



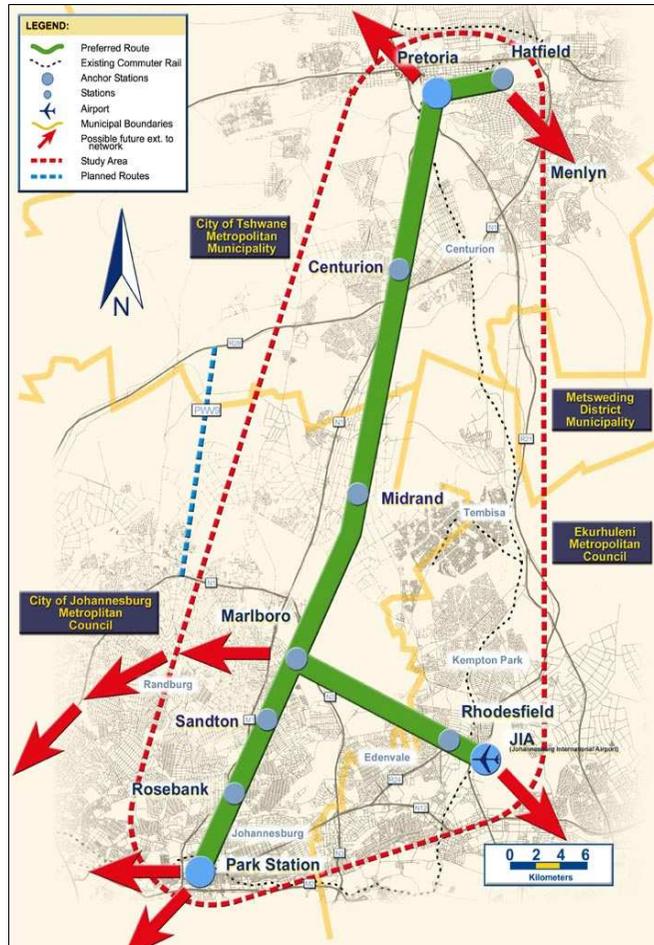
# Le rôle du Suivi Géotechnique sur un grand projet Gautrain, South Africa

**Présenté par Roger Storry**

**October 2010**



# Description du projet Gautrain



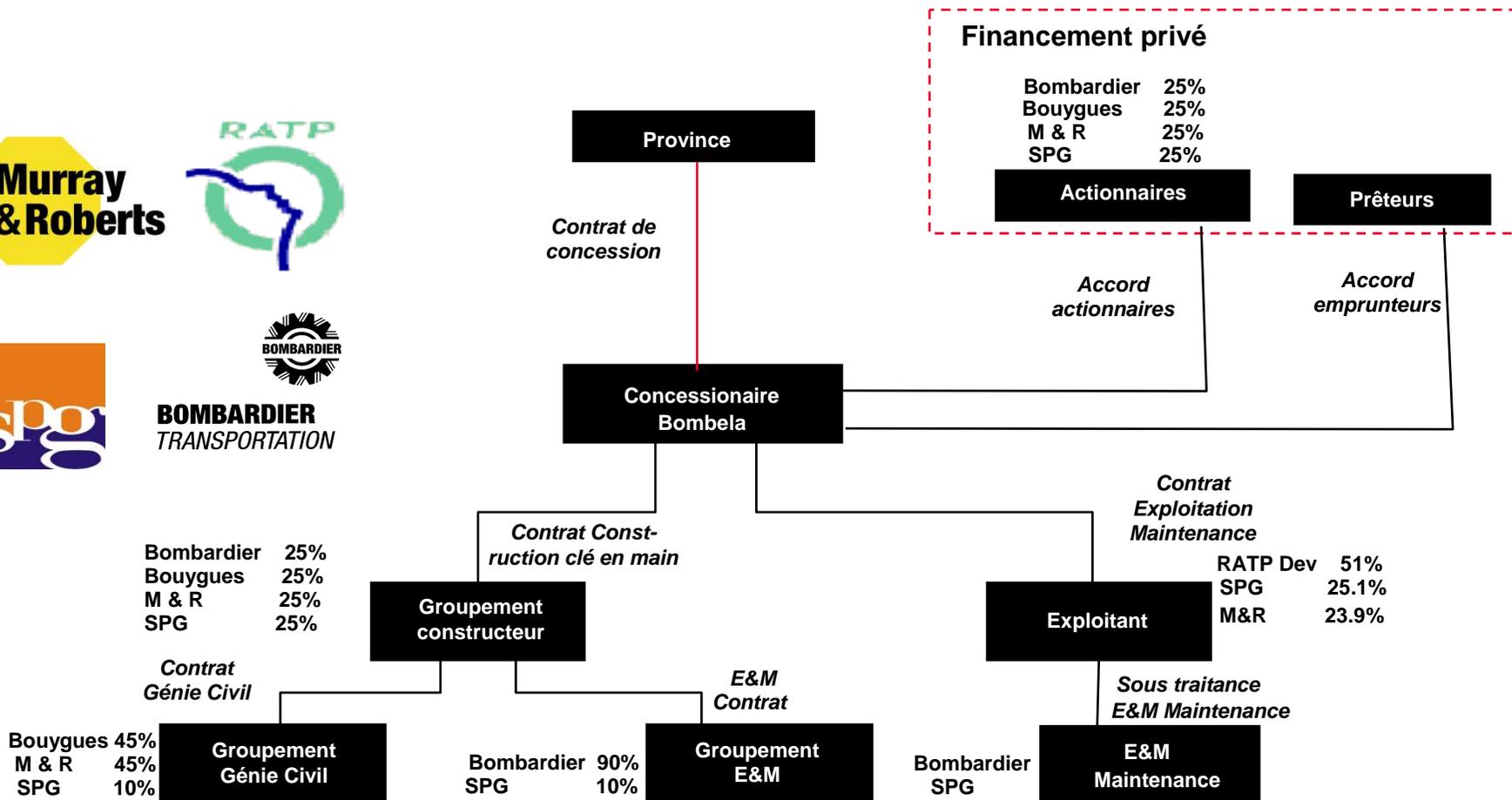
Données du PROJET	2007
Durée de Construction	45-54 Mois Début 28 <sup>th</sup> Sept 06
Durée de Concession	19,5 ans
Longueur	80 km
Stations	10 + 1 dépôt
Longueur de unnels	15,3 km (3,3 km TBM)
Nombre de viaducs et longueur	16 – 10,4 km
Terrassements	Déblais 6 Mm3 Remblais : : 5 Mm3 30 Mm3 km transport
PS / PI	31 / 17



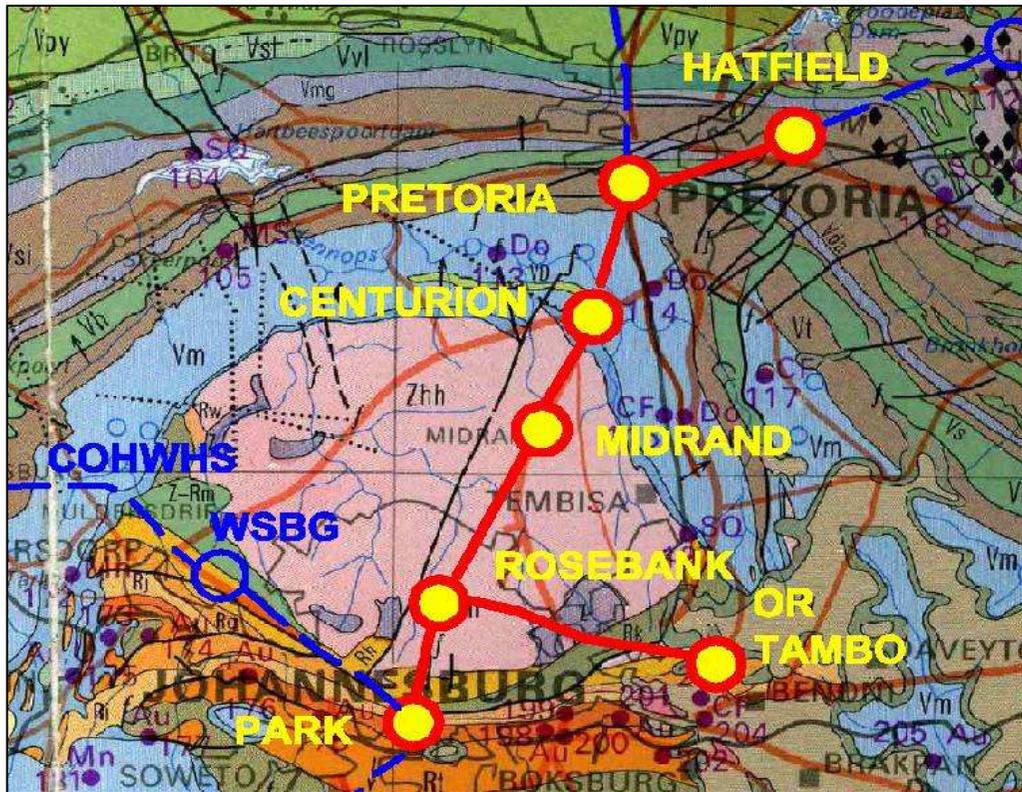
# Organisation financière et contractuelle



**BOMBARDIER**  
TRANSPORTATION



# Géologie du projet



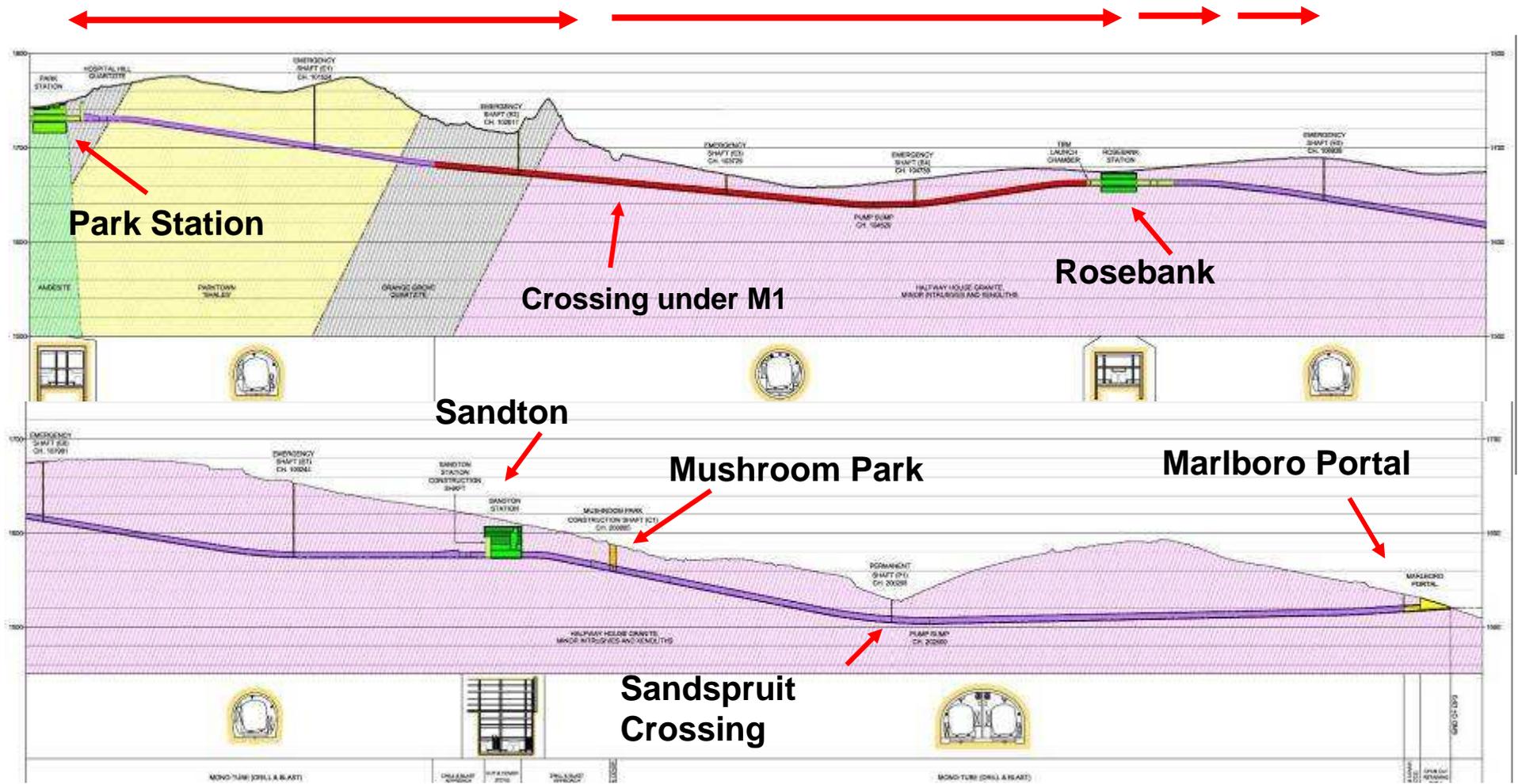
- ✓ Dôme granitique sur la moitié (3.2 Mds années)
- ✓ Meta-sédiments Witwatersrand
- ✓ Dolomites (2.2 Mds années)
- ✓ Roche sédimentaires du Pretoria Group



