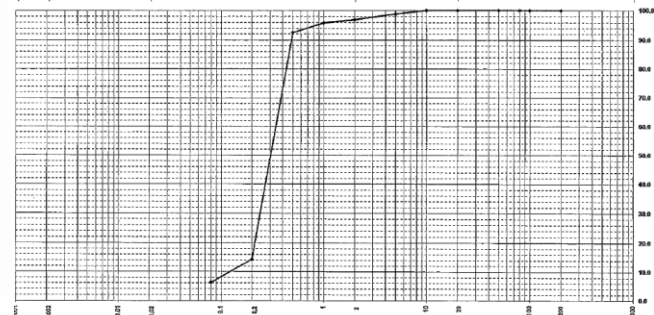
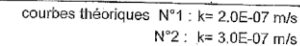
Étude G12

Sables et graviers (alluvions)

ables jaunes
avec niveaux plus
argileux
(molasse)

$$k = 100 \text{ d}_{10}^2$$
 $1.7 \cdot 10^{-4}$ $5.0 \cdot 10^{-5}$

Tous les essais Lefranc sont réalisés en descente uniquement



- Selon la norme NFP94-500 (2013), cette prestation est du ressort du géotechnicien:

L'hydrogéologue et le géologue ne sont pas encore suffisamment missionnés dans le cadre des études géotechniques

L'eau dans les sols

- Les pistes d'amélioration:
 - Observatoire des niveaux piézométriques dans les zones urbanisées
 - Inventaire des prélèvements et des réinjections dans les aquifères
 - Améliorer les essais d'eau ponctuels ou rendre obligatoire les essais de pompage?
 - Rendre obligatoire l'intervention de l'hydrogéologue pour des projets d'infrastructure urbaine?
 - Rendre obligatoire un suivi piézométrique sur une durée minimum pour les projets interférant avec la nappe

- L'ingénierie géotechnique
- L'eau dans le sol
- **Les investigations géotechniques**
- L'instrumentation, l'auscultation
- Surveillance des ouvrages ou dimensionnement interactif
- L'évolution de la pratique

Les investigations géotechniques (en France)

Au début était le pressiomètre... Ménard:

- Brevet d'invention en 1958
- D60 Ménard
- Première norme: 1990 NFP 94-110
- Mise à jour: 2000 NFP 94-110-1
- Norme européenne: 2015

Essai d'expansion par Kögler (1933)

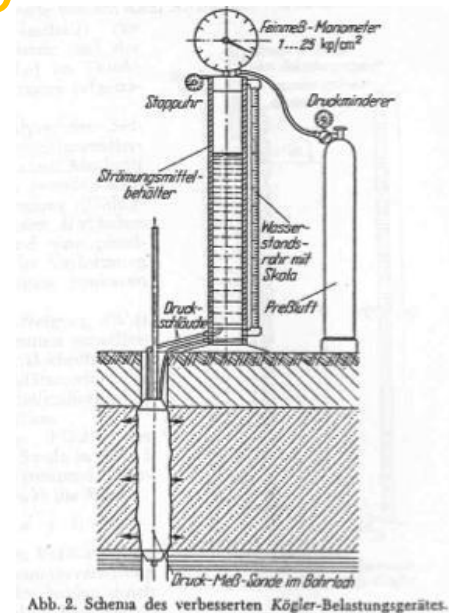


Abb. 2. Schema des verbesserten Kögler-Belastungsgerätes.

Le pressiomètre

- Calcul des tassements:
 - D60 (1962): formules semi-empiriques

$$w = \frac{1,33}{3E} p R_0 \left(\lambda_d \frac{R}{R_0} \right)^\alpha + \frac{\alpha}{4,5E} p \lambda_s R$$

- Norme d'application de l'EC7 NFP94-261 (2013)

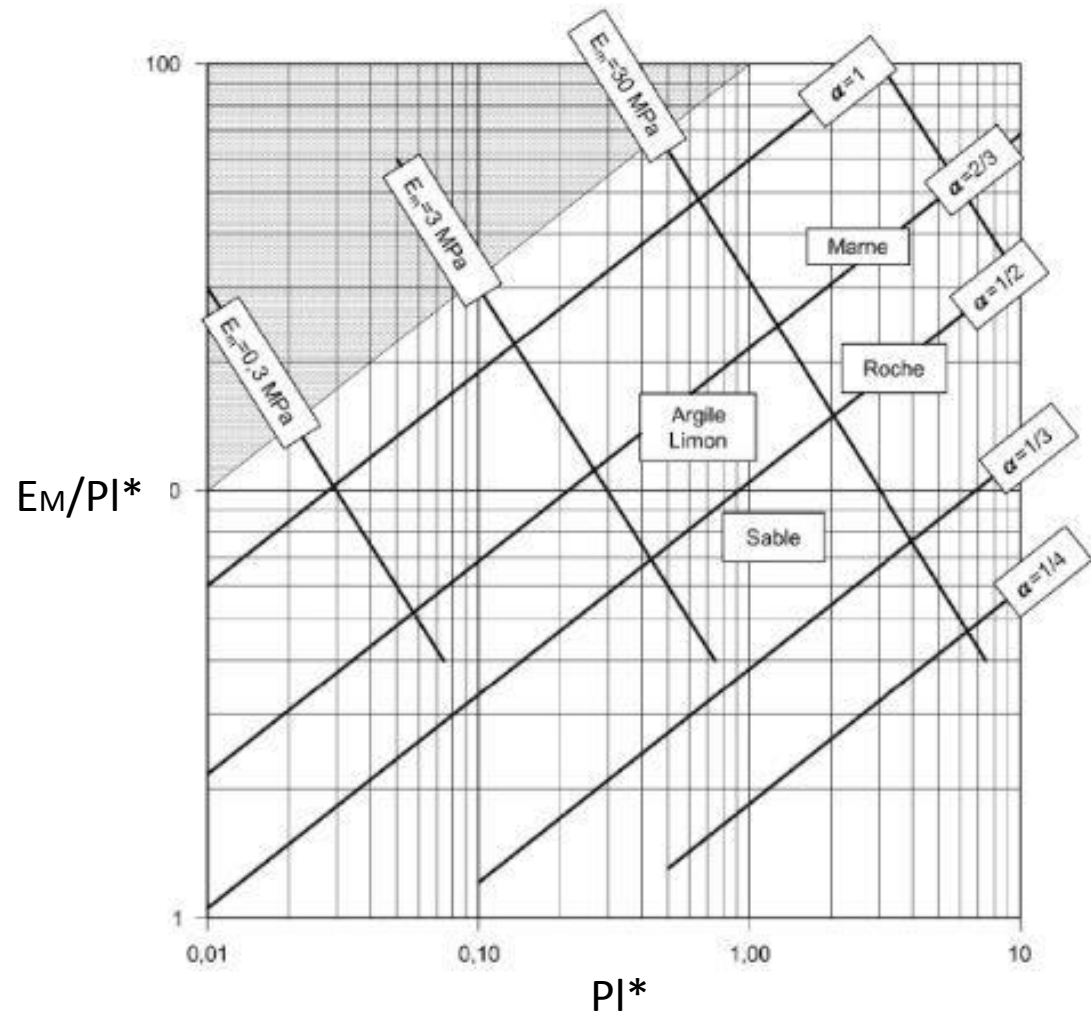
$$s_c = \frac{\alpha}{9E_M} (q' - \sigma'_{v0}) \lambda_c B$$

$$s_d = \frac{2}{9E_M} (q' - \sigma'_{v0}) B_0 \left(\lambda_d \frac{B}{B_0} \right)^\alpha$$

Le pressiomètre

- Dernière innovation: le PRESSIORAMA

JP Baud (2011)



La « mesure » de la pression limite

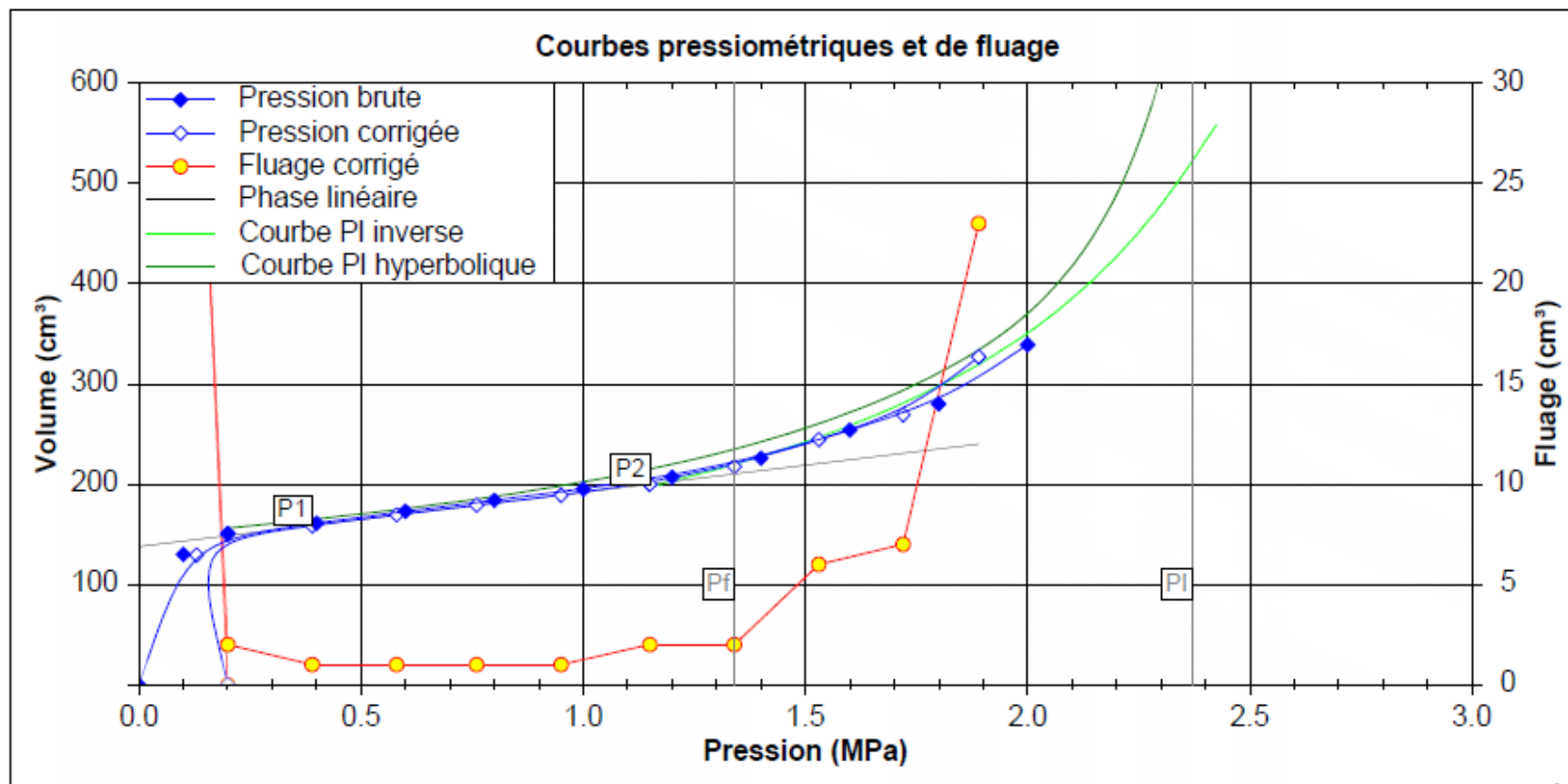
Essai : SP201 - 19.00 m

EXPRS B1.47.4

Em (MPa)	27.98
Em / PI*	12.89
PI* (MPa)	2.17
Pf* (MPa)	1.14

PI (MPa)	2.37
Pl _i (MPa)	2.56
Pl _h (MPa)	2.37
Pl _d (MPa)	1.89

Pf (MPa)	1.34
σ_{hs} (MPa)	0.20
P1 (MPa)	0.39
P2 (MPa)	1.15



Le pressiomètre

- Les outils nouveaux:
 - la sonde pressiométrique qui n'éclate pas (souvent)

Essai : 2-4M - 64.50 m

EXPRS B1.47.4

Em (MPa)	273.2
----------	-------

PI (MPa)	12.0
----------	------

Pf (MPa)	6.5
----------	-----

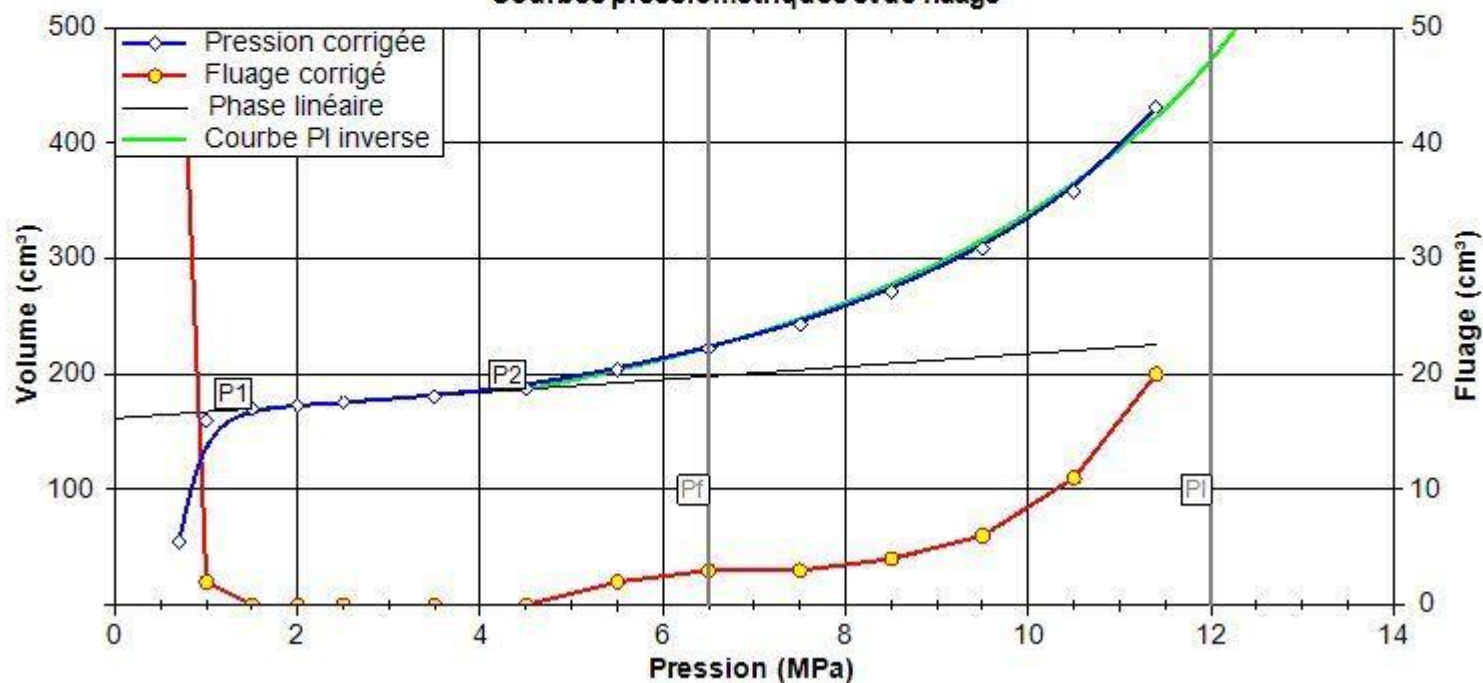
Em / PI*	24.60
PI* (MPa)	11.1
Pf* (MPa)	5.6

Pl _i (MPa)	13.8
Pl _h (MPa)	12.0
Pl _d (MPa)	11.4



ohs (MPa)	0.9
P1 (MPa)	1.5
P2 (MPa)	4.5

Courbes pressiométriques et de fluage



Le pressiomètre

- Les outils nouveaux:
 - la sonde pressiométrique qui n'éclate pas (souvent)
 - les essais très haute pression (10, 25, 50 MPa) avec procédure automatisée à partir d'une sonde monocellulaire (46 ou 74 mm), qui concurrence l'essai dilatométrique
(quelle précision sur la mesure du module?)

Quelle précision sur les modules?

Essai : 2-4M - 64.50 m

EXPRS B1.47.4

Em (MPa)	273.2
----------	-------

Em / PI*	24.60
PI* (MPa)	11.1
Pf* (MPa)	5.6

PI (MPa)	12.0
----------	------

Pf (MPa)	6.5
----------	-----

Essai : 2-4M - 64.50 m

EXPRS B1.47.4

Em (MPa)	183.0
----------	-------

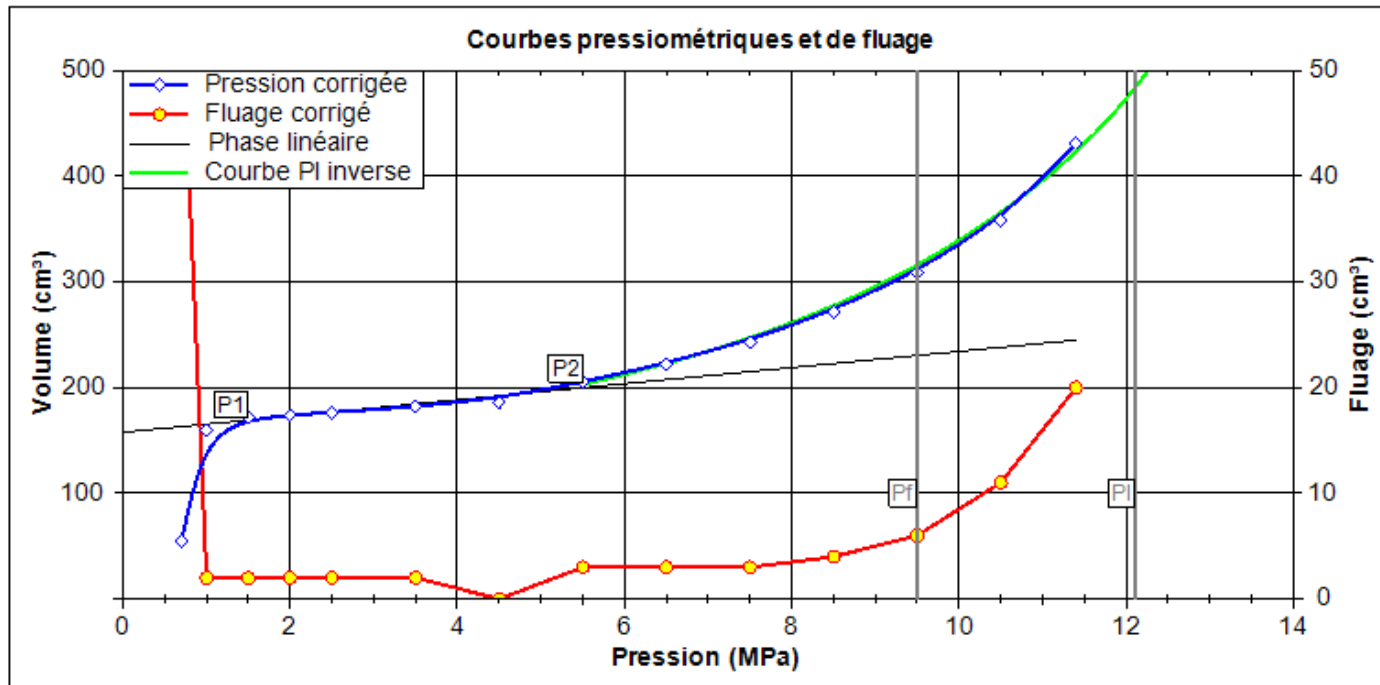
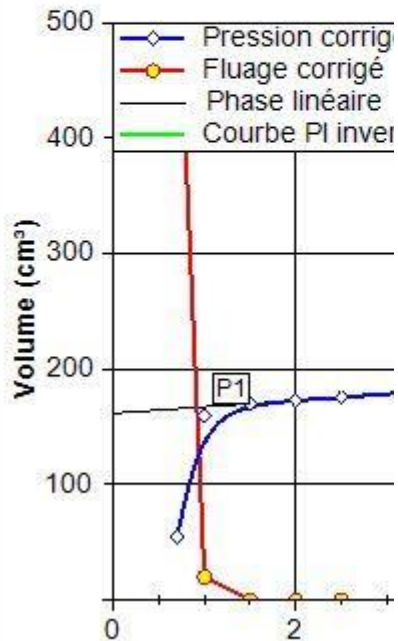
Em / PI*	16.30
PI* (MPa)	11.2
Pf* (MPa)	8.6

PI (MPa)	12.1
----------	------

Pl _i (MPa)	13.9
Pl _h (MPa)	12.1
Pl _d (MPa)	11.4

Pf (MPa)	9.5
----------	-----

chs (MPa)	0.9
P1 (MPa)	1.5
P2 (MPa)	5.5



Le pressiomètre

- Les outils nouveaux:
 - la sonde pressiométrique qui n'éclate pas (souvent)
 - les essais très haute pression (10, 25, 50 MPa) avec procédure automatisée à partir d'une sonde monocellulaire (46 ou 74 mm), qui concurrence l'essai dilatométrique
(quelle précision sur la mesure du module?)
- Programme ARSCOP: 2016-2020

Les Axes du PN ARSCOP

Axe	Tâche	Sous-tâche
AXE 1 – Développement de systèmes de mesure et de protocoles	1.1 Promotion des techniques innovantes existantes – Pratique quotidienne	
	1.2 Mesure de la pression interstitielle	1.2.1 Conception
		1.2.2 Fabrication
		1.2.3 Validation (2 sites min.)
	1.3 Techniques de forage et d'autoforage	1.3.1 Étude d'adaptation
		1.3.2 Campagne d'essais croisés (2 sites min)
	1.4 Appareillage cyclique	1.4.1 Étude d'adaptation
		1.4.2 Campagne d'essais croisés (2 sites min)
	1.5 Application sismique (géophone et liquéfaction)	1.5.1 Conception
		1.5.2 Fabrication
		1.5.3 Validation (2 sites min)
	1.6 Caractérisation des sites expérimentaux sur site et en laboratoire	Site à identifier selon les développements à valider
AXE 2 – Méthodes de calcul des ouvrages géotechniques Base de données	2.1 Variabilité des sols et calcul des ouvrages	
	2.2 Lois de comportement – Éléments finis – Analyse inverse – Diagramme d'interactions	
	2.3 Module de réaction (t-z, p-y, cycles, déchargement, etc.)	
AXE 3 – Valorisation	3.1 Réalisation d'un ouvrage de synthèse	
	3.2 Présentation, conférence, expertise	
	3.3 Réalisation de séminaires, de supports de formation pour la pratique quotidienne	

nouvelles Approches de Reconnaissance des Sols et de Conception des Ouvrages géotechniques avec le Pressiomètre

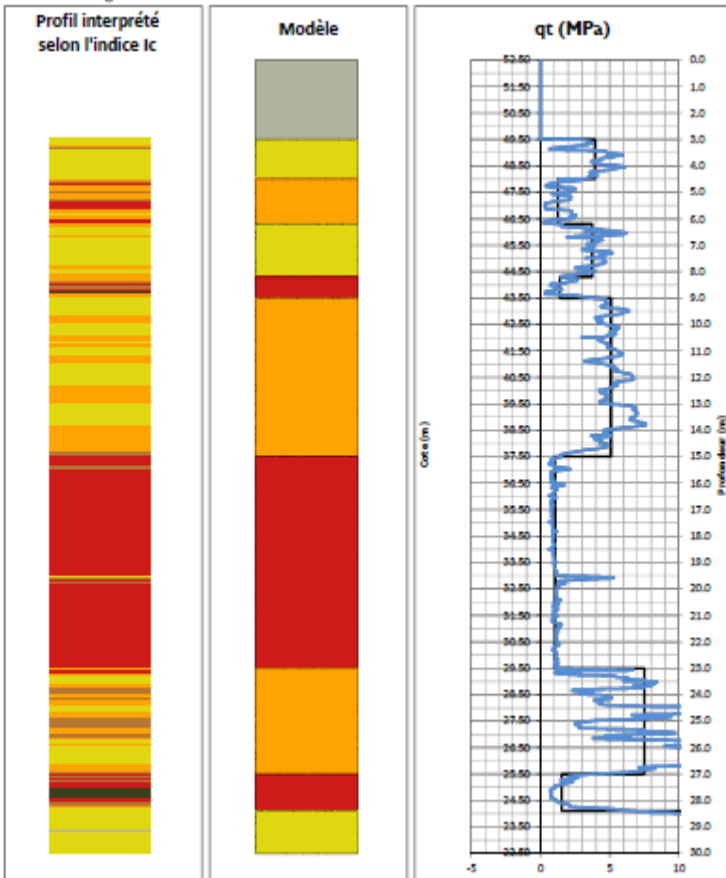
Le pénétromètre statique

- Très utilisé à l'international
- S'est beaucoup répandu en France ces dernières années:
 - Abaques de Robertson;
 - Caractérisation du risque de liquéfaction;

