



TRAVAUX EN MONTAGNE



*Retour d'expérience sur les
fondations d'ouvrages d'art en site
montagneux*

Dominique ALLAGNAT



JOURNÉE TECHNIQUE DU 19 NOVEMBRE 2015 - LYON



Sommaire

- A** | Introduction et problématique posée par les fondations de viaducs en site montagneux
- B** | Exemple 1 – Versant en limite d'équilibre - Viaduc de Sylans (Ain)
- C** | Exemple 2 – Glissement actif et sols mous - Viaduc de Monestier (Isère)
- D** | Exemple 3 – Glissement actif dépassant les capacités de l'ouvrage – Viaduc du Charmaix (Savoie)
- E** | Synthèse

A - INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE (1/4)

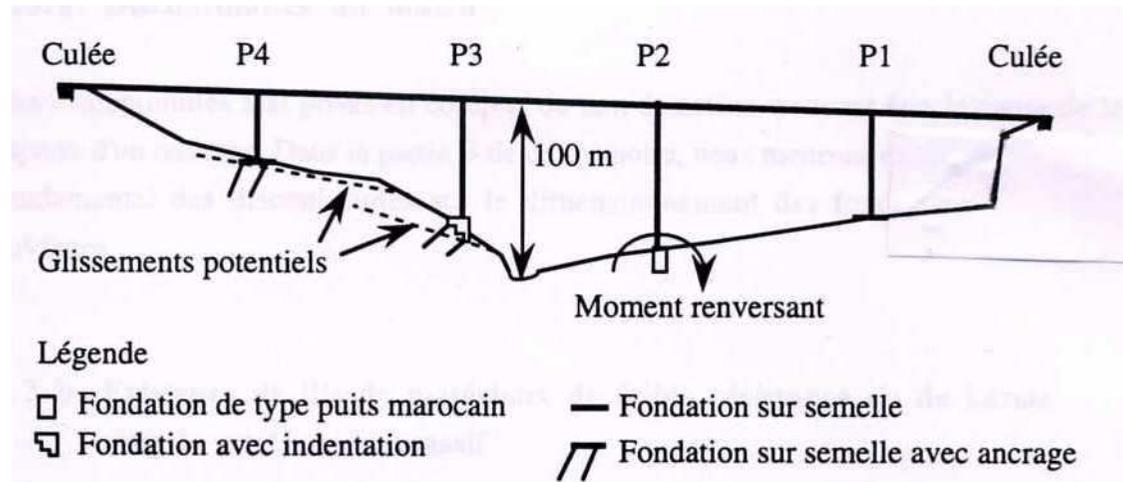
Spécificités des fondations en site montagneux :

- Pente (stabilité « géotechnique » et design structure)
- Géologie souvent complexe
- Contexte géotechnique souvent hétérogène
- Investigations particulières (roches et sols)
- Conception/dimensionnement non classiques

A - INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE (2/4)

En site rocheux ↔ fort relief ↔ grandes brèches

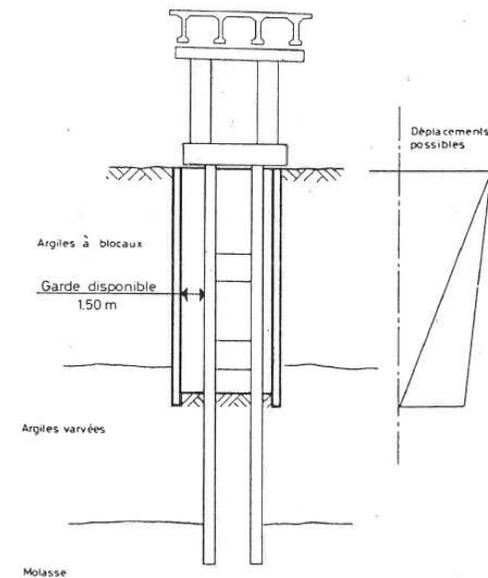
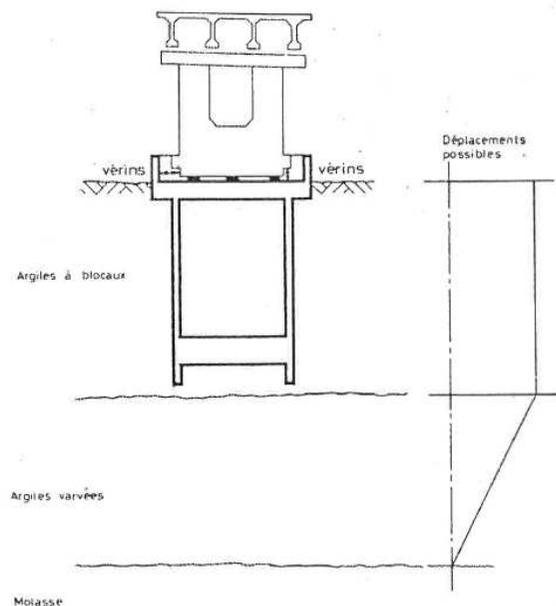
Franchissements : grands ouvrages avec nombre limité d'appuis ↔ charges importantes par appui



A - INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE (3/4)

Les problématiques à résoudre/versants :

- Risque de glissement
- Accès dans les versants (stabilité provisoire)
- Les méthodes de réalisation des fondations



A - INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE (4/4)

Les problématiques à résoudre / fond de vallée :

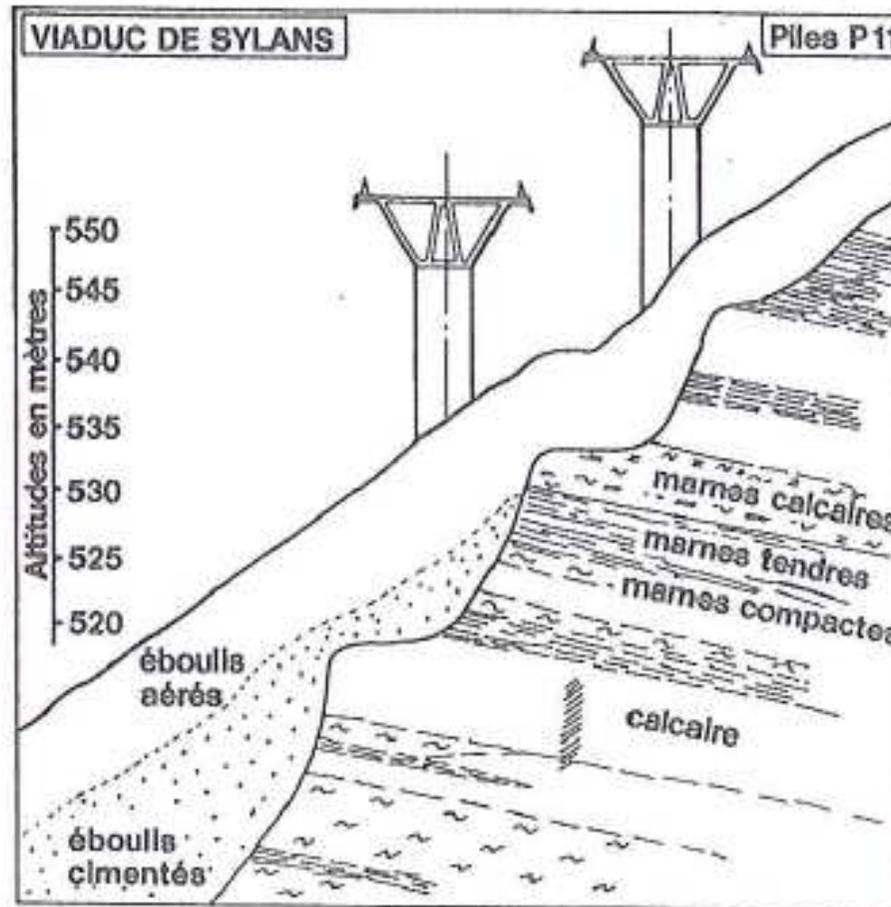
- Site montagneux \neq rocher généralisé (stable)
- Les remplissages en fond de vallée parfois très médiocres sur épaisseurs importantes (par exemple $q_T = 0,25$ à 2 MPa de 0 à 40 m de profondeur)
- Charges importantes \Rightarrow fondations spécifiques (apport de la mécanique des sols).

B - EXEMPLE 1 – VIADUC DE SYLANS (1/11)



Viaduc Sylans implanté à flanc de versant – Vue générale de la construction (1989) longueur = 1266 m

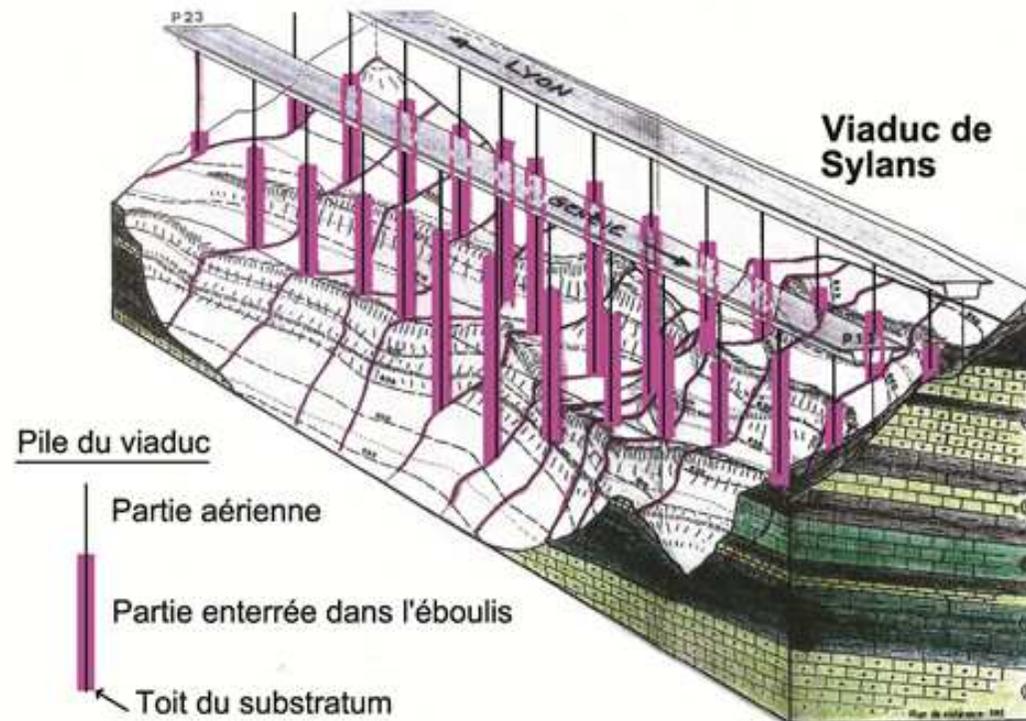
B - EXEMPLE 1 – VIADUC DE SYLANS (2/11)



Problématique : implantation des ouvrages dans un versant en limite d'équilibre

Profondeur substratum rocheux = 5 à 30 m

B - EXEMPLE 1 – VIADUC DE SYLANS (3/11)



Géologie complexe : topographie du toit du substratum

Dalles calcaires et marnes crétacée subhorizontales, chevauchées par des calcaires jurassiques en bancs verticaux => falaises supérieures => érosion => manteau éboulis