# Géologie schématique des sections en Tunnel

Witwatersrand –  
Schiste, Siltstone  
et Quartzite

Granite



# Rôle de l'équipe géotechnique pour les tunnels

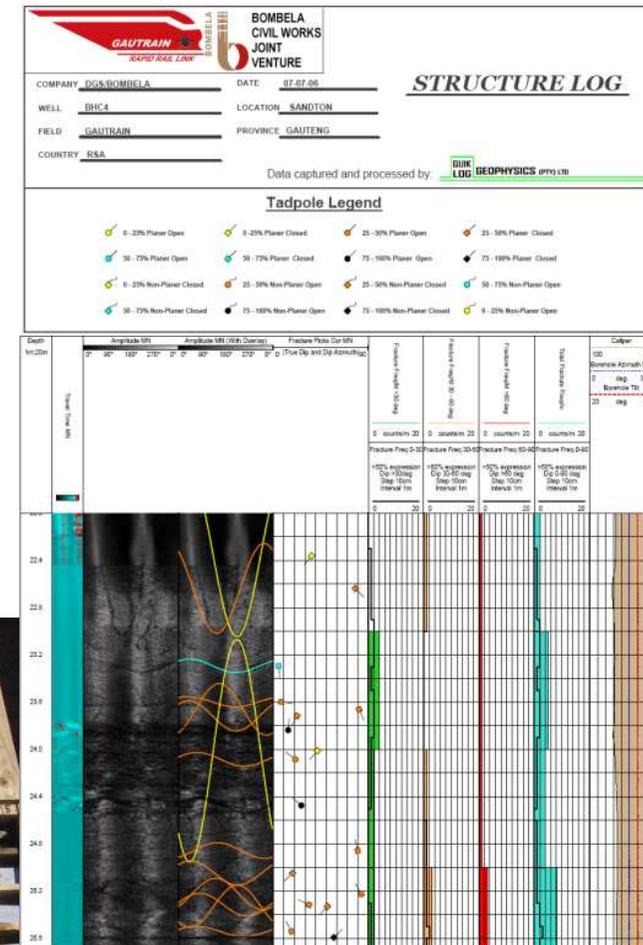
- Reconnaissances géotechniques
- Levés géologiques au front – définition des soutènements des puits et tunnels
- Suivi des reconnaissances à l'avancement
- Suivi technique des injections d'étanchéité
- Validation des niveaux d'ancrage des parois moulées
- Auscultations géotechniques – en tunnel et en surface



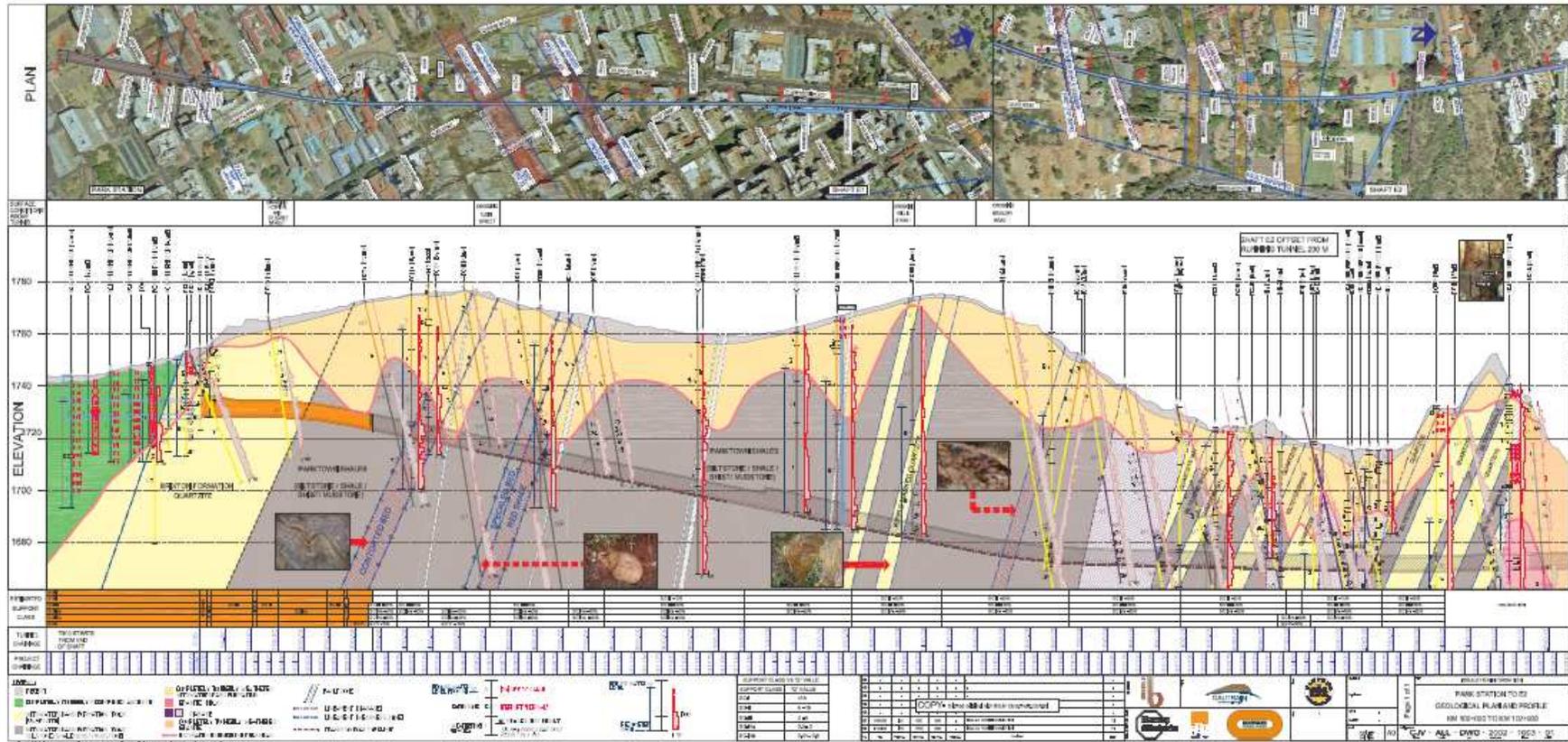
# Reconnaitssances pour les sections en tunnel

## Tunnels

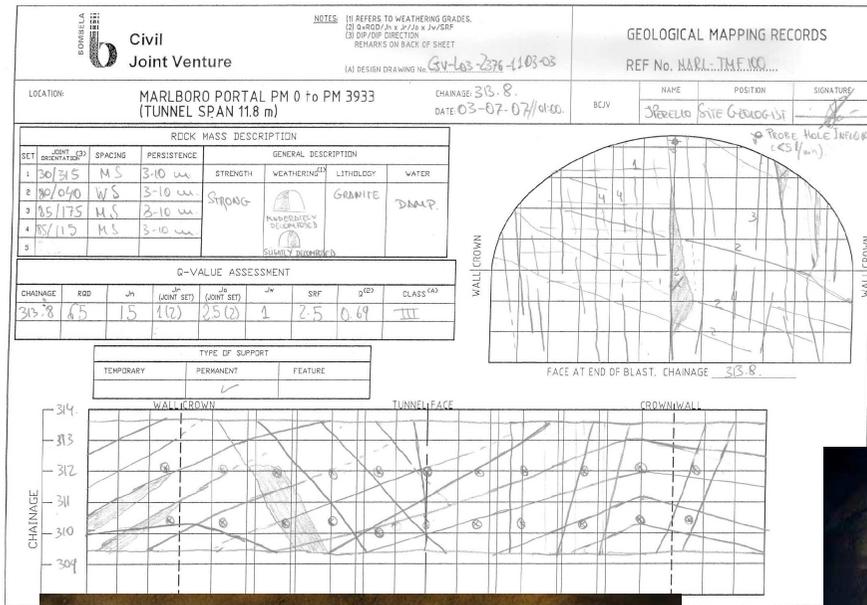
- Environ 15 km de tunnels
- 275 points de sondages
- Essais in situ et de laboratoire



# Modèle géologique – de Park à M1 Crossing



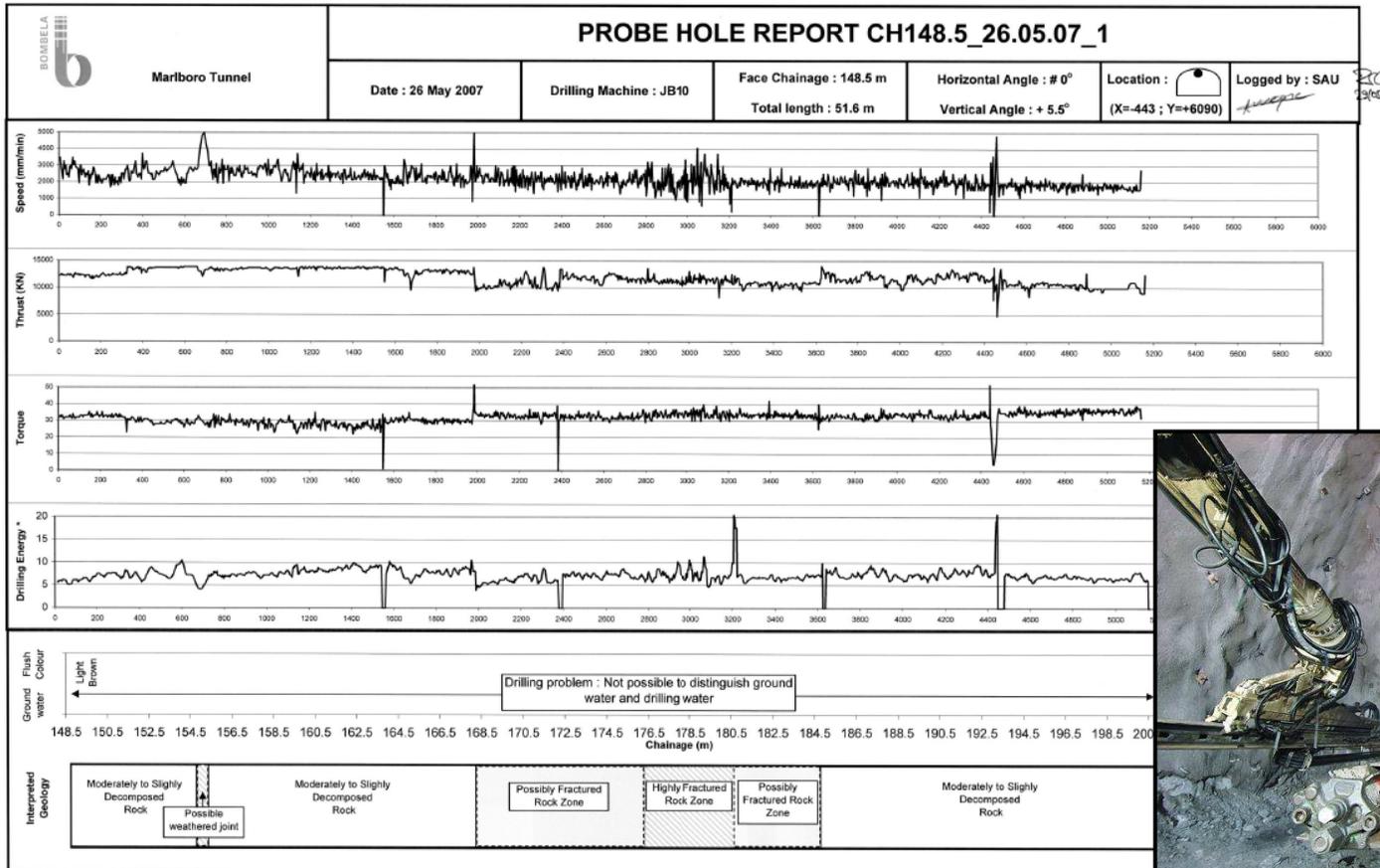
# Relevés géologiques en tunnels



- ✓ Relevés géologiques systématiques pour définir le type de soutènement
- ✓ Soutènements en tunnel basés sur le "Barton's Q system"



