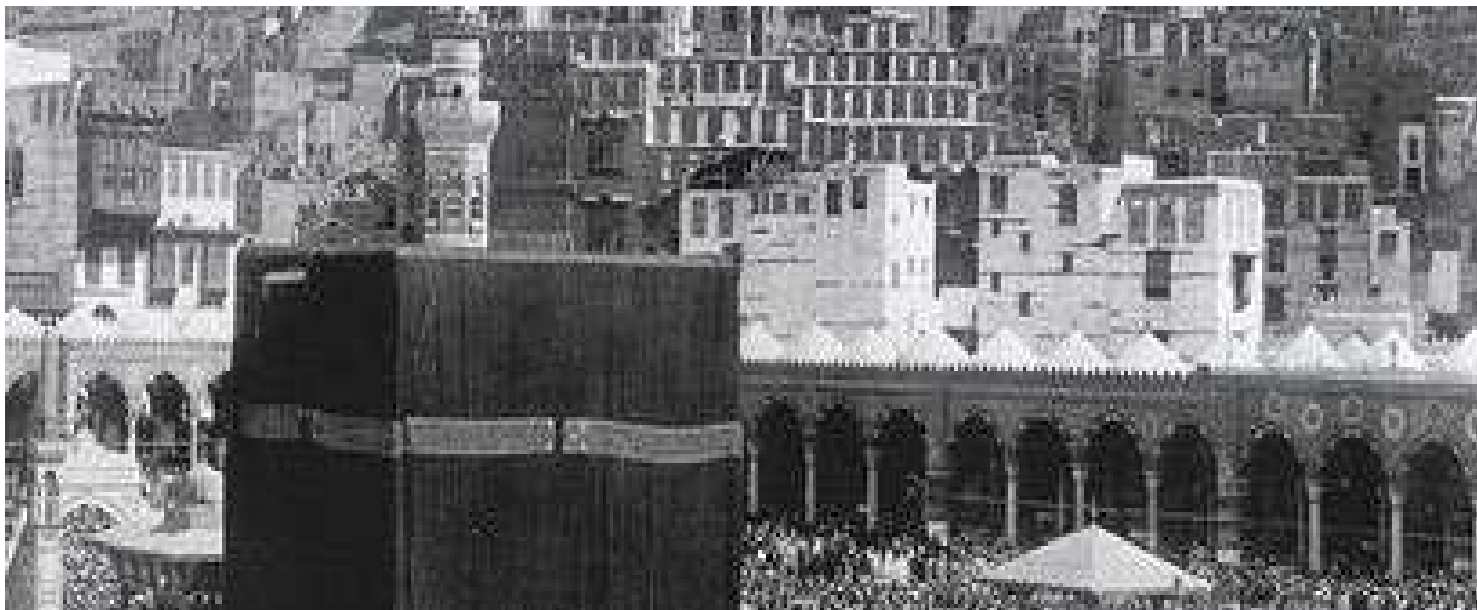


26 Mars 2015

Journée Technique AFTES – CFGI – CFMS
CHANTIERS LINEAIRES SOUTERRAINS EN SITE URBAIN
Influence de la géologie, de l'hydrologie et de la géotechnique
sur la conception et la réalisation des ouvrages

Métro de la Mecque

Risques géotechniques et choix de conception dans un contexte rocheux altéré à très altéré avec présence de la nappe sacrée de Zam Zam



Elena CHIRIOTTI
echiriotti@systra.com

SYSTRA

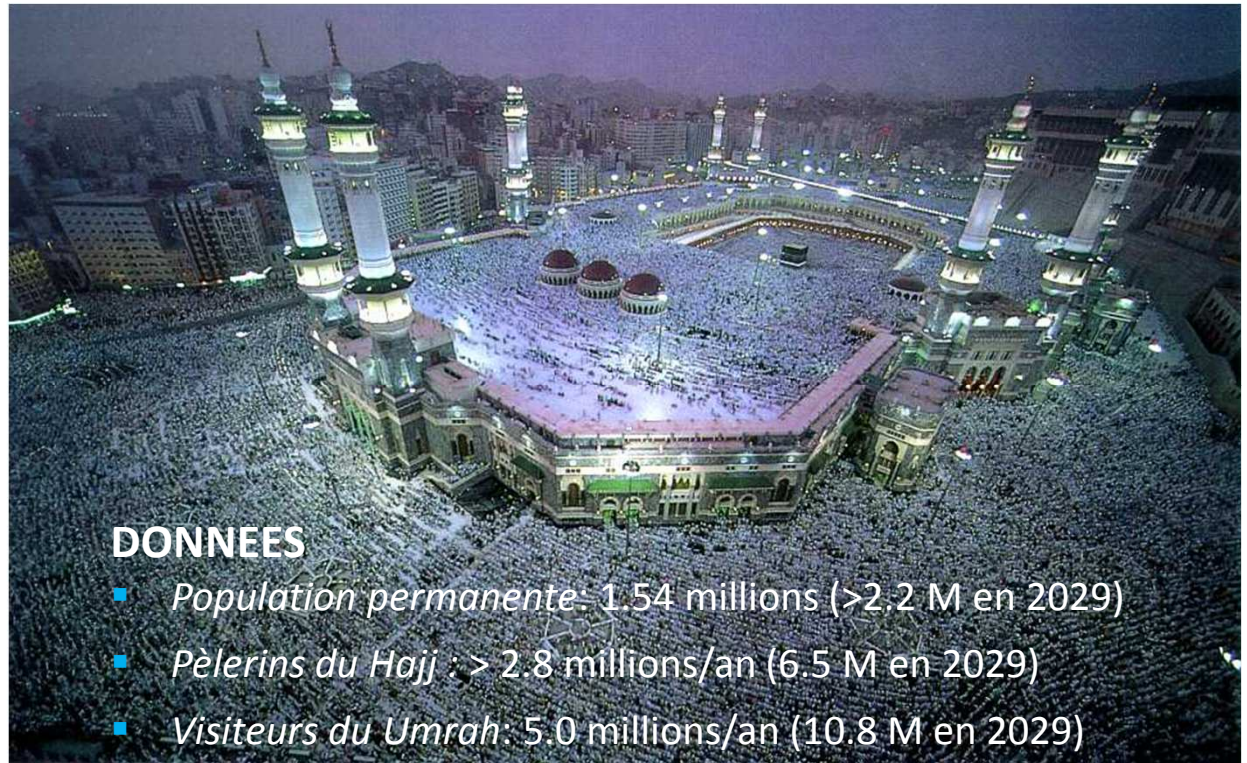


Le projet

SYSTRA

Contexte du project

- ❑ **Développement rapide** de la ville, centre administrative de la Province
- ❑ **Centre de pèlerinage**, prière et culte pour la communauté Musulmane internationale
- ❑ Flux de voyage et **demande de transport** très particuliers
- ❑ **Période de picque** : Ramadan et Hajj
- ❑ Système de transport actuel par **bus**