Le pénétromètre statique

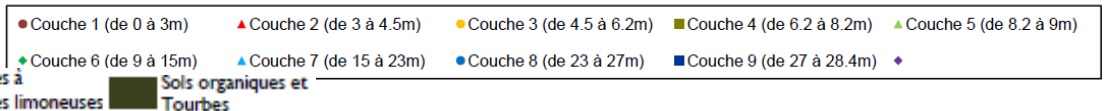
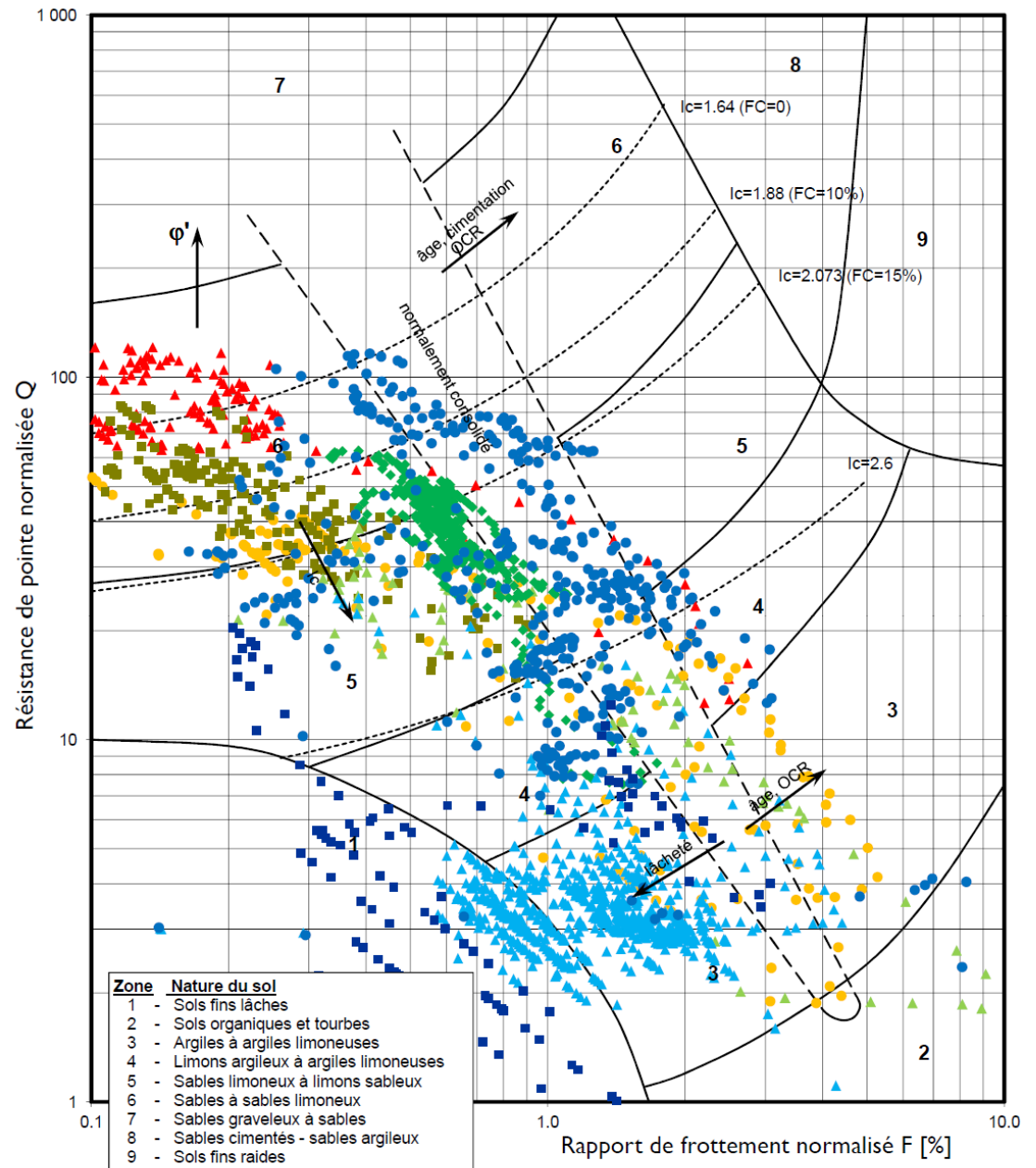
- Ses inconvénients:
 - Essai aveugle
- Le remède
 - Abaque de Robertson

• Abaque de Robertson



Indice de comportement I_c

$$I_c = [(3,47 - \log Q)^2 + (\log F + 1,22)^2]^{0,5}$$

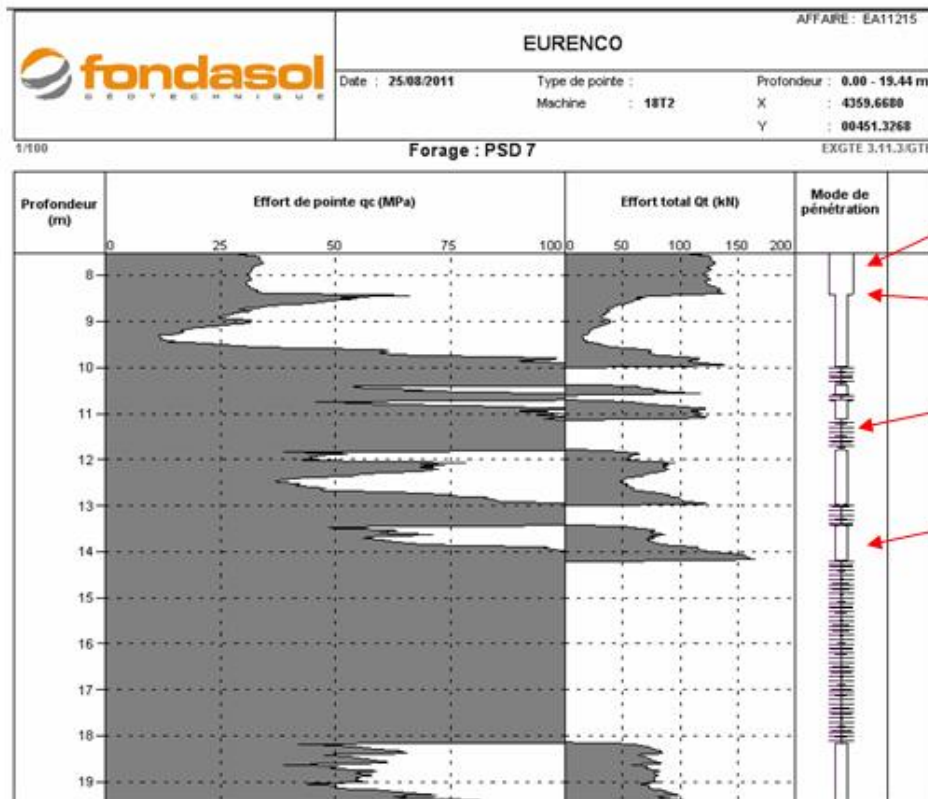


Le pénétromètre statique

- Ses inconvénients:
 - Essai aveugle
 - Refus sur des terrains durs, très compacts
- Le remède
 - Abaque de Robertson
 - Essai de pénétration stato-dynamique

- Pénétromètre stato-dynamique

- Permet de traverser des terrains compacts
- Non inclus dans la norme européenne des essais de pénétration



Statique
φ 60mm

Télescopage

Dynamique
φ 39mm

Statique φ
39mm



Le pénétromètre statique

- Ses inconvénients:
 - Essai aveugle
 - Refus sur des terrains durs, très compacts
 - Pas de mesure de déformation
- Le remède
 - Abaque de Robertson
 - Essai de pénétration stato-dynamique
 - Corrélations EC7
 - Thèse de H. Ali sur le CLT

Recherche sur le CLT cone loading test

THÈSE

Présentée par

Hassan ALI

CARACTERISATION AMELIOREE DES SOLS PAR L'ESSAI DE CHARGEMENT DE POINTE AU PIEZOCONES - APPLICATION AU CALCUL DES FONDATIONS PROFONDES

Soutenue publiquement le 07 octobre 2010 devant le jury composé de :

MM	R. Frank	<i>Rapporteur</i>
	A. Van der Stoel	<i>Rapporteur</i>
	Ph. Reiffsteck	<i>Directeur de thèse</i>
	D. Boissier	<i>Examineur</i>
	C. Bacconnet	<i>Examineur</i>
	R. Gourvès	<i>Examineur</i>
	H. Van de Graaf	<i>Examineur</i>
	F. Baguelin	<i>Examineur</i>



Principe de mesure CLT

- Fonçage d'une pointe piézocône à la profondeur d'essai
- Relaxation de 10 minutes
- Chargement:
par paliers successifs, à
à vitesse constante



Mini-chenillard de Lenkelma

Essai au CLT

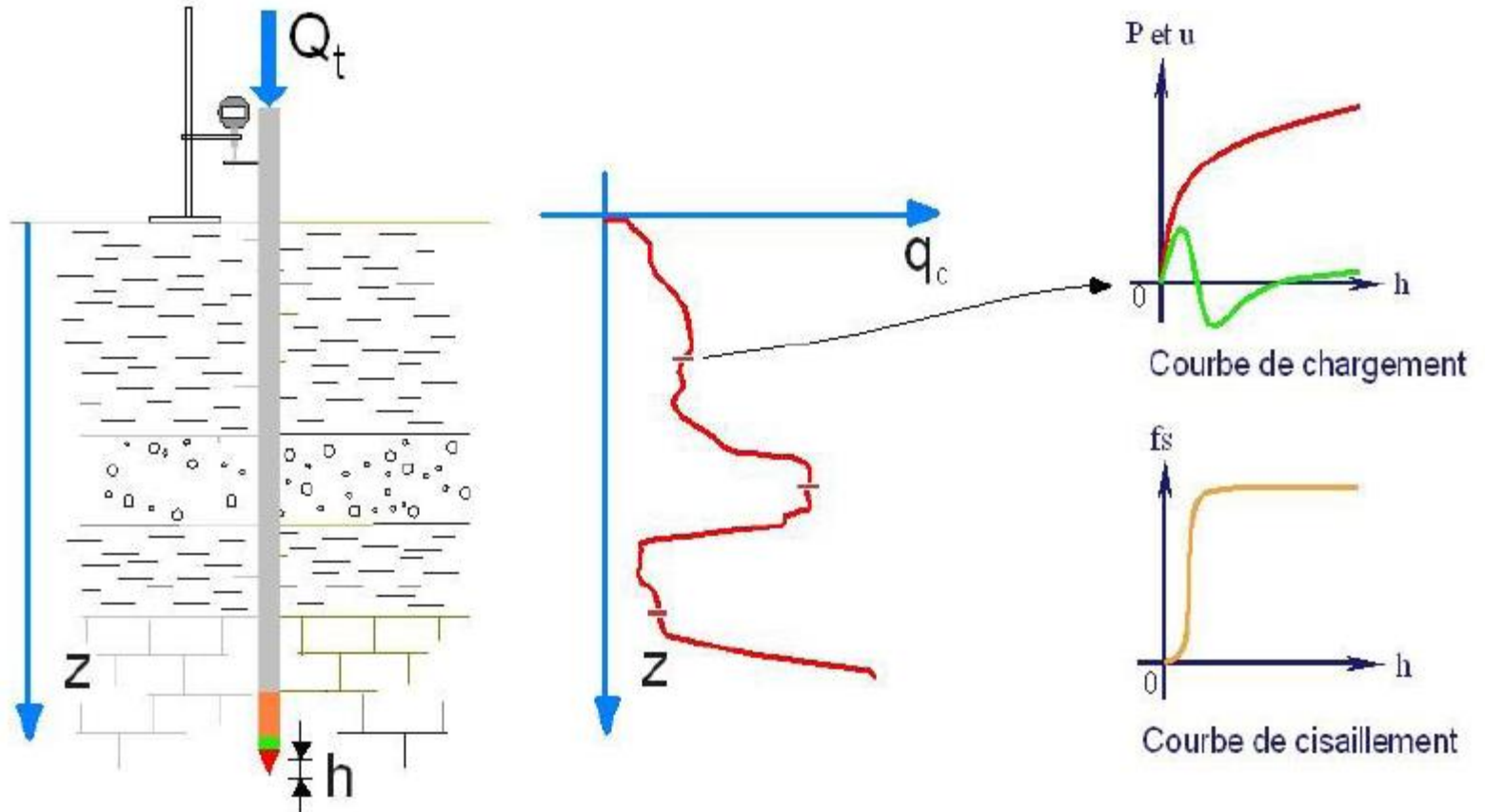
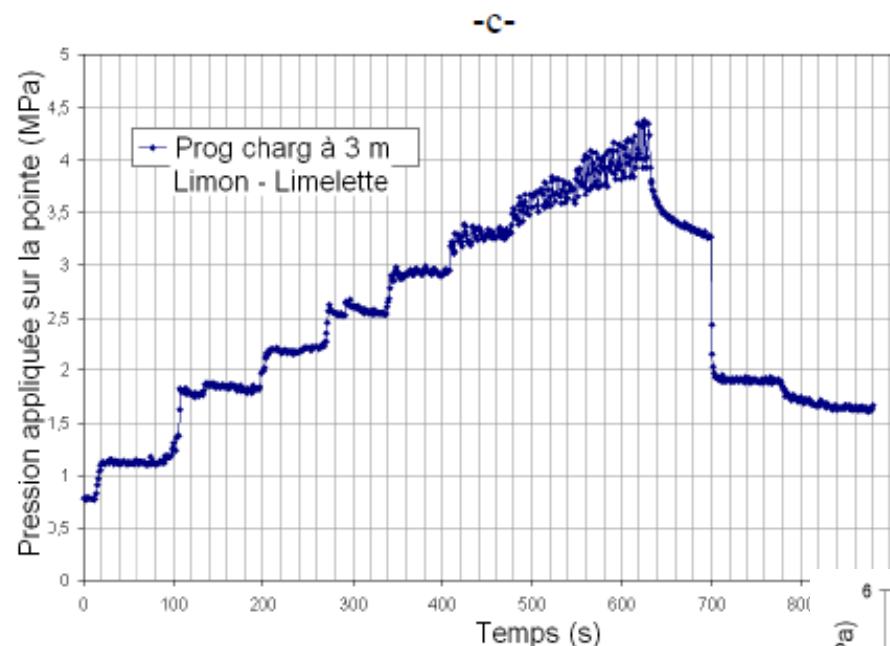
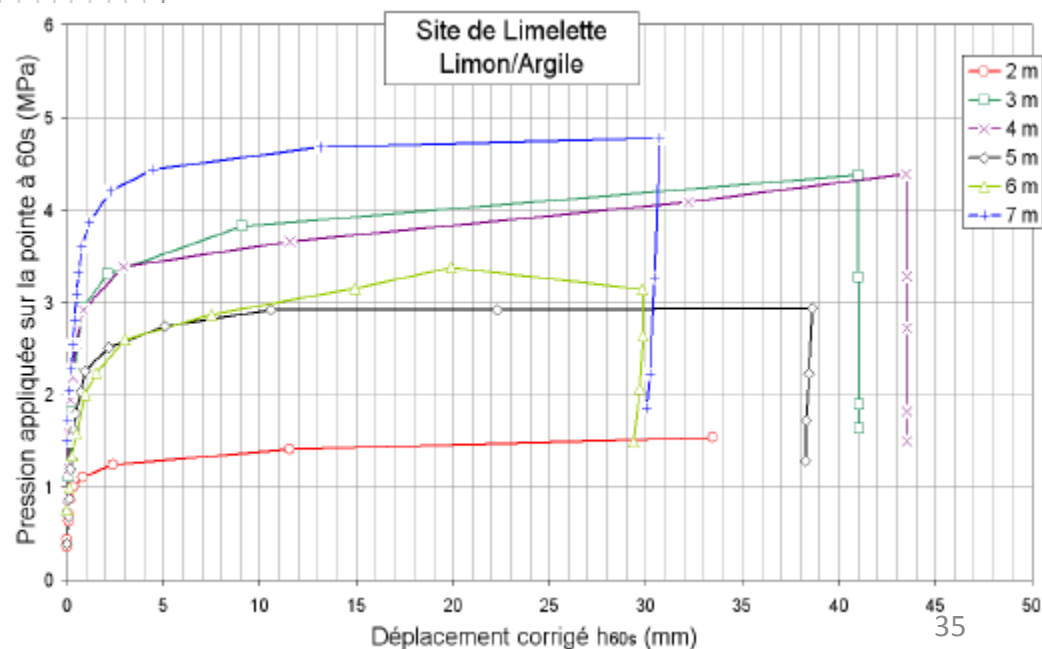
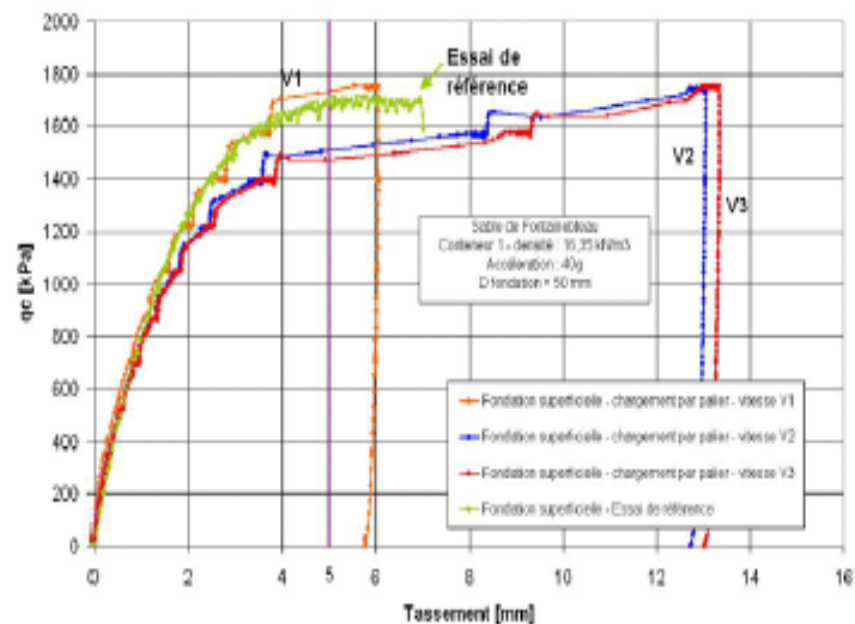


Figure III-1. Principe de l'essai de chargement de pointe

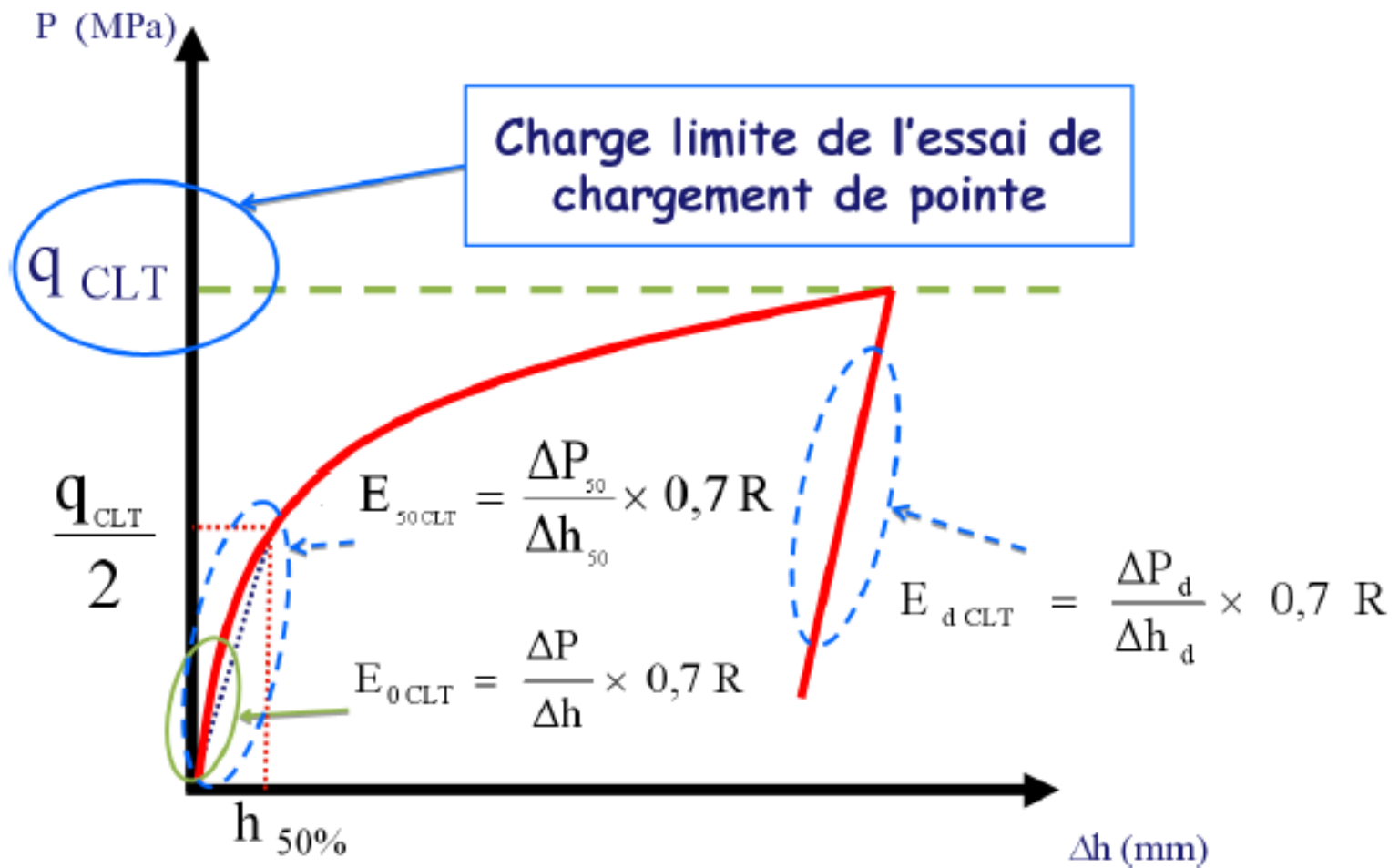
Mesure de la pression, de la pression interstitielle et du frottement en fonction du déplacement

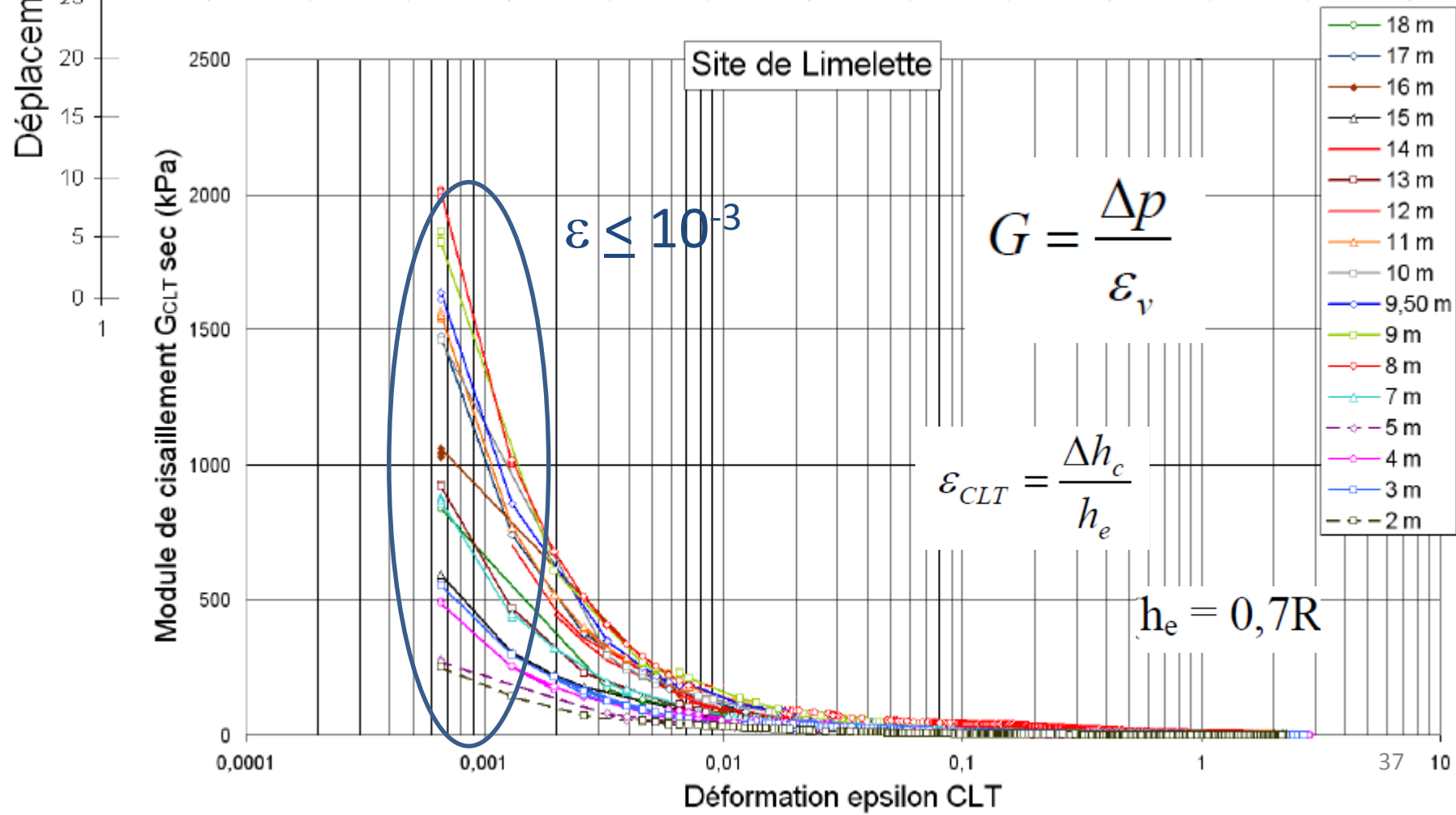
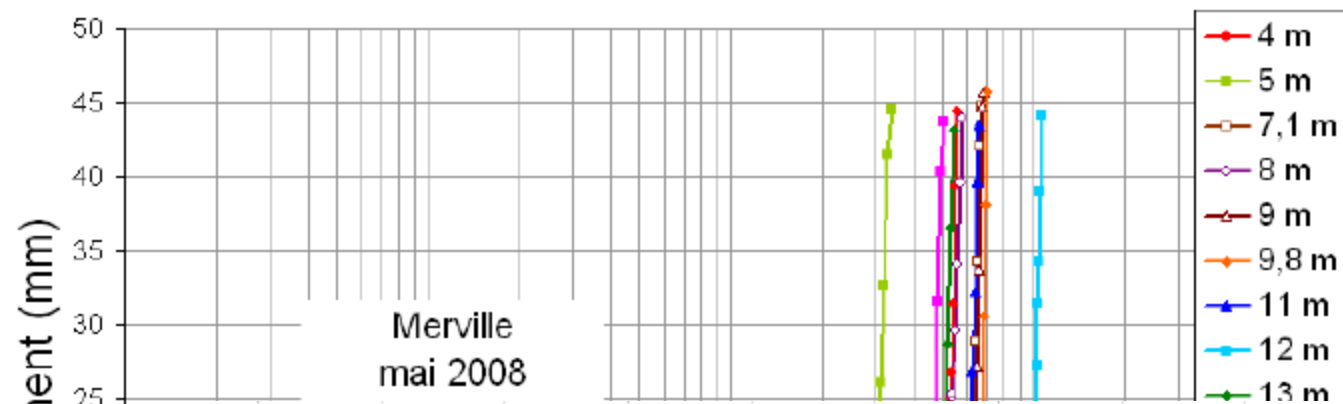