# Relevés géologiques en tunnels



- ✓ Reconnaissances au front systématiques pour identifier les zones altérées et les risques de venues d'eau incontrôlables



# Rôle de l'équipe géotechnique pour les travaux "extérieurs"

- Reconnaissances géotechniques
- Levés géologiques des déblais – définition des dispositions de stabilisation des talus
- Validation des conditions de fondations des pieux et semelles
- Définition et suivi des traitements de terrain en zone dolomitique pour minimiser le risque de fontis
- Suivi des traitements de plate-forme par compactage dynamique, substitution
- Auscultations géotechniques

✓ Rôle d'Assurance Qualité

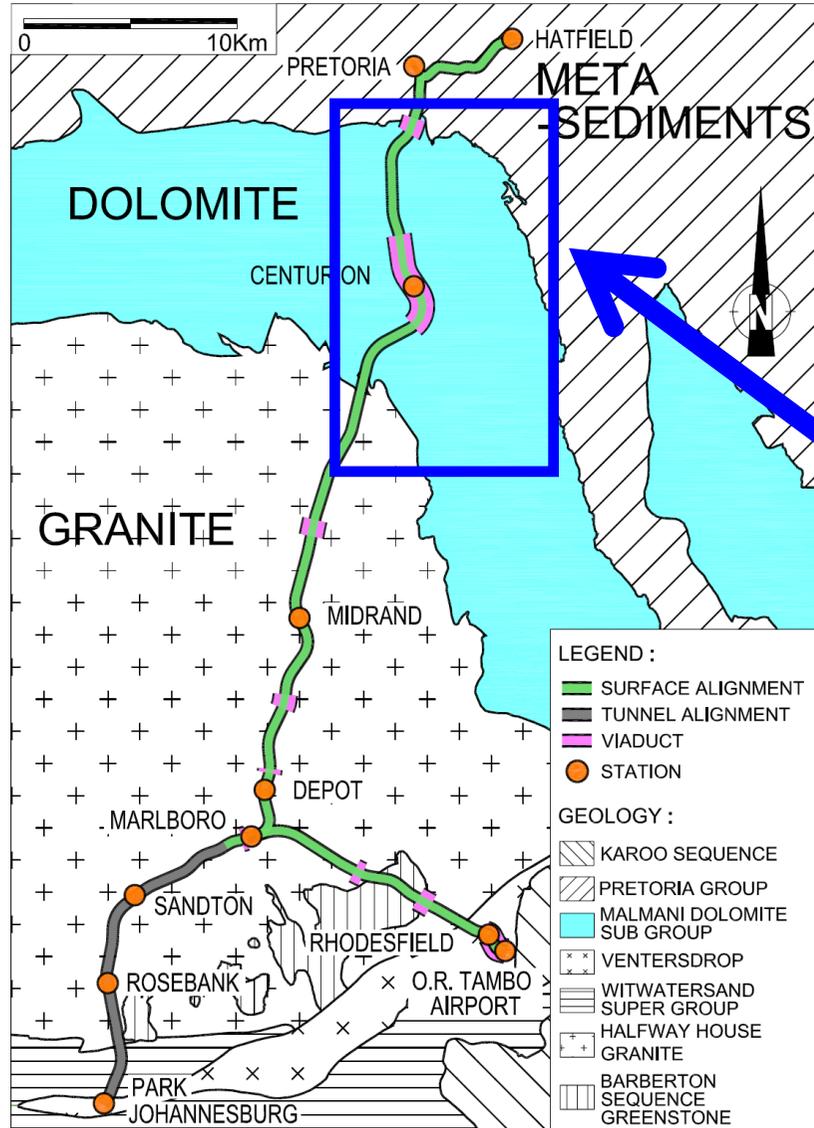




# Dolomites



# Projet Gautrain–Section dolomitique

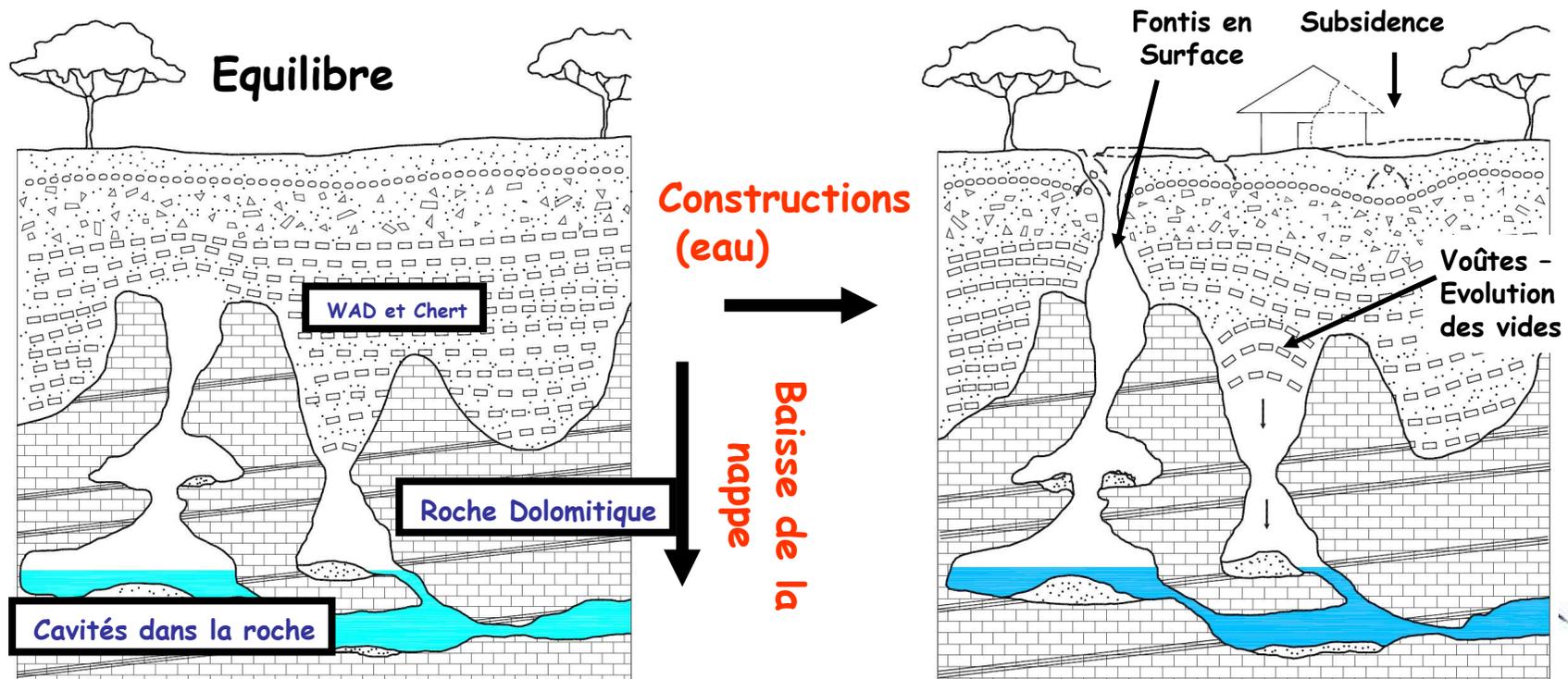


**Section dolomitique - 15km**

- ✓ 5.8 km Viaducs
- ✓ 1.4 km Déblais
- ✓ 1.8 km Remblais
- ✓ 1.0 km Remblais en sol renforcé

# Singularités des terrains dolomitiques

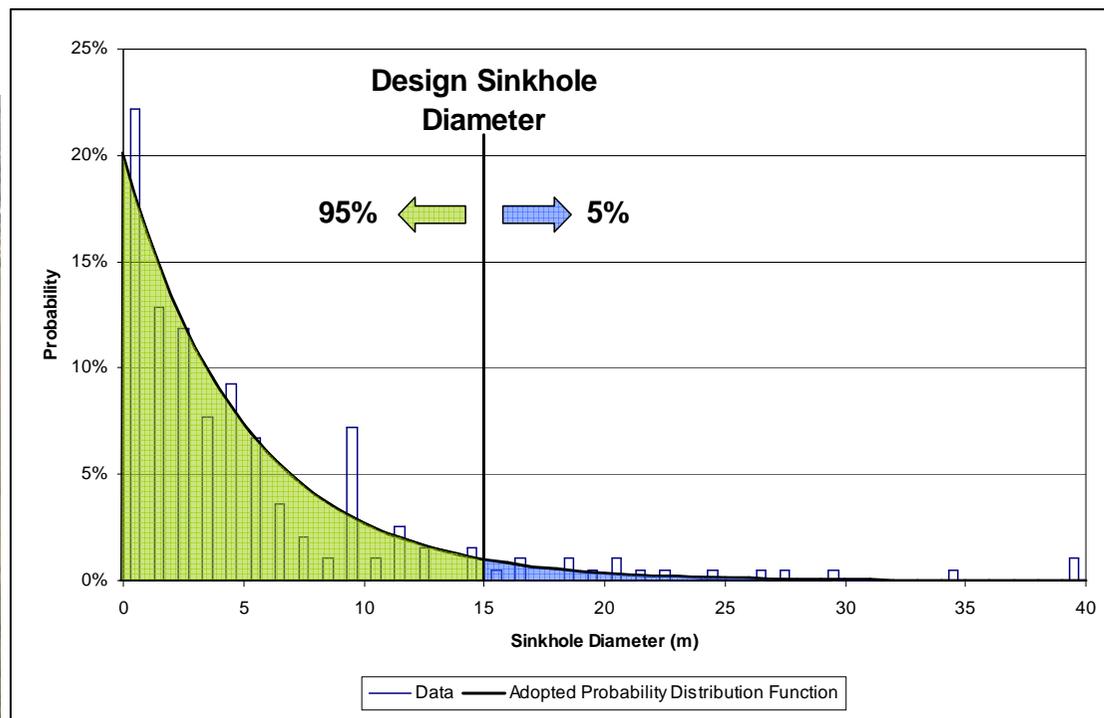
- ✓ La dolomite est extrêmement dure mais soluble – l'altération chimique conduit à une topographie karstique particulièrement irrégulière
- ✓ L'altération et les circulations d'eau créent des cavités et "cheminées verticales" profondes au sein du rocher et des sols sus-jacents
- ✓ Une déstabilisation de l'équilibre (écoulement souterrains ou baisse rapide des niveaux piézométriques) conduit à des sinkholes (fontis) débouchant en surface (diamètre de dimensionnement considéré : 15m)



# Risque de Sinkholes



**Nombre total d'évènement pris en compte pour l'étude : 458**  
**(parmi un total de 865 enregistrements plus ou moins renseignés)**



# Les challenges des reconnaissance en zone dolomitique



## Terrains Superficiels

- Effondrable
- Meta Stable (Wads : residus ultime de la dissolution de la dolomite)
- Très hétérogène
- Vides

## Figures karstiques

- Vides
- Blocs rocheux durs
- Toit du substratum très irréguliers et avec de fortes pentes
- "Pinnacles"
- Frontières "brutales"

# Approche traditionnelle en terrain dolomitique



## Echantillons (usuellement)

- Pas de récupération ou très remaniés

## Méthode de foration

- Déviations sur les pinnacles
- Perte d'outils

## Paramètres de foration

- Artefacts
- Faible résolution
- Représentativité très locale

Objectif => Techniques de Reconnaissance robustes pour obtenir des paramètres géotechnique fiables pour la conception des ouvrages

# Dolomie - Méthodes utilisés

## "Symmetrix" (Terrains Superficiels )

- Avancement simultané du tubage et de l'outil de forage.
- Remontée de l'échantillon avec le tubage.
- Echantillonnage "propre".
- Tubage et train de tiges rigides.