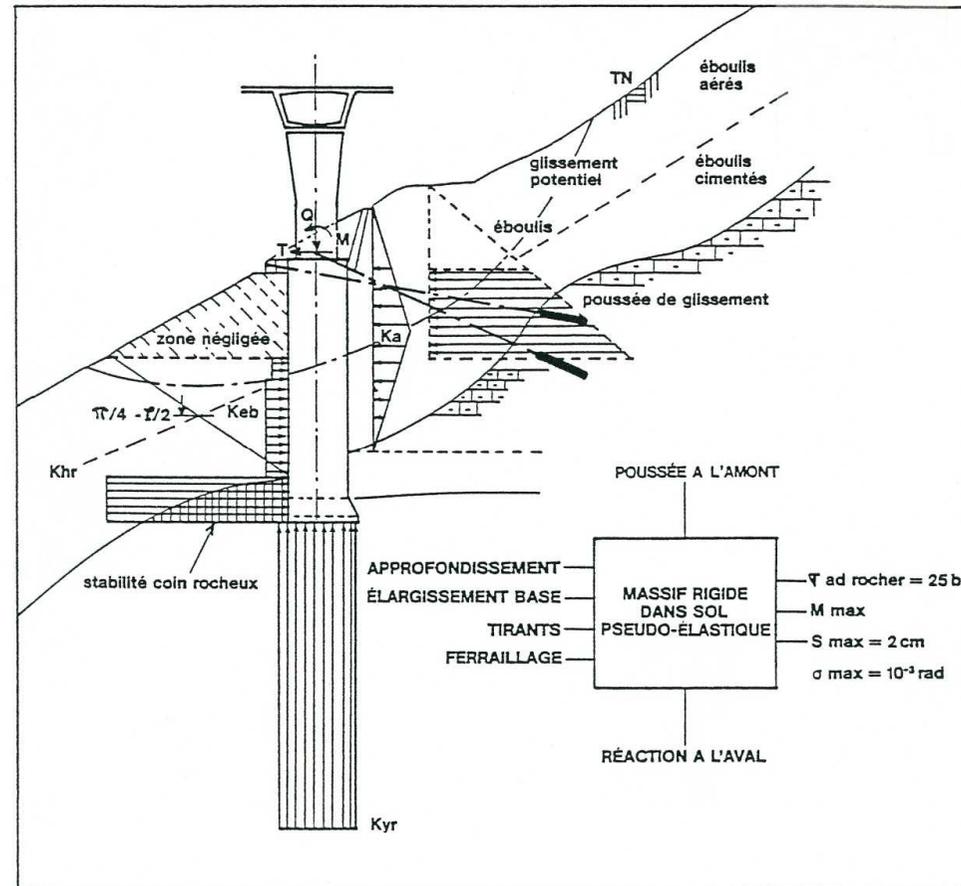
B - EXEMPLE 1 – VIADUC DE SYLANS (4/11)

Eboulis	ϕ'	C' kPa	E pressio MPa	PI-Po MPa	Rc MPa	γ kN/m ³
Eboulis argileux	25°	15	--	--	--	--
Eboulis silteux	38-42°	0-20	1.4-60	0.2 à 4	--	18.5 – 21
Eboulis aérés	36-38°	3-5	0.7-8	0.2-1.1	--	14.5-18
Eboulis cimentés	--	--	--	--	3.5	--
Eboulis à gros blocs	37-43°	--	--	--	--	--

Rocher	Rc (MPa)	Rt (MPa)	E (MPa)	VI m/s	γ KN/m ³
Calcaires	20-100	2-8	10 000	3 800-5 600	26-27
Marnes	≤ 30	2-3	600	1 800-4 000	24-26

Caractéristiques géomécaniques des éboulis et du rocher

B - EXEMPLE 1 – VIADUC DE SYLANS (5/11)



Hypothèses de dimensionnement

Interactions : poussée de glissement et encastrement au rocher

B - EXEMPLE 1 – VIADUC DE SYLANS (6/11)



Vue des travaux - Fondations sur puits

B - EXEMPLE 1 – VIADUC DE SYLANS (7/11)

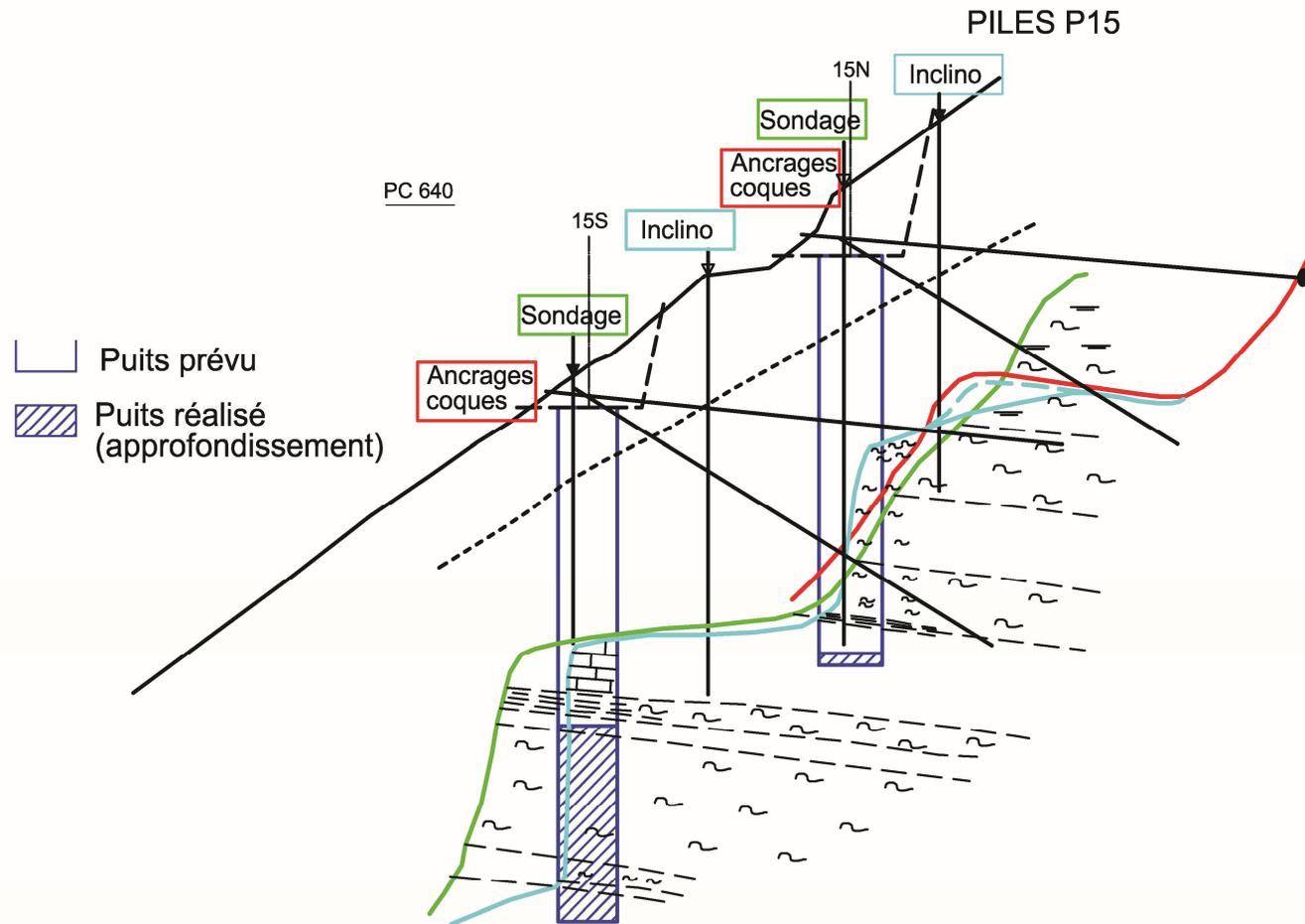


Creusement avec blindage BA



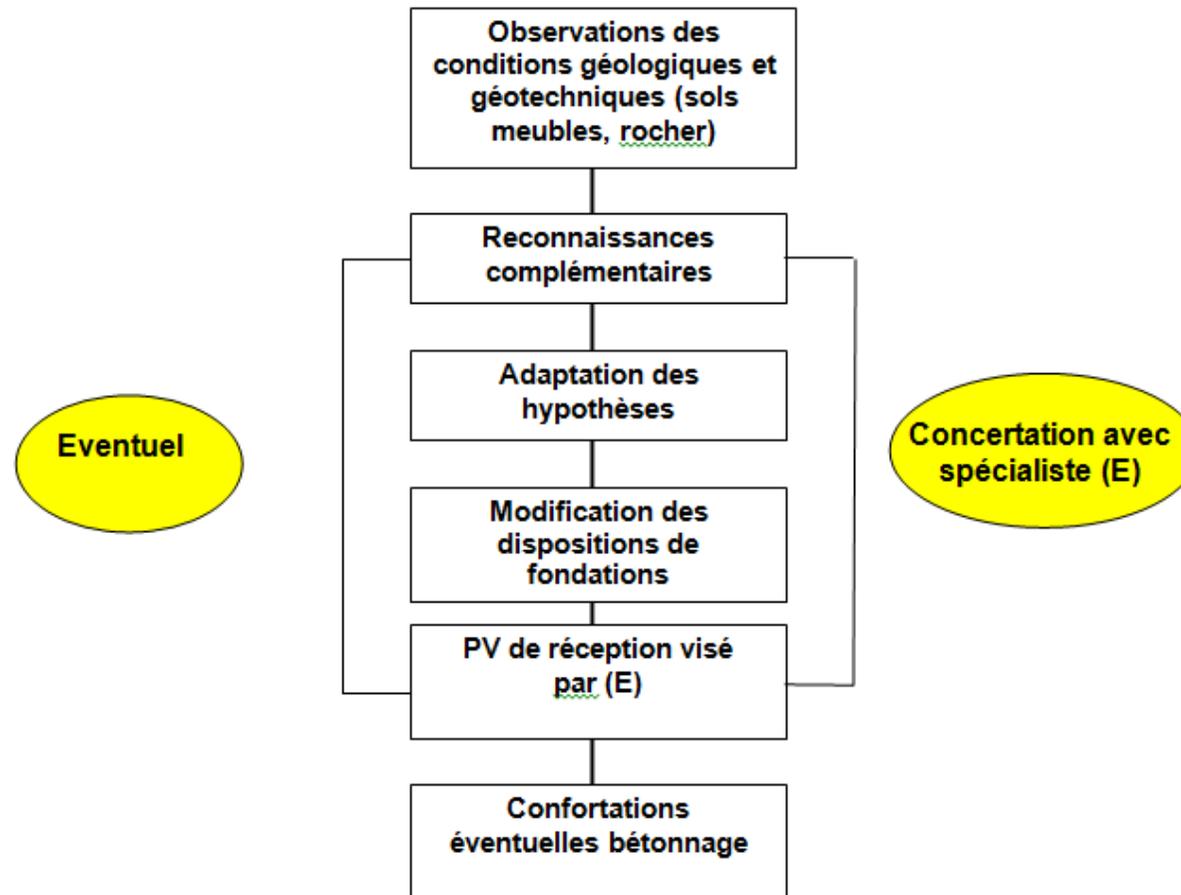
Armatures et bétonnage

B - EXEMPLE 1 – VIADUC DE SYLANS (8/11)



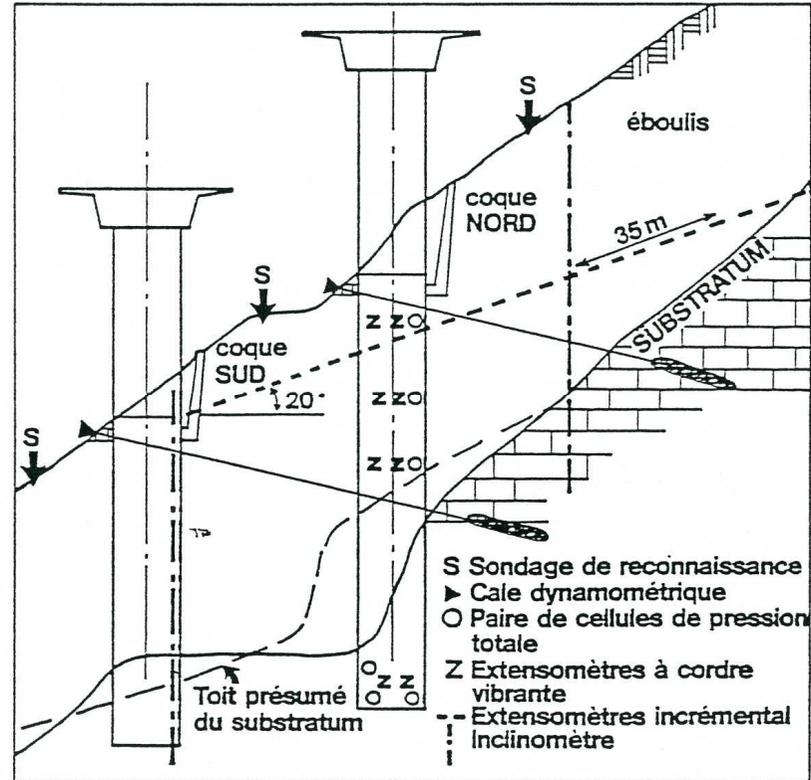
Incertitudes sur l'encastrement des puits
Géologie/géotechnique à l'échelle « métrique »

B - EXEMPLE 1 – VIADUC DE SYLANS (9/11)