Couche de Limon à Limelette

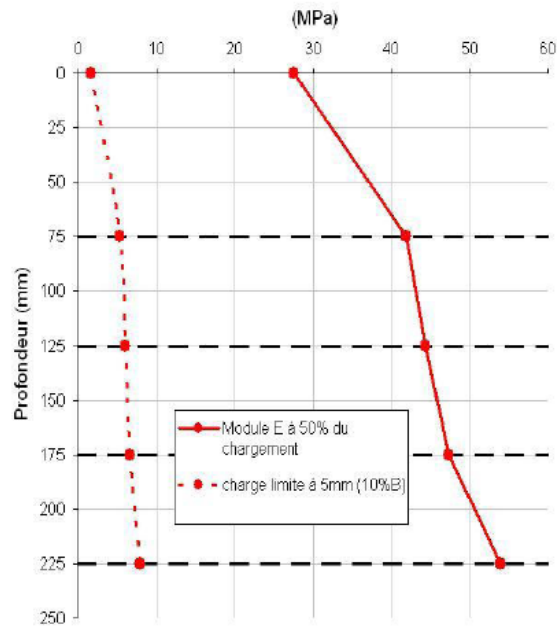
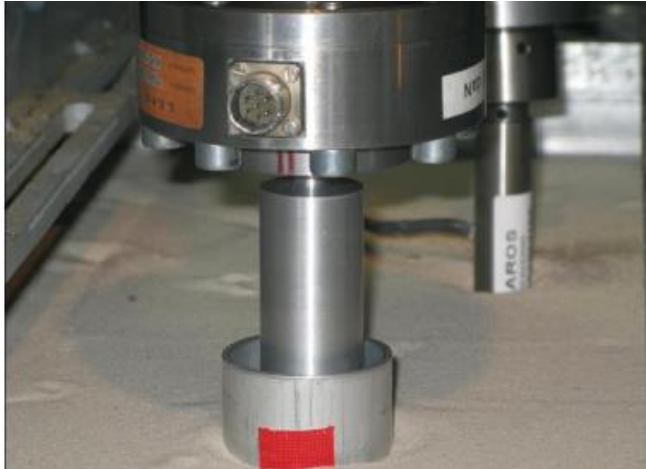


Courbe de chargement

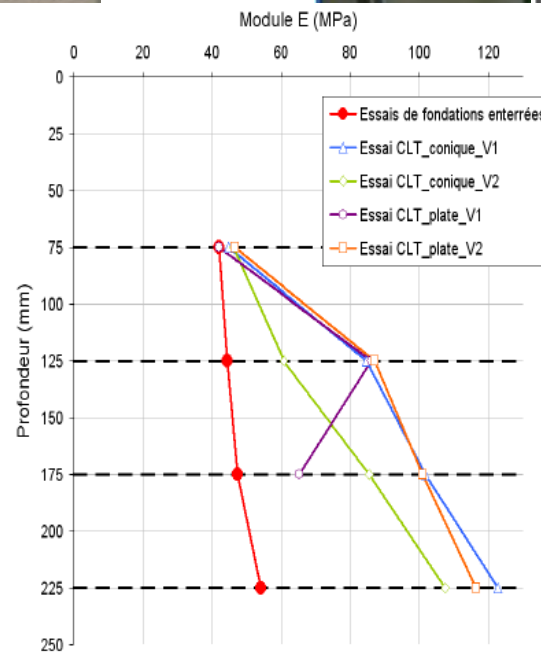




Essais en centrifugeuse



(a) Variation du module E_{50} et de la charge limite des fondations avec la profondeur



(b) Comparaison des modules obtenus pour les fondations et les essais CLT.

Figure VI-39. Synthèse des modules, essais de fondations et essais CLT



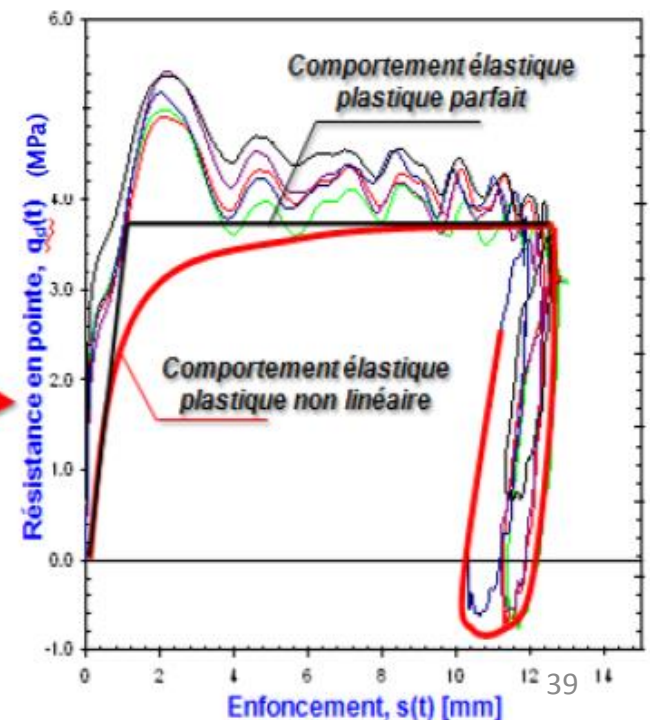
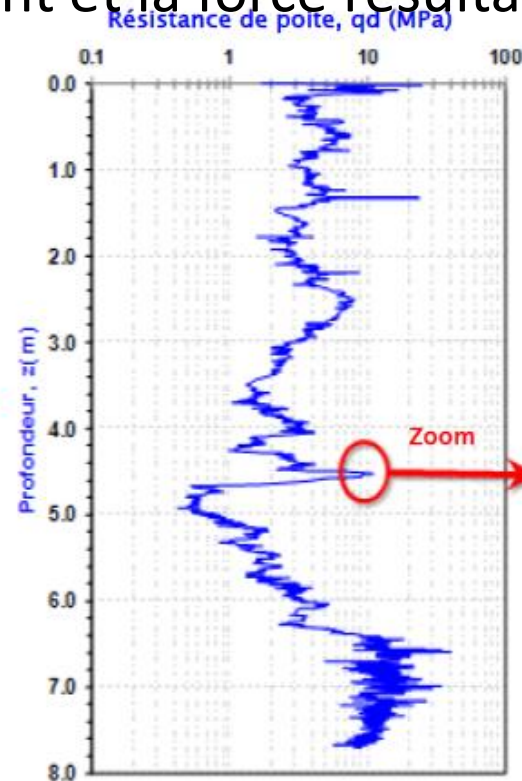
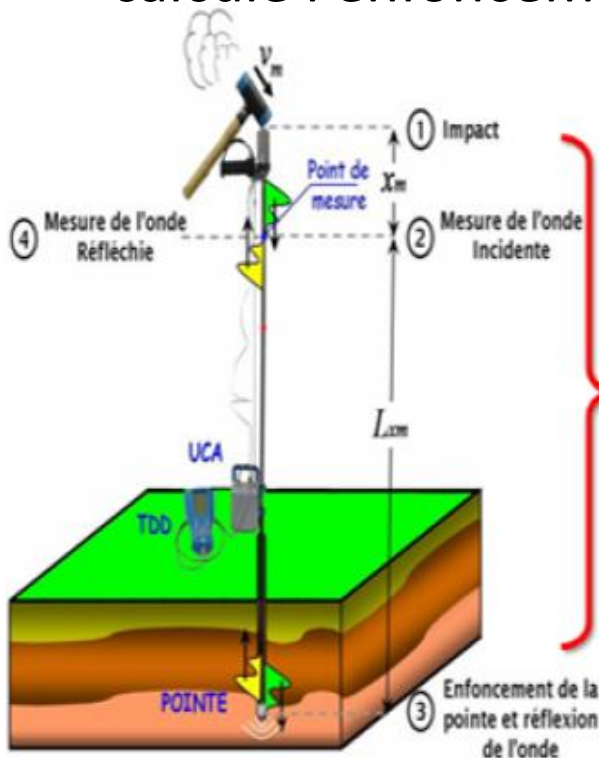
Reconnaissance des remblais ferroviaires

PANDA 3®

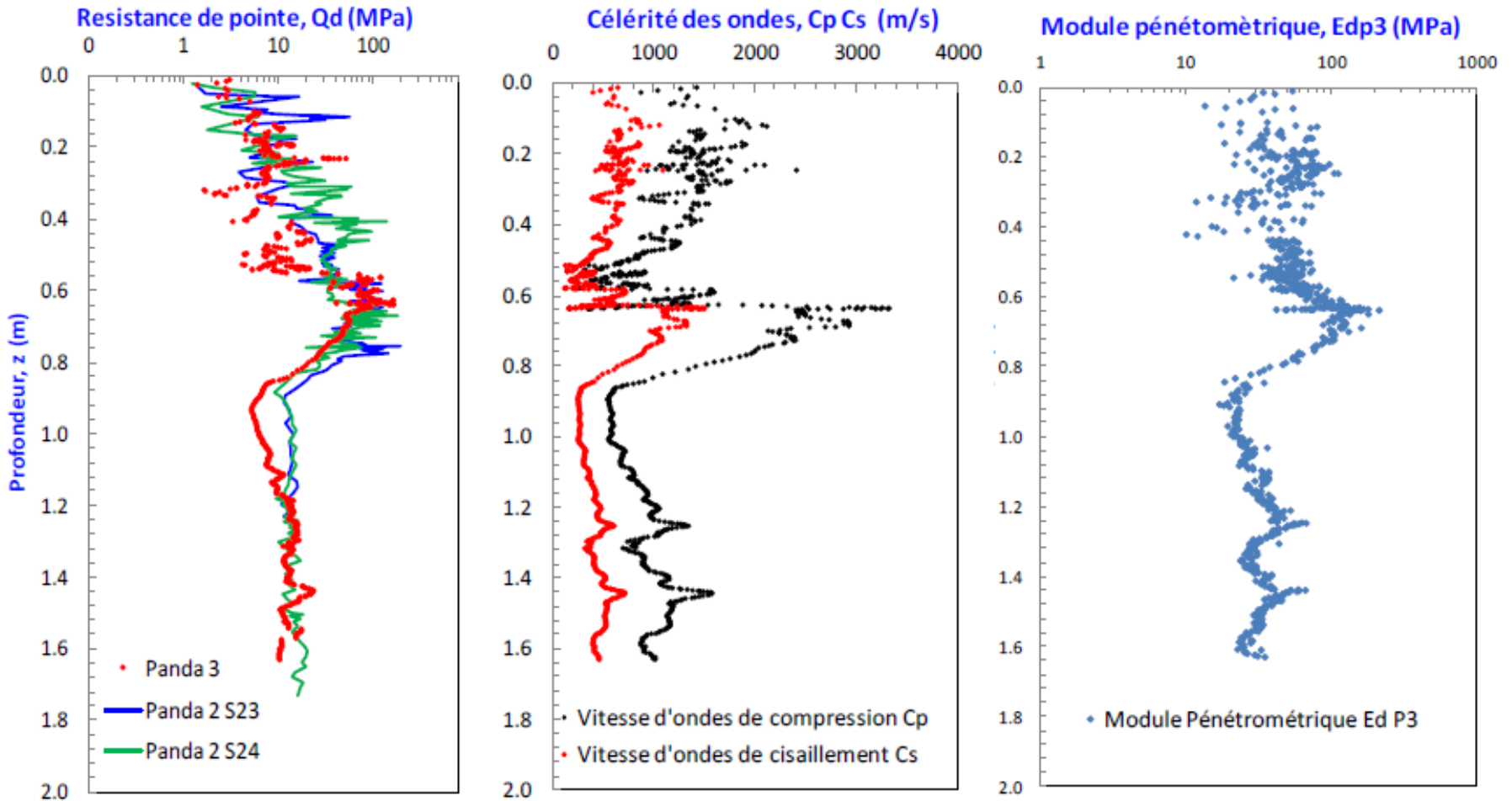
E. Escobar (JNGG2014)

Au cours du battage, mesure dans la tige de la variation de déformation et d'accélération entraînée par le passage de l'onde de compression créée par l'impact.

En découplant les ondes descendantes et remontantes on calcule l'enfoncement et la force résultante en pointe .



Mesure une résistance dynamique, un module de déformation dynamique, des vitesses de cisaillement



De nouveaux modes d'investigation

- La carottage sonique
 - Forage en roto-vibration
Vibration 150 Hz + rotation
150 trs/min maxi
 - Performant dans les
terrains bouillants, sous
nappe
 - Alternative au tubage à
l'avancement pour la pose
d'équipement



- Carottage sonique

- Forage en roto-vibration

- Tiges et tubes spécifiques



- Taillants-couronnes spécifiques

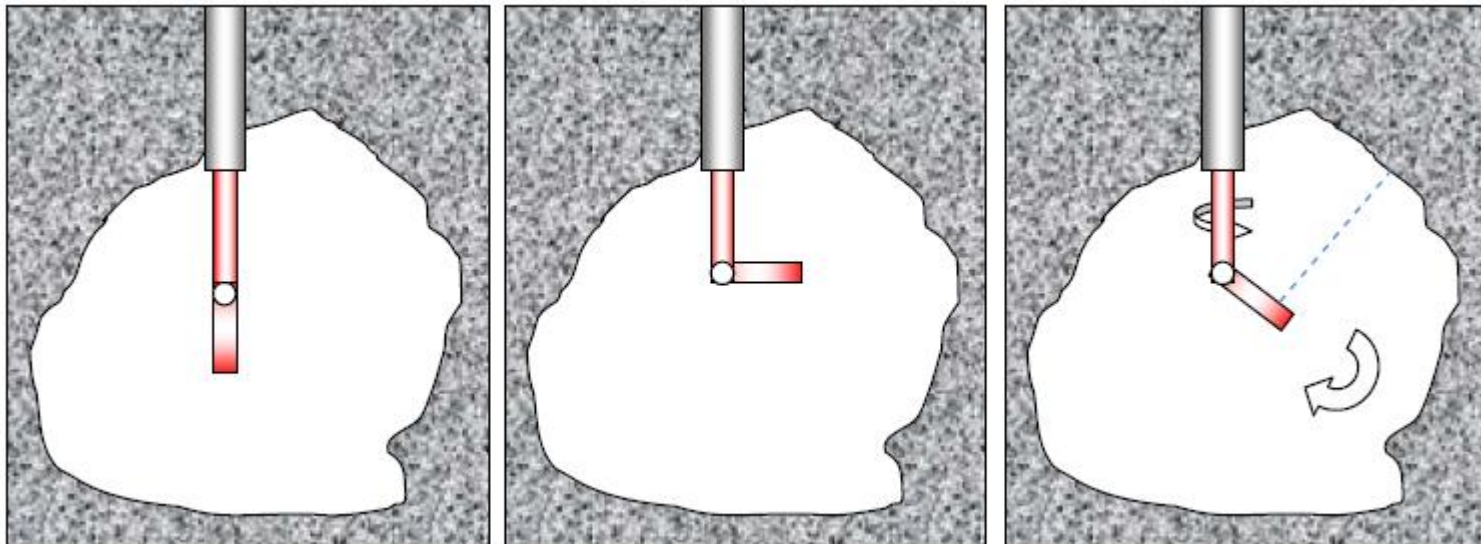


Acquisition de données d'investigation

- Envoi de données de terrain enregistrées par télétransmission
- Tablettes sur chantier:
 - Envoi des instructions aux équipes
 - Saisie des données d'essais
 - Télé-transmission des résultats d'essai au bureau
- Implantation via GPS?
 - Précision encore insuffisante des GPS

De nouveaux modes d'investigation

- Sonde laser en forage:
dimensionnement de cavités
franches hors d'eau
 - Principe:
 - Mesure du temps d'aller-retour d'un rayon laser projeté sur une paroi
 - 400 points par seconde



De nouveaux modes d'investigation

- Sonde laser en forage
 - Sonde équipée d'une caméra : prises de vue endoscopiques

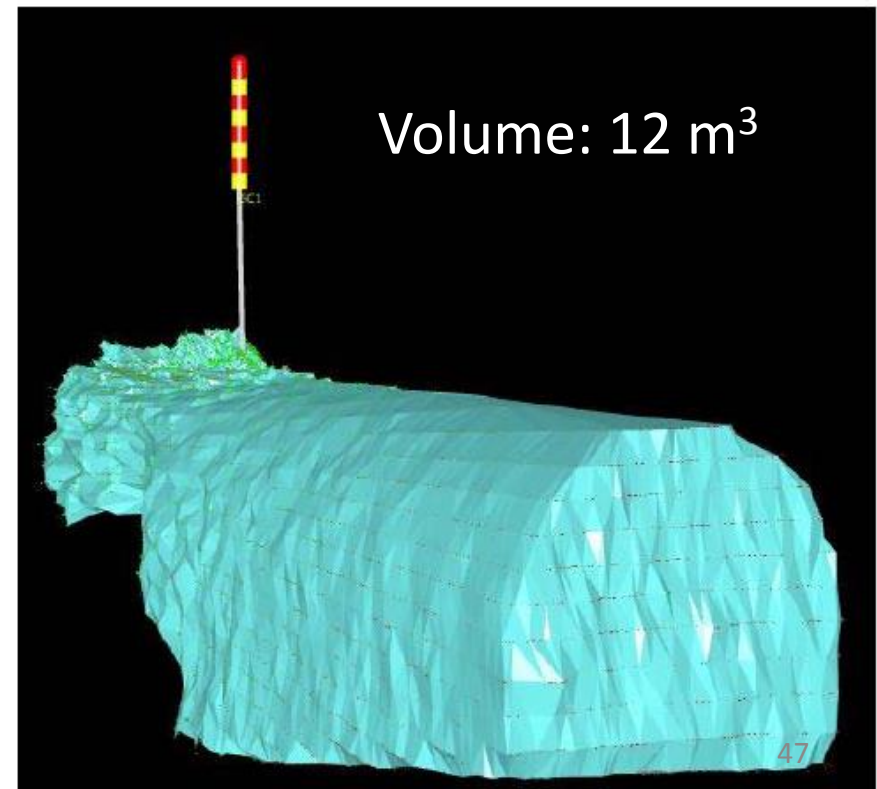
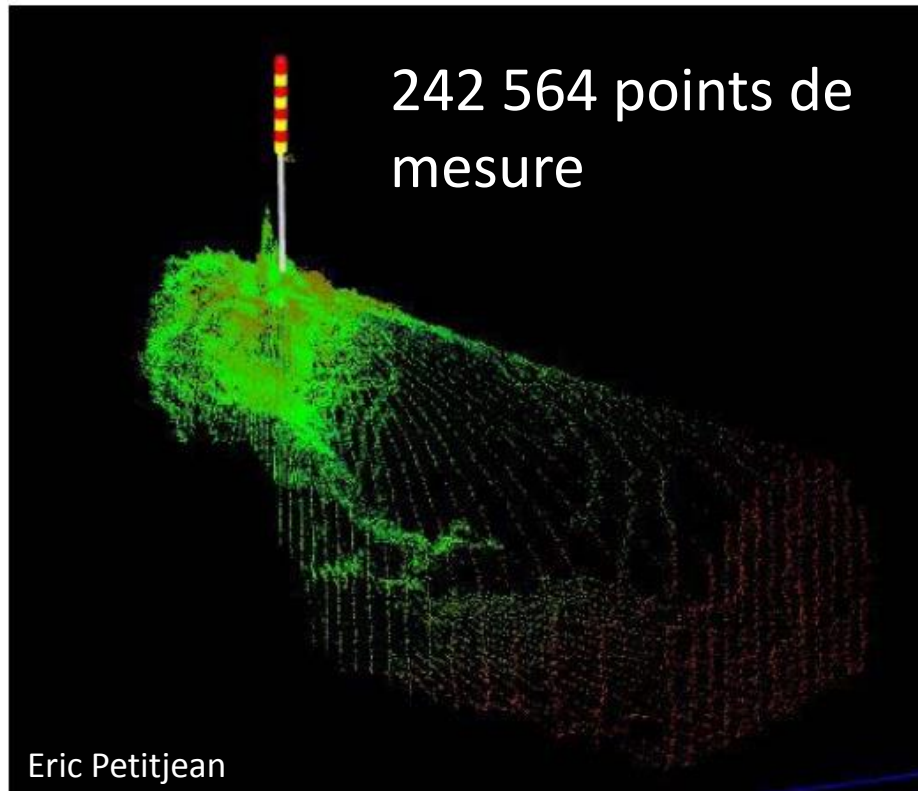


- Sonde laser en forage:
dimensionnement de cavités
franches hors d'eau
 - Traitement et restitution des données:
 - MNT
 - Calculs de volume
 - Plans et coupes

De nouveaux modes d'investigation

- **Sonde laser en forage**
 - Traitement et restitution des données:
 - Calculs de volume

EX: ancienne cave sous
chaussée partiellement
comblée, à Saverne (68)



- Sonde laser en forage

De nouveaux modes
d'investigation

EX: Catiche,
à Faches-Thumesnil (59)

63 926
triangulations

Volume:
 235.9 m^3

Eric Petitjean

-1.60m

-4.10m

-6.60m

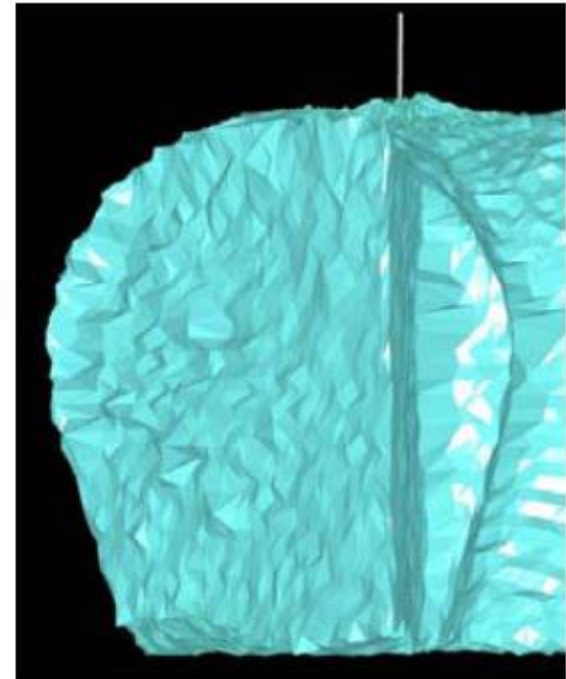
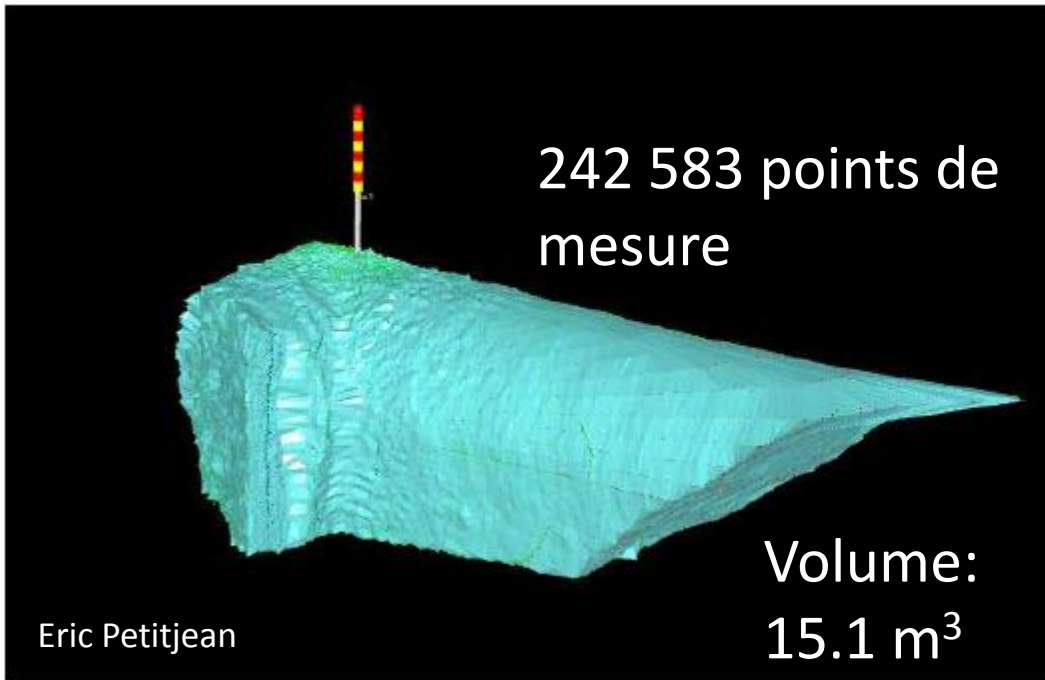
-9.10m