DONNEES

- *Population permanente: 1.54 millions (>2.2 M en 2029)*
- *Pèlerins du Hajj : > 2.8 millions/an (6.5 M en 2029)*
- *Visiteurs du Umrah: 5.0 millions/an (10.8 M en 2029)*

Les besoins

- ❑ **Répondre à la demande de mobilité** des résidents, des visiteurs et des pèlerins
- ❑ Développement de la ville en dehors du Makkah Central Area (MCA) qui demande un **accès rapide et sûr au centre ville**, à travers un système de **transport de masse modern et efficace**
- ❑ Production des études et implémentation du projet dans des **délais très serrés**
- ❑ **Gestion des interfaces** avec tous les programmes de développement urbain à l'étude
- ❑ Réalisation selon un modèle contractuel de type **Conception - Construction**

Les Acteurs de la phase d'étude

❑ Maître d'ouvrage

قطارات مكة للنقل العام
MAKKAH MASS RAIL TRANSIT



❑ PMOC

(Project Management Office Consultant)



❑ Etudes de faisabilité

terminés en novembre 2012



❑ Designer

(Lignes B et C : *Concept Design, Preliminary Design et Tender Documents*)



Le réseau métro à long terme



Line	Length	Number of stations
A	54,2 km	27
B	31.3 km	16
C	50.9 km	22
D	47 km	25

Phasage du Projet:

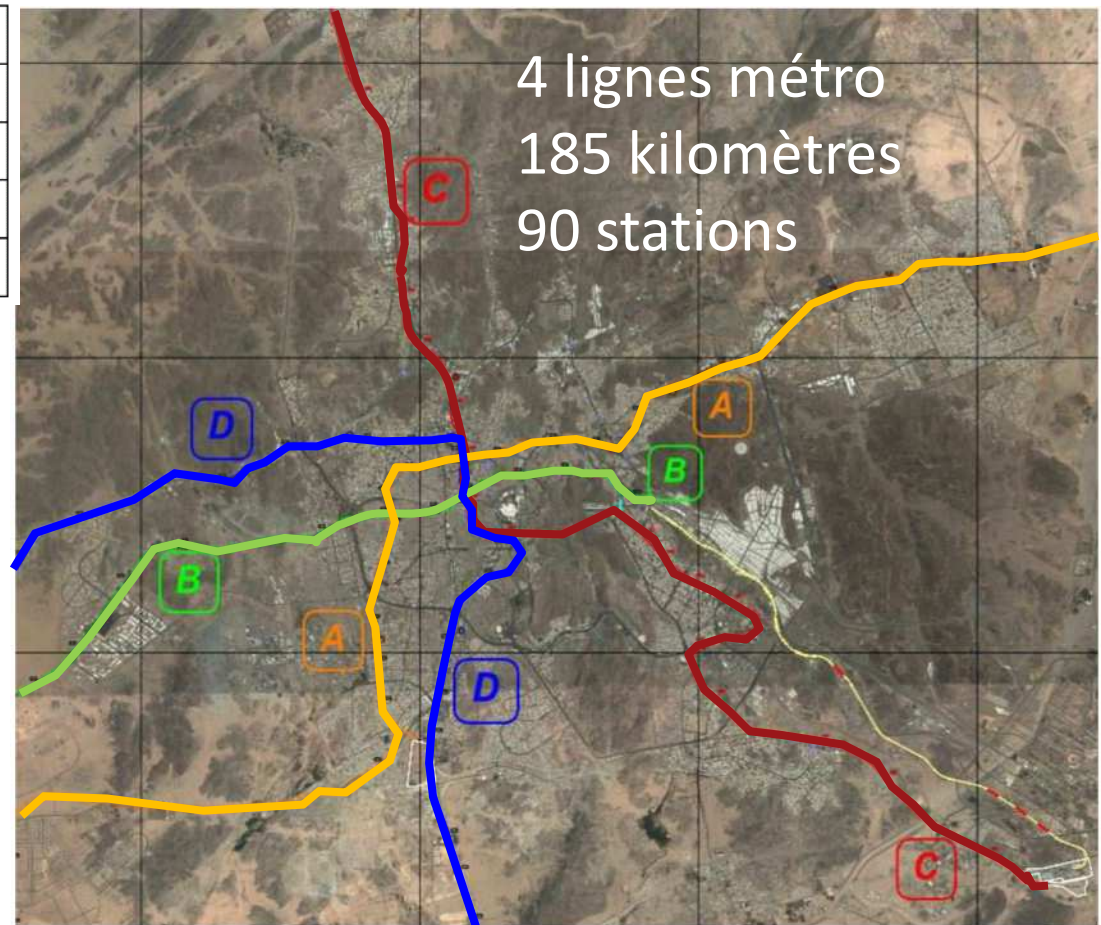
Phase 1: Ligne B de B02-E à B04-W;
Ligne C de C08-S à C05-N 5 (*Design Stage 1*)

Phase 2: Ligne A

Phase 3: extension Nord de la Ligne C
(*Design Stage 2*) et Ligne D

Phase 4 : extension Ouest Ligne B
(*Design Stage 2*)

Réseau metro issu des Etudes de faisabilité (nov. 2012)