## Circulation Inverse (Rocher)

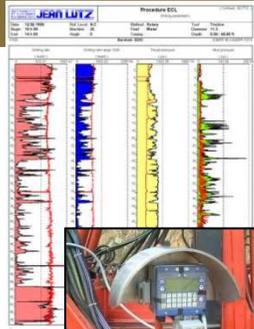
- Remontée de l'échantillon avec le train de tiges.
- Echantillonnage "propre".

## Mesures en forages

- Enregistrement des paramètres de Forage (Jean Lutz)
- Déviations



# Reconnaitances en phase exécution



**Forages "Symetrix" avec enregistrement des paramètres**



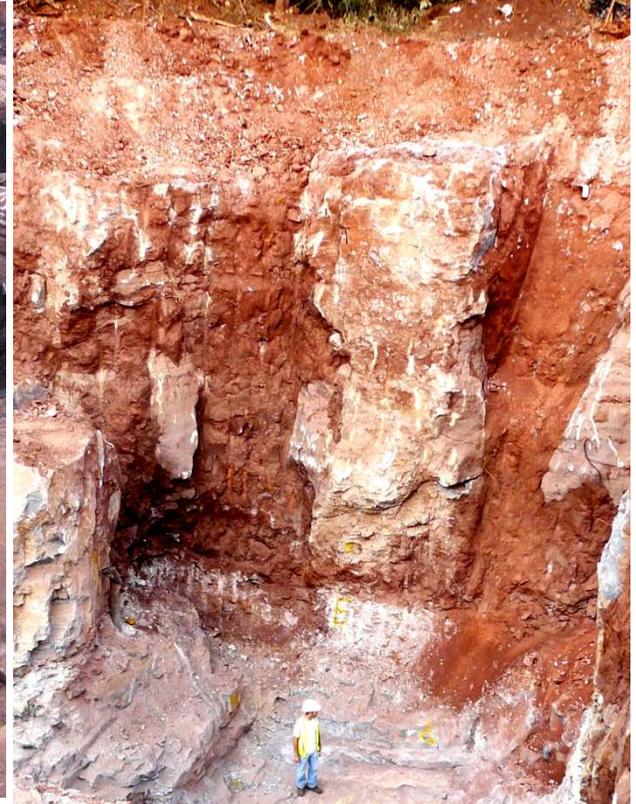
**Radar en forage pour la détection des falaises enterrées et des cavités**



**Forages à la tarière  $\Phi$  900mm pour prélèvement d'échantillons intacts et paramètres de calcul**

- ✓ Reconnaissances géotechniques détaillées => Paramètres géotechniques réalistes pour le projet (au total 1166 sondages le long des 15km de la zone dolomitique)
- ✓ Reconnaissances géophysiques - Borehole Radar - Microrgravimétrie – CSW (continuous shear waves)
- ✓ Pénétration Statique CPT et pressiomètre – jamais utilisés auparavant dans cette zone

# Challenge des reconnaissances en zone dolomitique – Représentativité des sondages ?



Valeur d'un sondage ?

Variations brutales : du Rocher au Sol. Ne permet pas de détecter les "objets" voisins



# Geophysique en forages – Valeur ajoutée

Le Radar en forage valorise les sondages.

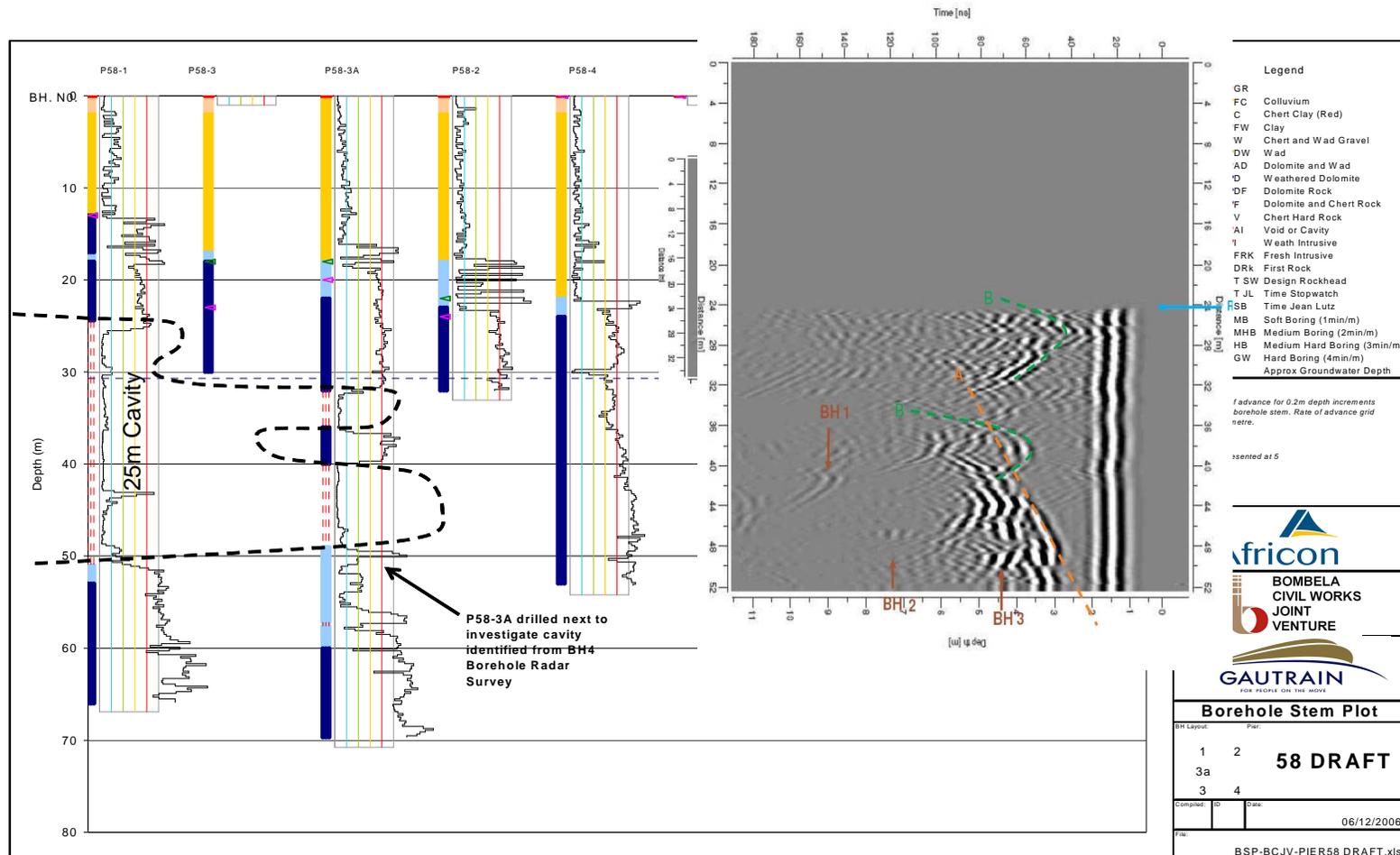
Diamètre d'investigation passe de 0.165 m à 15 m ...

Identification possible :

- vides.
- zones lâches.
- falaises enterrées.
- discontinuités géologiques et contacts.



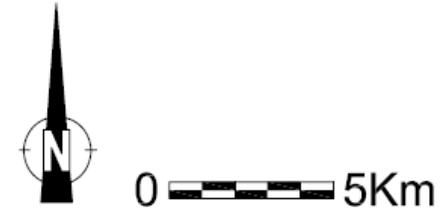
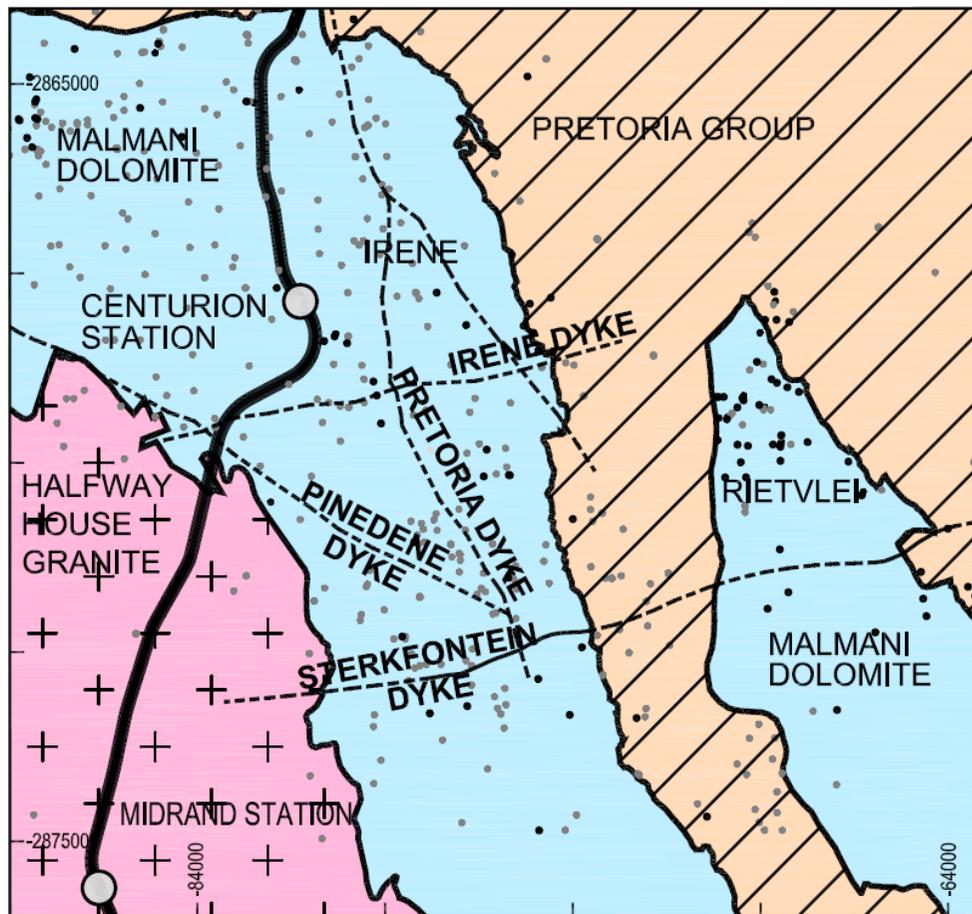
# Section Dolomitique - Radar en forage pour les Foundations des Viaducs



Le Radar a permis d'identifier des vides non reconnus par le forage initial



# Zone d'étude hydrogéologique



Un abaissement du niveau de la nappe dans un milieu karstique peut provoquer la formation de fontis.