-11.60m

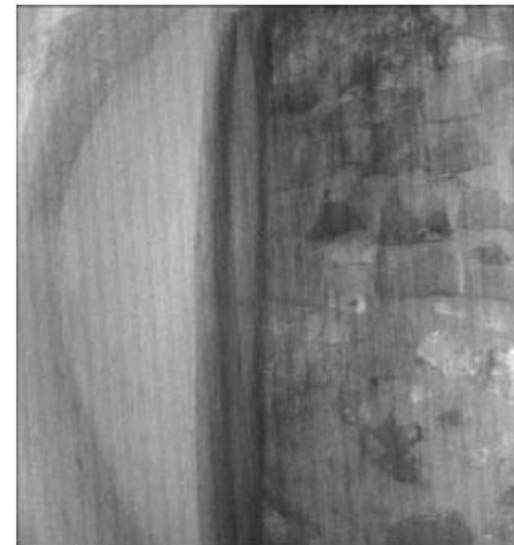
48

- Sonde laser en forage

De nouveaux modes
d'investigation



EX: ancienne galerie
murée,
à Bourges (18)



De nouveaux modes d'investigation

- Les drones

- Acquisition 3D
- Traitement et restitution des données:
 - MNT
 - Ortophotographie
 - Calculs de volume
 - Plans et coupes
- Inspections techniques d'ouvrages, falaises



- Le drone: inspection

De nouveaux
modes
d'investigation



Le drone en géotechnique

- **Mesure de la fracturation rocheuse**

- Ortho-photographies
- Supports de relevés de fracturation
- Canevas stéréographiques

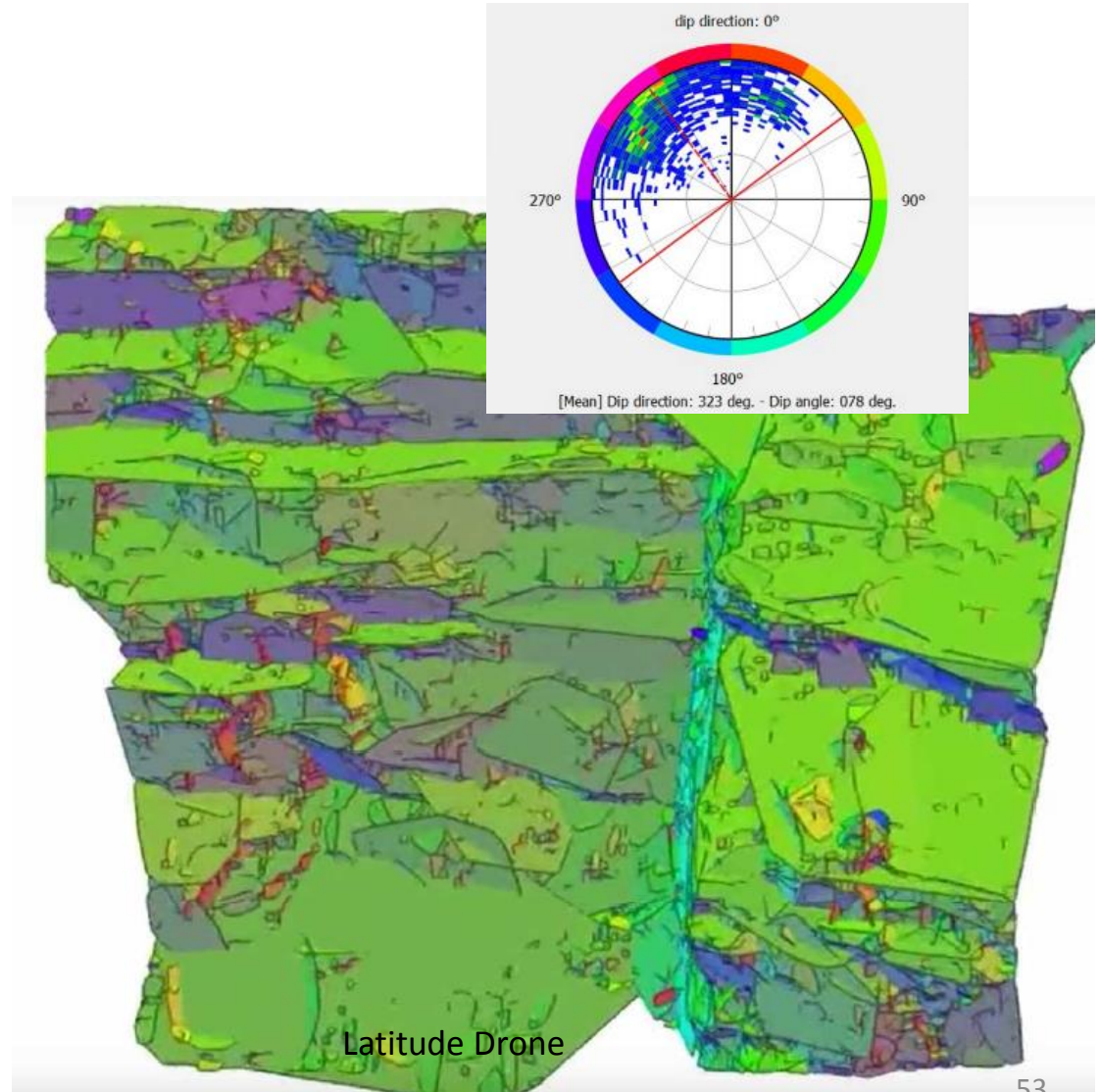
Exemple de traitement d'image



Latitude Drone

Relevé de fractures à partir d'un drone

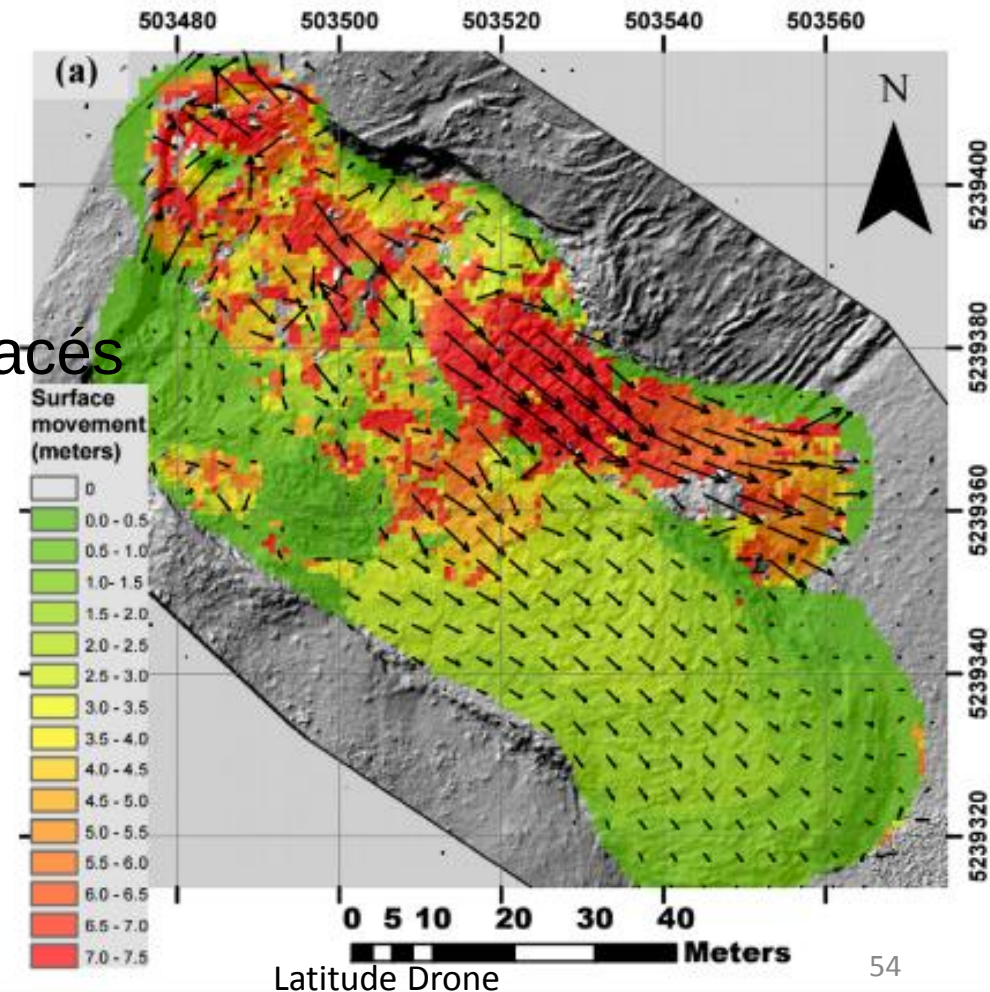
- Interprétation: orientation et pendage
- Complémentaire des sondages et de l'imagerie de paroi en forage



Le drone en géotechnique

- Surveillance des mouvements de terrain

- Cartes de déplacements
- M N T
- Coupes
- Maillage éléments finis
- Calculs de volumes déplacés



- Etude/contrôle des terrassements
 - Plans/coupes
 - Calculs de cubature/surfaces
 - Contrôles de volume



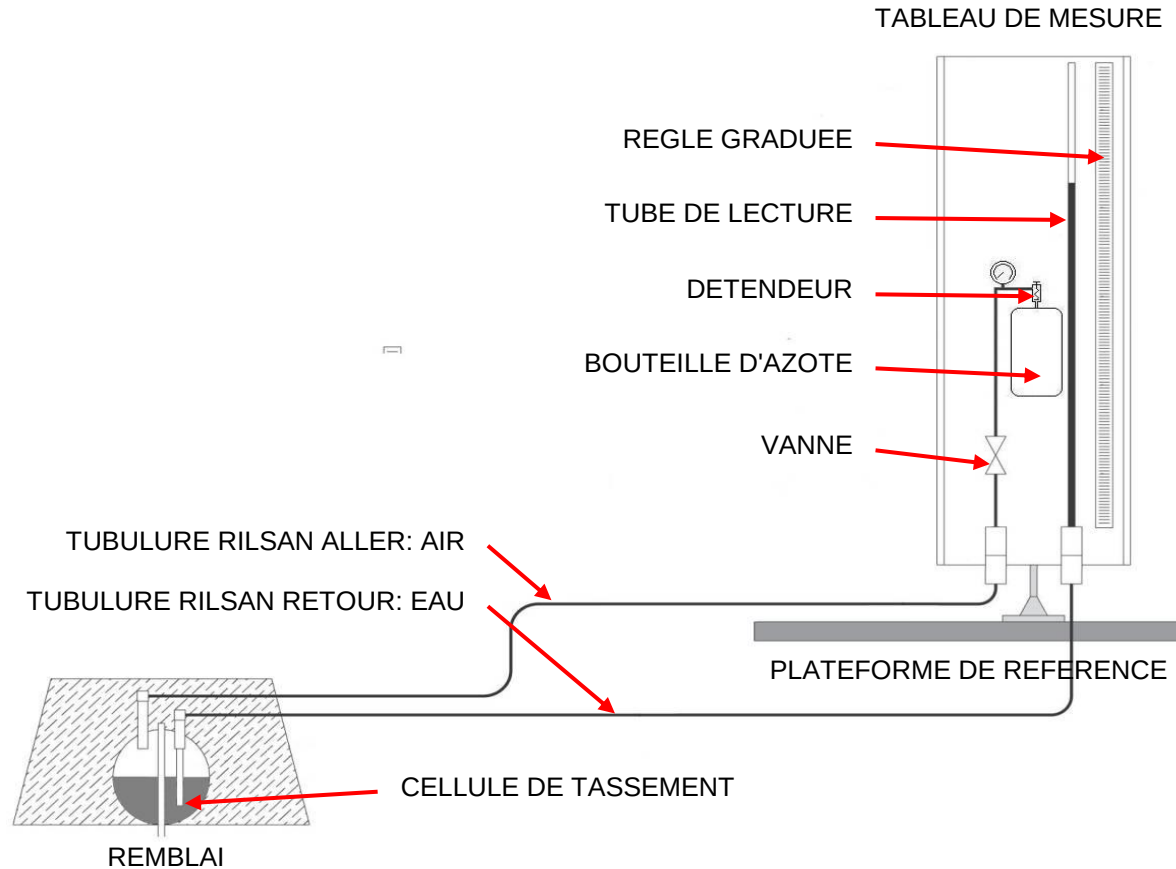
Sommaire

- L'eau dans le sol
- Les investigations géotechniques
- **L'instrumentation, l'auscultation**
- Surveillance des ouvrages ou dimensionnement interactif
- L'ingénierie géotechnique
- L'évolution de la pratique: discussion

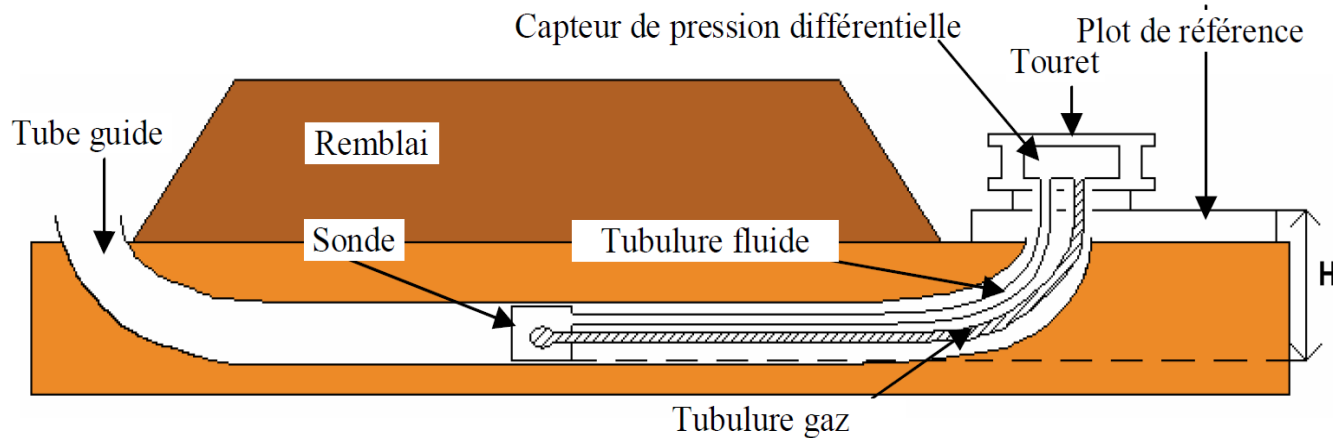
Auscultation /suivi

- Acquisitions et enregistrement
- Transferts des données en temps réel
- Dispositifs d'alerte automatique par mail/tél
- Nombreuses applications:
 - Suivi topographique de précision
 - Mesures de vibration
 - Suivis piézométriques
 - Suivis inclinométriques: inclinomètres automatiques et sans fil
 - Fissuromètres, extensomètres, cordes optiques sans fil
 - Contrôles de tension des tirants