Logigramme pour la conception interactive des puits de fondation

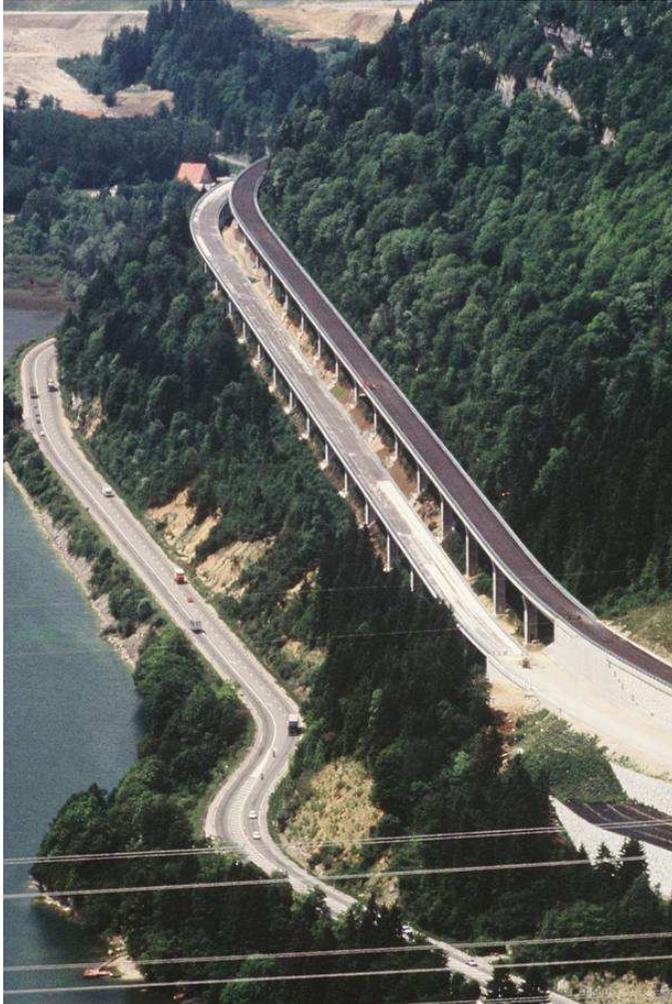
B - EXEMPLE 1 – VIADUC DE SYLANS (10/11)



Suivi à long terme de la stabilité du versant d'éboulis par instrumentation (surveillance renforcée)

Pas de mouvement de versant sur une période de 25 ans

B - EXEMPLE 1 – VIADUC DE SYLANS (11/11)



Vue d'ensemble du viaduc de Sylans

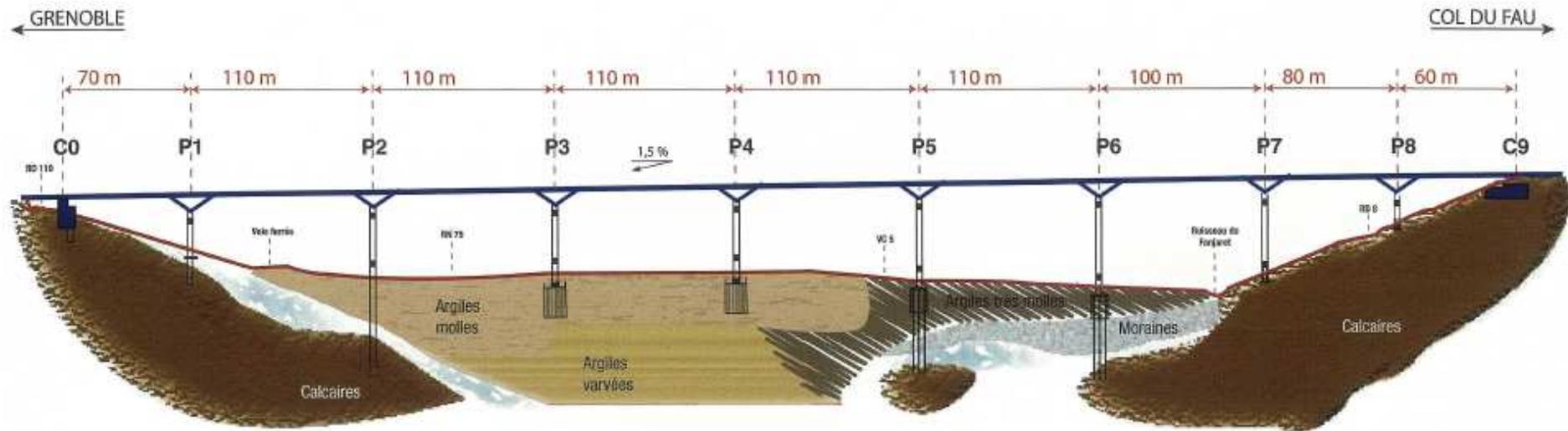
- Système de fondation adapté au contexte géologique et géotechnique.
- Suivi des travaux et instrumentation => conformité niveau de service (25 ans de suivi/sans mouvement).
- Mais modification récente de la réglementation sismique (zone de sismicité modérée agr = 1,1 m/s²) => reconsidérer les risques de mouvement du versant.

C - EXEMPLE 2 – VIADUC DE MONESTIER (1/11)



Longueur = 860 m, fin des travaux = 2006

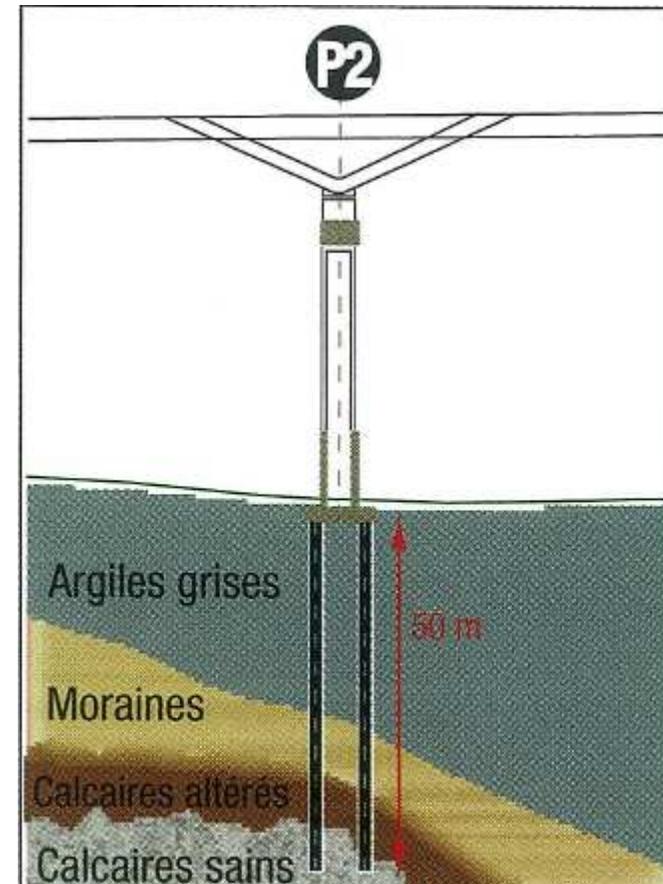
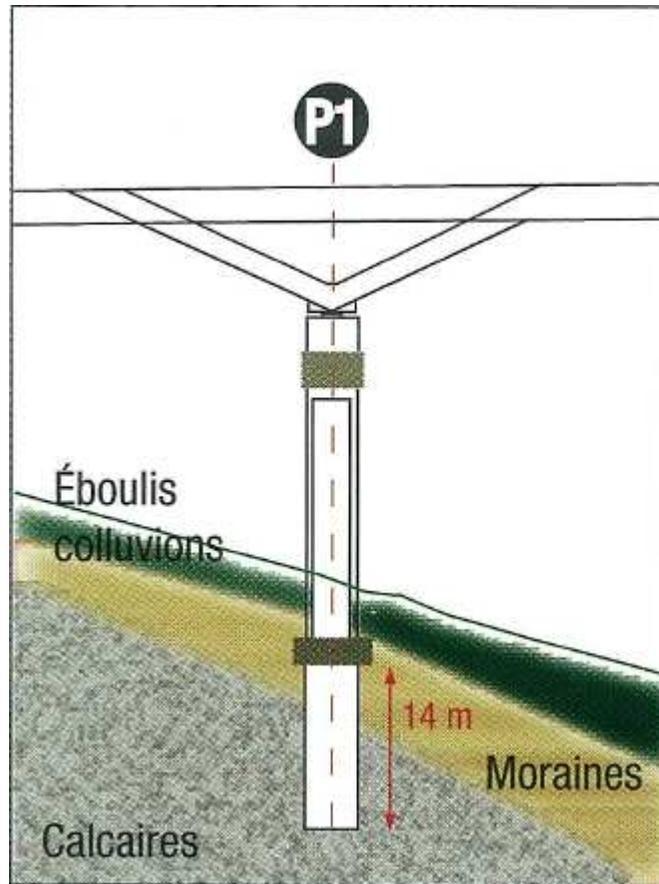
C - EXEMPLE 2 – VIADUC DE MONESTIER (2/11)



Coupe longitudinale des fondations du viaduc de Monestier-de-Clermont

Vallée glaciaire profonde, argiles varvées et molles d'origine glacio-lacustre en partie centrale, surmontées par terrasses fluvio-glaciaires.

C - EXEMPLE 2 – VIADUC DE MONESTIER (3/11)

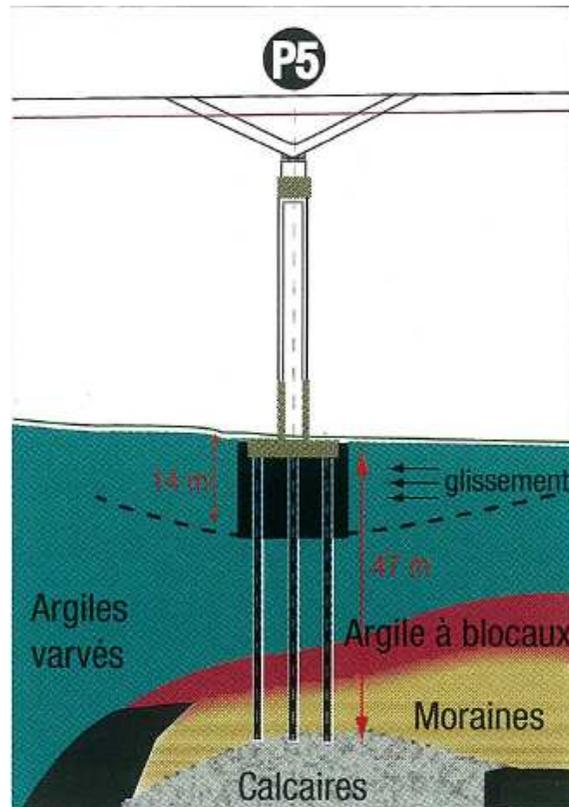


C0 et P1 puits $\varnothing = 4\text{ m}$, $p = 10$ à 14 m

6 pieux $\varnothing 1,50\text{ m}$, $p = 50\text{ m}$

C - EXEMPLE 2 – VIADUC DE MONESTIER (4/11)

Problématique glissement de terrain



- Activité 5 mm/an (maximum)
- 12 pieux Ø 1,40 m $p = 47$ m
- Protection par enceinte circulaire Ø 15 m ($\Delta = 1,5$ m)

C - EXEMPLE 2 – VIADUC DE MONESTIER (5/11)