Etudes hydrologiques et hydrogéologiques pour :

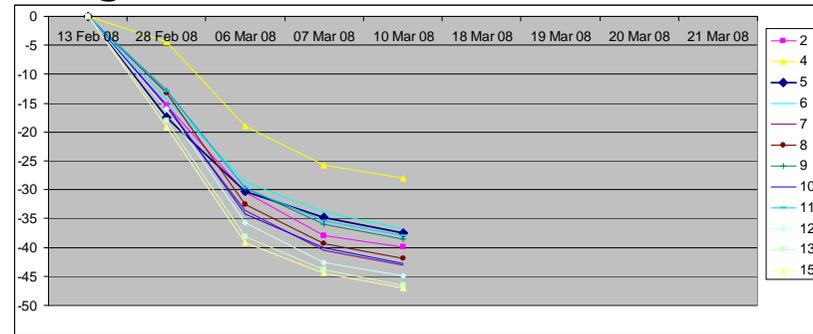
- Évaluer le risque d'abaissement.
- 212 forages d'eau et 3 installation d'alimentation en eau municipale – 20 000 m<sup>3</sup>/jour



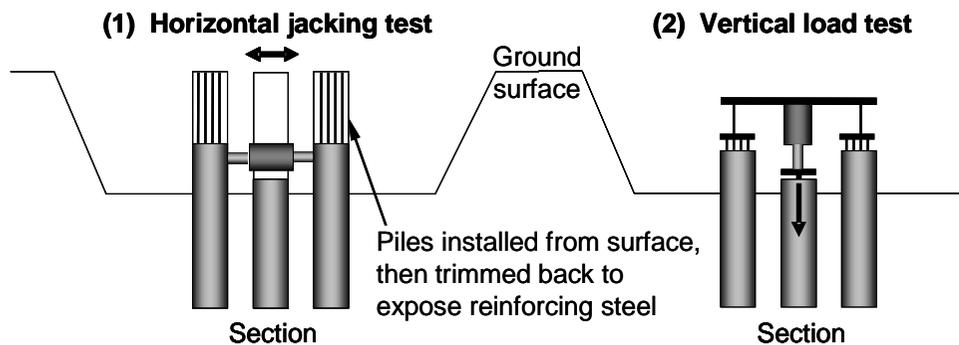
# Reconnaitssances en phase execution – Essais en vraie grandeur



- ✓ 1000 blocs de 10t sur 21m \* 21m
- ✓ Charge 230 kPa



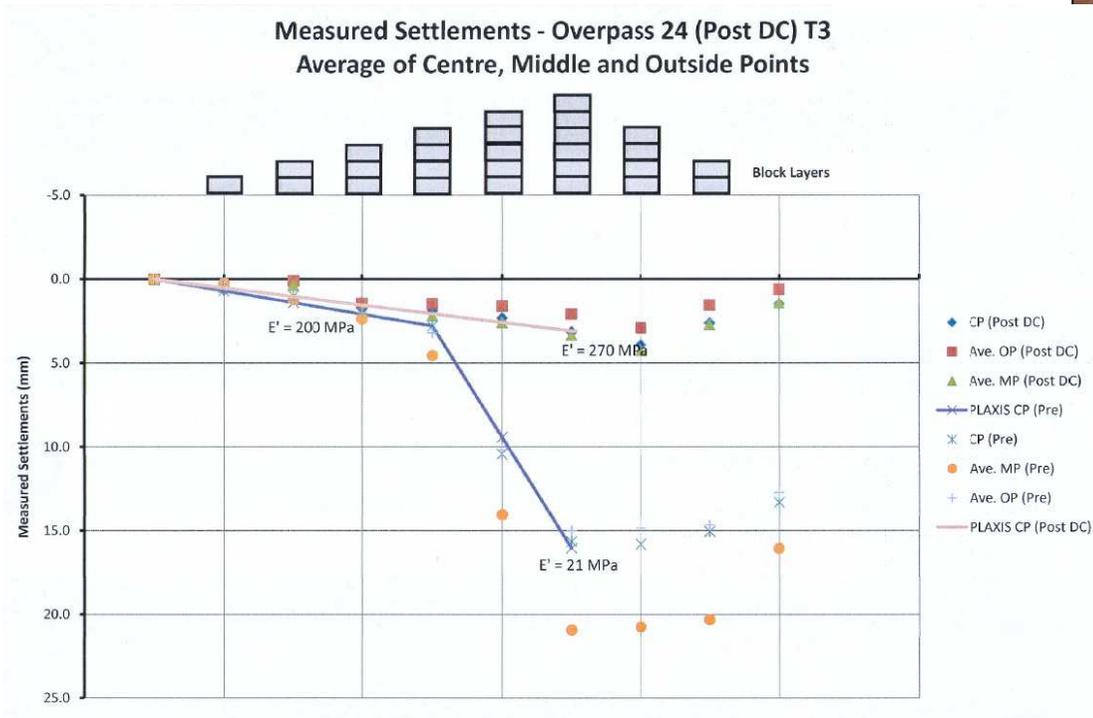
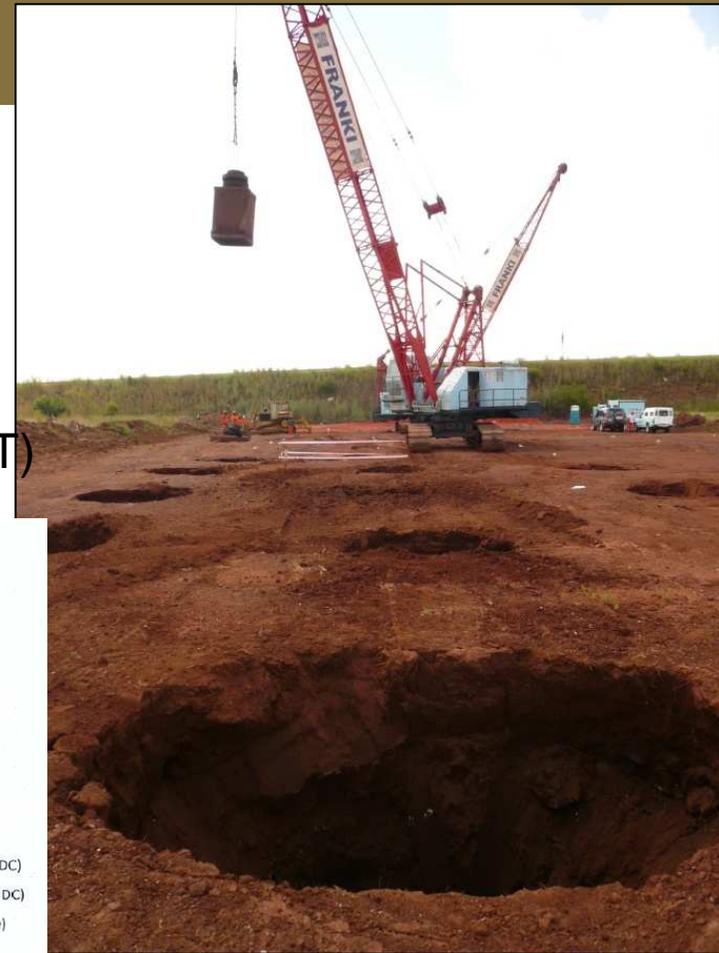
## Chargements de pieux en vraie grandeur



# Reconnaissances en phase exécution – Essais en vraie grandeur

## Plots d'essais de traitement de plate-forme

- ✓ Compactage dynamique dans les zones à forte épaisseur de terrains lâches à faible profondeur
- ✓ Contrôle par mesures de tassement sous chargement par les blocs et essais de plaque (PLT)



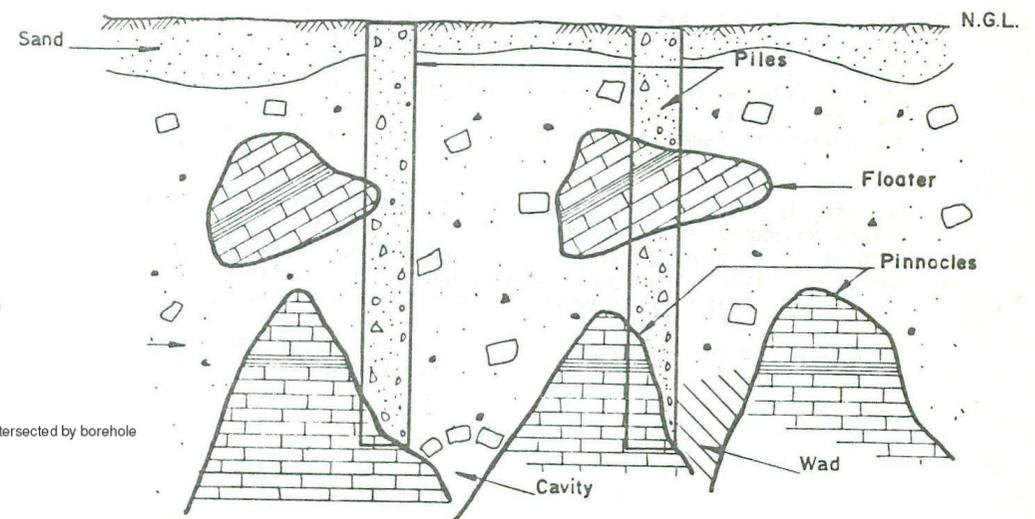
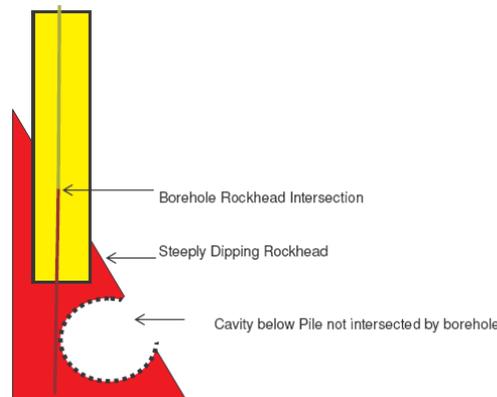
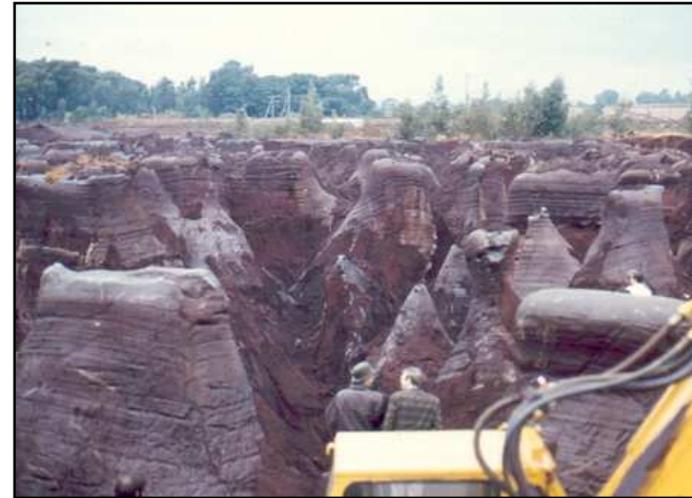
# Les Challenges identifiés pour les Fondations des Viaducs



# Problèmes de Fondation en zone dolomitique

## CHALLENGES

- ✓ Fortes variations du toit du rocher (4m à >80m sur 10m de distance horizontale)
- ✓ Contrastes de résistance des terrains (de 300MPa au "coton")
- ✓ Cavités et grandes dalles de dolomie
- ✓ Matériaux compressibles (WAD)
- ✓ Formations de sinkholes