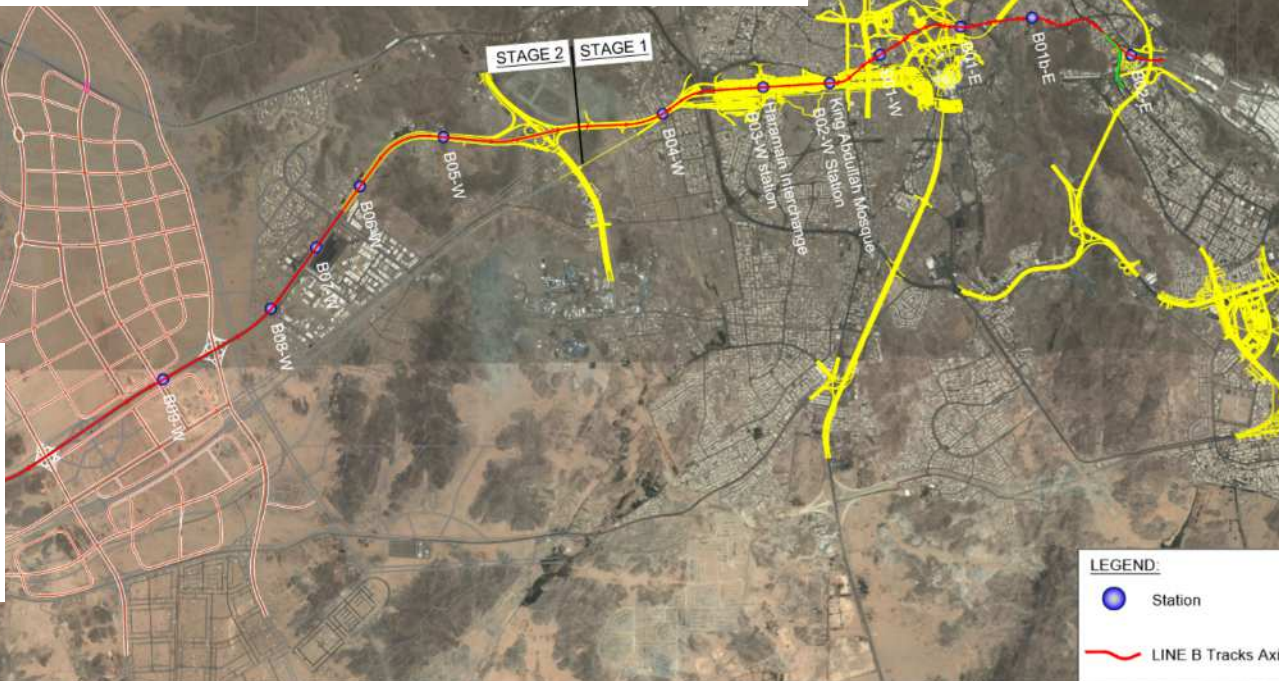
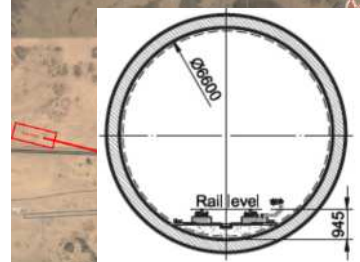
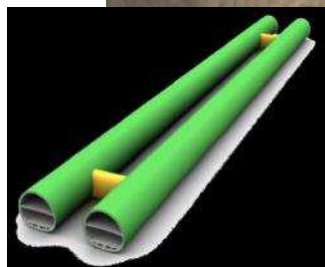
Ligne B – tracé et caractéristiques



LINE B STAGE 1	Length (m)	Stations
Elevated / At grade	1 000	2
Underground	10 898	5
TOTAL	11 898	7

LINE B STAGE 2	Length (m)	Stations
Elevated / At grade	19 441	9
Underground	0	0
TOTAL	19 441	9

LINE B	Length (m)	Stations
Elevated / At grade	20 441	11
Underground	10 898	5
TOTAL	31 339	16



LEGEND:
 Station
 LINE B Tracks Axis

Ligne C – tracé et caractéristiques

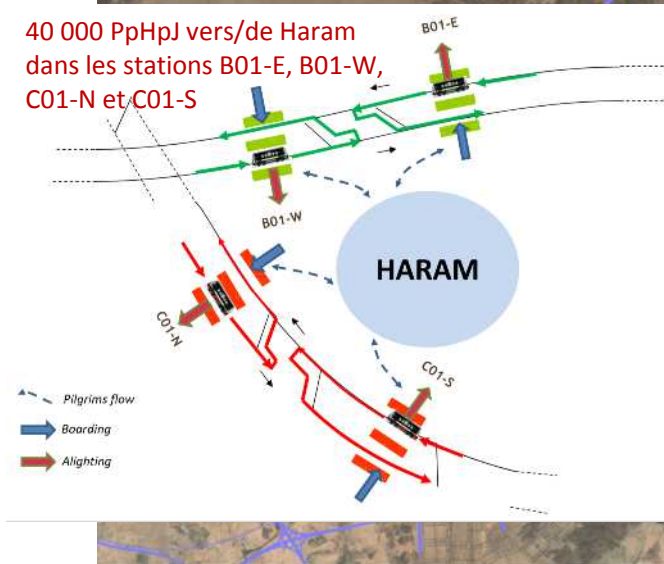


LINE C STAGE 1	Length (m)	Stations
Elevated / At grade	21,040	10
Underground	12,175	5
TOTAL	33,215	15

LINE C STAGE 2	Length (m)	Stations
Elevated / At grade	15,608	6
Underground	2,046	1
TOTAL	17,654	7

LINE C	Length (m)	Stations
Elevated / At grade	36,648	16
Underground	14,221	6
TOTAL	50,869	22

40 000 PpHpJ vers/de Haram
dans les stations B01-E, B01-W,
C01-N et C01-S



Phases d'étude & advancement du projet

- ❑ Etudes de faisabilité (nov. 2012)
- ❑ Revision des Etudes de Faisabilité (fév. 2013)
- ❑ Concept Design, Stage 1 (juin 2013)
- ❑ Preliminary Design, Stage 1 (mai 2014)
- ❑ Concept Design, Stage 2 (mai 2014)
- ❑ Preliminary Design, Stage 2 (oct. 2014)