Photo des travaux, semelle sur pieux + protection par enceinte circulaire

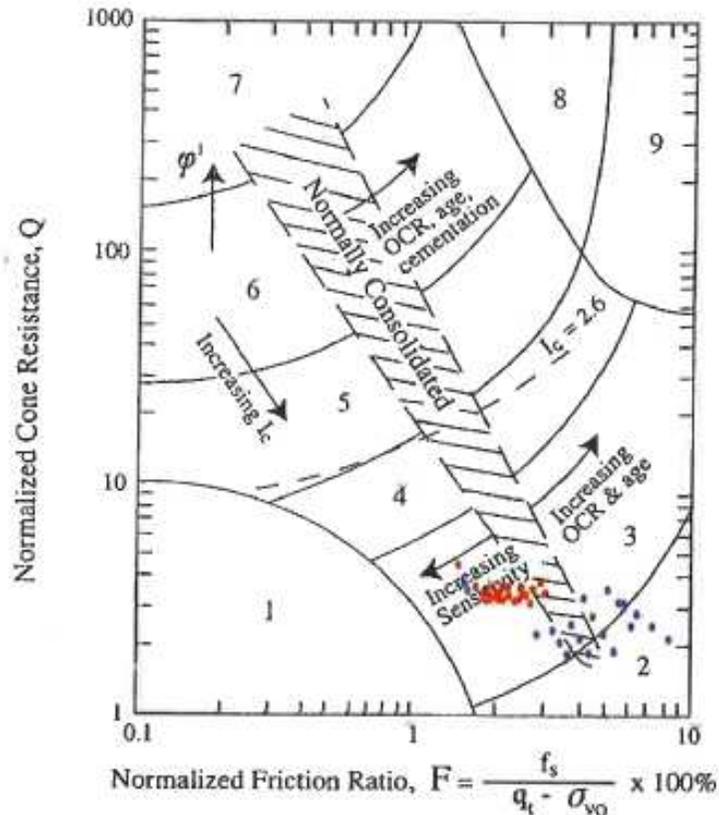
C - EXEMPLE 2 – VIADUC DE MONESTIER (6/11)

Problématique sols mous en partie centrale

- 2 à 20 m argile limoneuse « localement surconsolidée »
- 20 à 60 m argile limoneuse « normalement consolidée »
- Non liquéfiable sous séisme

Argiles molles/ argiles varvées

- $q_T = 0,25$ à $0,8$ MPa à $p = 2$ m à 18 m
- $q_T = 1$ MPa à $p = 20$ m
- $q_T = 2$ MPa à $p = 40$ m
- $q_T = 3$ MPa à $p = 60$ m

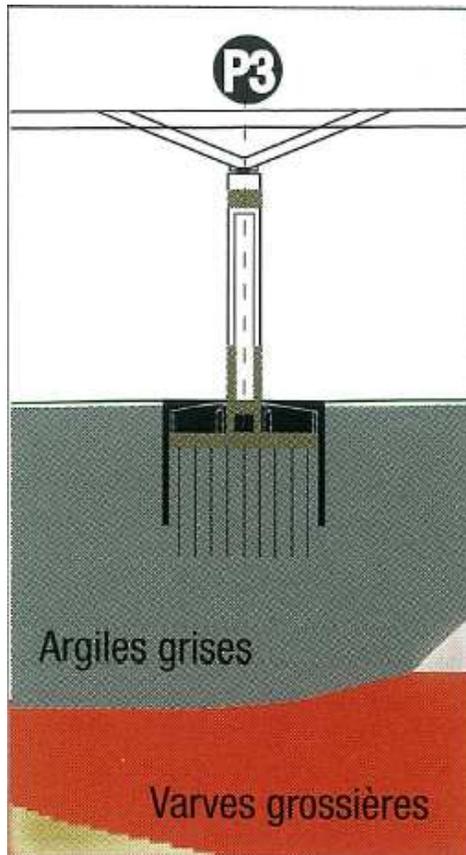


–Position des couples (F, Q) pour la pile P3

– $z < 20$ m : figuré bleu

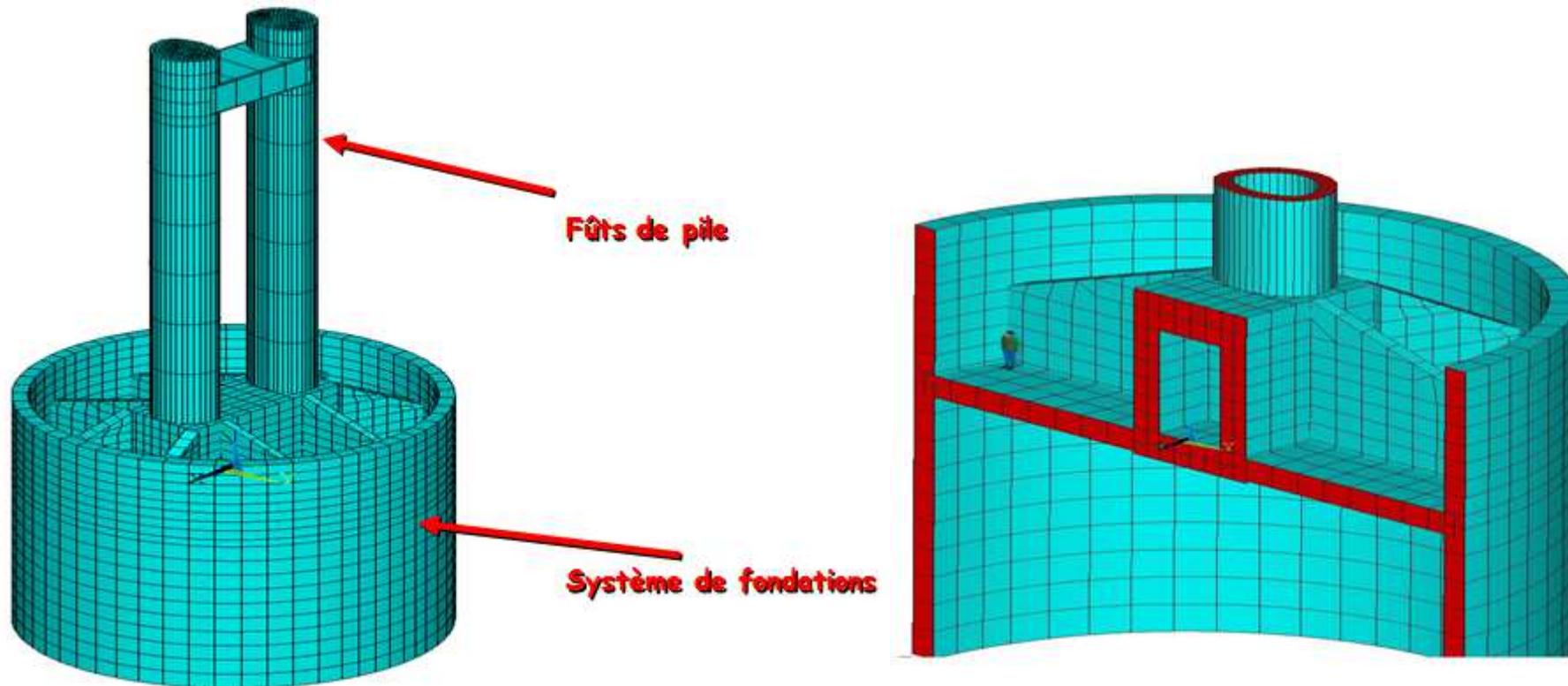
– $z > 20$ m : figuré rouge

C - EXEMPLE 2 – VIADUC DE MONESTIER (7/11)



- P3 et P4 conception innovante fondation creuse
- Volume excavé = 6000 t = descente de charge
- Inclusions métalliques pour le gonflement (excavations) / tassement des argiles

C - EXEMPLE 2 – VIADUC DE MONESTIER (8/11)

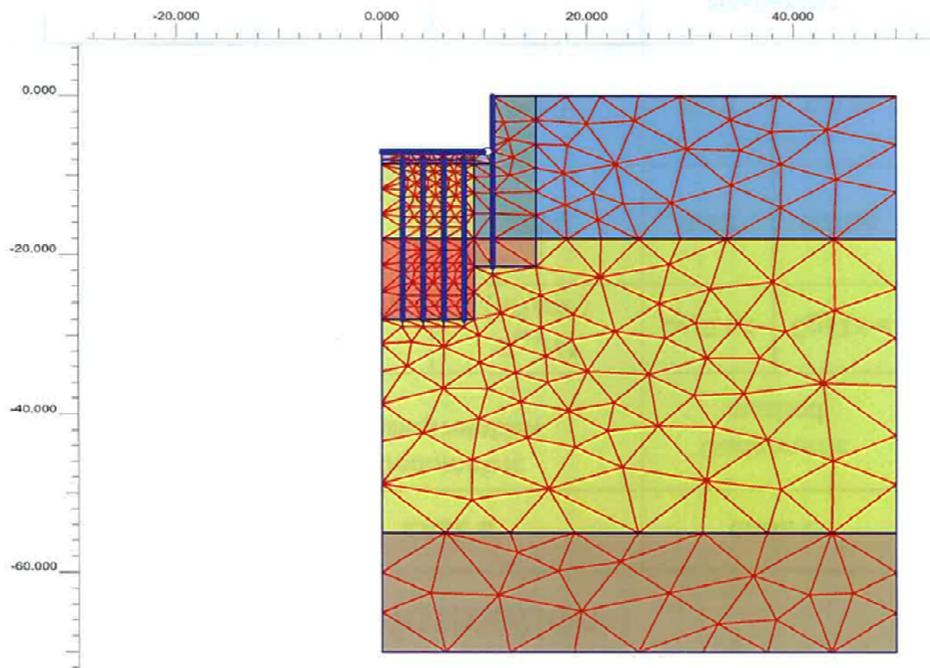


C - EXEMPLE 2 – VIADUC DE MONESTIER (9/11)

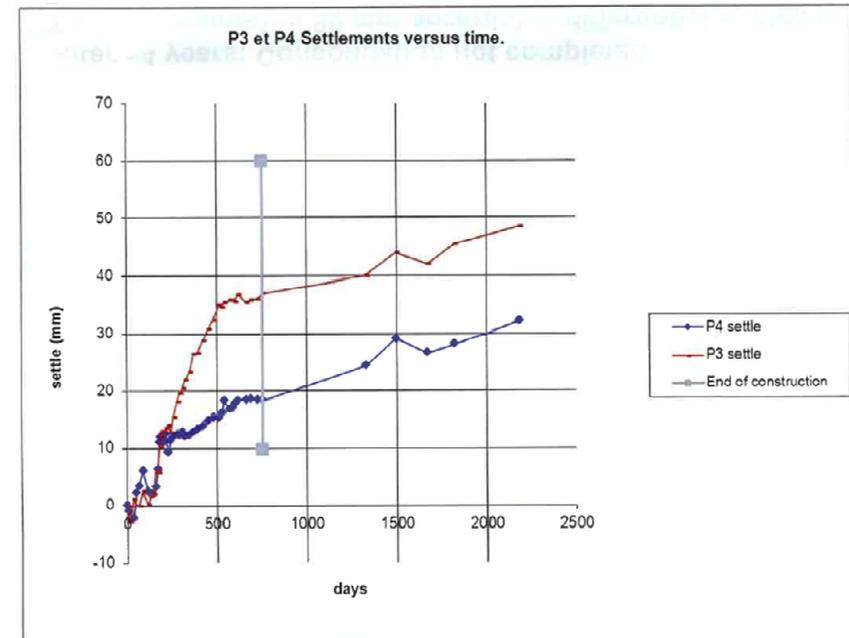


Excavation des argiles/ têtes des inclusions rigides

C - EXEMPLE 2 – VIADUC DE MONESTIER (10/11)



W Fin de construction = 33 à 62 mm
W en service = 21 mm



W Fin de construction = 19 à 37 mm
Après 5 ans 15 mm (80 mm/structure)

C - EXEMPLE 2 – VIADUC DE MONESTIER (11/11)



- **Fondations hétérogènes**
- **Suivi conforme des déformations et tassements**
- **REX très important sur le comportement des argiles varvées du Trièves**

D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (1/16)