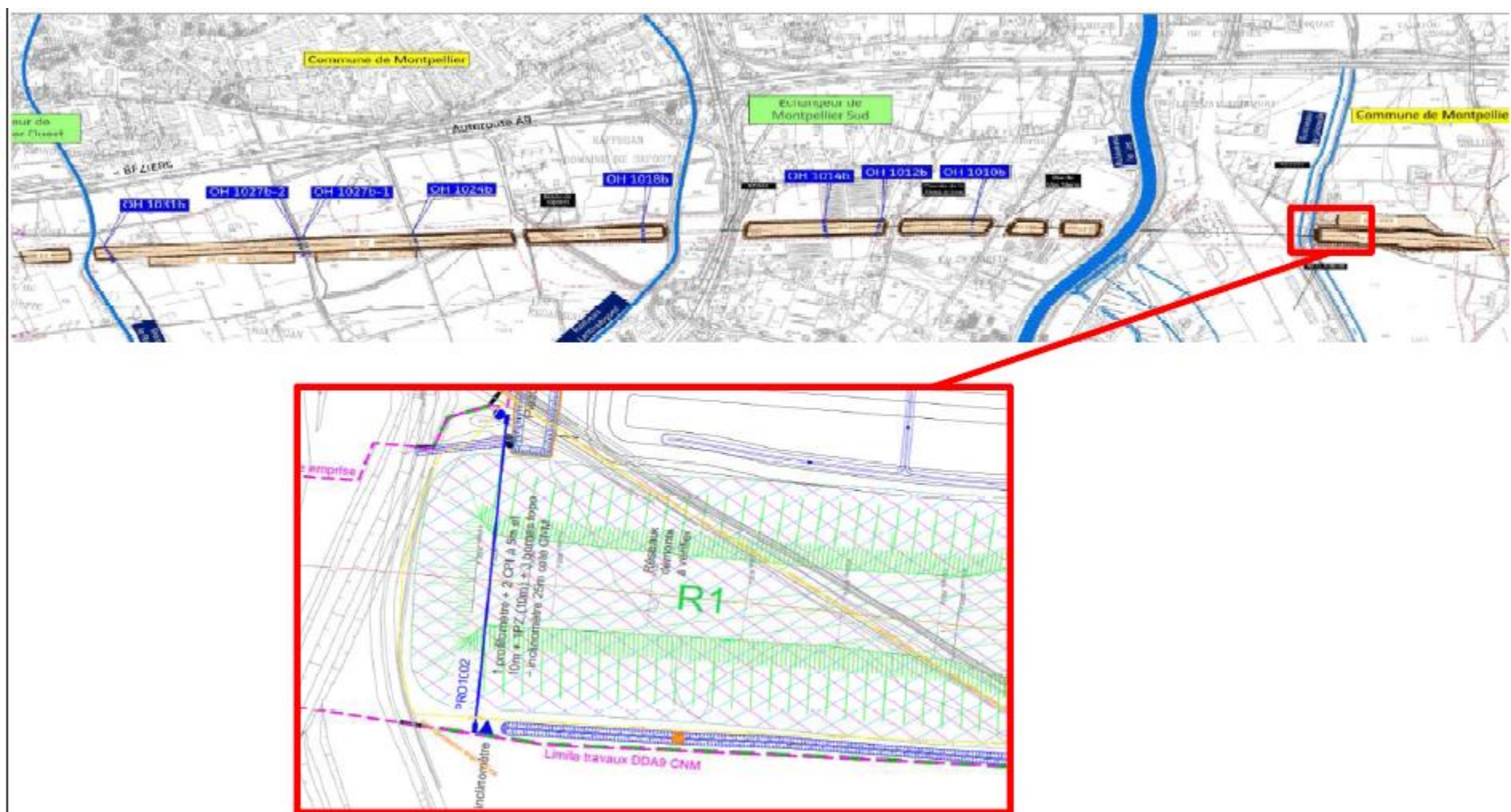
Exit le tassomètre à boule



Mesures au profilomètre

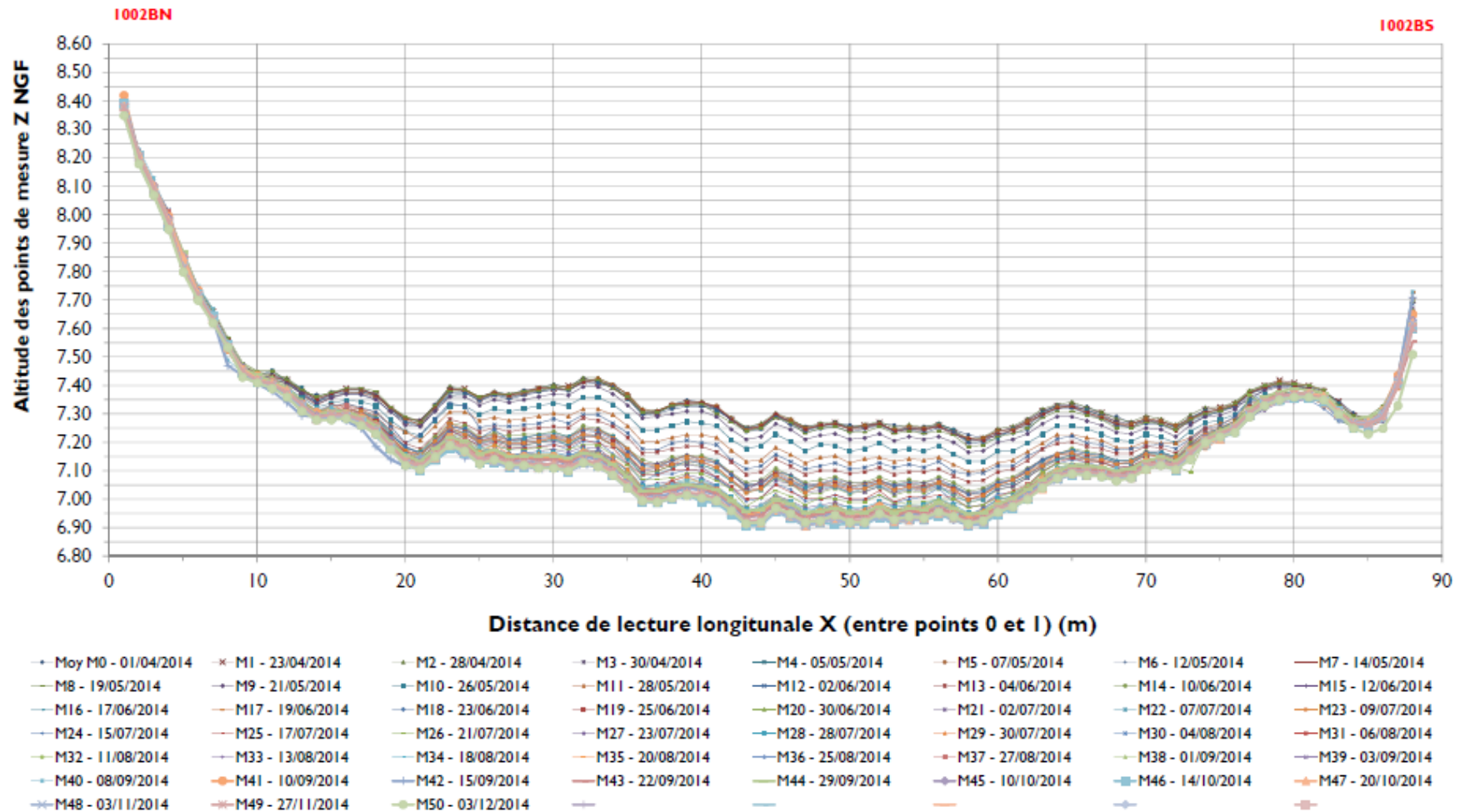


Ex: doublement de l'A9



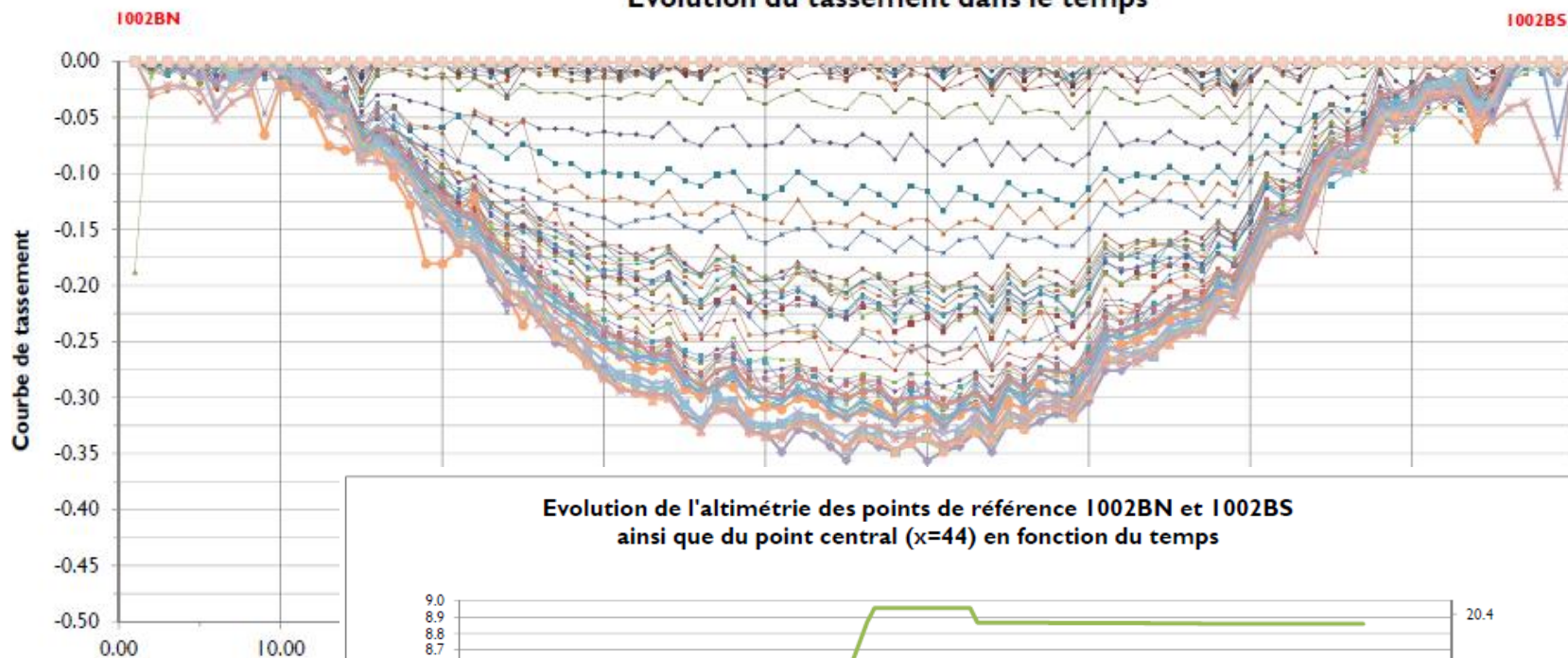
Données brutes

Evolution du profil dans le temps - Valeur moyenne en NGF

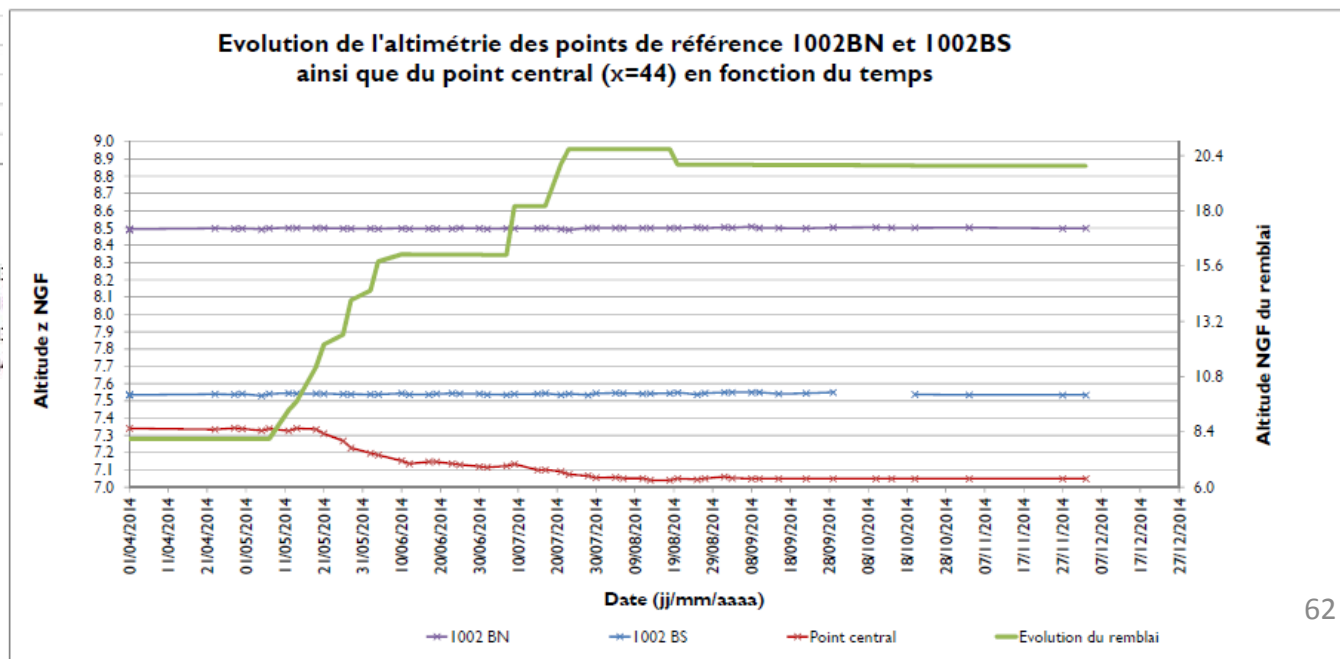


Analyse des données

Evolution du tassement dans le temps



Evolution de l'altimétrie des points de référence I002BN et I002BS ainsi que du point central (x=44) en fonction du temps



Exemple d'auscultation

Déconstruction/reconstruction de l'Hôtel de Paris à Monaco (ECARTIP)

- Un réseau de 7 bornes piliers autour des ouvrages.
- La surveillance de 130 mini prismes d'auscultations.
- Des mesures de déplacements en absolu et relatif et des mesures de convergences.



Ecartip

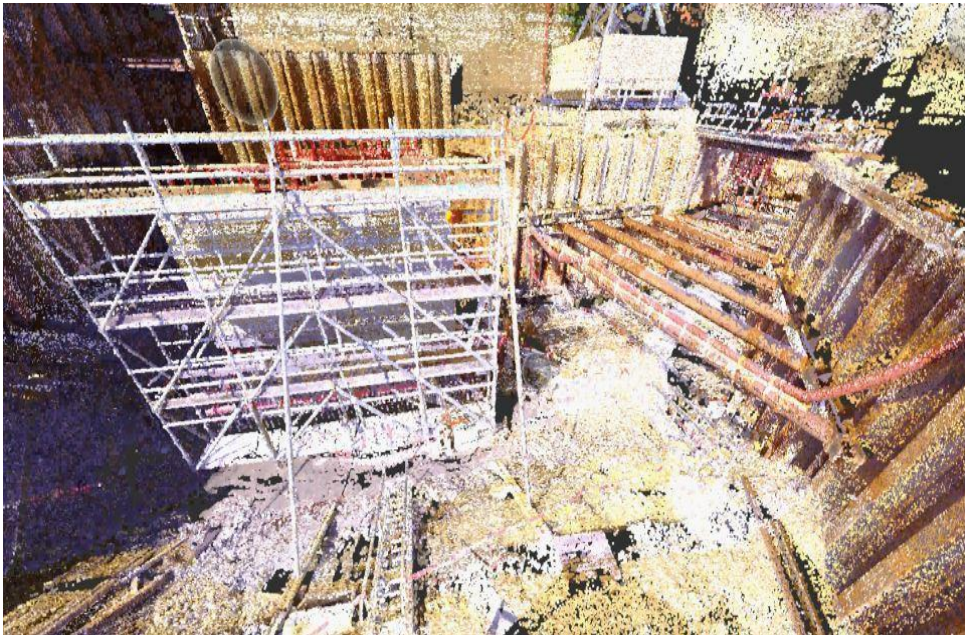
Scan Laser statique

Exemple:

scan Faro X330 d'une portée supérieure à 300m

Permet de relever de manière précise (bruit de 3 mm)
et rapide (presque 1 million de points à la seconde)

l'environnement voulu afin de le modéliser, le dessiner
ou le comparer.



Systèmes lidar dynamiques

- Grands Projets d'Infrastructures Linéaires,
- Des outils adaptés à toutes les phases de la construction ; de l'état de lieux avant travaux au récolement.

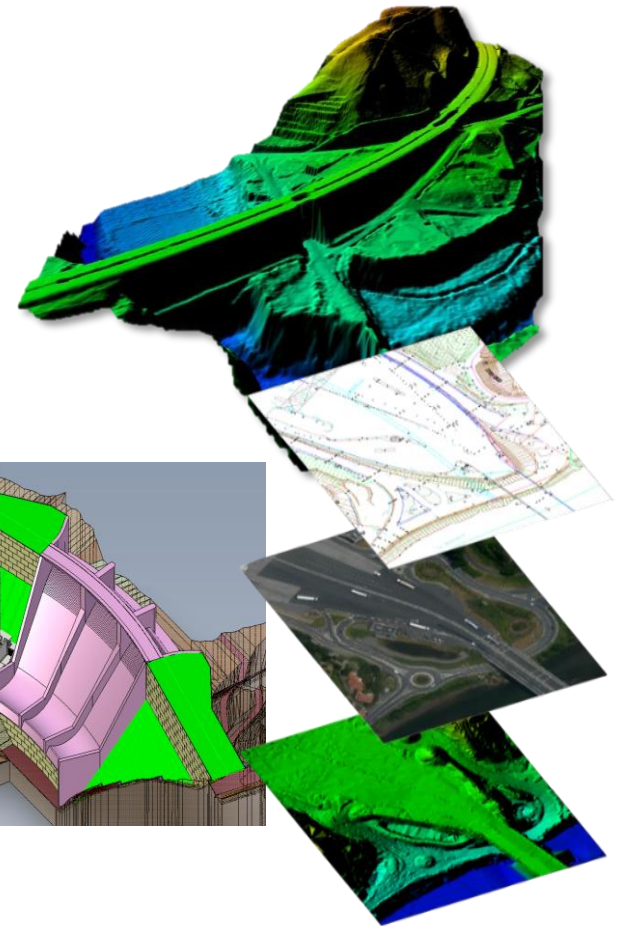
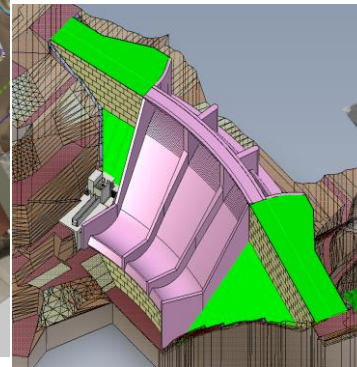


Ecartip

Systèmes lidar dynamiques

- Les données sont intégrables dans les suites logicielles CAO/DAO standard

- Modèle numérique de surface & de terrain (MNS/MNT)
- Classification des données laser (végétation, bâti, etc.)
- Courbes de niveaux
- Plan topographique
- Orthophotographies

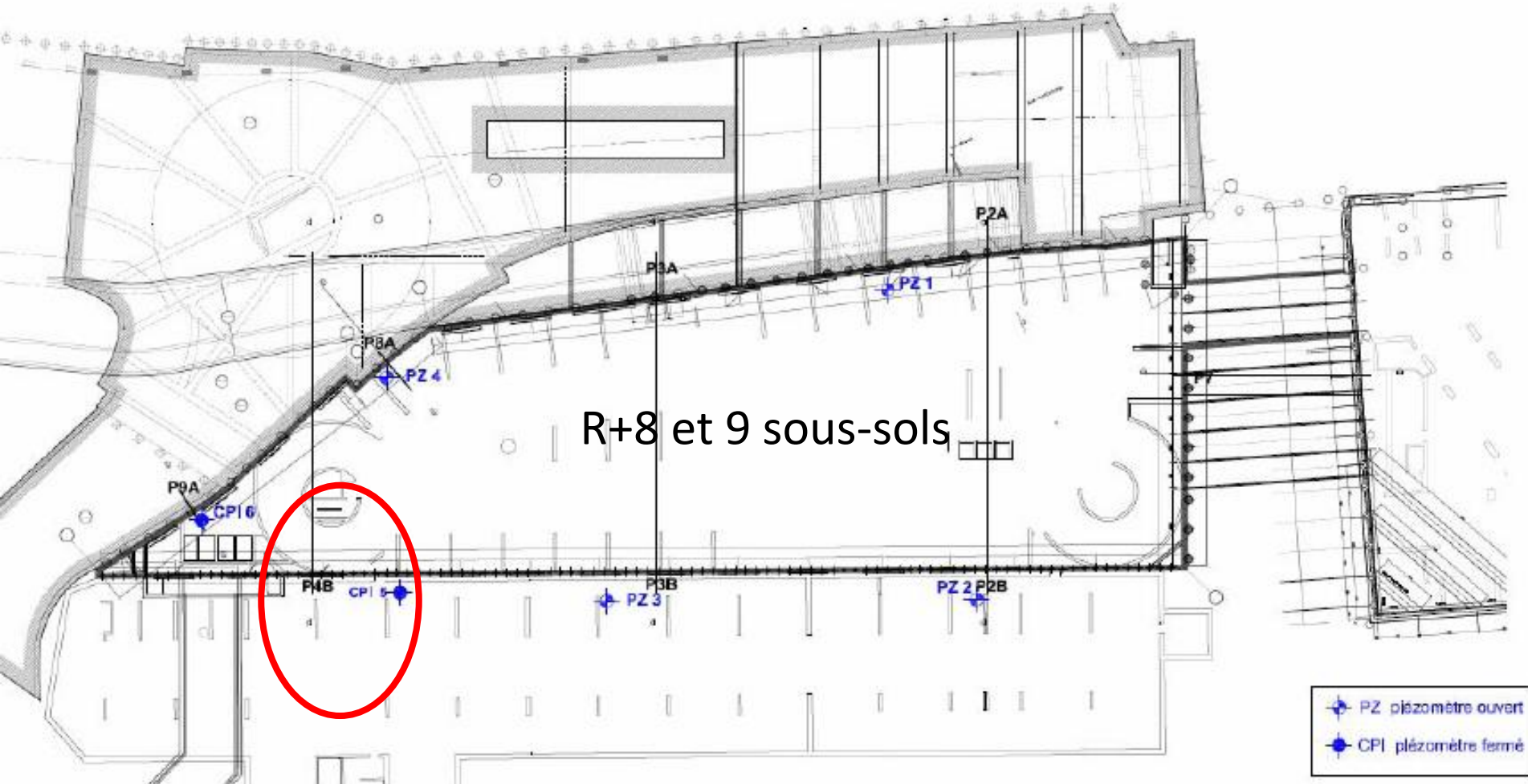


L'utilité de l'instrumentation des chantiers dans la maîtrise des risques- 1^{er} exemple

- Chantier Rainier III à Monaco



Repérage des coupes

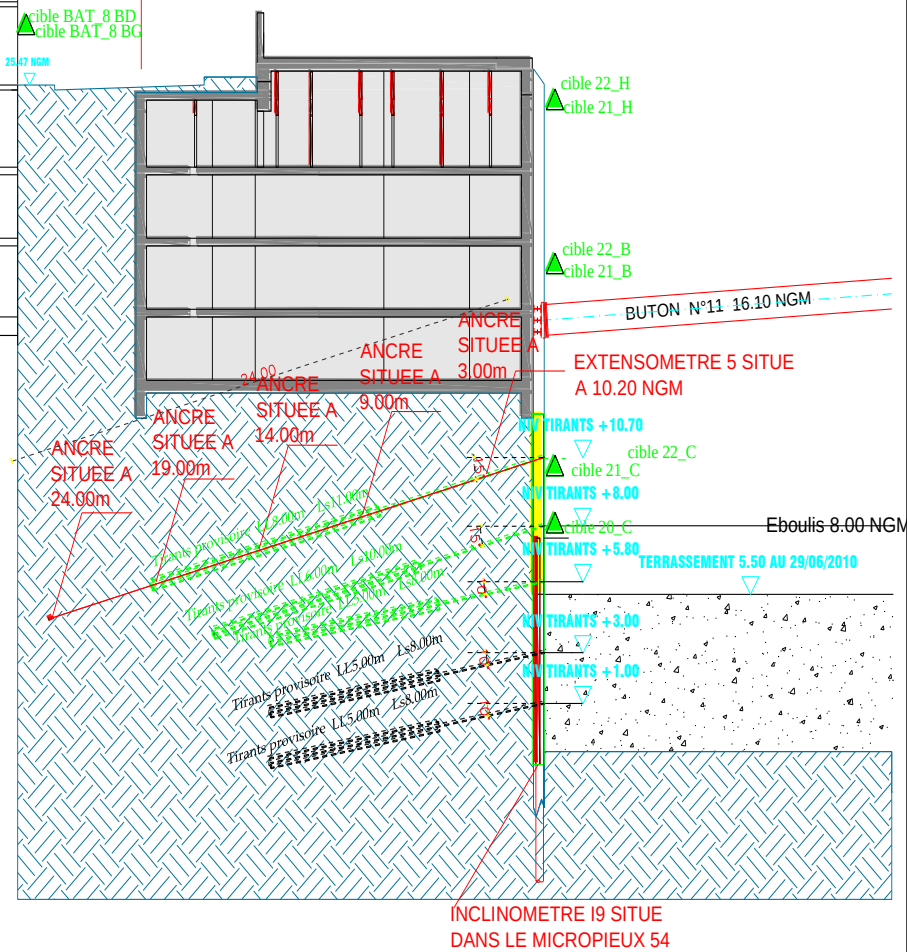


Repérage coupes de calcul et piézomètre



The diagram illustrates three different pier types used in bridge construction:

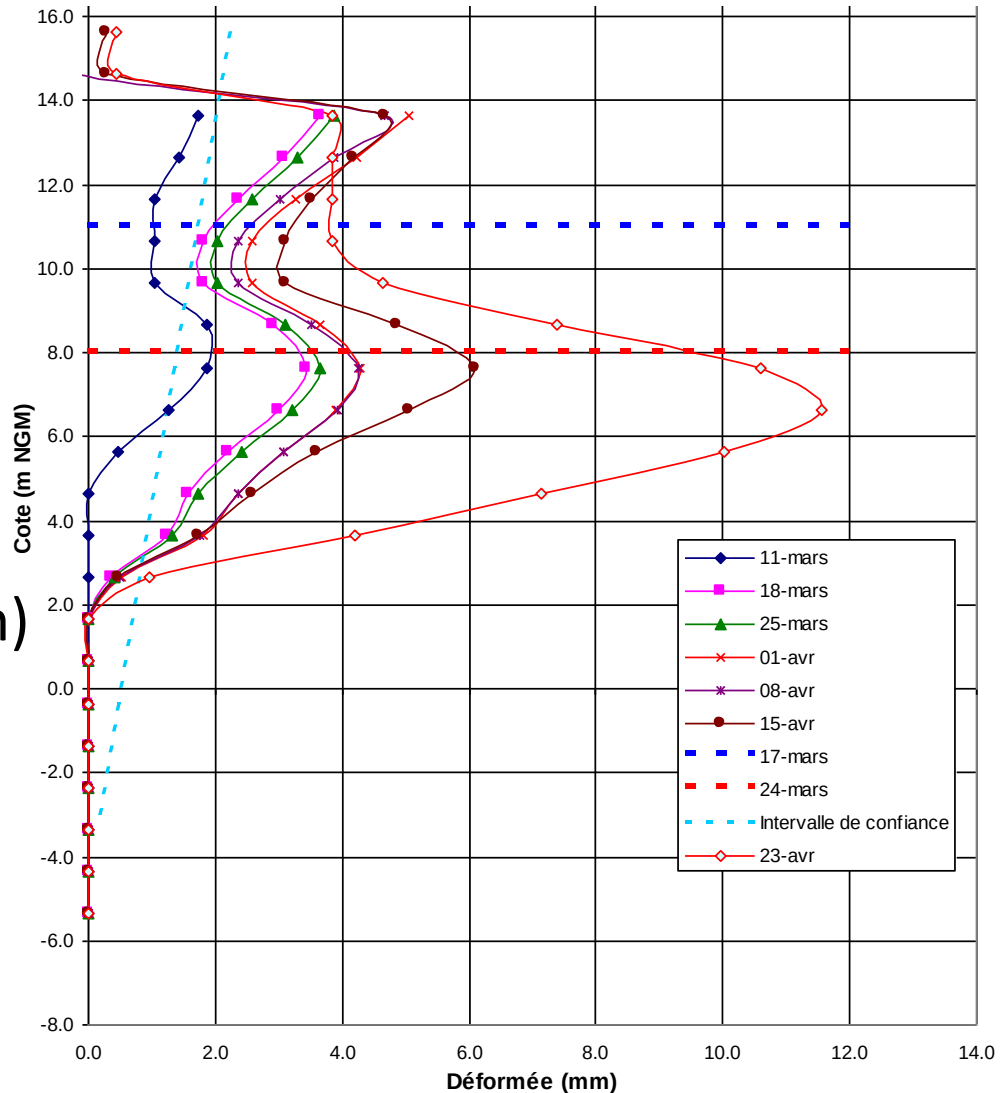
- TIRANTS TENDUS**: Represented by a green horizontal bar.
- TIRANTS NON TENDUS**: Represented by a black dashed horizontal bar. Below it, the text "Tirants provisoire L5,00m Ls9,00m" is written.
- PAROI BETONNEE**: Represented by a yellow horizontal bar.



Alerte: Evolution inclinomètre I9 (coupe 4B)

Dépassement:

Seuil d'alerte (4 mm),
Seuil d'intervention (4,5 mm)
Maximum admis (5mm)



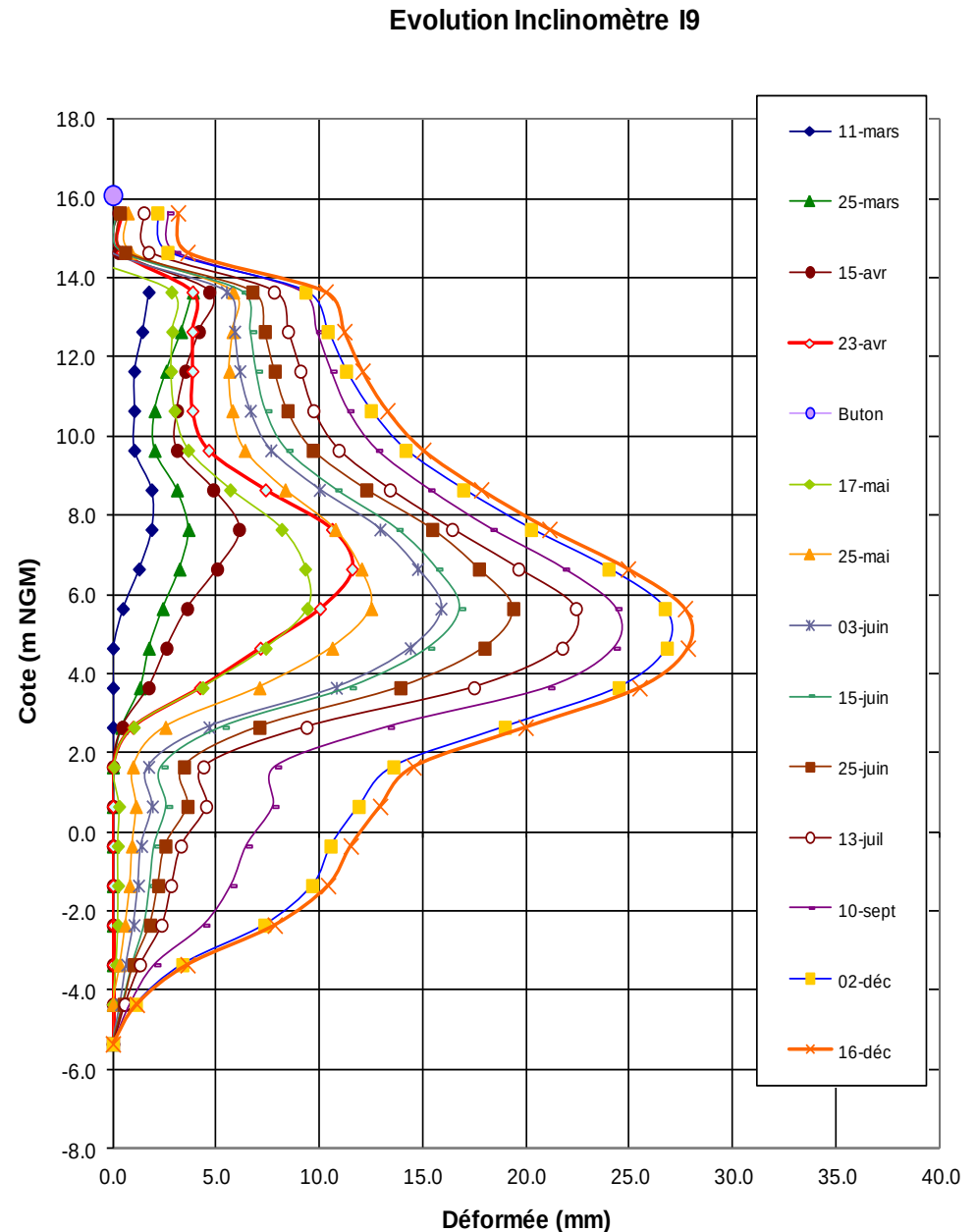
Adaptations mises en œuvre

- Investigations complémentaires:
 - Constat d'un niveau d'argile marneuse au contact Jurassique /crétacé, plastique, de plus faibles caractéristiques mécaniques.
- Un niveau de butons supplémentaire
- Un niveau de tirants supplémentaire, de longueur plus importante (23m au lieu de 19m)
- Drain profond
- Terrassements par plots de deux tirants

Poursuite des travaux:
fond de fouille -1,8 NGM,
atteint en septembre

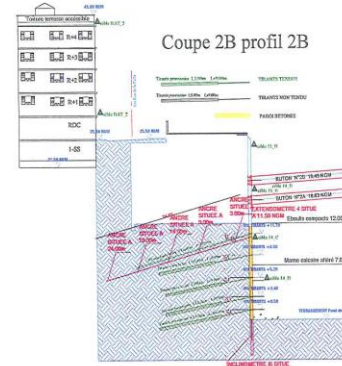
25mm atteint (sans
dommage aux avoisinants)

28 mm atteint en
décembre



L'importance de l'analyse des données

Aperçu d'une page du rapport de suivi pour un profil



Observations :

Géologies rencontrées sur paroi

Théorique

- Eclous compacts +12,00 NGM
- Marno calcaire altéré +7,00 NGM

Réel

- Eclous compacts +13,20 NGM
- Marno calcaire altéré +7,00 NGM

Niveau d'eau +1,50 NGM (obtenue avec lecture piézomètre PZ 2)

Avancement (mètres)

- Tirants 11,70 NGM (boulon)
- Tirants 8,50 NGM (boulon)
- Tirants 5,20 NGM (boulon)
- Tirants 2,40 NGM (boulon)
- Tirants 0,80 NGM (boulon)
- P1 - SS-0 étudié

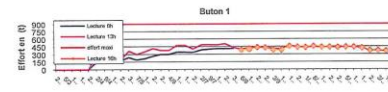
Avoisinants et paroi existante : Mouvement sur la cible 15_B inférieure au mm.