1 an et demi pour
développer les études et
préparer le DCE de 82km
de ligne et 38 stations

Démarrage des travaux de la Phase 1 prévu pour début 2016

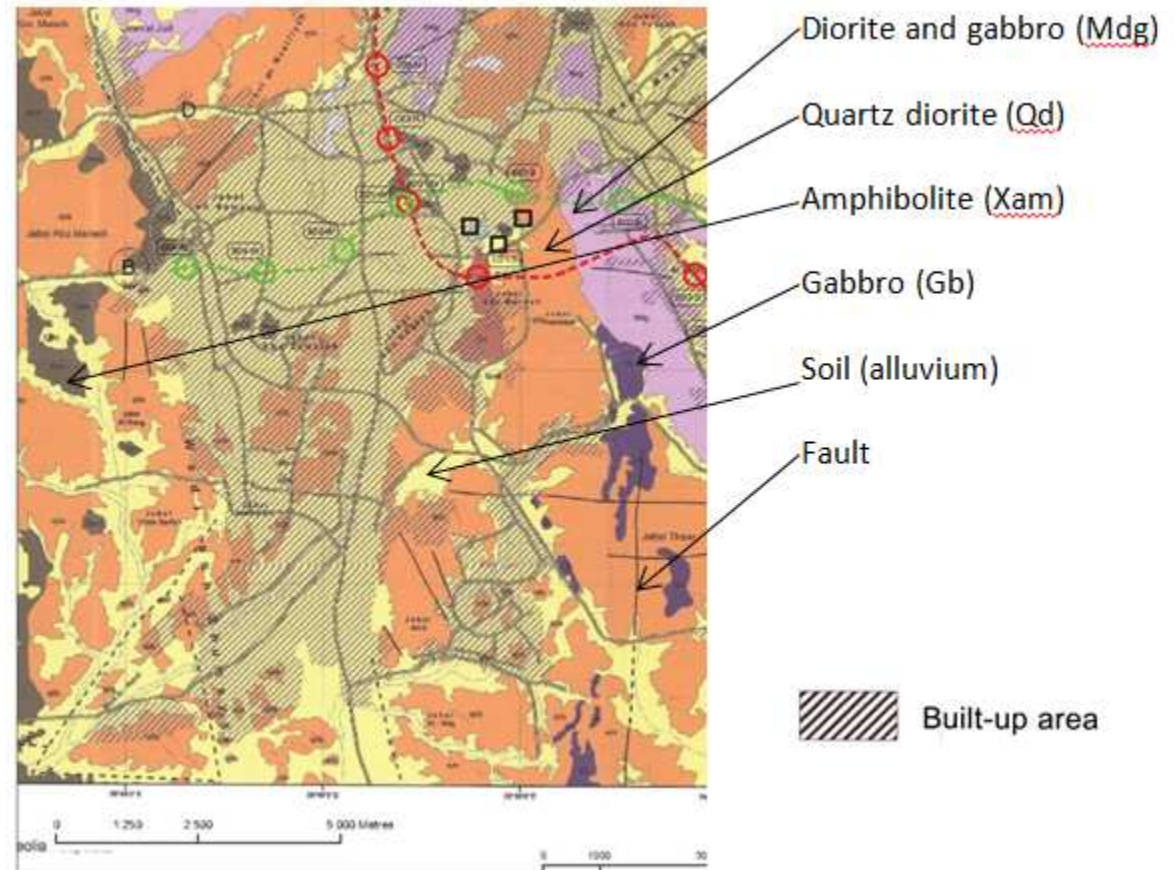


Le contexte géologique et hydrogéologique

SYSTRA

Contexte géologique

- Roches magmatiques du Précambrien (granite, gabbro, gneiss, amphibolite, ...) recouverts par les Alluvions Quaternaires du Wadi
- Deux familles de fractures prédominantes (N-S et E-W)
- Massif rocheux très altéré à altéré, et fracture à décomposé



Contexte hydrogéologique



- ❑ Nappe phréatique non confinée, dans les alluvions
- ❑ Dans le Haram, présence de la source sacrée de Zam Zam alimentée principalement par le Wadi Ibrahim, à travers les Alluvions du Wadi



- ❑ Profondeur du puit d'environ 30m, dont environ 13,5m dans les alluvions et 17m dans la diorite.
Entre les deux formations, une zone de roche très fracturée (environ 1m) apporte la plupart des venue d'eau