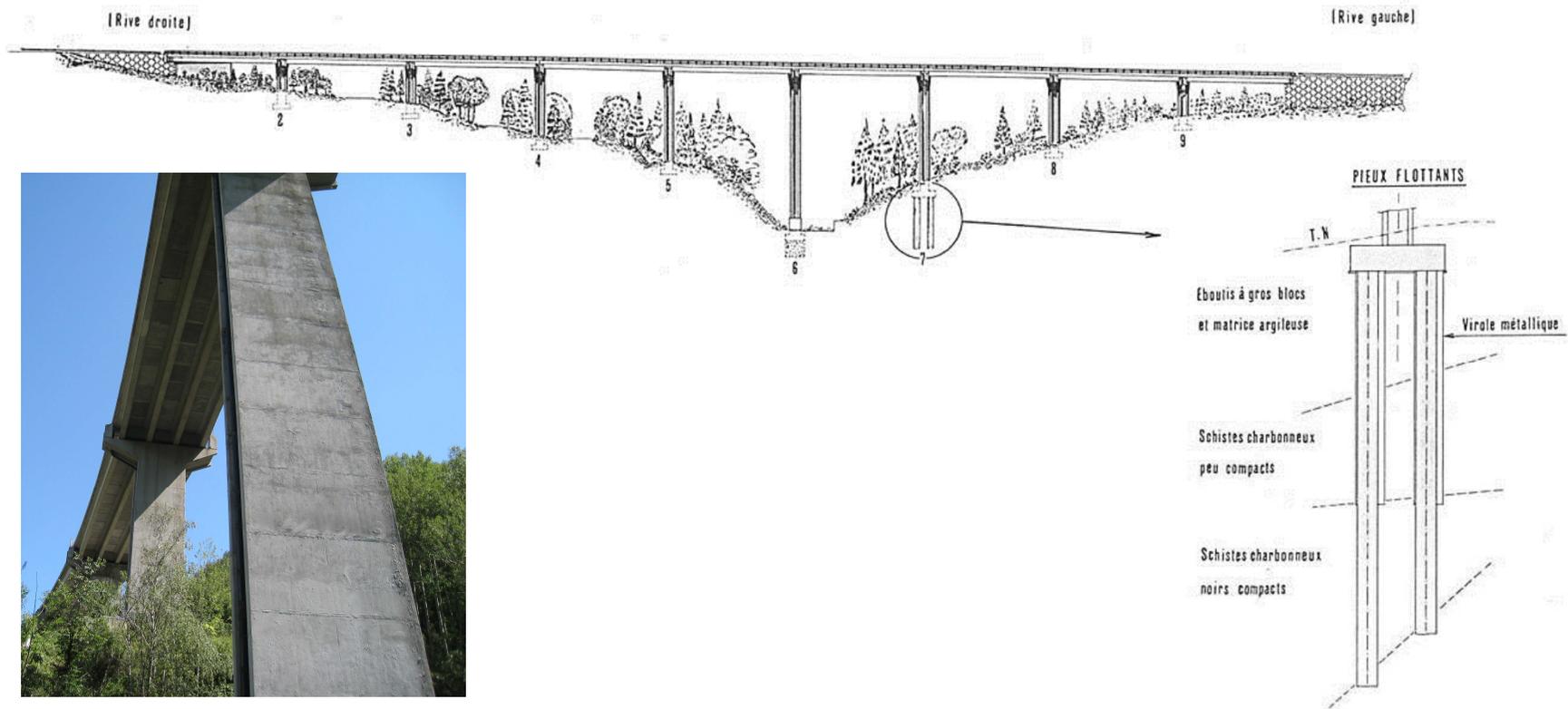


Longueur 360/281 m, années 1978 et 2019

D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (2/16)

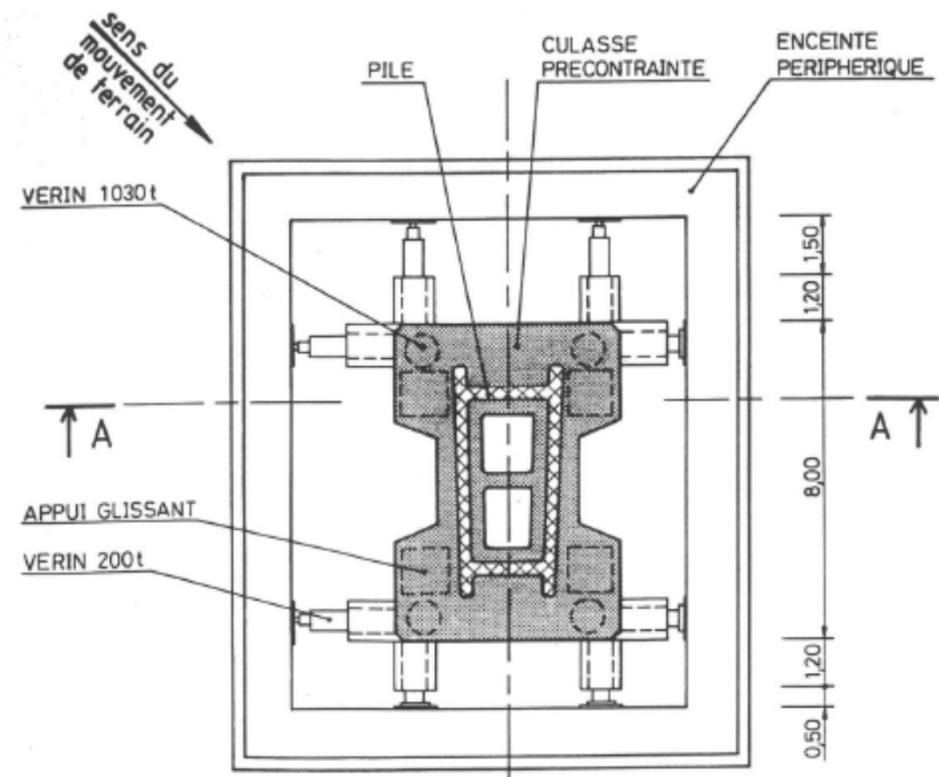
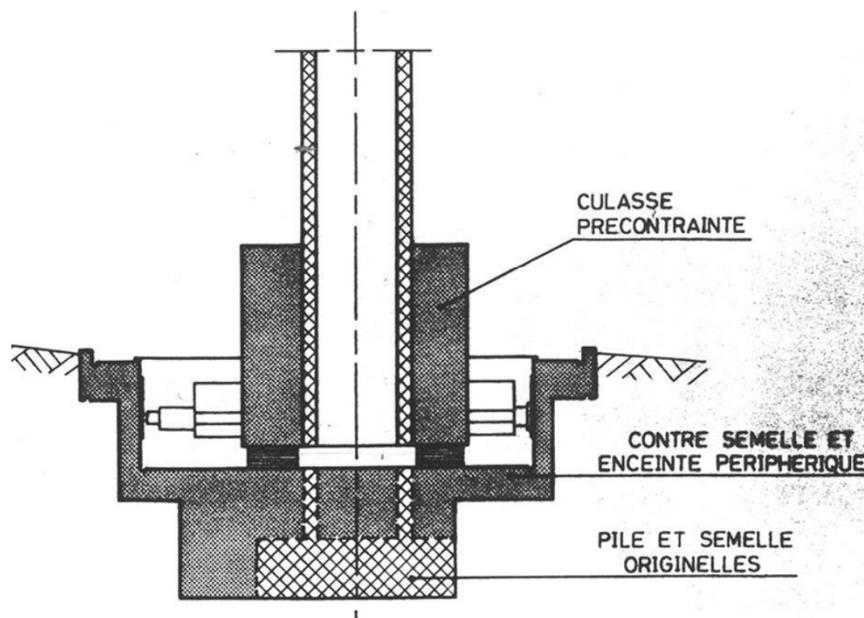
A l'origine un viaduc de conception classique 1978

- 9 travées isostatiques de 40 m
- 7 piles intermédiaires fondées superficiellement, une sur pieux



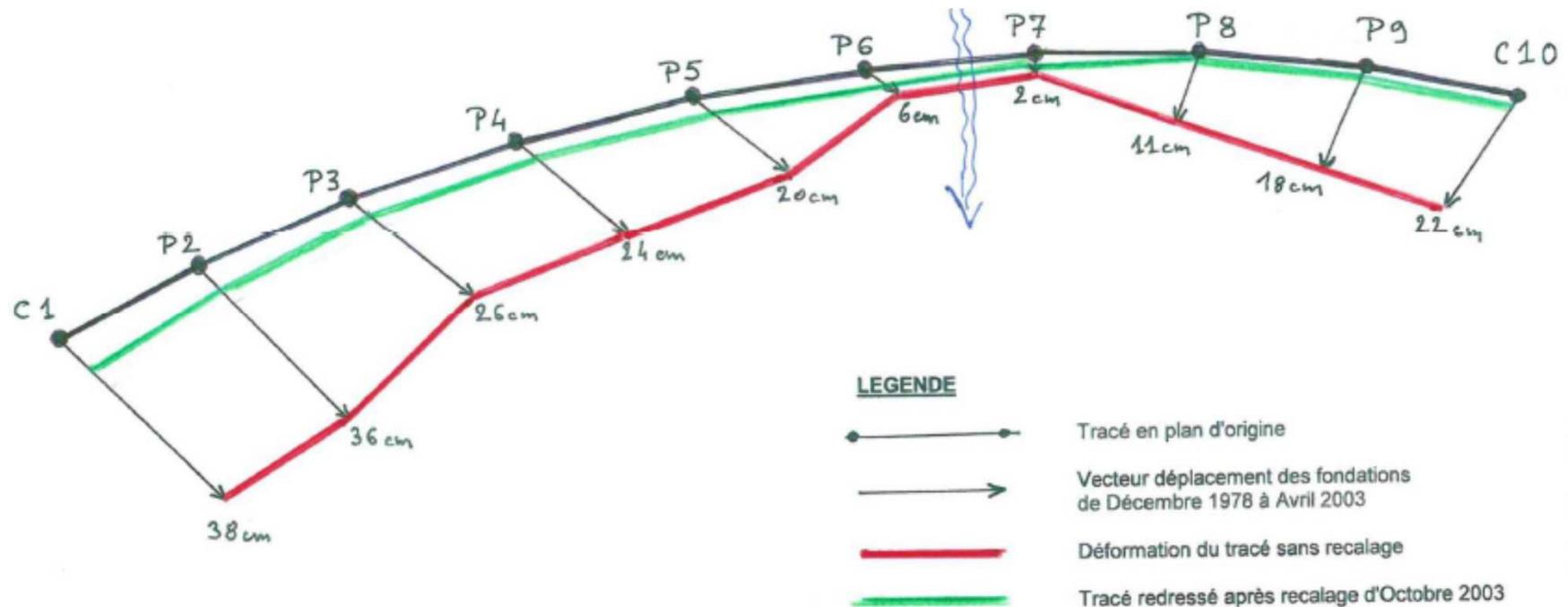
D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (3/16)

1985, après avoir envisagé la démolition, mise en œuvre d'une solution originale conçue par Jean Tonello permettant de recaler le tablier à sa place initiale avec une durée de vie évaluée à 40 ans.



D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (4/16)

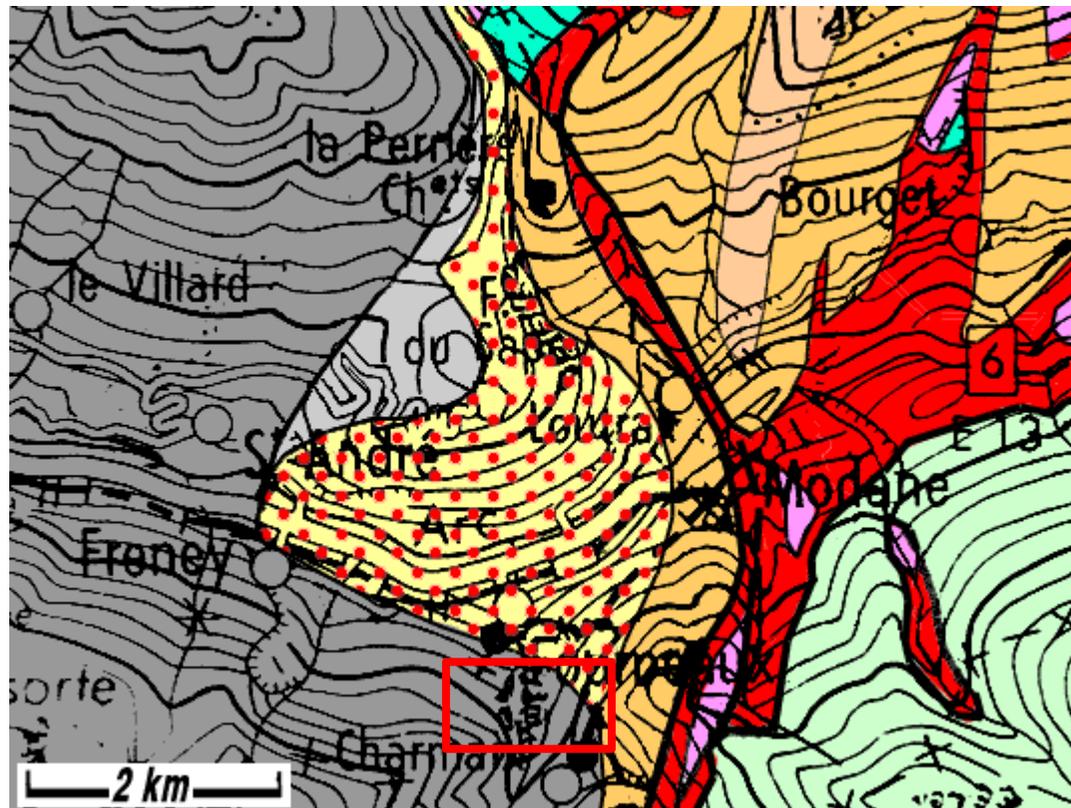
De 1986 à 2003, 3 opérations de recalage