Tête de paroi : Stabilisation

Lit n°1 (+7,80 NGM) : Stable

Lit n°2 (+2,00 NGM) : Stable

Conclusion : Mouvement sur la cible 15_B au droit des butons 2B et 3B en corrélation avec la baisse des efforts dans les butons



Conclusions: instrumentation

- Importance:
 - de l'instrumentation,
 - du suivi en temps réel,
 - de l'analyse en temps réel

un ingénieur sur site, à temps plein
- Difficulté d'interprétation de certaines mesures:
nécessité de corréler les observations entre elles
- Utiliser le retour d'expérience

Auscultation et suivi- 2^{ème} exemple

Etat initial: ancienne carrière d'exploitation de grès

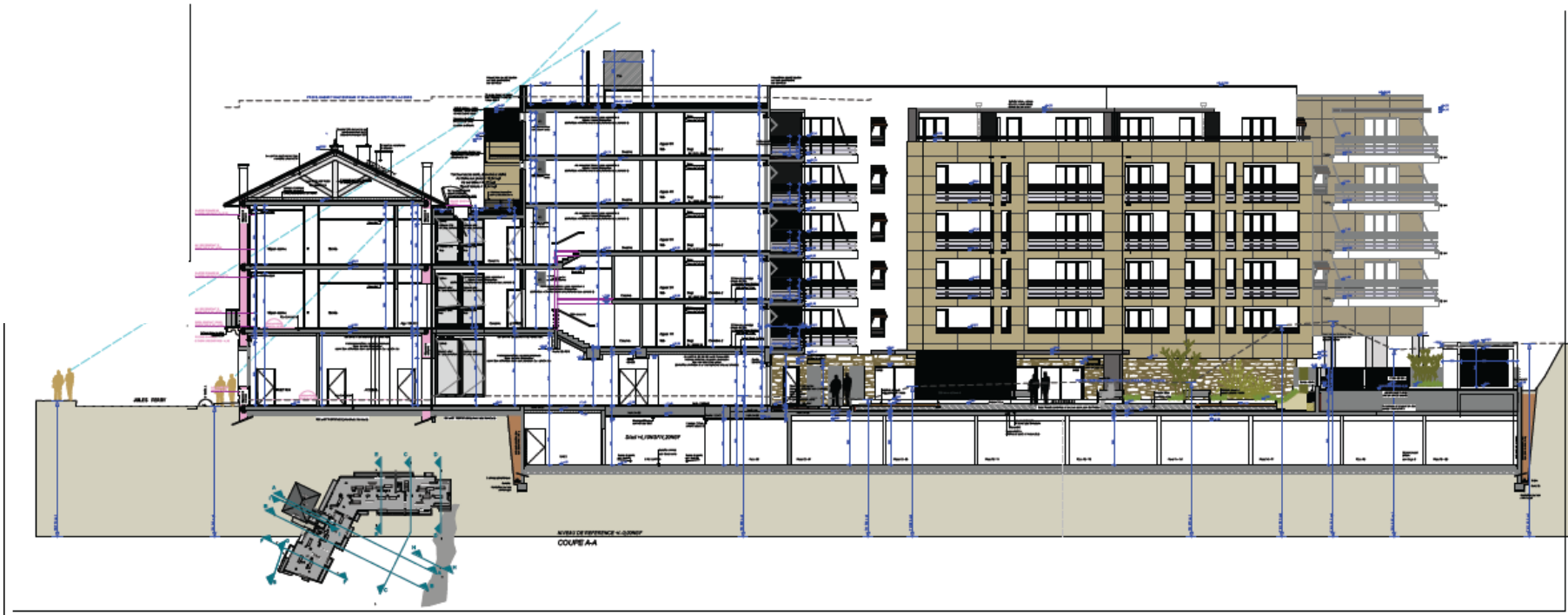
Le site



Eric Petitjean

Le projet

- Projet immobilier au pied d'une falaise rocheuse (ancienne carrière de grès)



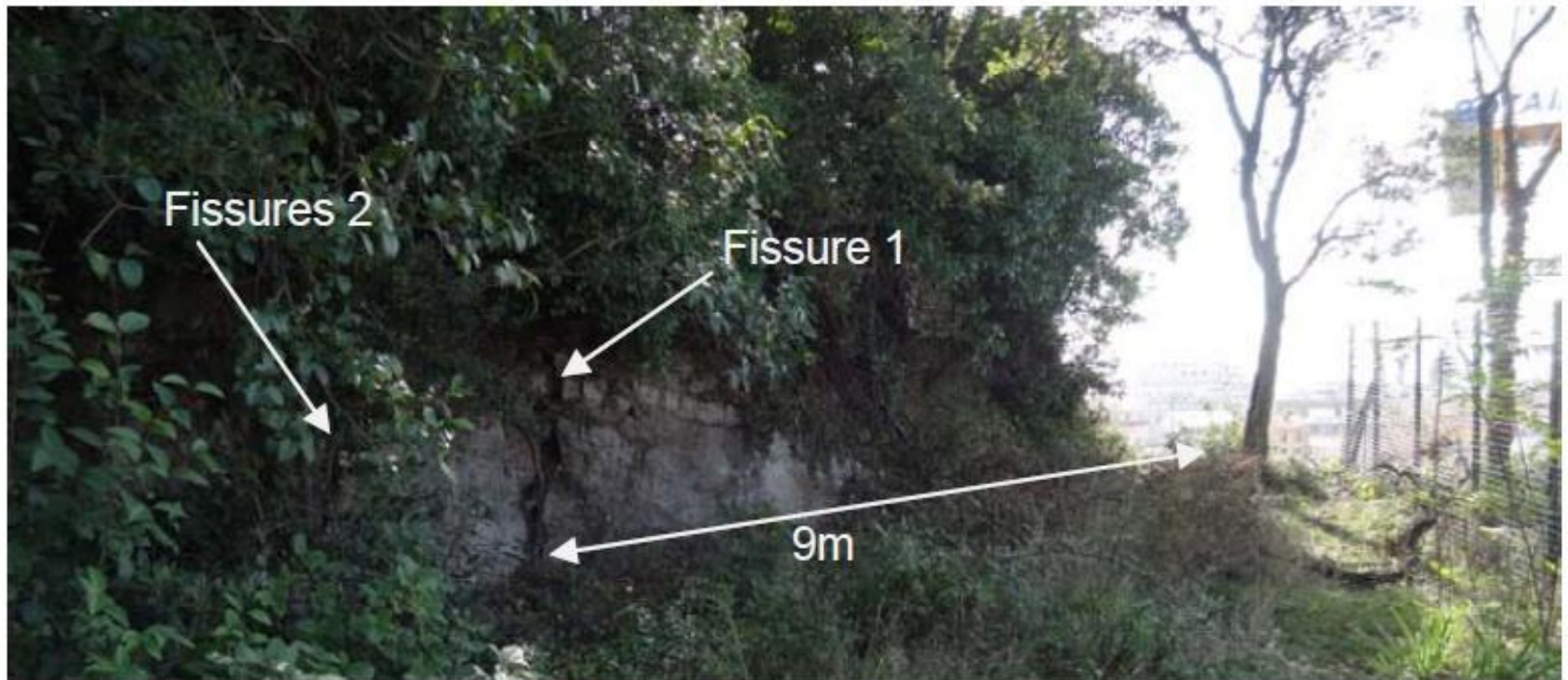
Les faits Eboulement principal août 2014 : 9000 m³



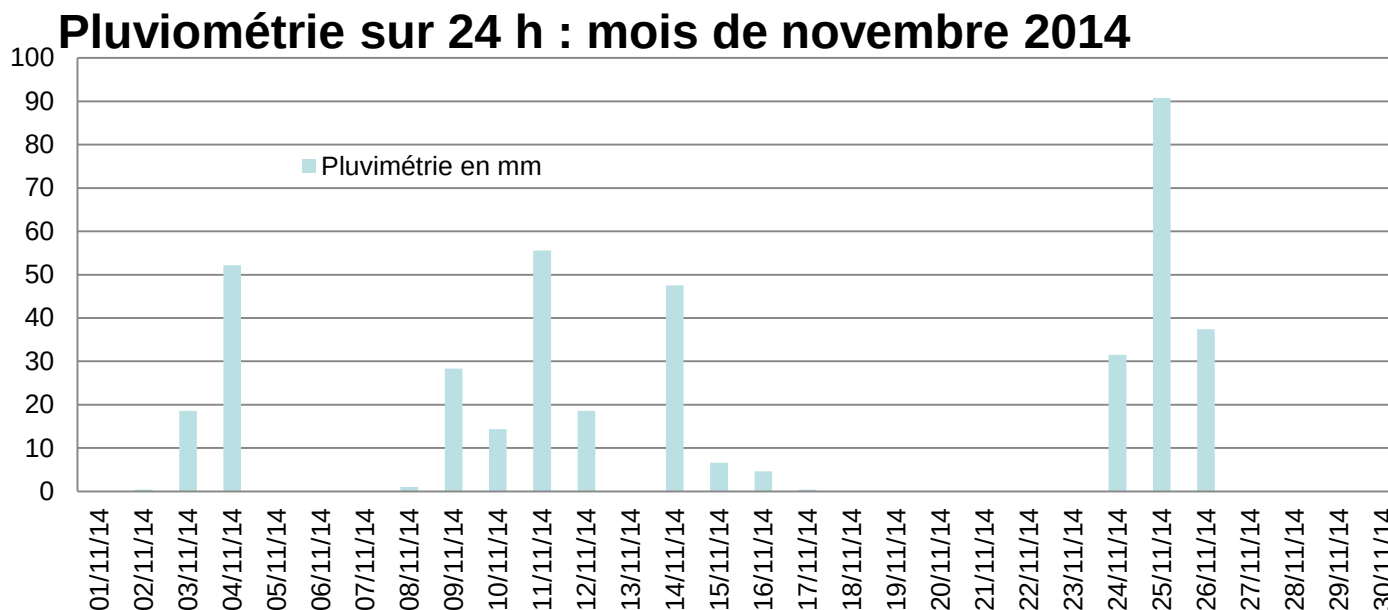
Photo : 25/09/14

Eric Petitjean

Premiers constats



Evolution du phénomène



- **Suivi topographique (géomètre):**

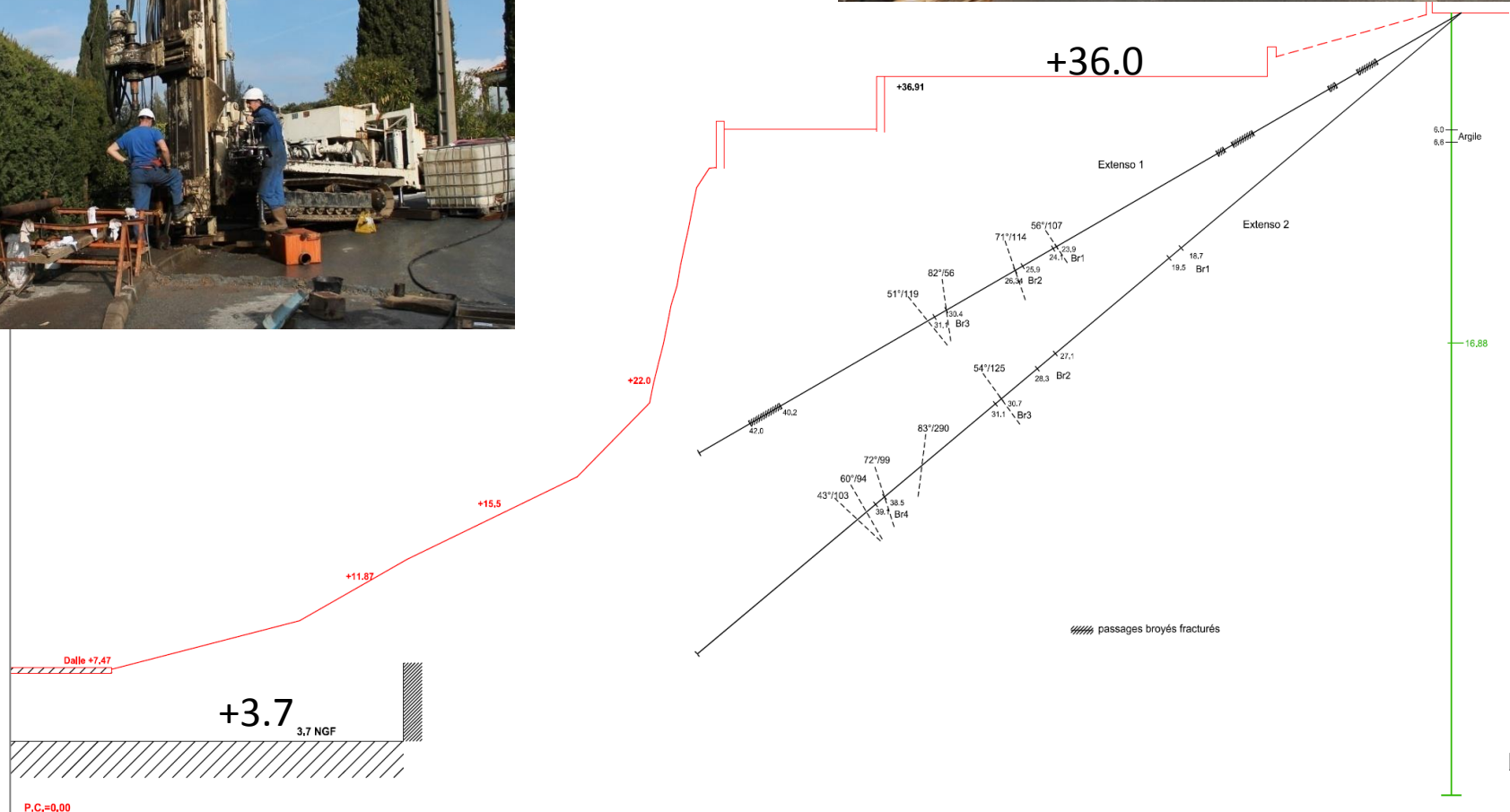
Mouvements observés jusqu'à 40m en arrière de la falaise le 18 novembre

- Evacuation de 3 maisons
- Fermeture de la rue en contrebas
- réalisation d'investigations complémentaires

Extension des désordres en arrière de la falaise



Campagne de reconnaissance



Levé géologique

En grand

- Sur le site
- En dehors du site



Levé géologique

- En détail



Analyse géologique

- Sondages carottés



SCe2 : passée de 19.1 à 19.5 m

Analyse géologique

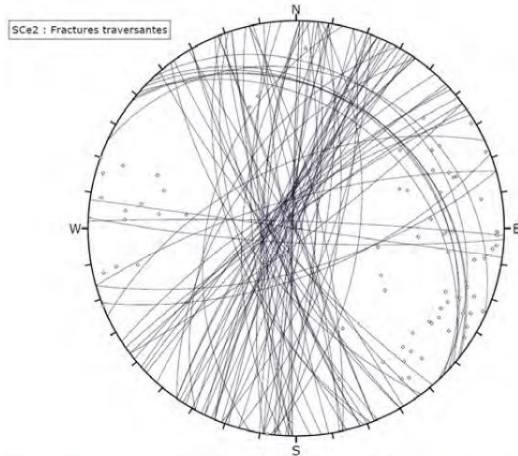


Figure 8 : sondage SCe2 : Projection stéréographique hémisphère supérieur : fractures traversantes.

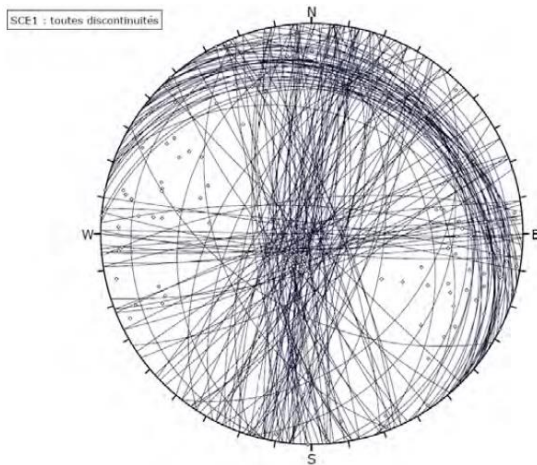
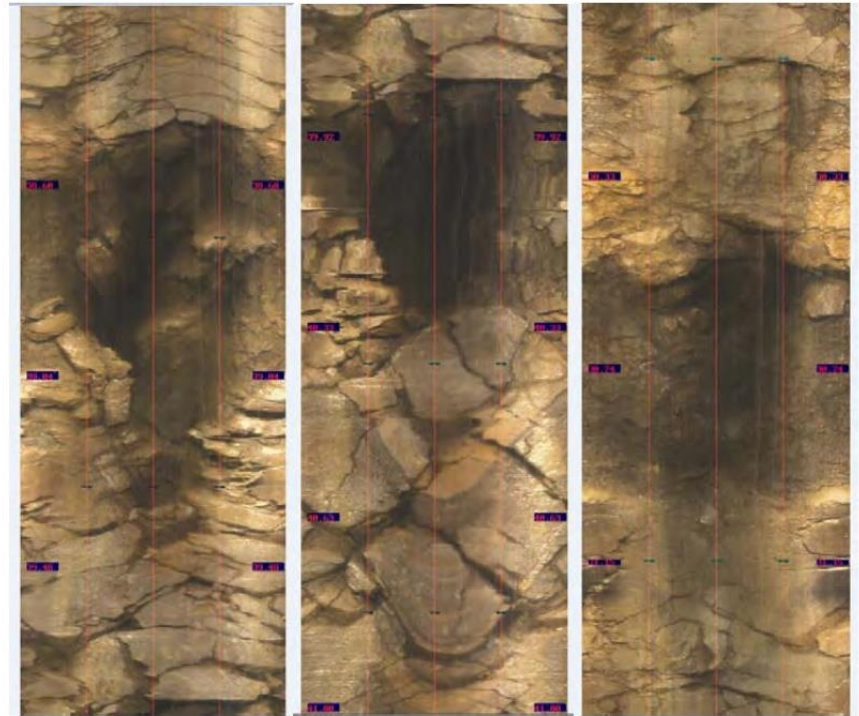


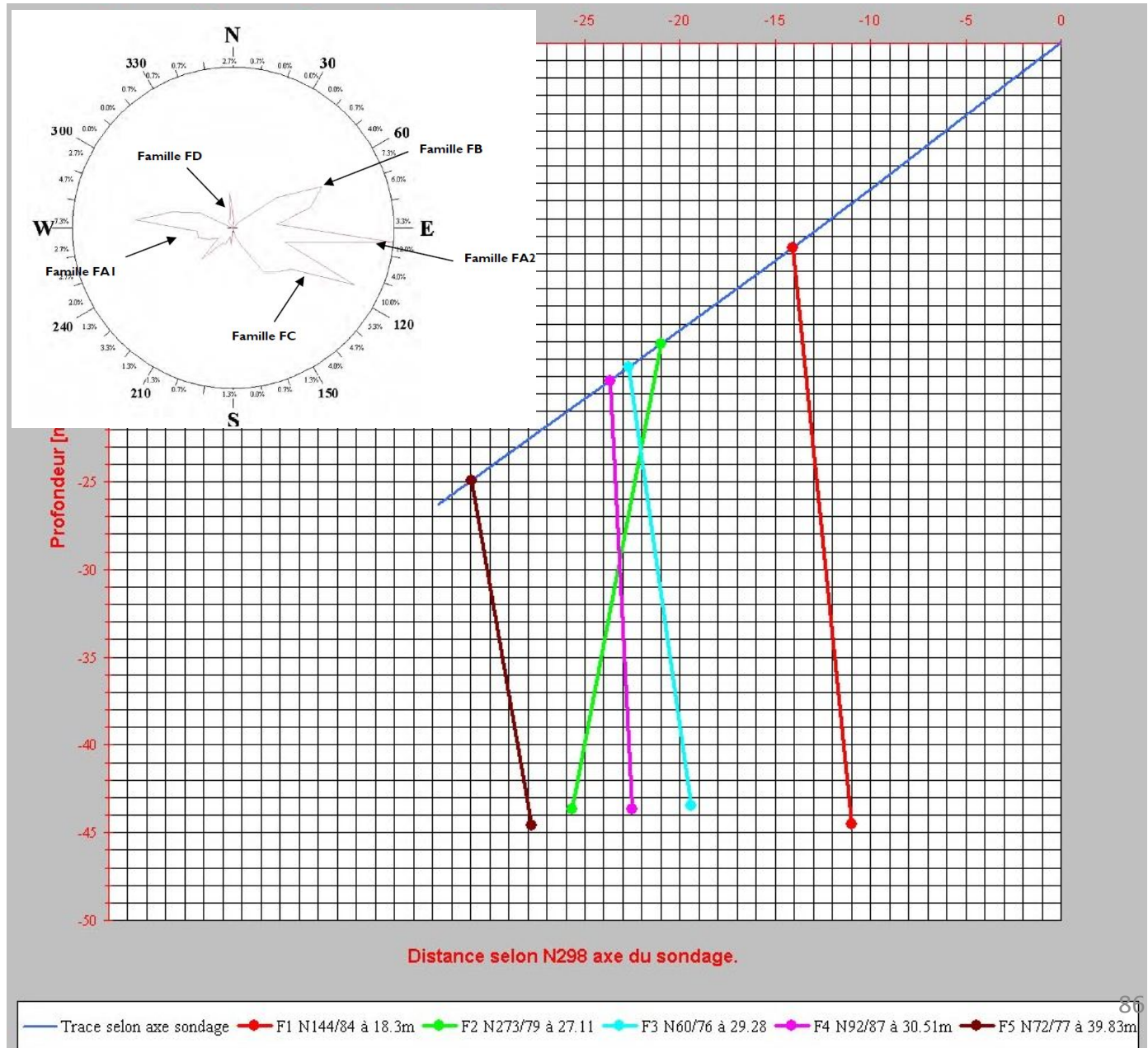
Figure 18 : sondage SCe1 : Projection stéréographique hémisphère supérieur : toutes fractures.



Photos 12 : Caissons de brèches observés en imagerie de paroi.

- Imagerie de paroi en forage
- Analyse structurale

Analyse géologique

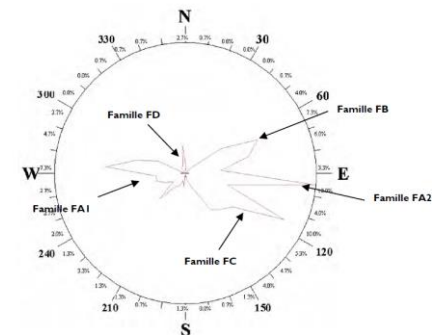


Analyse géologique

Massif prédécoupé en monolithes plus ou moins élancés qui, par décohéson progressive le long des plans arrière, se présentent en situation fragile.

La distribution des contraintes n'étant pas uniforme, des déplacements relatifs peuvent apparaître, contribuant à aggraver le processus de rupture.