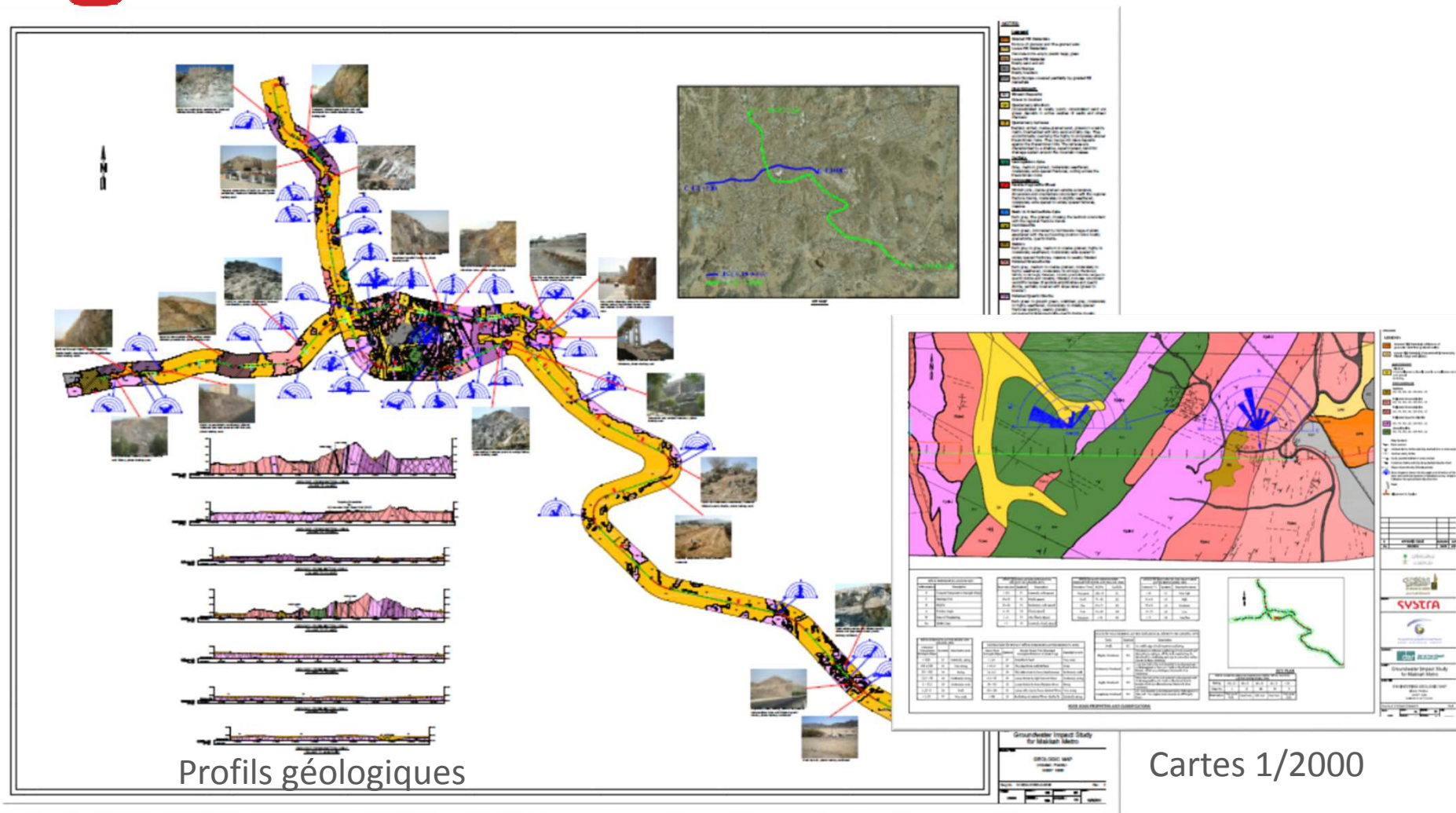
Les investigations (*Conceptual & Preliminary Design*)

SYSTRA

Les objectifs

- ❑ Disposer de **cartes géologiques fiables** à l'échelle du projet → campagne de levés géologiques et restitution
- ❑ **Stabiliser le profil** géologique, géotechnique et géomécanique longitudinal, dans un contexte de variabilité du tracé → campagne de reconnaissance de base et campagnes intégratives, sur < 1an !
- ❑ Acquérir une connaissance suffisante à la **compréhension des risques**, en **sols et roches** → modèle conceptuel et investigations à support
- ❑ Valoriser la **connaissance locale** et faire des reconnaissances dans une **zone sacrée** → collaboration avec SGS (Saudi Geological Survey & DAR)
- ❑ Mettre en place un **modèle hydrogéologique fiable** et représentatif pour étudier l'impact potentiel dans la zone du Zam Zam → collaboration avec SGS and DAR

Levés géologiques de détail



Les campagnes de reconnaissance

		Ligne B	Ligne C	
Stage 1	1ère campagne	28	9	▪ Essais in situ (SPT, dilatomètre, perméabilité) ▪ Essais d'identifications ▪ Abrasivité ▪ Dureté ▪ Caractérisation discontinuités ▪ Résistance ▪ Déformabilité
	campagne aditionnelle	18	5	
Stage 2	1ère campagne	48	25	
	campagne aditionnelle	11	3	

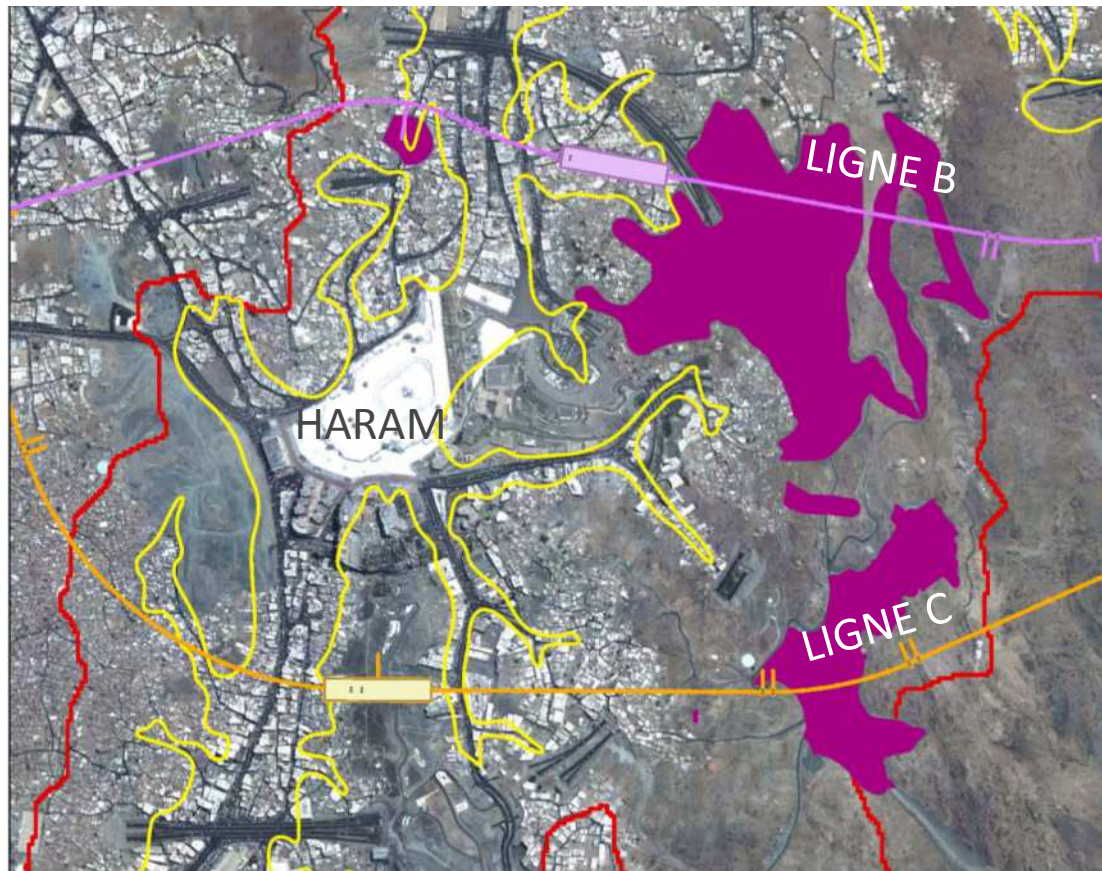
TOTAL : 147 sondages (espacement moyen de 500m !)
+ 76 sondages existants venant du projet KAAR