Un dispositif qui a atteint ses limites

D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (5/16)

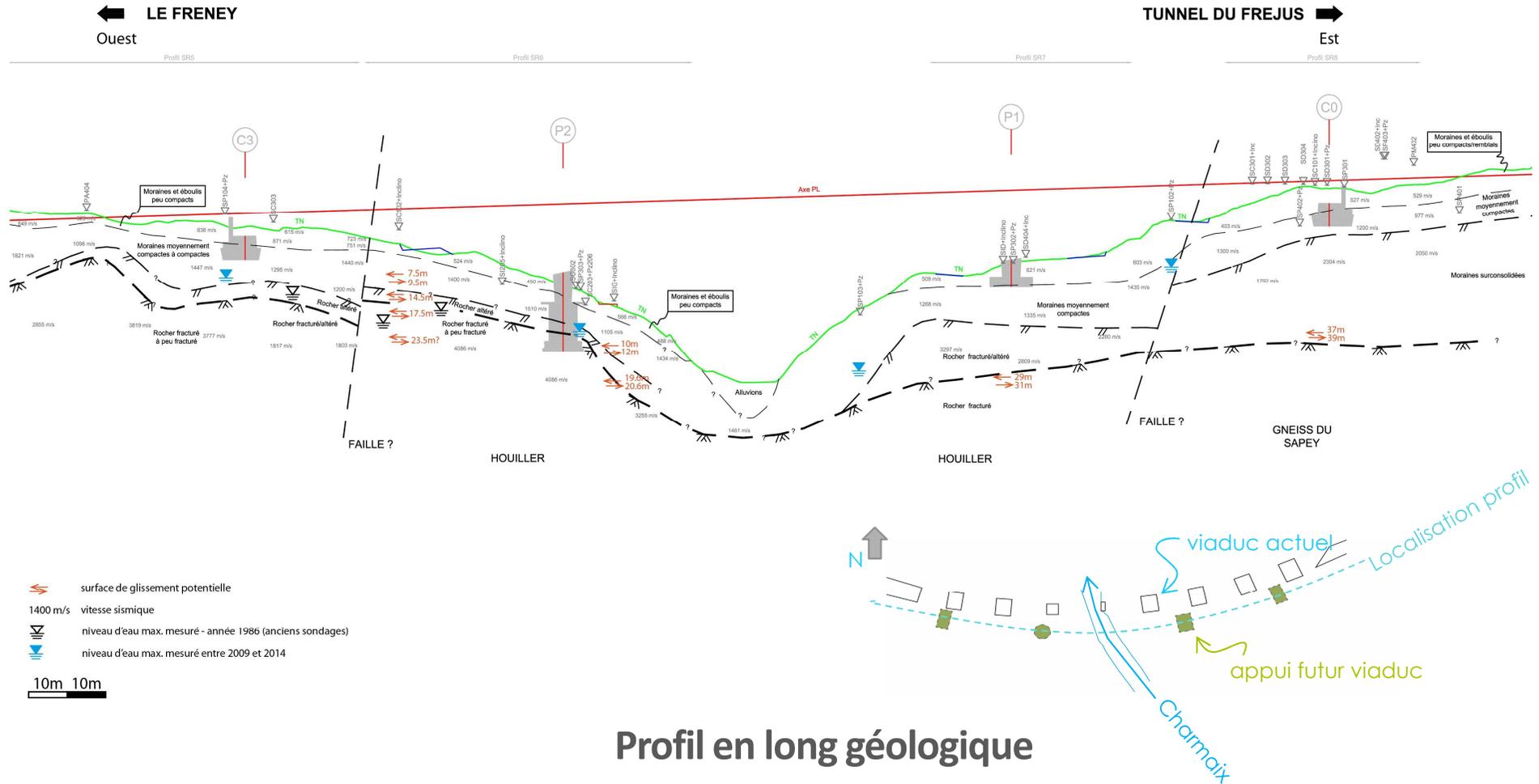
Carte géologique simplifiée



Légende :

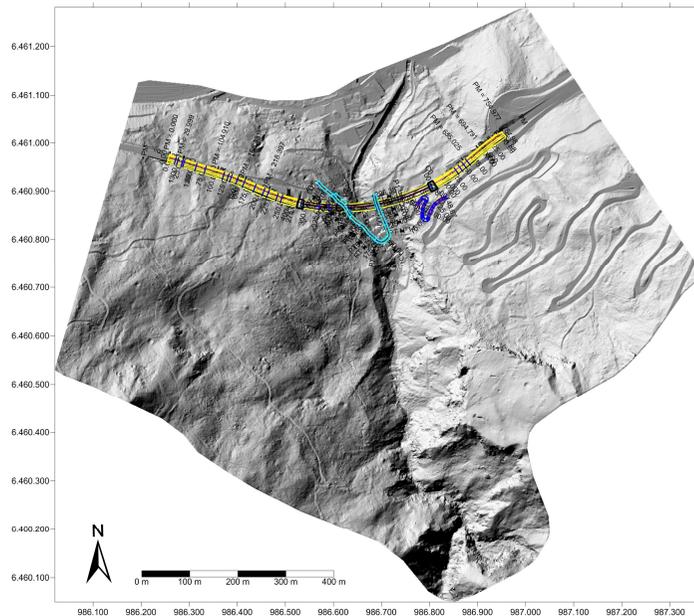
-  Schistes du Houiller
-  Gneiss du Sappey
-  Schistes versicolores
-  Gypses et cargneules
-  Localisation du projet

D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (6/16)

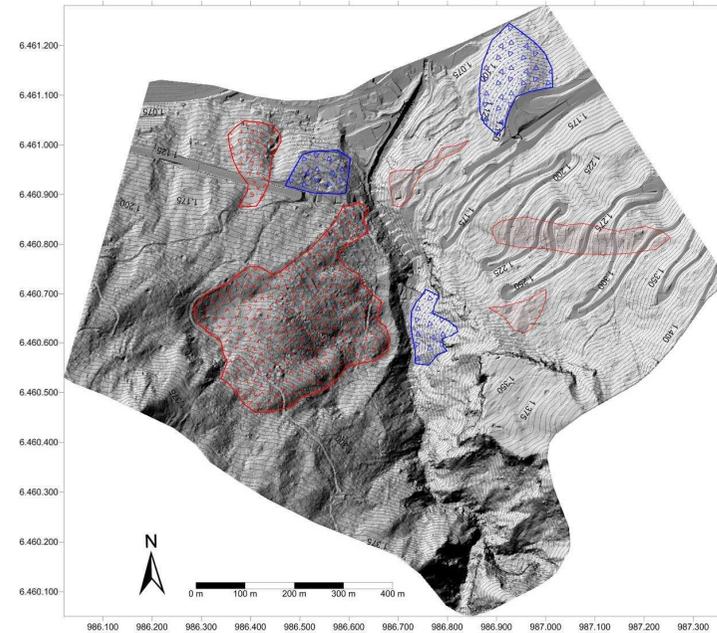


D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (7/16)

Etudes historiques des glissements
(en local / régional)



Situation du projet



3 grands types d'anomalies :

- Zone d'éboulis ou de remblais 
- Zones glissées avérés 
- Zone de glissement probable 

Interprétations

D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (8/16)

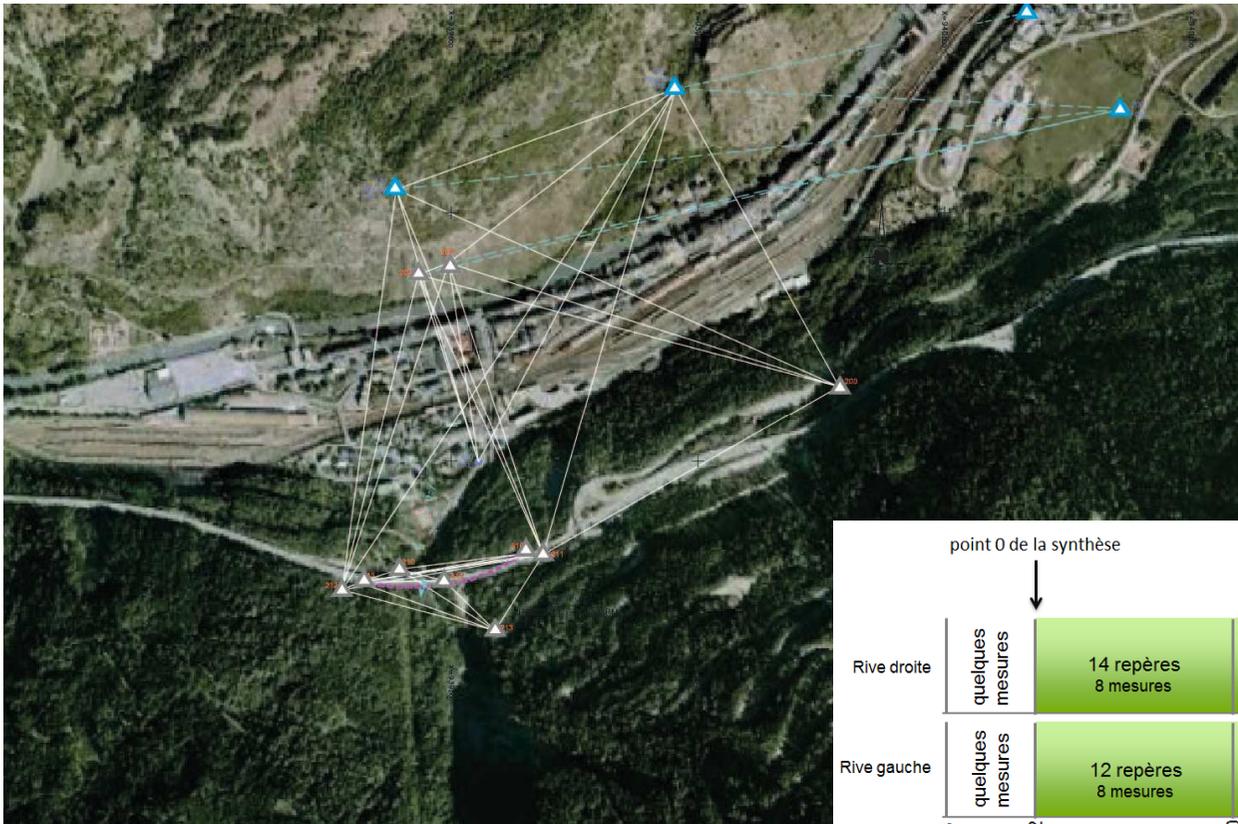
Différents types de mesures disponibles :

- Mesures topographiques
- Mesures inclinométriques
- Suivis piézométriques

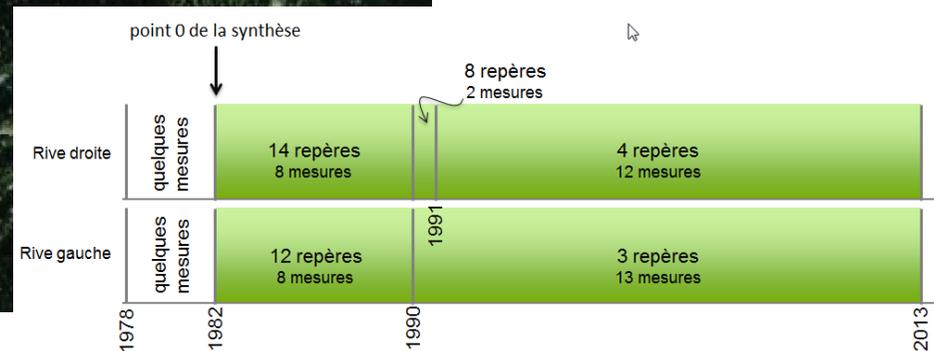
D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (9/16)