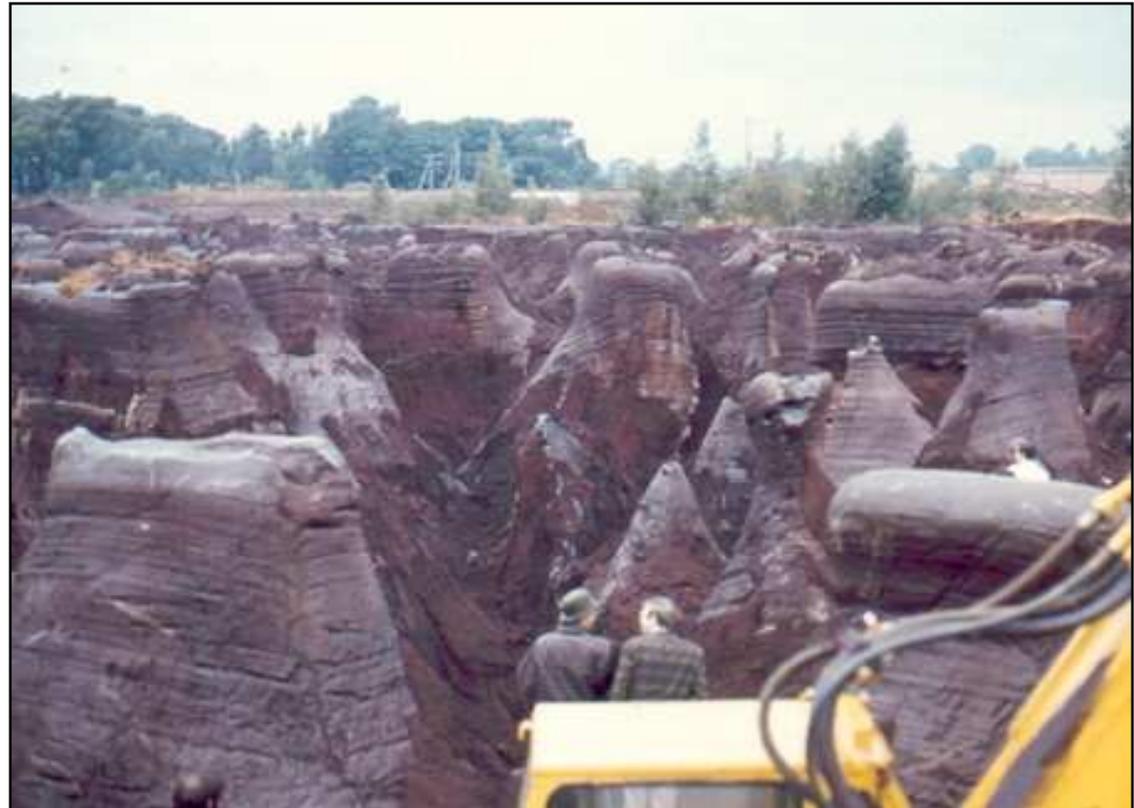


# Solutions de Fondation en zone dolomitique

## Solutions

Les différentes solutions de fondations :

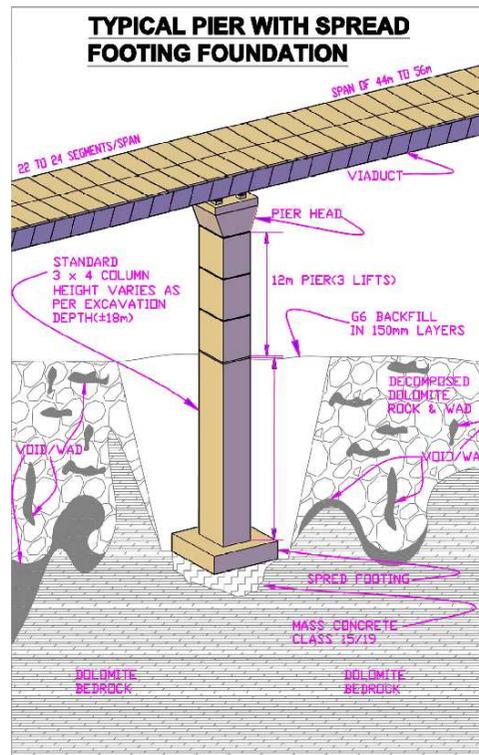
- ✓ Semelles superficielles
- ✓ Fondations flottantes
- ✓ Puits au rocher
- ✓ Pieux de grand diamètre



# Solutions de Fondation - Semelles

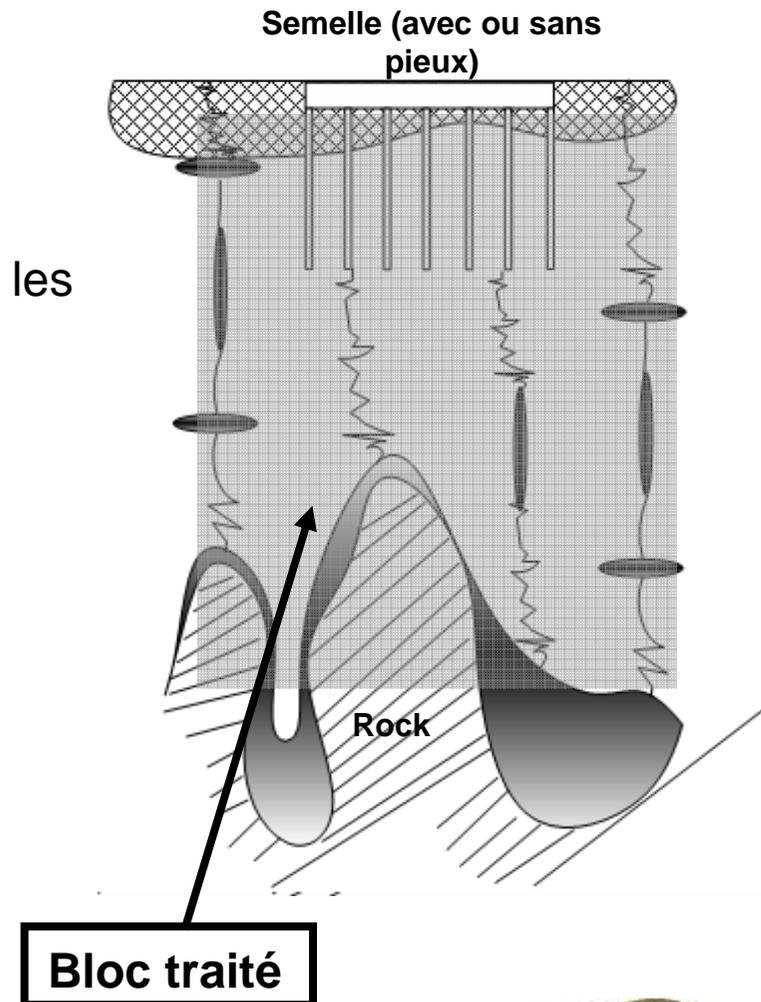
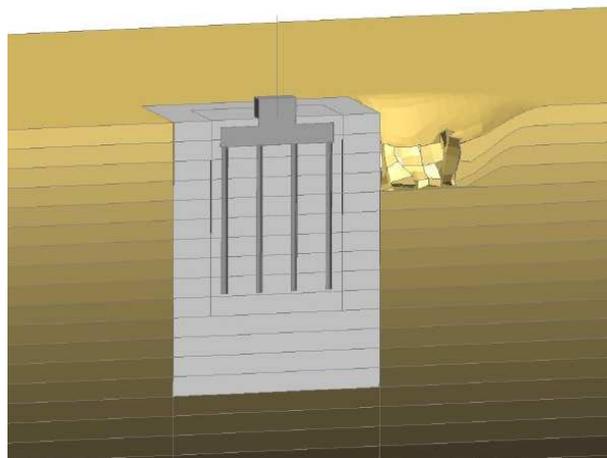
## Semelles superficielles

- ✓ En zones de rocher peu profond – jusqu'à 10 m
- ✓ Essais de chargement et injection (si nécessaire) pour confirmer la validité de la fondation



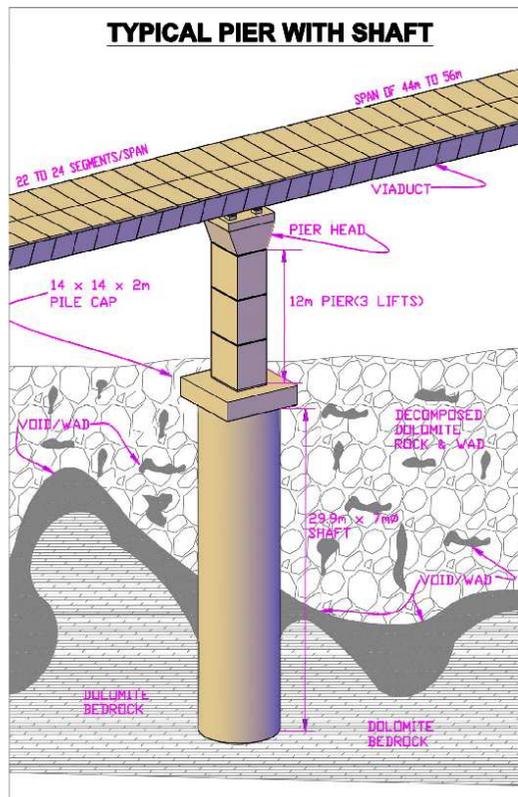
# Solutions de Fondation – Fondations flottantes

- ✓ Semelle de liaison
- ✓ Pieux flottants si nécessaire pour les tassements – 20 pieux  $\Phi$  600 mm.
- ✓ Matelas de substitution si nécessaire pour les terrains hétérogènes
- ✓ Traitements de terrain – remplissage des vides pour minimiser le risque de fontis



# Solutions de Fondation - Puits

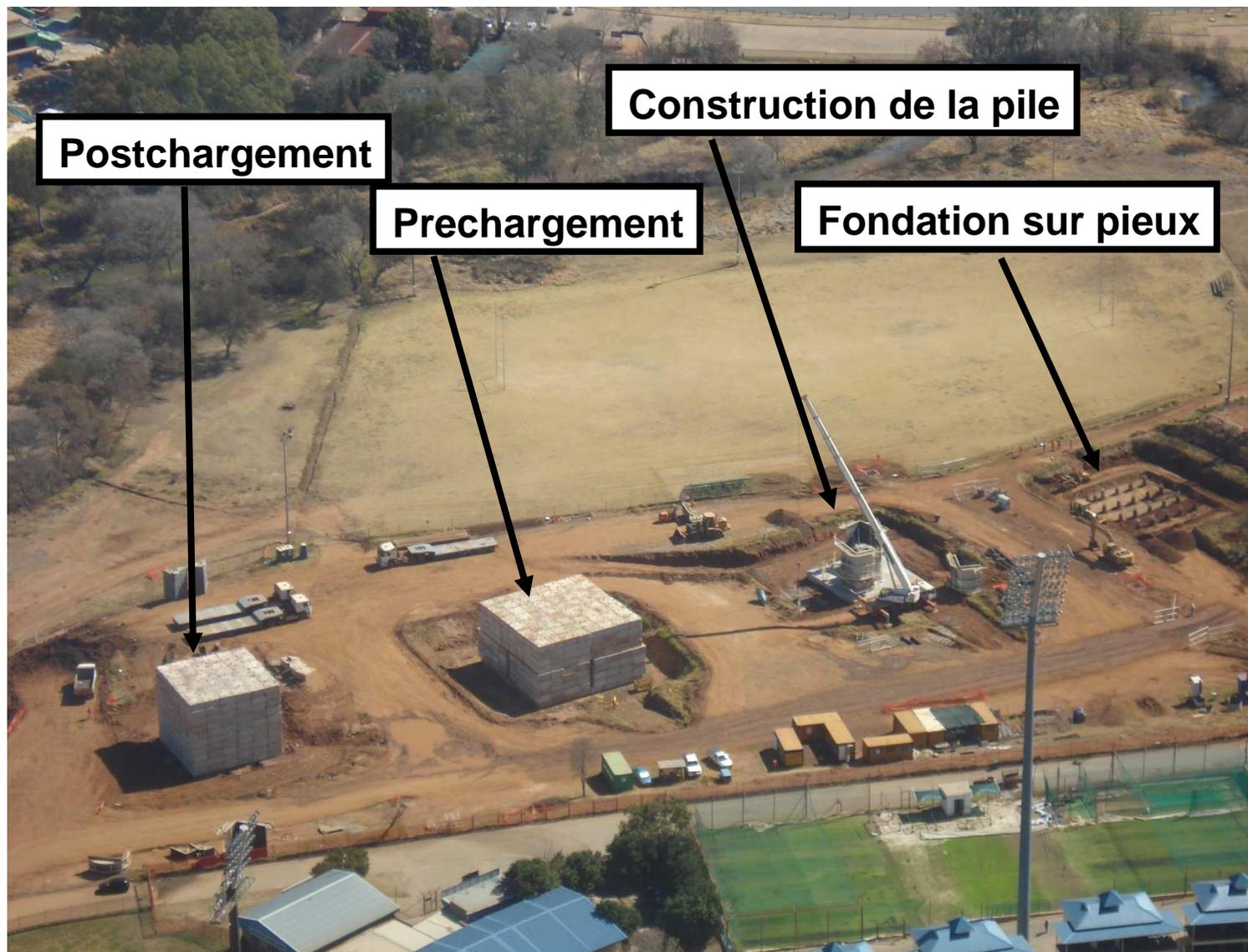
- ✓ Puits de 7 m de diamètre encastrés au rocher
- ✓ Profondeur : 15 à 50m
- ✓ Injections en fond de puits pour vérifier les conditions de terrain