Problèmes:

- Qualité sous-traitant et suivi
- Nombre de sondages limité par les moyens disponibles et le temps
- Besoin d'interpréter rapidement les données de site

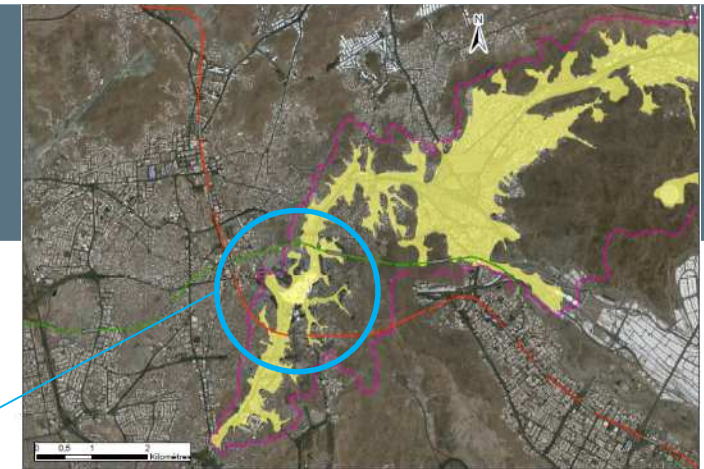
Les études hydrogéologiques

Caractérisation de l'aquifère Wadi Ibrahim – Zone Haram



Groundwater Impact Study for Makkah Metro
Protection Zones

0 175 350 700 1,050
Meters



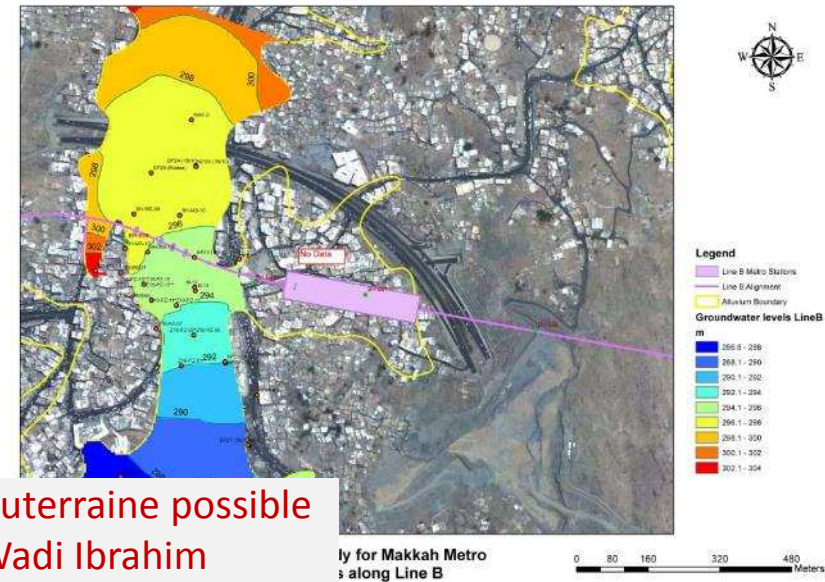
- Limite du bassin versant
- Limite des alluvions
- Zones de protection du rechargement naturel
- Niveaux piézométriques
- Direction d'écoulement
- Transmissivité (600-1200 m²/j)
- Conductivité (5-60 m/j)

Legend

- Line C Metro Stations
- Line B Metro Stations
- Line B Alignment
- Line C Alignment
- Alluvium Boundary
- Protection Zones
- Watershed

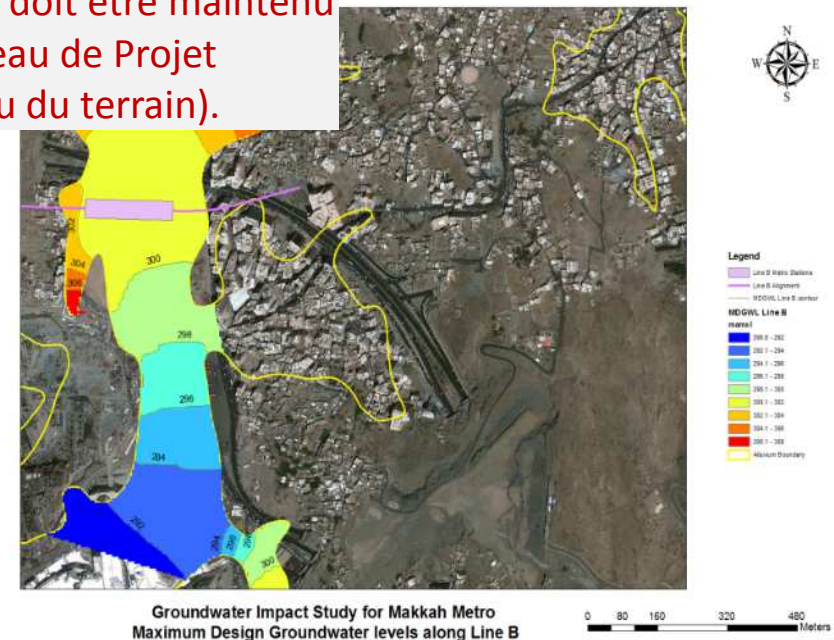
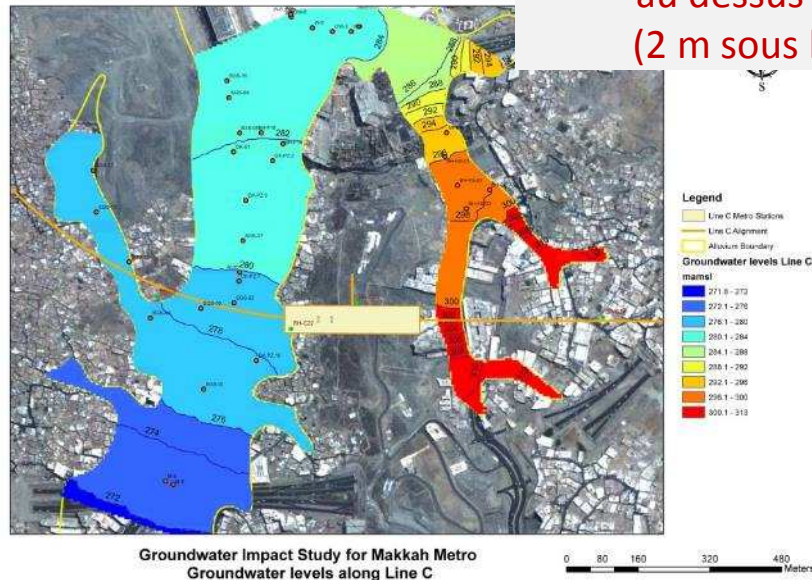
Impact sur stations/fondations