INSTRUMENTATION : MESURES EN SURFACE

Localisation et périodes des mesures



△ Borne de référence
△ Borne mesurée

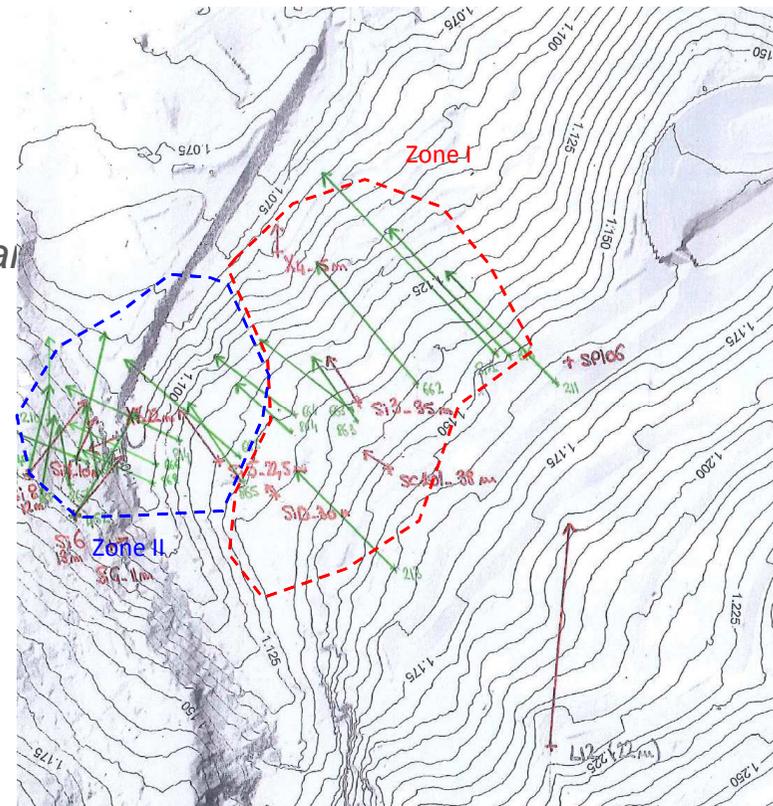


D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (10/16)

MESURE EN SURFACE - RIVE DROITE

Synthèse

- $Vitesse_{1990 \text{ à } 2013} < Vitesse_{1982 \text{ à } 1990}$
 - ⇒ consolidation des terrains
 - ⇒ Indépendamment du mouvement général du versant
- Vitesses planimétriques retenues :
 - Direction : ligne de plus grande pente
 - Zone 1 : 13 mm/an
 - Zone 2 : 9 mm/an
- Rôle de la pluviométrie dans les déplacements

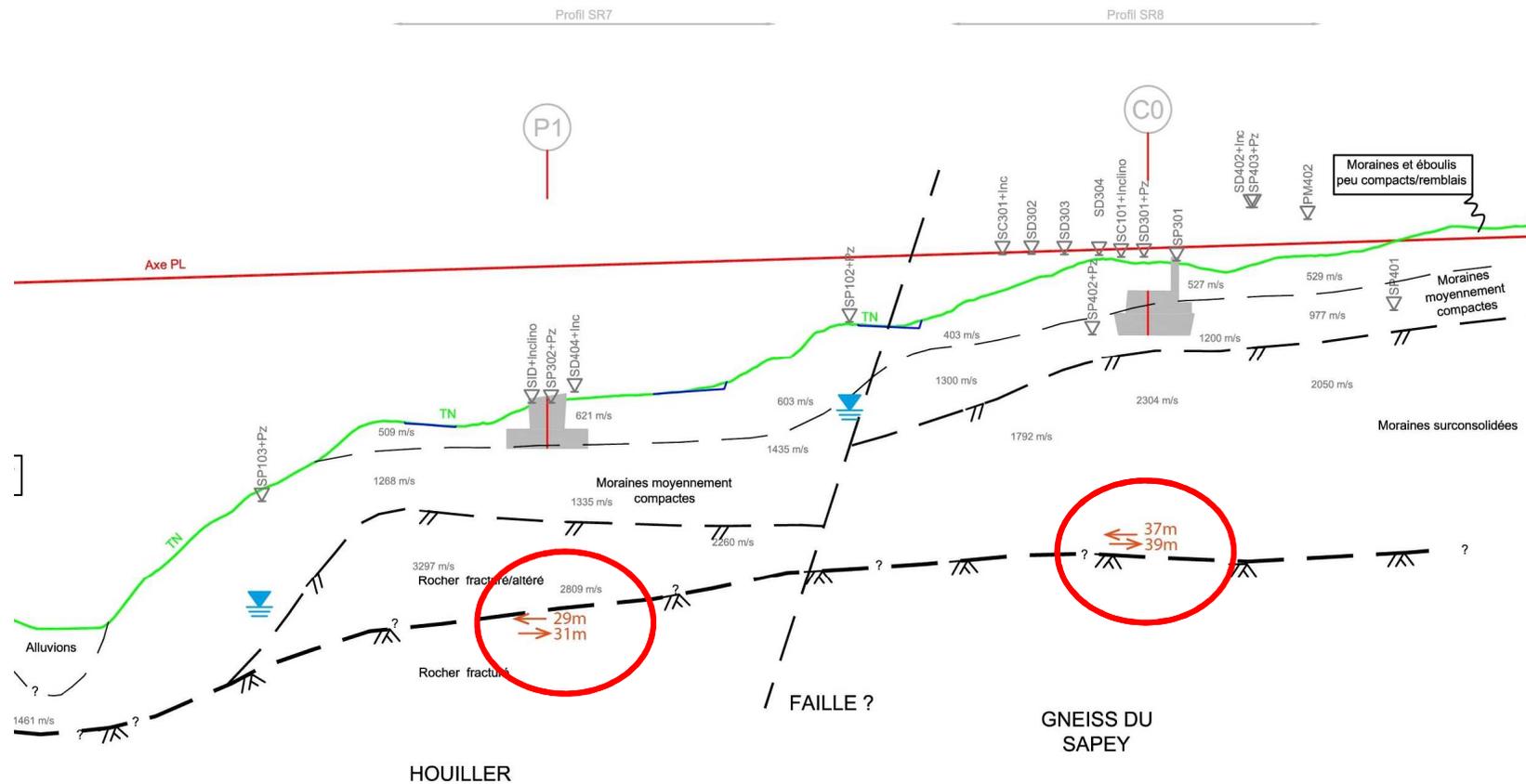


Vecteur vitesse moyen repères topo. (flèche verte)
entre 1982 et 1990

D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (11/16)

INCLINOMÈTRES - RIVE DROITE Localisation des zones de cisaillement

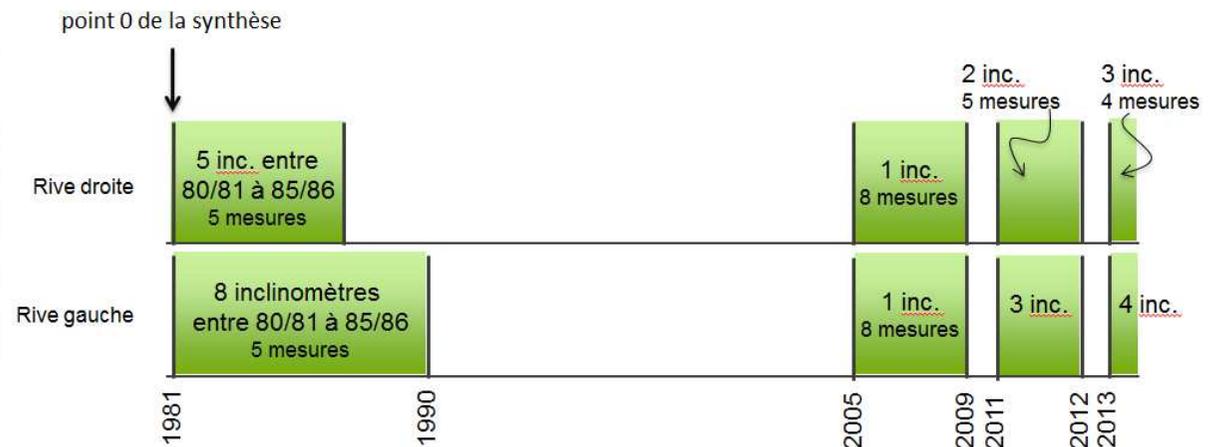
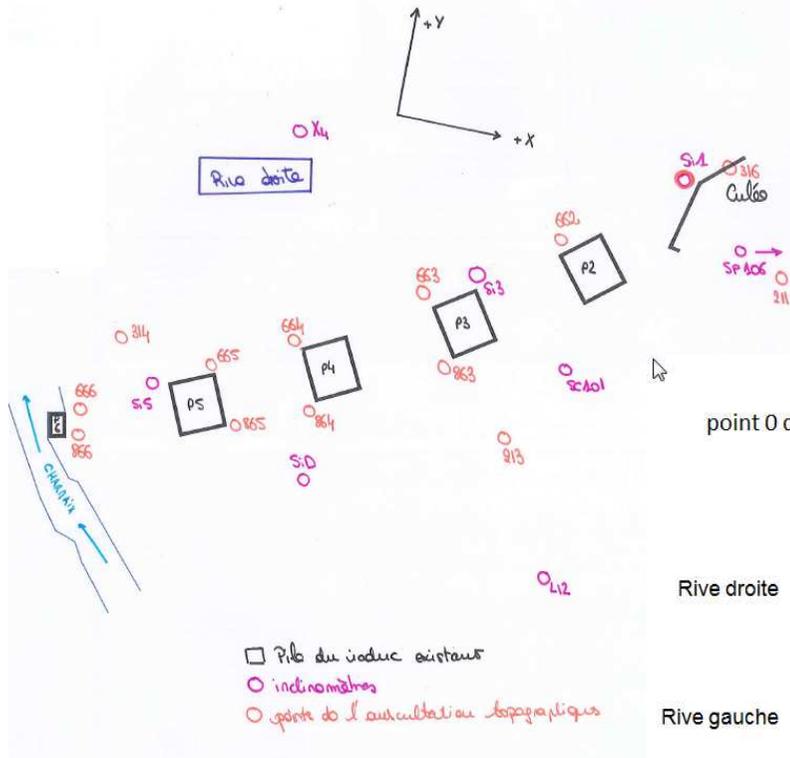
TUNNEL DU FREJUS →
Est



D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (12/16)

INCLINOMÈTRES - RIVE DROITE

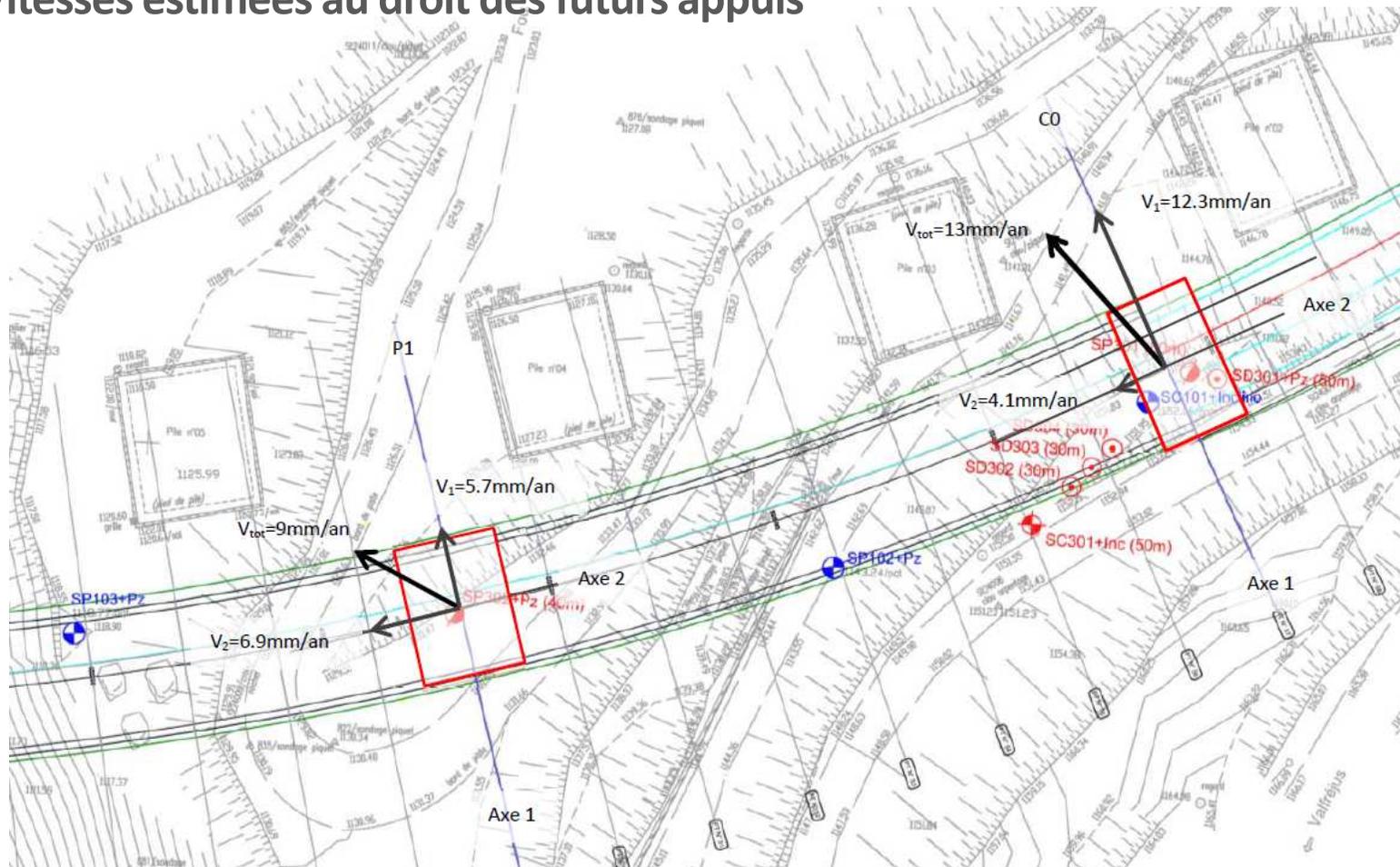
Localisation et périodes des mesures



D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (13/16)