Sheet: Pier 7	Type: Shaft Mapping Photo Interpretation. So	Date: 23/01/2008	Ref: BOMBELA CIVIL WORKS JOINT VENTURE	Sheet: Pier 7
Sheet: Sheet 1 of 4	Project: Gautrain Rapid Rail Link	Depth: 21.4m	Print Date: 16/05/2008	Sheet: Sheet 2 of 4
Figure: 1	Note: Refer to attached spreadsheet for summary of structural measurements		Mapper: GH	Figure: 2



# Fondations des viaducs en travaux



# Injections en zone dolomitique



# Méthode d'injection pour les fondations flottantes

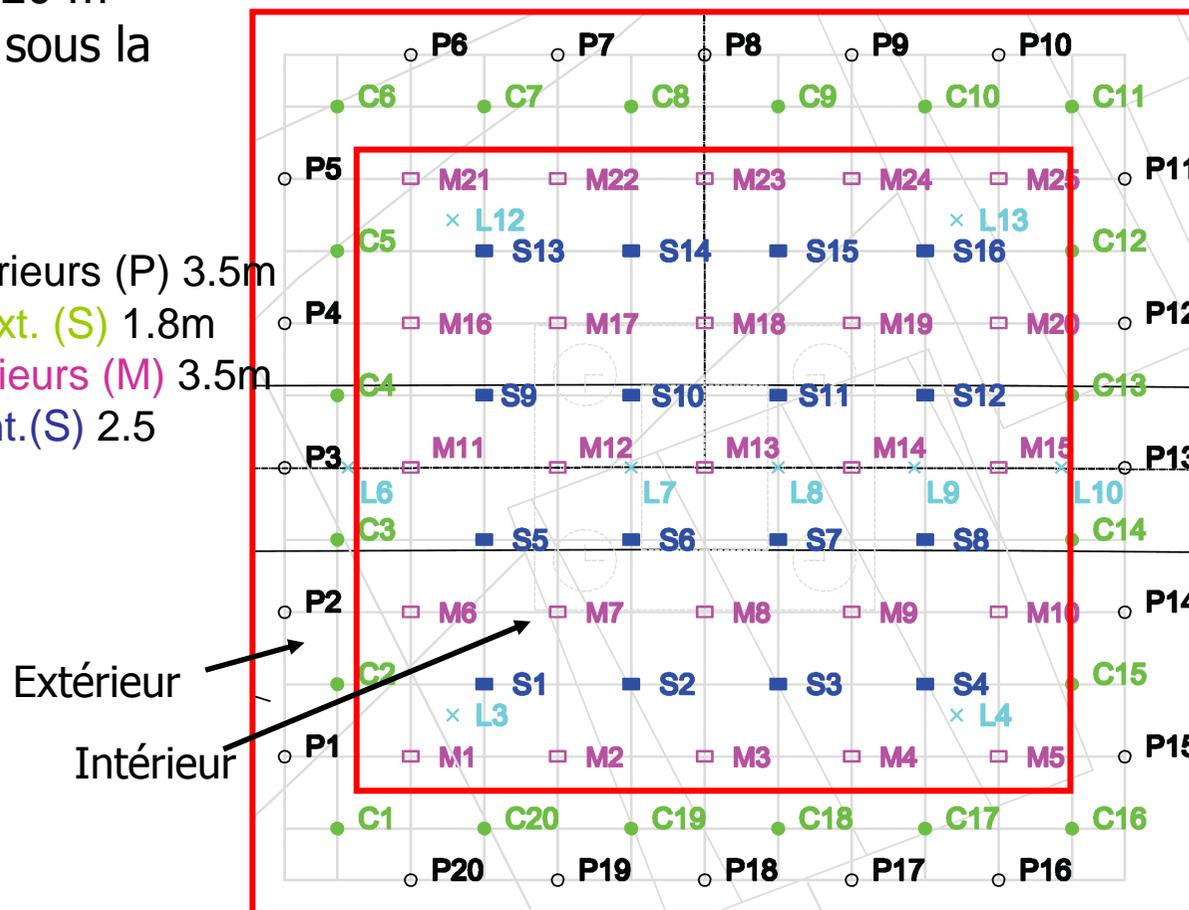
## Principe du traitement – Compaction Grouting

- ✓ Zone de traitement 20 x 20 m jusqu'au rocher ou 20 m sous la nappe
- ✓ 81 forages en 4 phases
- ✓ Maillage :
  - Primaires extérieurs (P) 3.5m
  - Secondaires ext. (S) 1.8m
  - Primaires intérieurs (M) 3.5m
  - Secondaires int.(S) 2.5



*Propriétés du mortier : essais de Slump 200mm,*

*Composition du mortier : Sable, Cendres volantes, Bentonite, Eau*



# Méthode d'injection pour les fondations flottantes

## Mise en Oeuvre

- 6 équipes d'injection sur des appuis différents.

### Volume de mortier variable selon :

- le degré de karstification.
  - la position de la nappe.
  - la profondeur du rocher.
- 
- 30 à 90 m<sup>3</sup> injectés chaque jour sur chaque appui.
  - 1500 à 3500 m<sup>3</sup> de mortier injecté au total sur chaque appui.



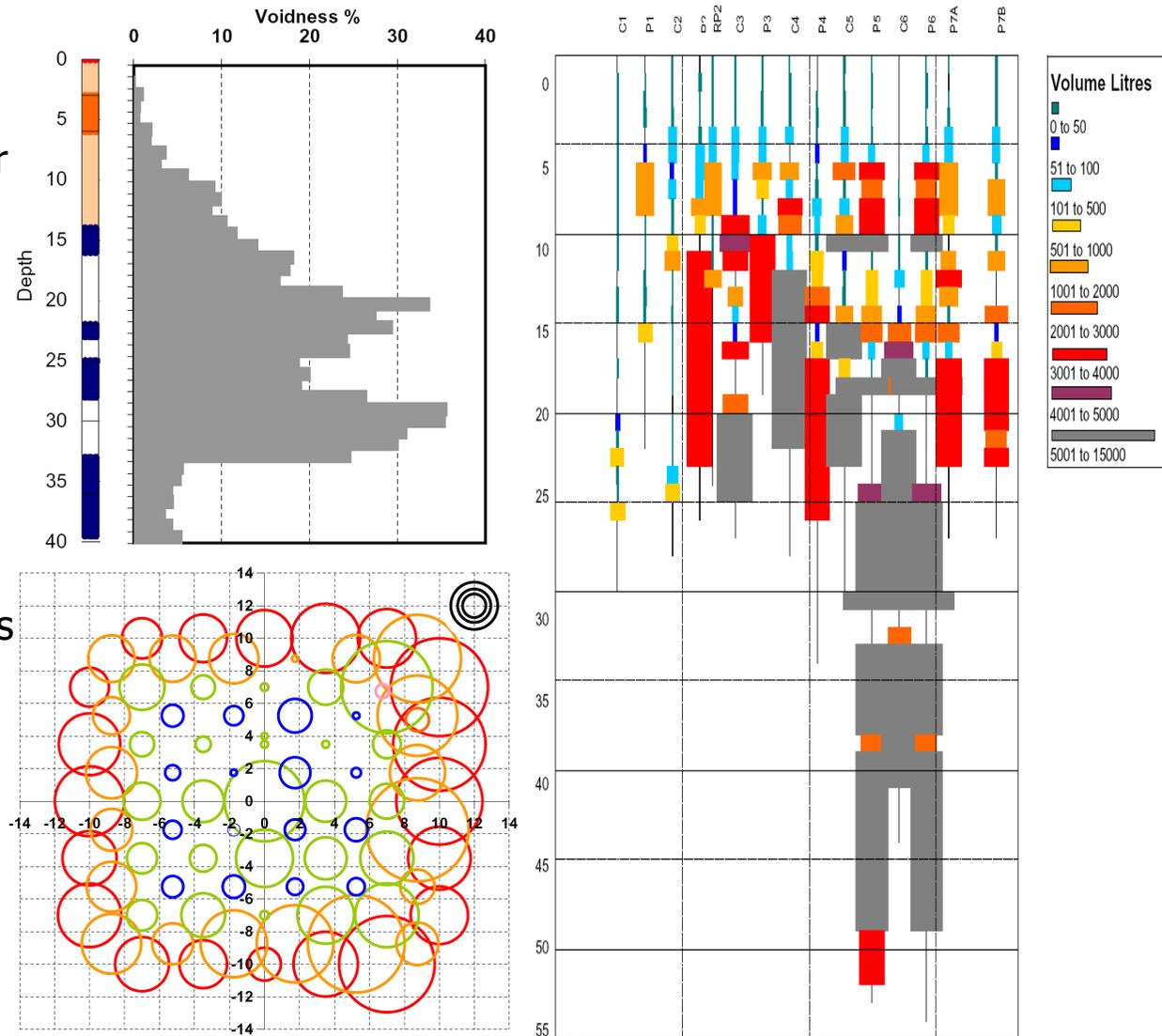
# Compaction Grouting : synthèse finale du traitement

## Les tendances

Les résultats des phases successives ont permis d'identifier progressivement des conditions d'arrêt telles que :

- ✓ Augmentation des pressions
- ✓ Augmentation des retours de cuttings.
- ✓ Réduction des vitesses de foration
- ✓ Réduction des volumes injectés

- "Volume des vides" des zones cibles : 20 à 40%.



# Viaduct 5c Terminé (Fin août 2010)



# Terrassements en secteur dolomitique



# Secteur dolomitique – Traitement de plate-formes

## La conception des terrassements dépend de :

- La nature du bedrock et sa profondeur
- La présence de wads (résidus de la dissolution de la dolomie)
- La présence de cavités ou zone de sol très lâche détectées