La **station B01-E** (Marwa) a été déplacée pour en limiter l'impact (initialement dans une zone sans données et proche de la zone de protection)



La **station C01-S**, initialement située à la surface et sur fondations superficielles

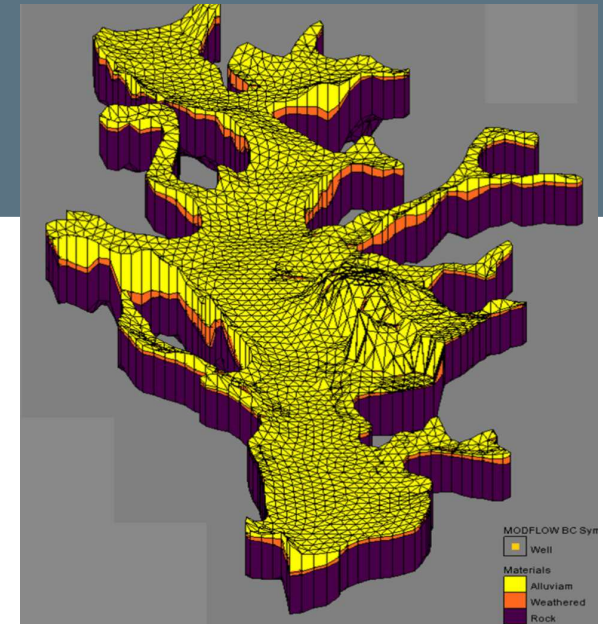
Aucune construction souterraine possible dans la zone du Wadi Ibrahim
Le niveau des fondations doit être maintenu au dessus du Niveau de Projet (2 m sous le niveau du terrain).



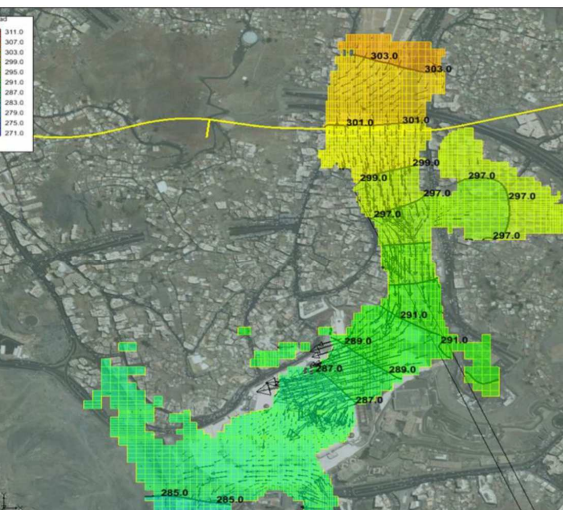
La modélisation hydrogéologique

Etude d'impact
de la Station
Marwa B01-E

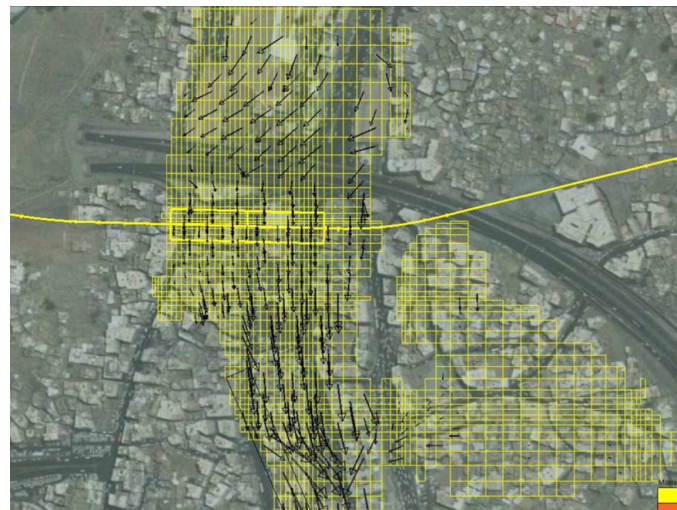
Model	Water level Upstream	Water level downstream	Water level in Zamzam well
Calibration Model (Before Marwa station)	+301.4	+296.9	+285
Scenario 1: Marwa station at +298	+301.45	+296.7	+284.96
Scenario 2: Marwa station at +290	+302.0	+294.77	+283.3
Scenario 3: Marwa station at +280	+302.6	+293.2	+281.6