En l'absence de plan(s) de rupture basal identifié(s) et d'indices francs de glissement plan sur plan sur des plans peu pentés dirigés vers l'aval, il semble que les **mouvements se produisent par basculement et/ou rupture de l'assise après sa fragilisation par des mécanismes et des géométries complexes** mêlant écrasement en compression, cisaillement, **rupture en relais sur des plans de fracturation, les plans de stratification voire au sein de la matrice et influence des pressions d'eau dans la fracturation.**



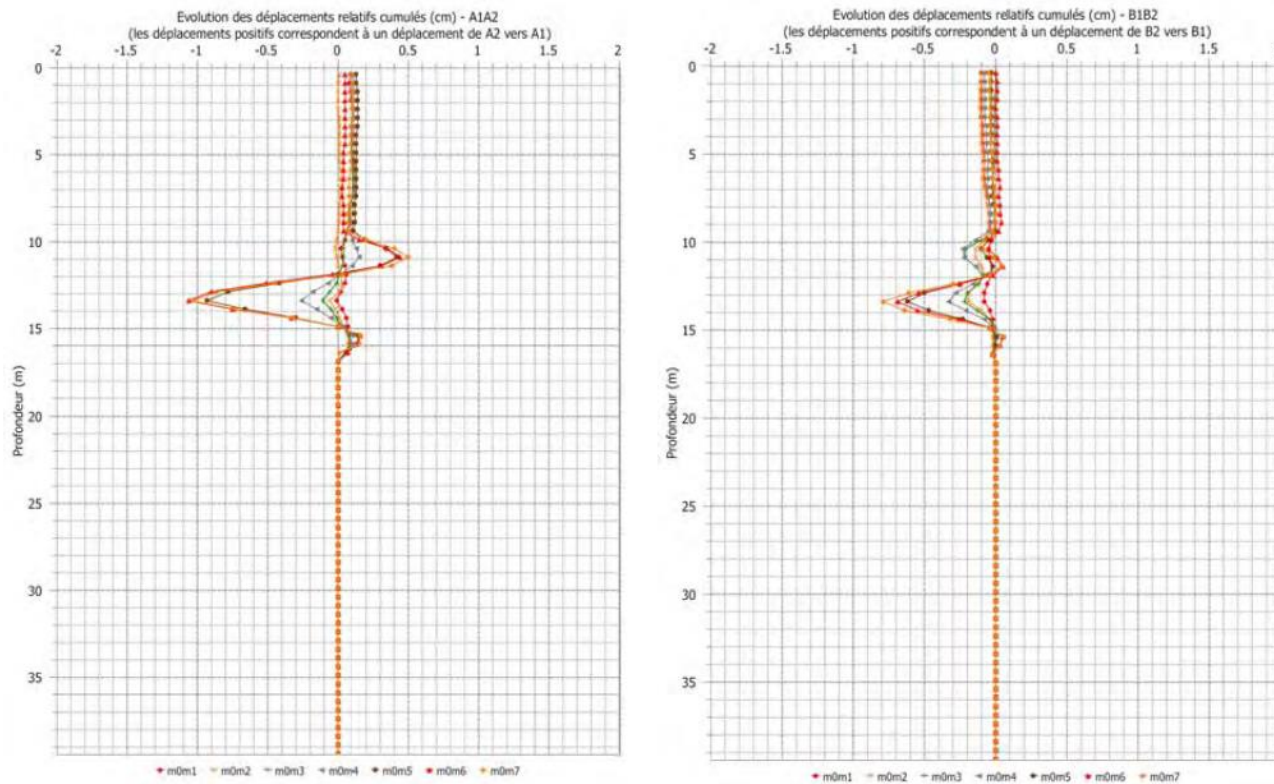
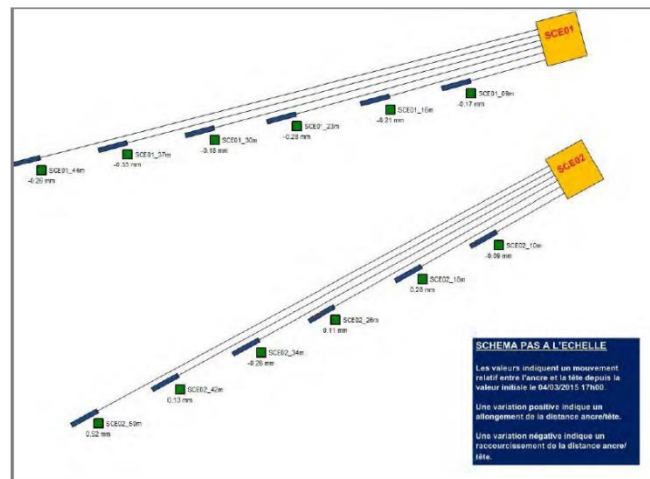


Figure 25 : déplacements cumulés selon A1 A2 et B1B2 mesures m7-m0



- Inclinomètre
- extensomètres

Instrumentation par système Cyclops (SolData) :

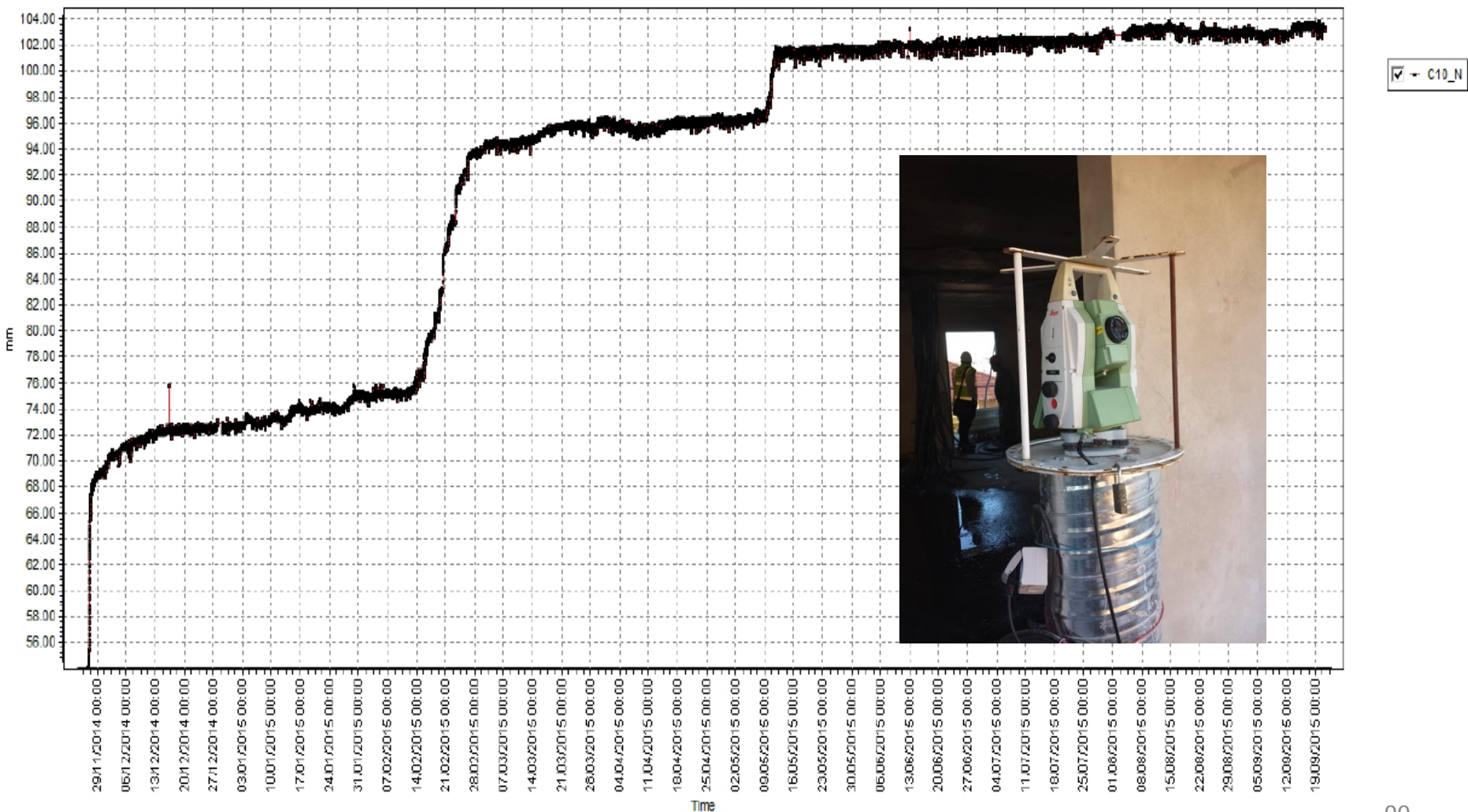
19 cibles interrogées toutes les 5mn avec calcul des déplacements en composantes N, T et Z avec transmission des données temps réel via portail internet



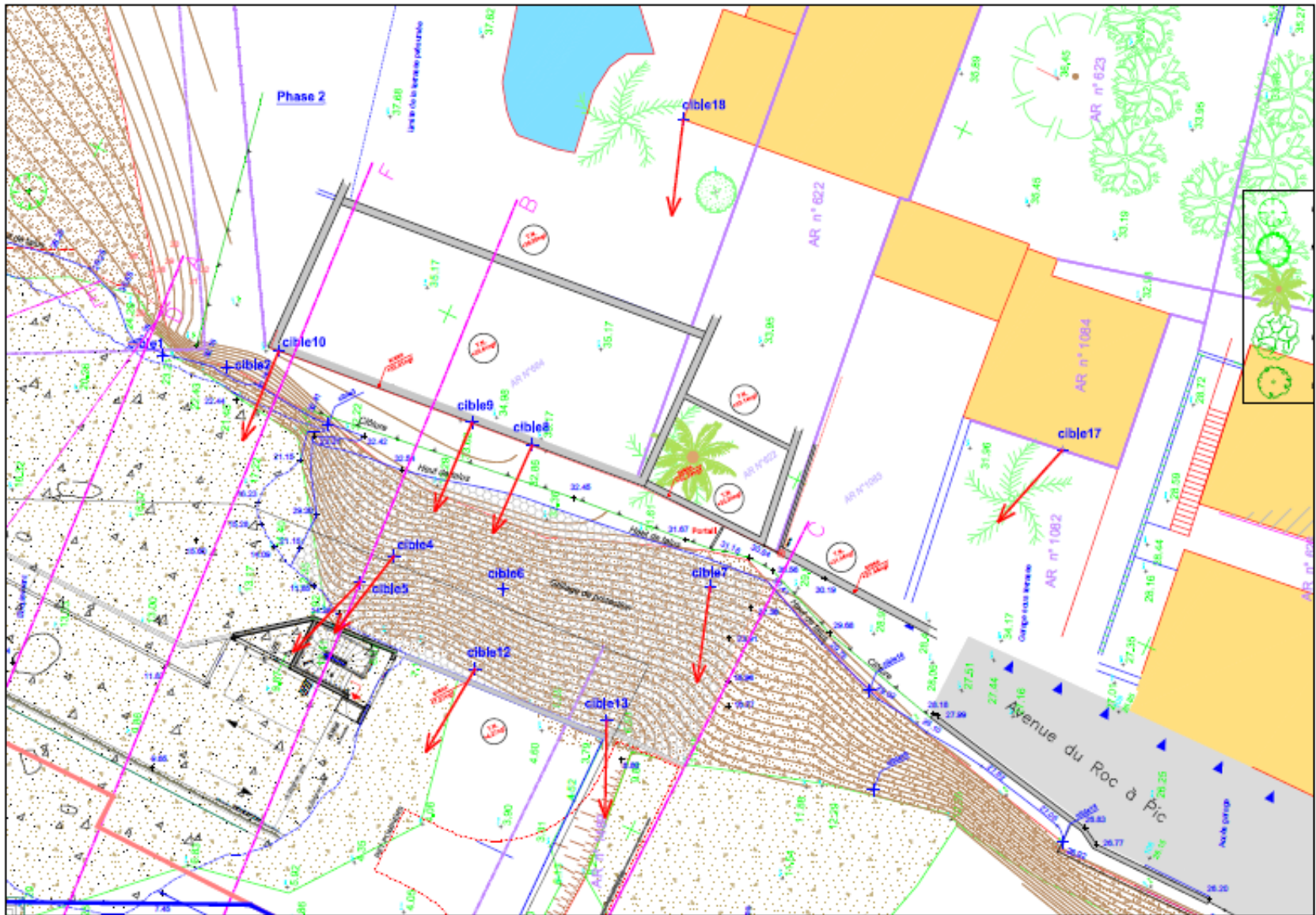
Mise en place d'une alarme sur chantier avec définition d'un seuil d'alerte basée sur les vitesses d'évolution de la composante **N**

Instrumentation par système Cyclops (SolData) : 19 cibles

Cible C10 : composante N depuis le 25/11/14



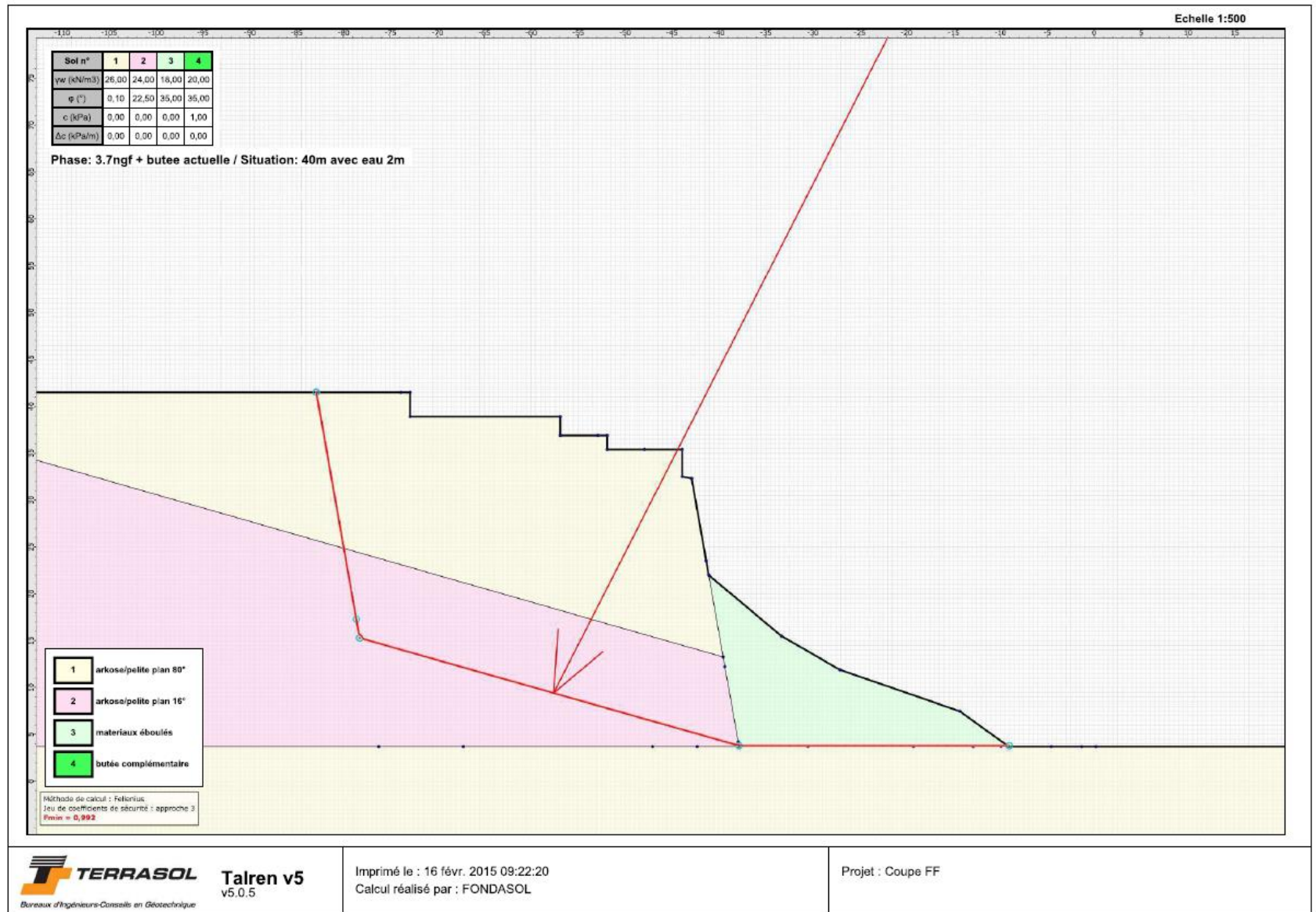
Instrumentation : Azimut des déplacements



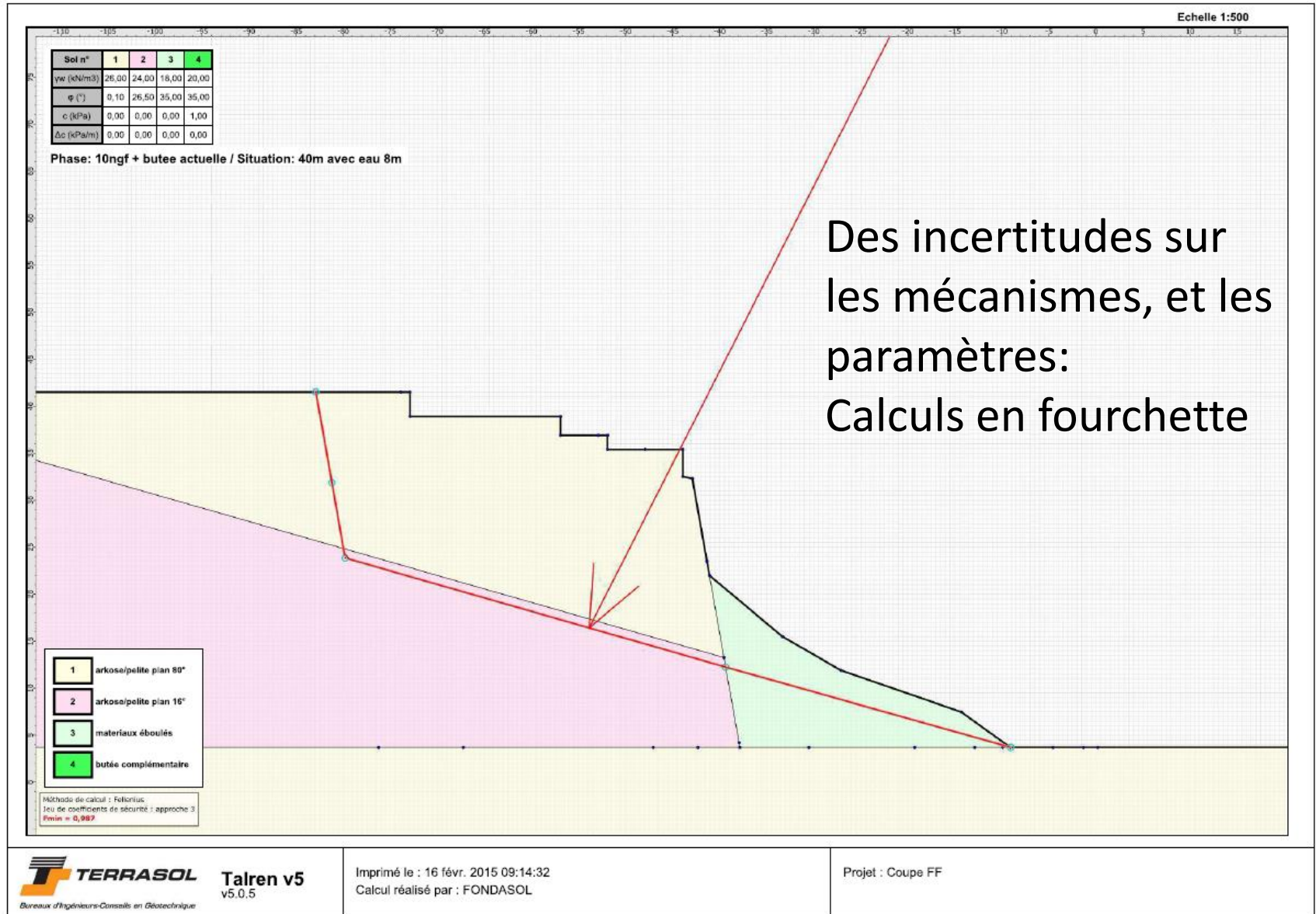
Modélisation

- Quels outils adaptés à un tel contexte géologique?
- Quels paramètres?
 - Surfaces de rupture planes dans un massif rocheux
 - Caractéristiques de cisaillement sur les surfaces, définies par rétro-analyse
 - Prise en compte du rôle de l'eau le long des plans de rupture