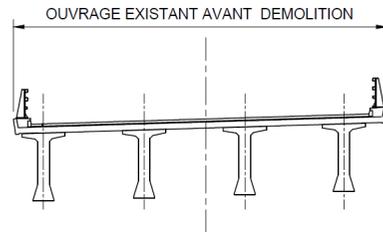
SYNTHÈSE - RIVE DROITE

Vitesses estimées au droit des futurs appuis



D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (14/16)

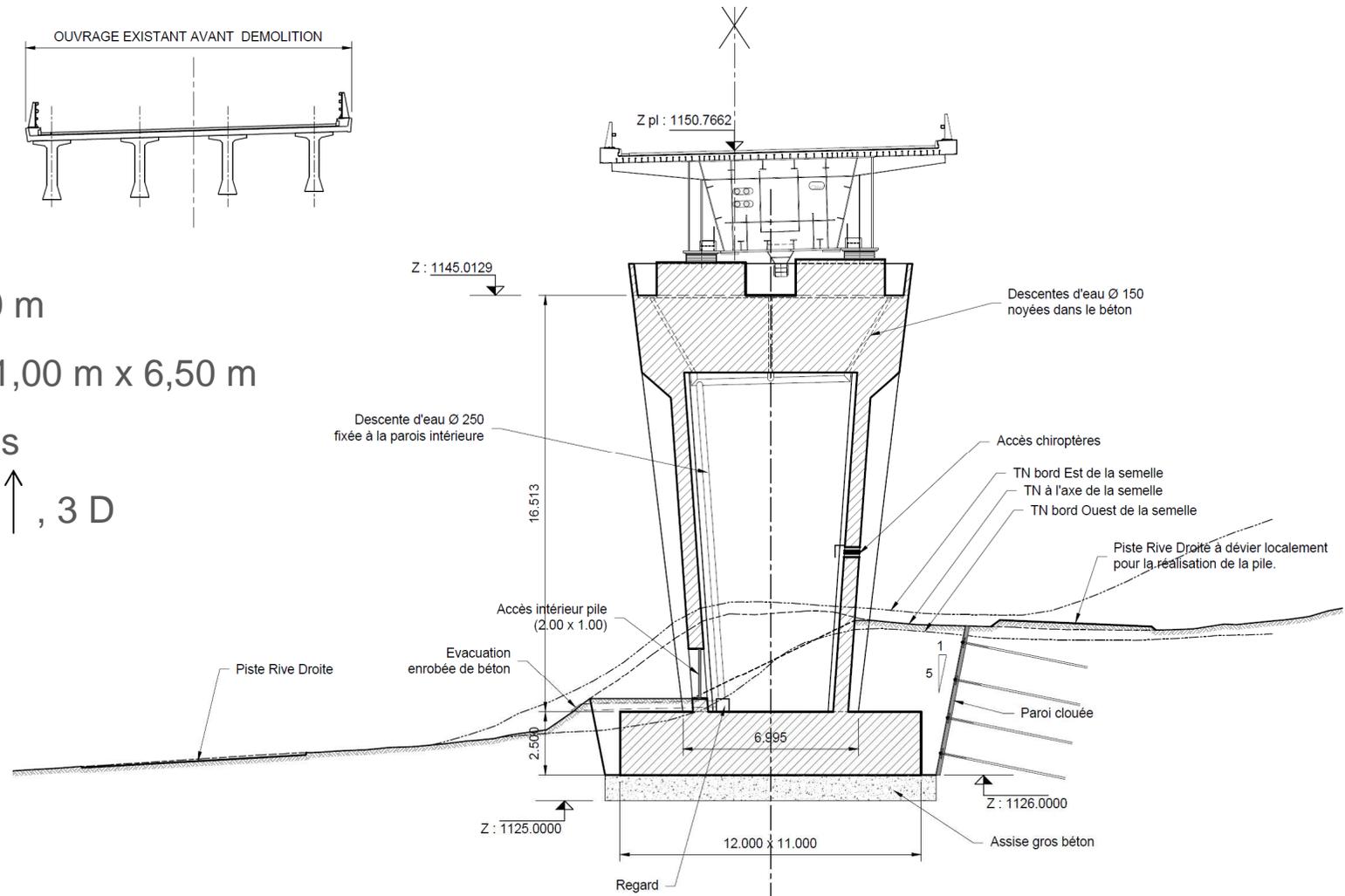
PILE P1



- Hauteur : 16,50 m
- Tête de pile : 11,00 m x 6,50 m

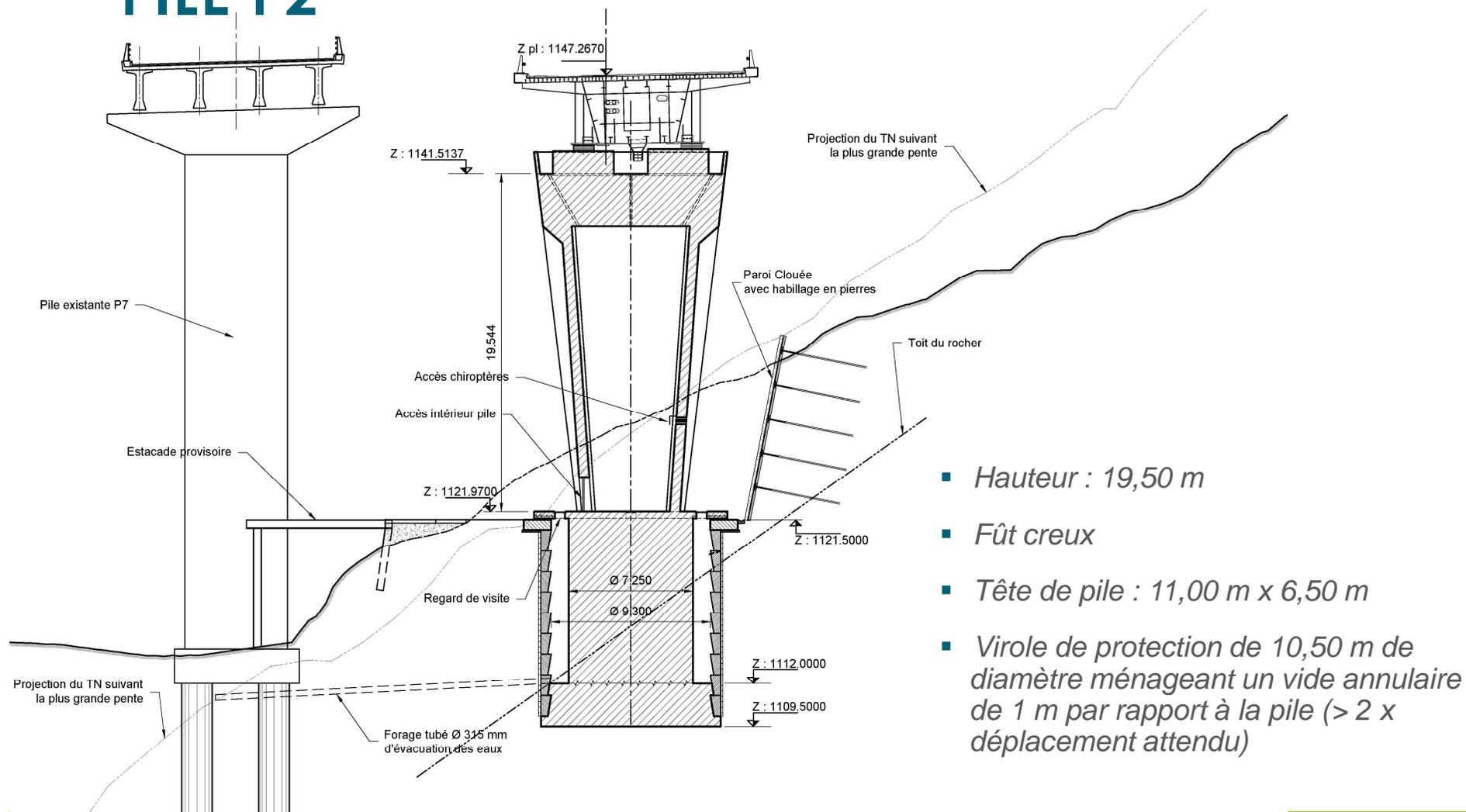
Culées et P1 fixes

Appareils d'appui ↑ , 3 D



D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (15/16)

PILE P2



D - EXEMPLE 3 – VIADUC DU CHARMAIX (16/16)



- Etude géotechnique très détaillée des glissements
- Analyse historique des mesures (32 ans) [RG 4 mm/an RD 9 à 13 mm/an]
- Conception structure / glissements (500 à 1 400 mm/100 ans)
- Attention particulière / pistes et plates-formes travaux

E - SYNTHÈSE (1/2)

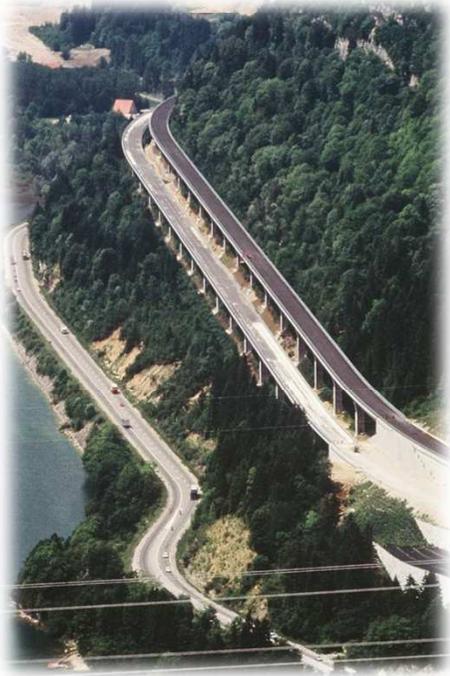
Il est nécessaire :

- « **D'apprivoiser** » le site : complexité des comportements sols/ouvrage.
- Connaître la géologie avec une **précision spatiale inhabituelle** (microgéologie).
- **Anticiper et phaser** les études géotechniques.
- **Considérer les phases provisoires** comme de véritables ouvrages géotechniques.

E - SYNTHÈSE (2/2)

Il est recommandé de :

- **Investir dans le design des fondations** ($\geq 30\%$ du coût de l'ouvrage).
- **Collaborer très étroitement** : ingénieurs Génie Civil, architectes, géologues, mécaniciens des roches et mécaniciens des sols.
- **Prévoir des reconnaissances pertinentes** (période suffisamment longue).
- **Mettre en œuvre un processus de suivi détaillé** (construction et service).



Merci pour votre attention