## Objectifs du traitement de plate-forme :

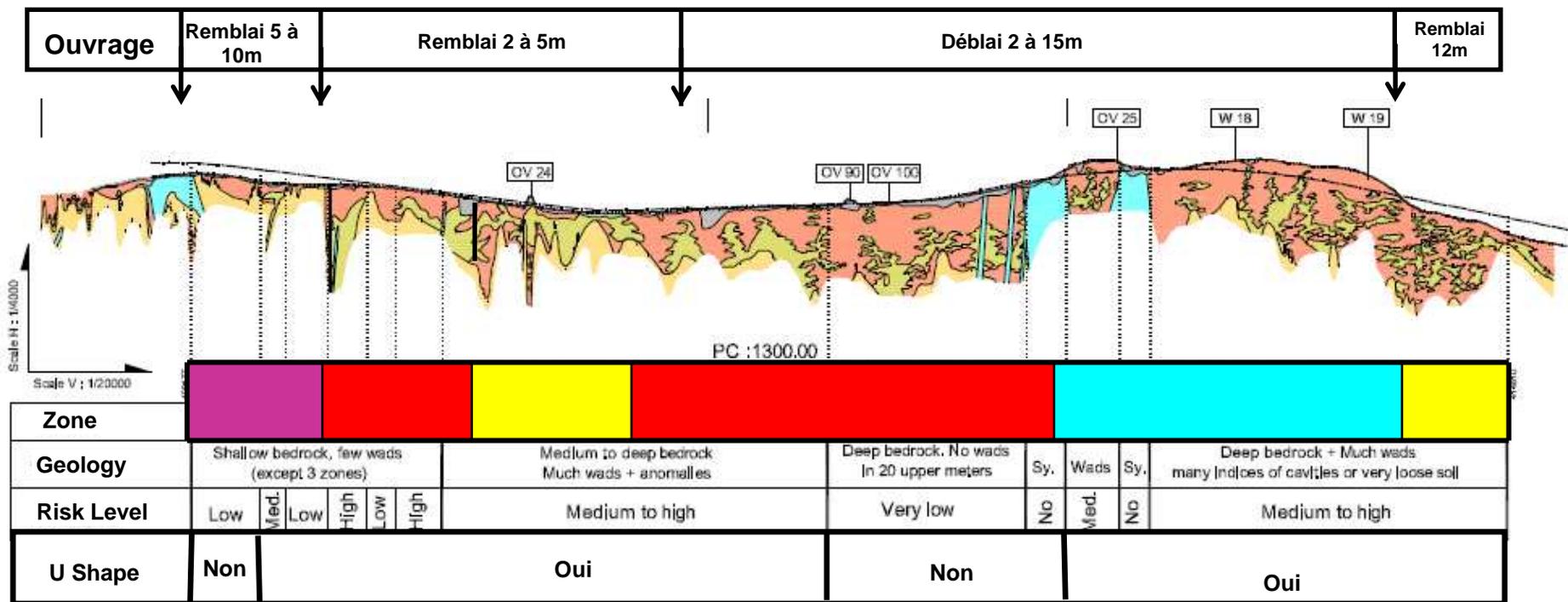
- Créer une fondation homogène sous la voie ferrée en densifiant les sols d'assise
- Faire effondrer les éventuelles cavités peu profondes

## Méthodes :

- ✓ Compactage dynamique – zones de wads superficiels
- ✓ Compactage standard – pas de wads superficiels et couches épaisses de graves de silex
- ✓ Ecrêtage des pinnacles et substitution
- ✓ Stabilisation des talus de déblais



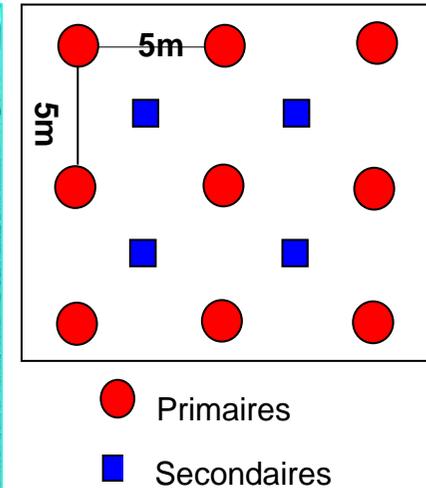
# Secteur dolomitique – Zonage des risques pour les traitements de plate-formes et traitements



- = Ecrêtage des pinnacles (Rocher près du TN)
- = Compactage (pas de Wad superficiels & couches de graves de silex)
- = Compactage dynamique (Wad superficiels sans graves de silex)
- = Substitution (déblais et compactage de plate-forme)

# Secteur dolomitique – Compactage dynamique

- Hauteur de chute = 18m
  - Poids de la masse = 14 ton
  - Poids du "finisseur" = 11 ton
- 
- Maillage prévu à l'origine 7m x 7m
  - Maillage final : primaires 5m x 5m
- Nombre de coups
- Passe Primaire N°1 = 14
  - Passe Primaire N° 2 = 10
  - Passe Secondaire 1 = 12



# Secteur dolomitique – Compactage dynamique – Analyses géotechniques



Prof. Primaires P1		Volume Primaires p1		Prof. Primaires p2		Volume Secondaires p2	
Prof.	Volume	Prof.	Volume	Prof.	Volume	Prof.	Volume
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60
1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90
2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20
2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30
2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60
2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80
2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10
3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20

 = Zones “molles”

- ✓ Analyse de la profondeur et du volume du cratère pour chaque coup et chaque passe – comparaison des primaires et secondaires. Amélioration attendue – zones rouges >1.75 m prof.
- ✓ Profondeur maximum du cratère 3.2m. Volume Max 12m<sup>3</sup>

# Secteur dolomitique – Compactage dynamique



**Traitement optimisé en utilisant la phase primaire n° 1 comme une phase de "reconnaissance" pour garantir un traitement uniforme**



# Secteur dolomitique – Déblais / U-Shape



- ✓ Les talus ont fait l'objet de levés géologiques pendant les travaux pour définir les mesures de stabilisation / protection
- ✓ Le fond de forme a fait l'objet de levés géologiques pour confirmer le traitement de plate-forme prévu au design.
- ✓ Des structures en U (U-Shape) ont été construites pour la protection contre les fontis dans les zones à fort risque



# Terrassements en zone de Dolomie peu profonde



- ✓ Subaffleurant (80% rocher dégagé, fractures comblées de soil-ciment).

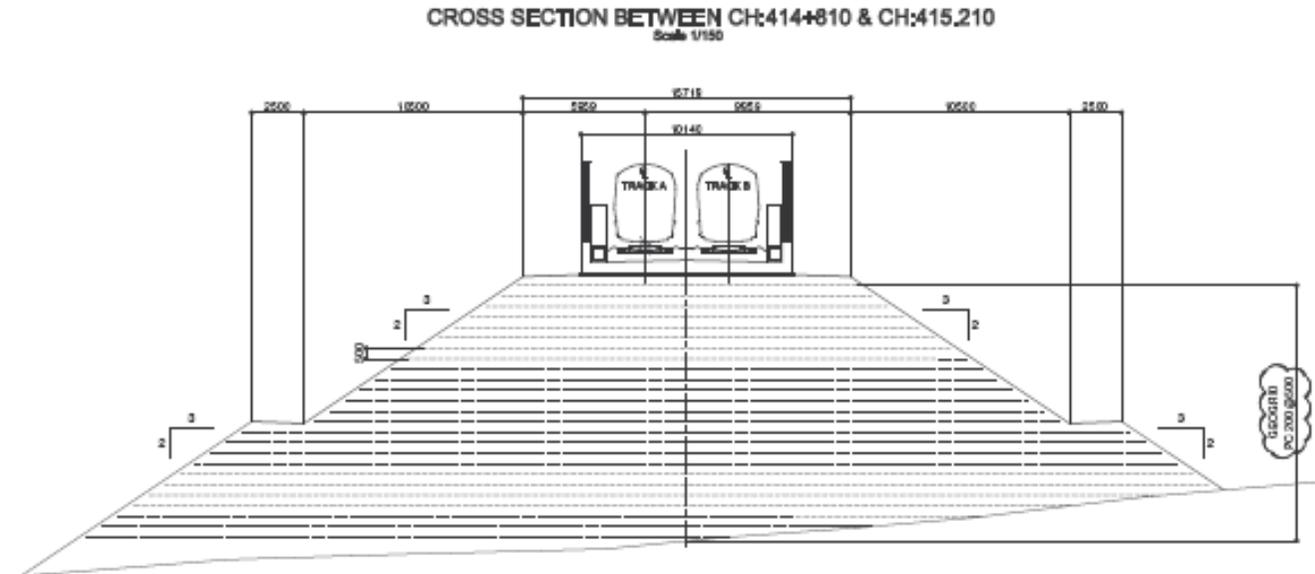


## Substitution

- Terrains érodables & effondrables
- 75 000 m<sup>3</sup>



# Secteur dolomitique – Grands remblais

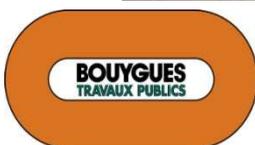


## Renforcement des grands remblais pour le risque de fontis

- Remblais >2m : renforcement nécessaire pour la condition de fontis (même avec le U-shape)
- Géogrilles placées tous les 200mm à 500mm (selon la hauteur)
- Total : 1 050 000m<sup>2</sup> of géogrilles mises en oeuvre



# Secteur dolomitique – Grands remblais/géotextiles

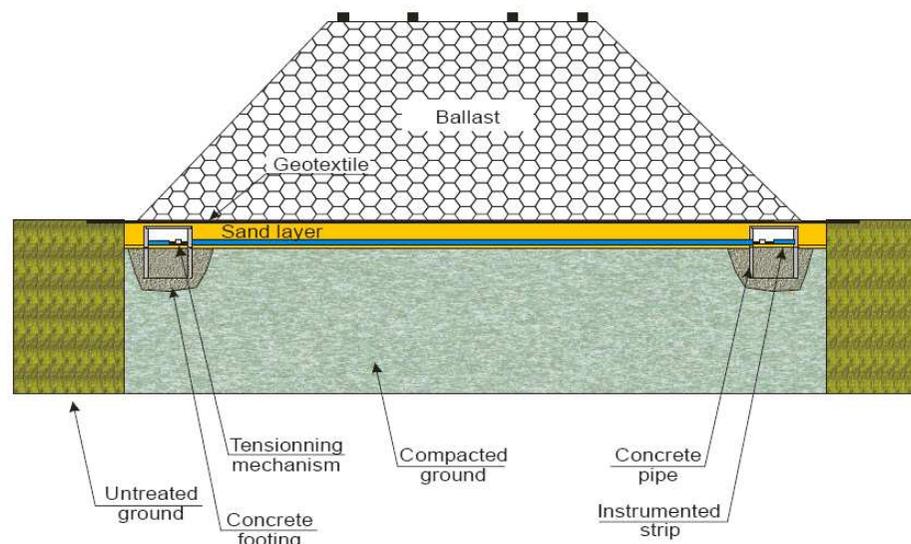


# Secteur dolomitique– Terrassements (Oct. 2009)

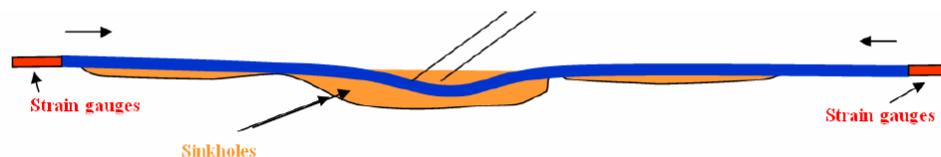


# Secteur dolomitique – Auscultation

- ✓ L'auscultation des ouvrages en terre et viaducs comporte différents systèmes :
- i. Suivi topographique standard
- ii. Suivi piézométrique
- iii. Auscultation en temps réel de détection de l'amorce d'un fontis dans les zones à haut risque sous la voie ferrée par un système de capteurs de déformation (BY ARES système)
- iv. Circulation de trains instrumentés pour vérifier les tolérances de voie



Cross-cable: below railway. Sinkhole causes deformation which causes pulling forces measured by strain gauges at nodes along railway



# Challenges des travaux géotechniques

- Du fait qu'il s'agit d'un pays "fermé" pendant de nombreuses années :
  - Peu d'entreprises de reconnaissance avec du matériel moderne
  - Les consultants ont tendance à s'appuyer sur "une personnalité" avec très peu de transfert d'expérience
  - Peu de personnel expérimenté de niveau intermédiaire
  - Projet Gautrain inhabituel et de très grande échelle, avec des délais fermes
  - Peu de laboratoires équipés en matériel d'essais sols & roches, peu d'automatisation / assurance-qualité dans les laboratoires
  - Les travaux réalisés dans le secteur dolomitique pour le projet Gautrain sont reconnus comme ayant permis de faire avancer les techniques de construction dans ces formations en Afrique du Sud : UN SUCCES !



# Challenges – équipe géotechnique

- Le recrutement s'est révélé être une autre difficulté majeure et inattendue .... Mais après tout c'était l'Afrique du Sud !
  - Peu de géologues / ingénieurs-géologues nationaux expérimentés du fait de l'émigration
  - Forte concurrence du secteur minier pour les recrutements, d'où des demandes de rémunération très élevées et un manque d'enthousiasme pour travailler de longues heures et les week-ends !
  - Fort turn over du fait de personnel mal adaptés aux postes
- ✓ Equipe finale constituée de 35 géotechniciens issus de 13 pays différents !





Merci

Des questions ?