Calage par rétro-analyse

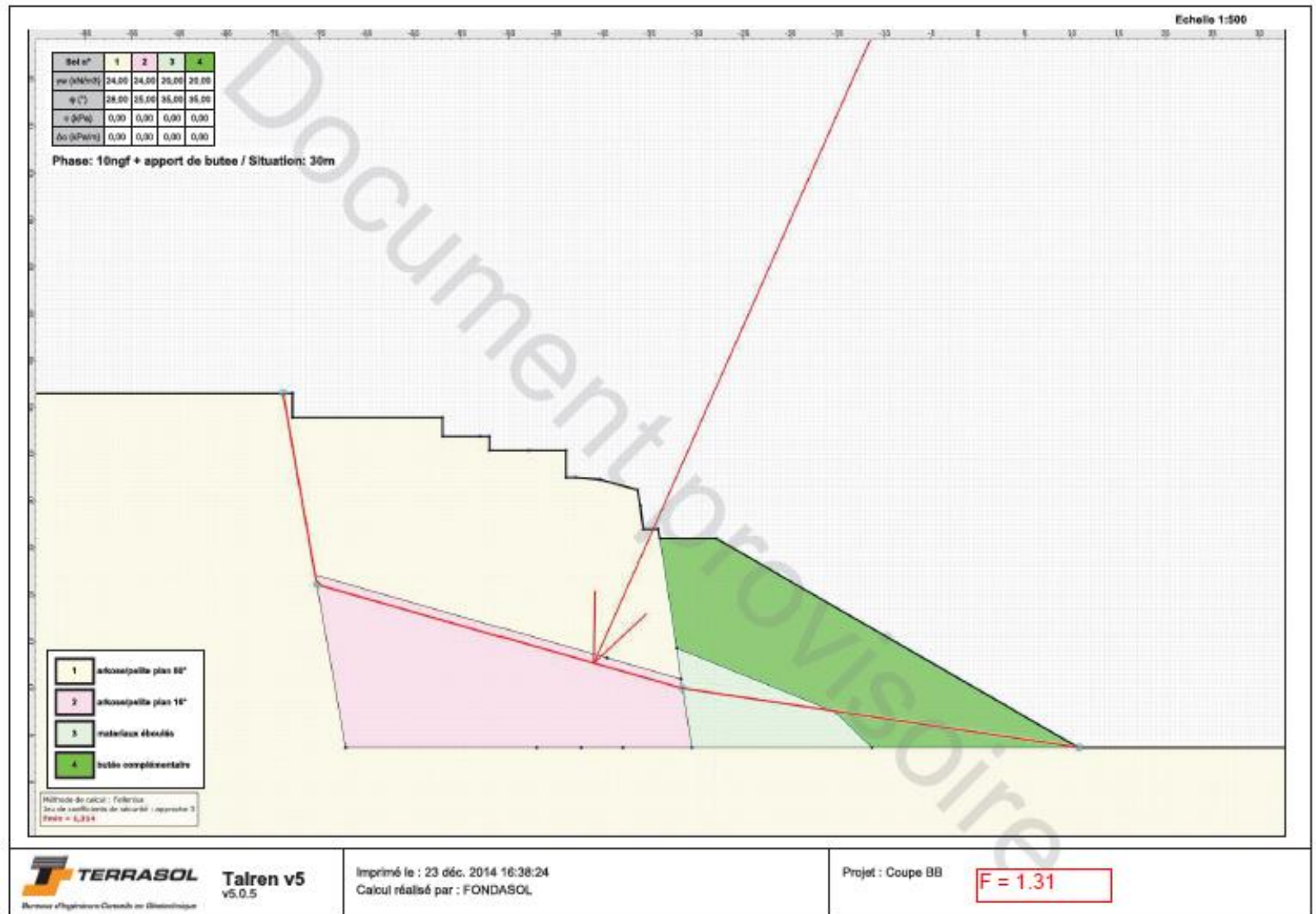


Calage par rétro-analyse



Modélisation: travaux d'urgence

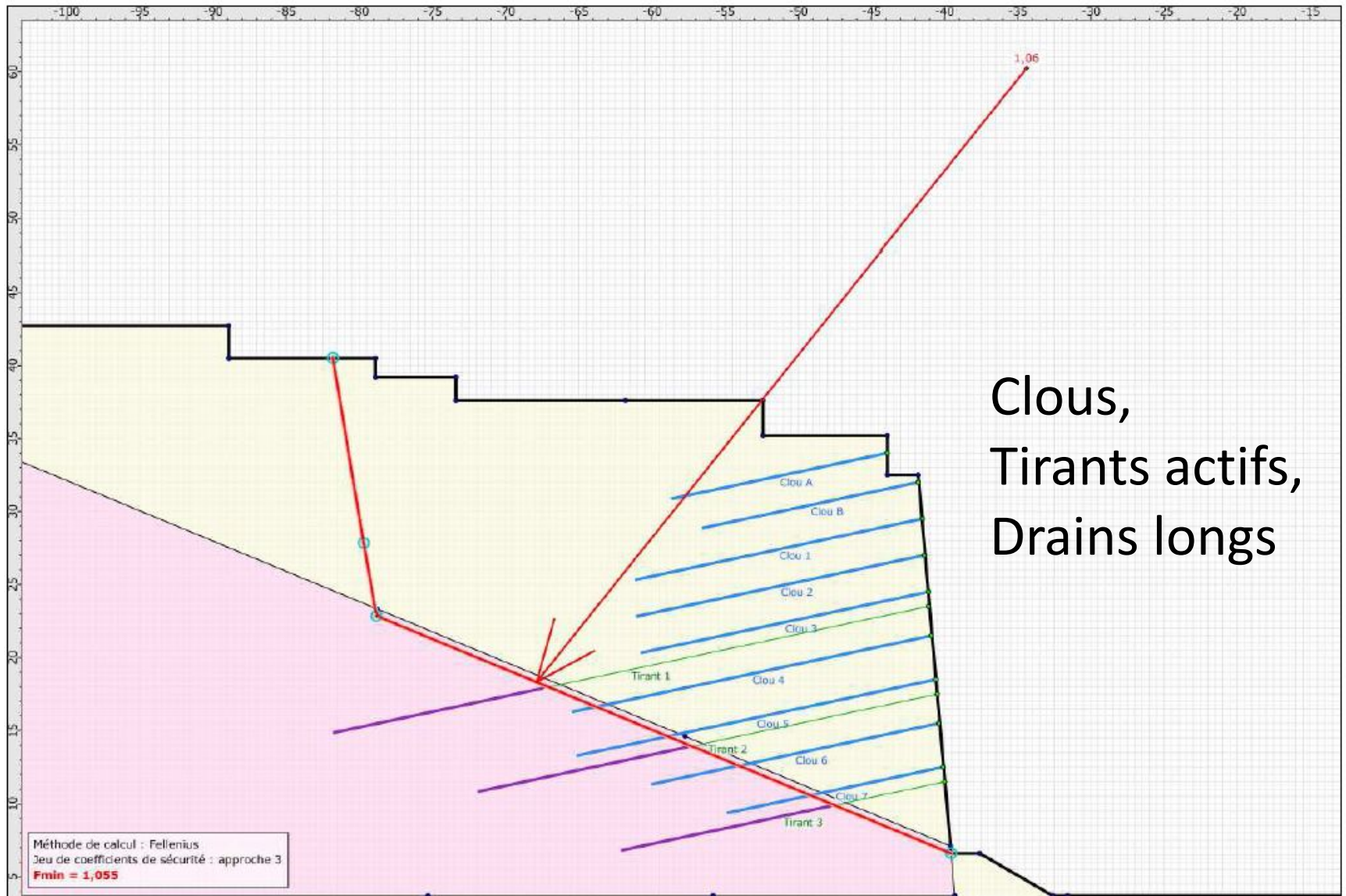
F recherché : 1.3



Avril Mai 2015 : réalisation d'une butée : 14 000 m³

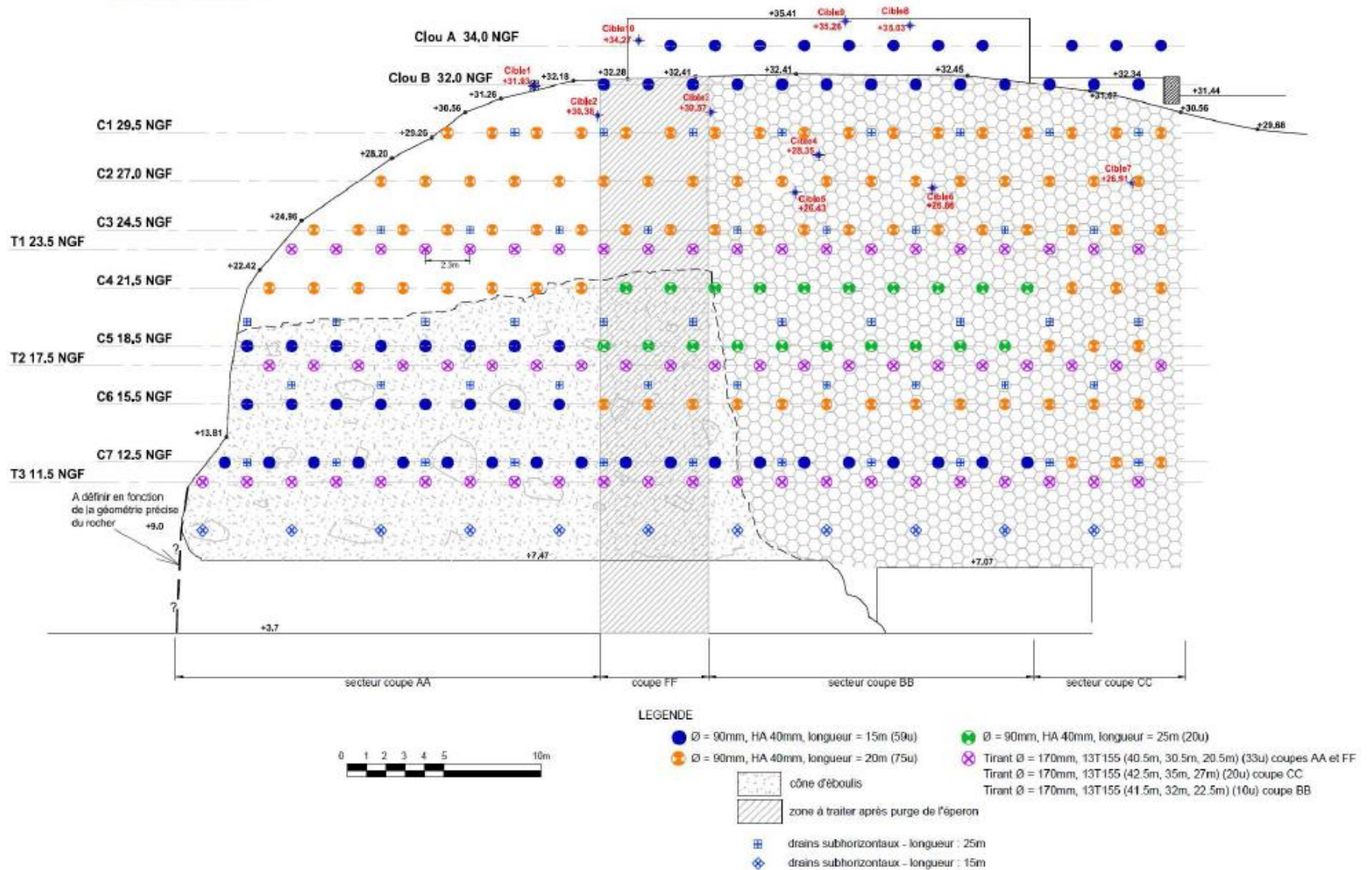


Modélisation des confortements définitifs



Principe des confortements

PLAN DE PRINCIPE



2nd exemple: conclusions

- Les reconnaissances doivent être adaptées:
 - Au projet
 - Au contexte du site
- Ne pas se contenter d'investigations sur la parcelle: penser ZIG!
- Ne pas se priver de l'œil et de l'analyse du géologue
- Toujours considérer le rôle de l'eau
- La modélisation n'est rien sans l'observation

- L'eau dans le sol
- Les investigations géotechniques
- L'instrumentation, l'auscultation
- **Surveillance des ouvrages ou dimensionnement interactif ?**
- L'évolution de la pratique

Les limites de l'auscultation

A 89 : Déblai D214 : septembre 2011



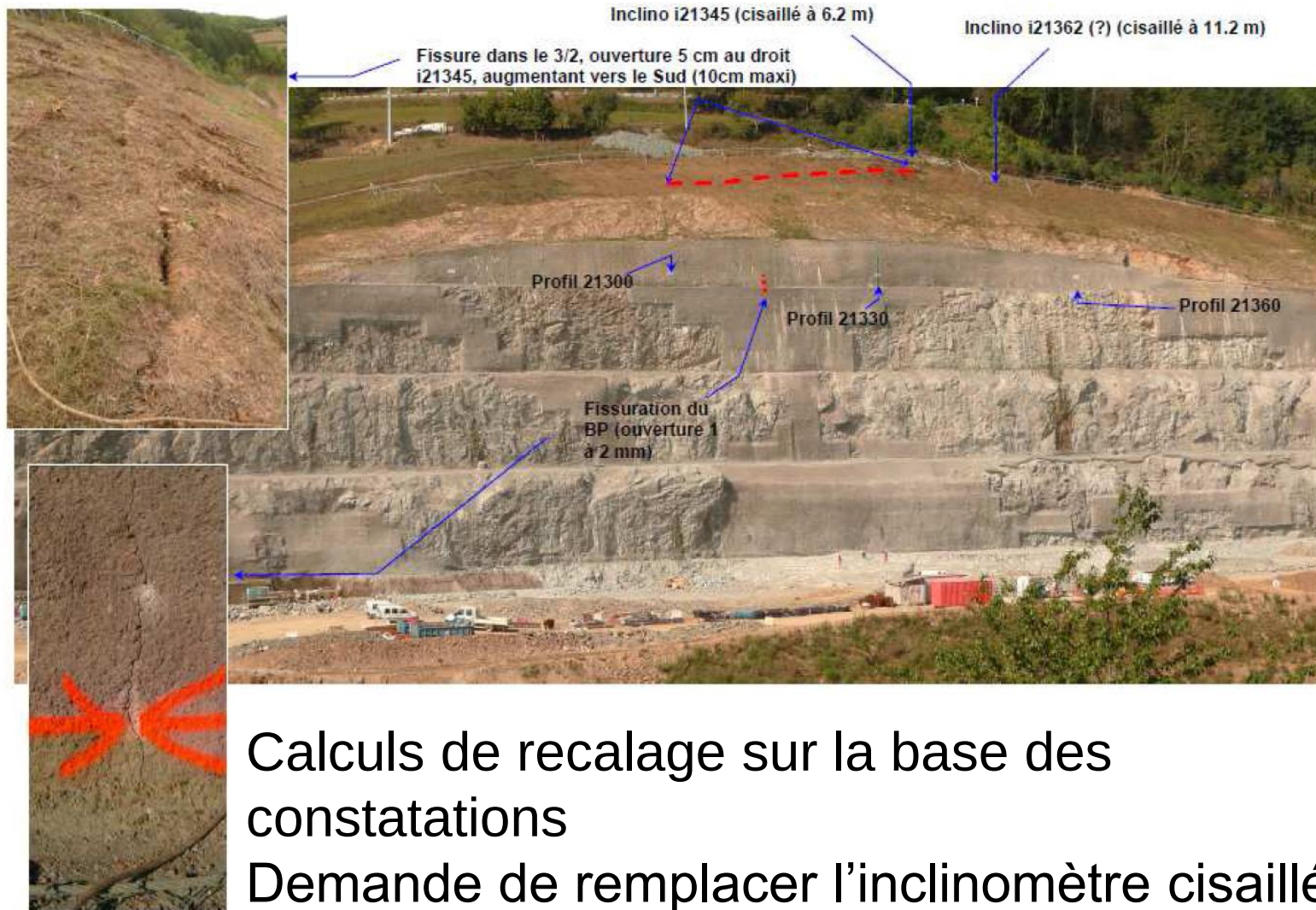
A 89 : éboulement du 21/09/11



A 89 : éboulement du 21/09/11



A 89 : éboulement du 21/09/11



Calculs de recalage sur la base des constatations

Demande de remplacer l'inclinomètre cisailé
Évacuation du chantier le 20 septembre

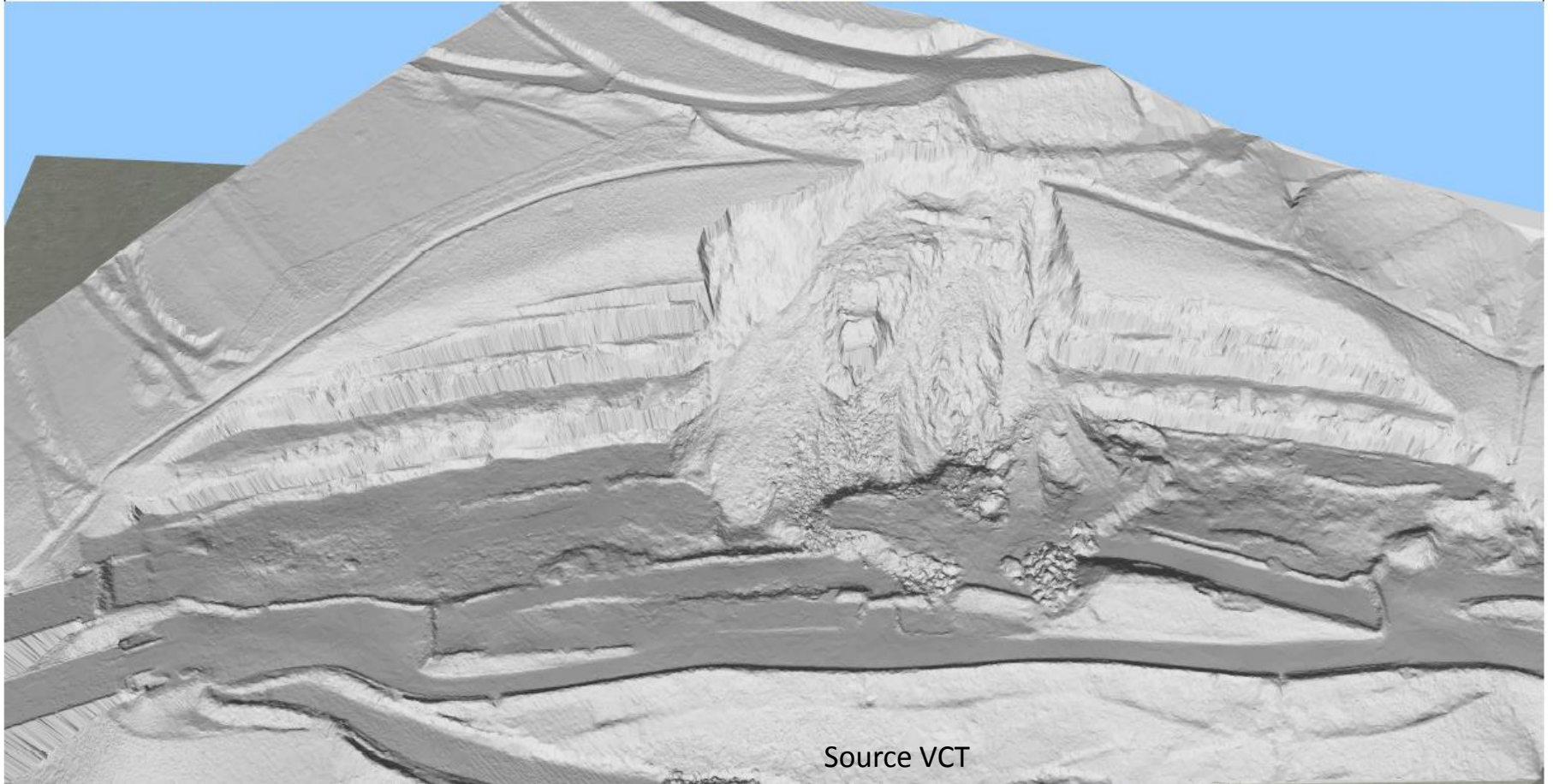


A 89 : Déblai D214 : éboulement du 21/09/11

A89 TOARCC CENTRE

D214 - VP 3 D SCAN LIDAR

20/02/2012



A 89 : éboulement du 21/09/11

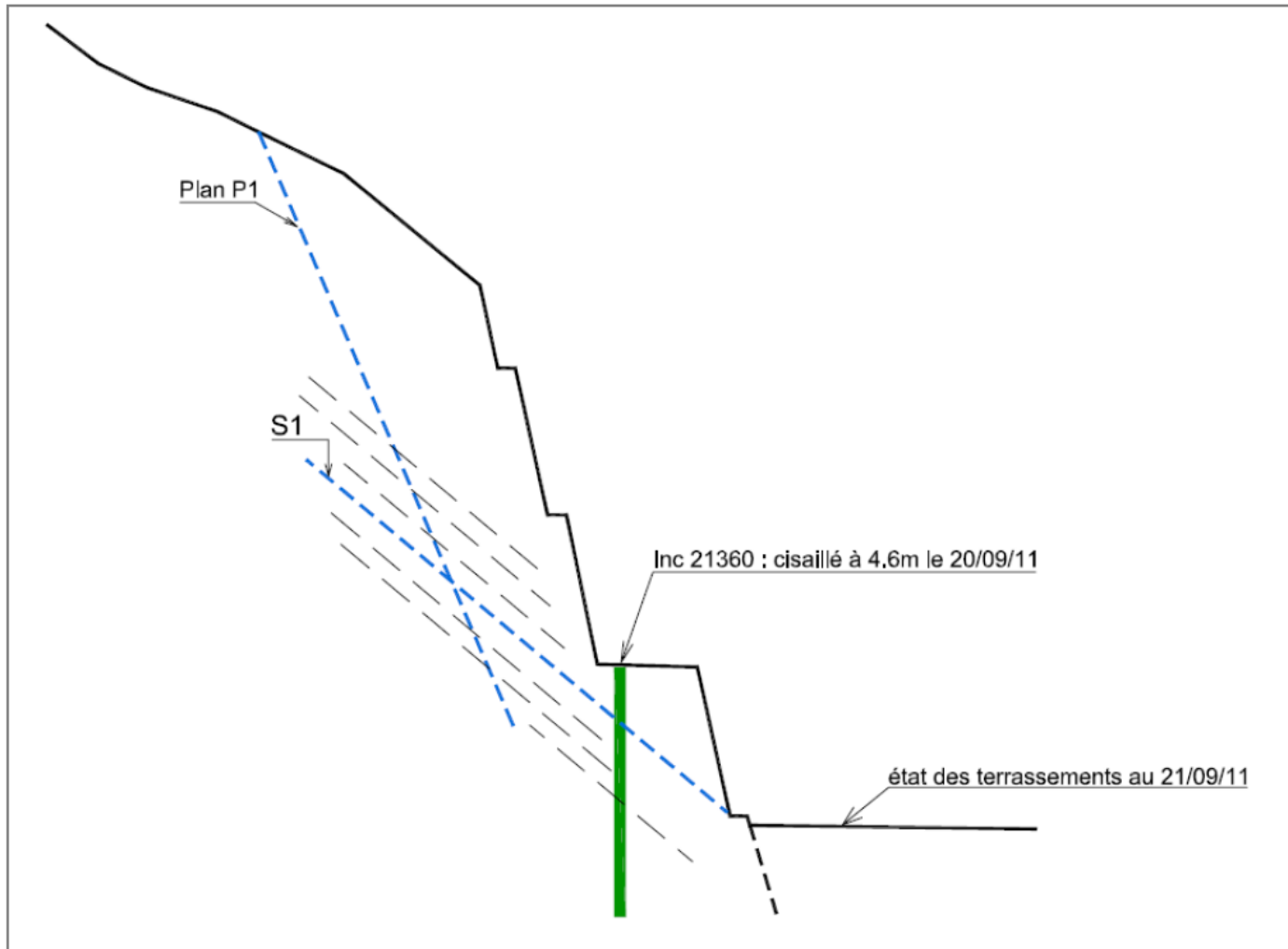


Schéma de principe du mécanisme de rupture

A 89 : éboulement du 21/09/11

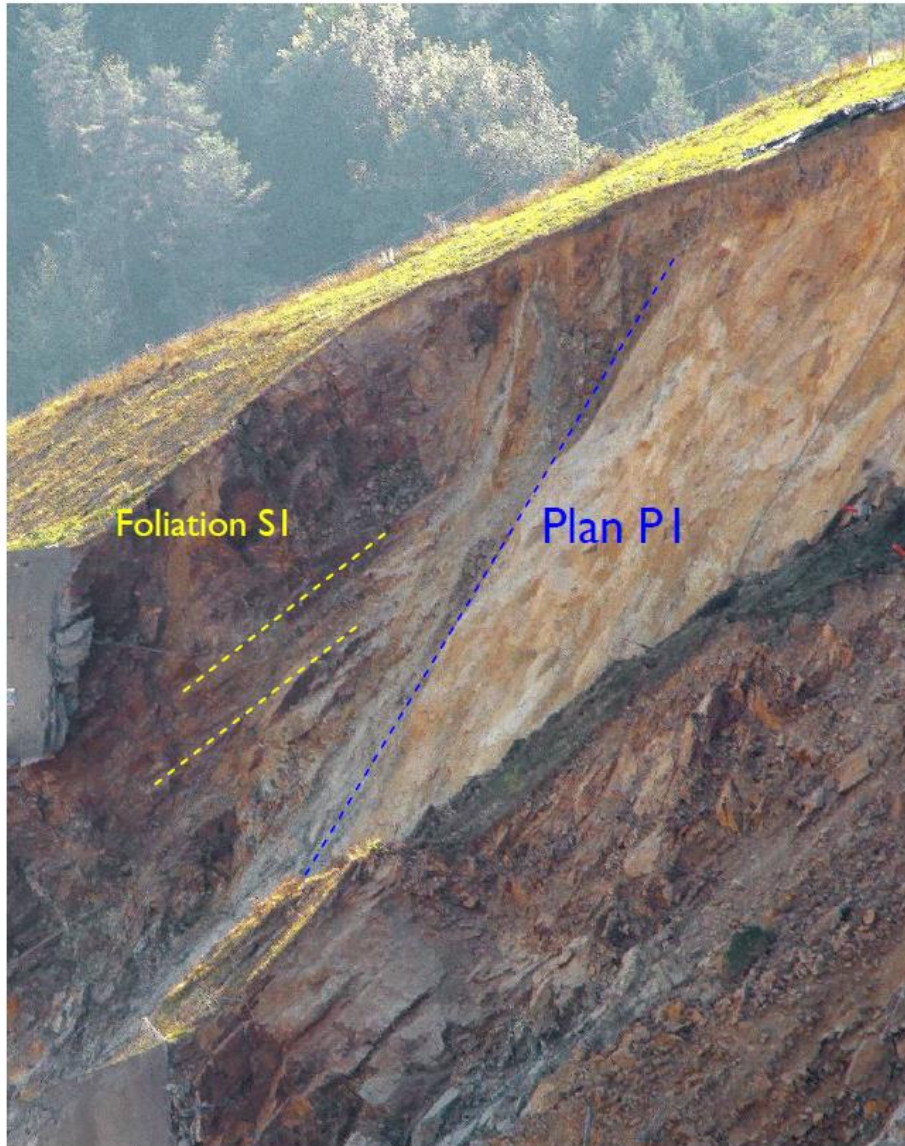


Photo 4 : vue de détail du plan principal avec traces de la foliation

A 89 : éboulement du 21/09/11



Ortho-photo du glissement



Source VCT

- *« Ce qu'un théoricien ne doit jamais oublier, c'est que, même eût-il mille fois raison, les faits lui réservent mille occasions d'avoir tort ».*

Jean Rostand
(Pensées d'un biologiste)

Réparation: adoucissement de la pente générale du talus





Leçons

- De l'analyse et l'interprétation des données géotechniques peuvent découler des modèles différents: la prudence doit prévaloir
(Eurocode 7)
- La sécurité des personnes est primordiale
- Le rôle de l'instrumentation est fondamental mais ne permet pas forcément de savoir à quel moment une rupture peut avoir lieu
Des recherches pour améliorer la maîtrise des risques

Surveillance micro-sismique d'un site (exploitation de sel)

Coccia et Al, JNGG 2016 (INERIS, SOLVAY Chimica Italia)

- Objectifs du dispositif: anticiper les instabilités de terrain, induites par la dissolution des couches de sel, par la détermination de signes précurseurs, à partir de sondes micro-sismiques
- Crises microsismiques: se sont terminées par un effondrement localisé.
 - augmentation rapide (en moins de 48h) de l'activité
 - concentration spatiale de l'activité microsismique.
 - nombre moyen de sondes enregistrant l'événement
- Décalage entre début de la crise et apparition de l'effondrement:
 - profondeur des cavités instables,
 - cinétique de remontée des fontis dans les terrains de recouvrement,
 - travail de reconnaissance périodique sur le terrain.

- L'eau dans le sol
- Les investigations géotechniques
- L'instrumentation, l'auscultation
- Surveillance des ouvrages ou dimensionnement interactif
- **L'ingénierie géotechnique**
- L'évolution de la pratique

La norme NFP 94-500

- A contribué largement à modifier la pratique de la géotechnique en France
- Les géotechniciens interviennent maintenant à tous les stades d'un projet jusqu'à l'achèvement de la construction
- Cette évolution est liée à une augmentation de la complexité des projets, et des contraintes environnementales de plus en plus fortes

La maîtrise des risques

- **Le sol: une donnée géologique et anthropique**
 - Géologie: complexe, des incertitudes
 - Activité humaine: pas assez de traçabilité
- **En investigations,**
 - Une marge de progrès certaine pour fiabiliser les données acquises sur le terrain: recherche et innovation
 - Davantage d'investigations au stade des études pour fiabiliser les projets: des progrès pour convaincre les donneurs d'ordre de leur intérêt vis-à-vis de la maîtrise des coûts et des délais
- **Travaux**
 - Investigations complémentaires
 - Davantage d'auscultation pour la maîtrise des risques
 - Développer le dimensionnement interactif. Faire évoluer la pratique actuelle: maîtrise d'ouvrage et maitres d'œuvres à convaincre

Ce qui doit perdurer

... voire s'améliorer!

- Les investigations géotechniques, adaptées au contexte, et progressives
- Le suivi des travaux, et la prévention des conséquences des aléas
- L'instrumentation ET l'analyse

- L'eau dans le sol
- Les investigations géotechniques
- L'instrumentation, l'auscultation
- Surveillance des ouvrages ou dimensionnement interactif
- L'ingénierie géotechnique
- **L'évolution de la pratique: table ronde**

« Tout le monde savait que c'était impossible à faire. Puis un jour, quelqu'un est arrivé qui ne le savait pas, et il l'a fait. »

Winston Churchill

**Nous avons besoin des jeunes et
de leur imagination!**