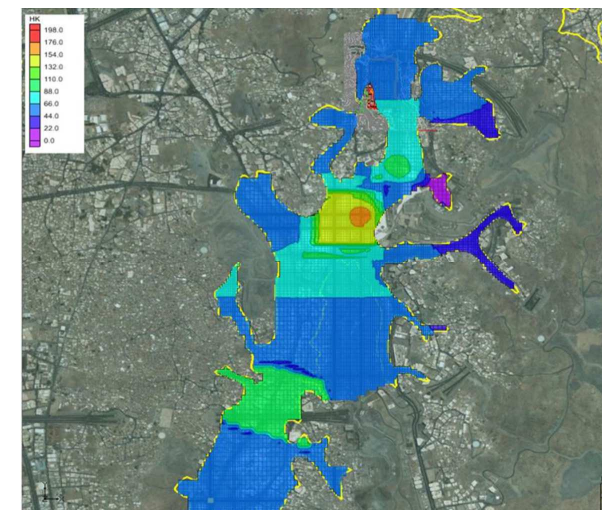
Elaboration de toutes les données existante sous
SIG et exportation dans outils de modélisation



Niveaux d'eau



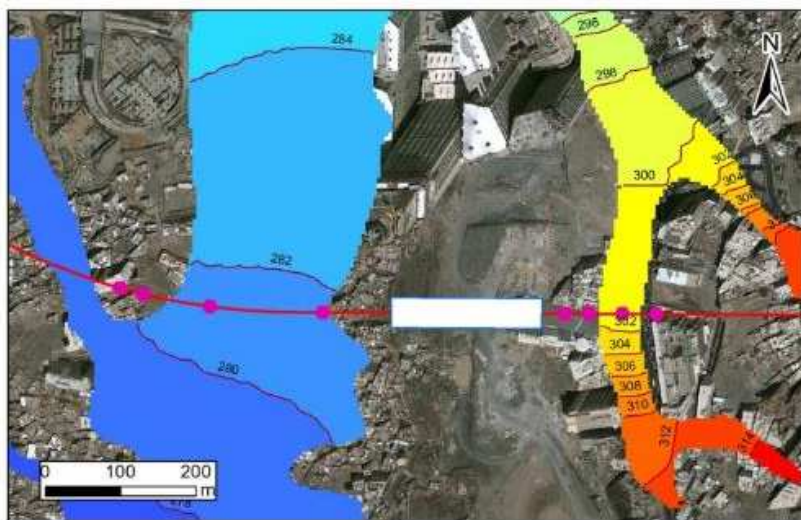
Vitesse d'écoulement



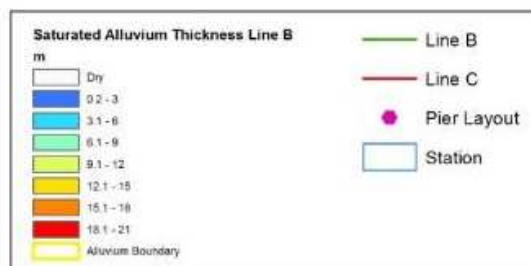
Perméabilité

Impact sur stations et fondations

Positionnement des piliers des viaducs dans la zone alluviale de Wadi Ibrahim

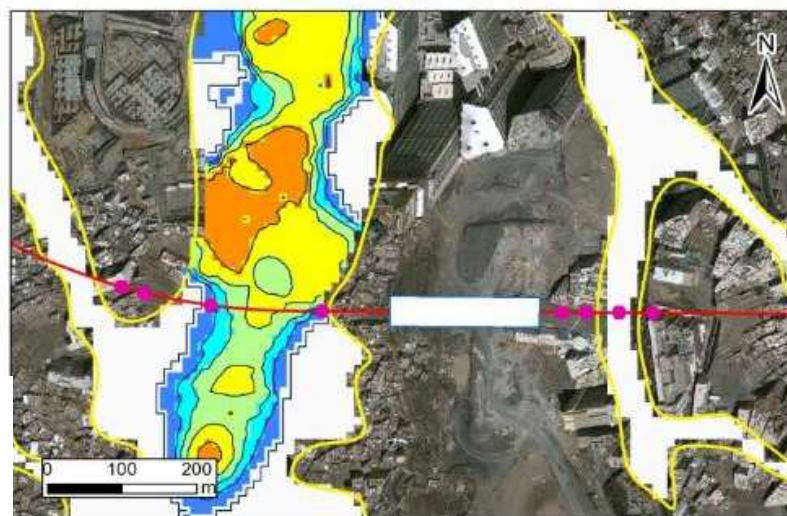


Niveaux piézométriques



Les pieux ne sont pas admis dans la zone alluviale du Wadi Ibrahim.

Si réalisés, les pieux doivent disposer d'un casing en acier inoxydable



Epaisseur des alluvions



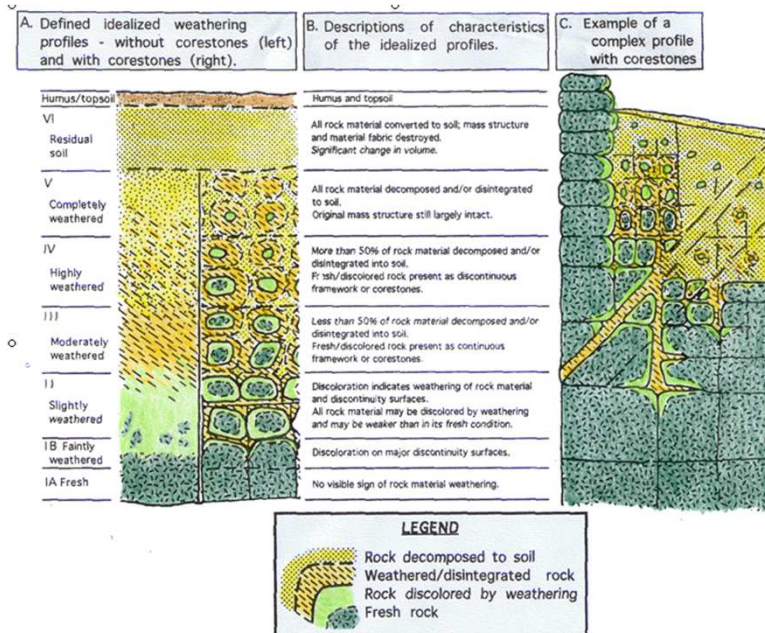
Interpretation & incertitudes

SYSTRA

Modèle de référence

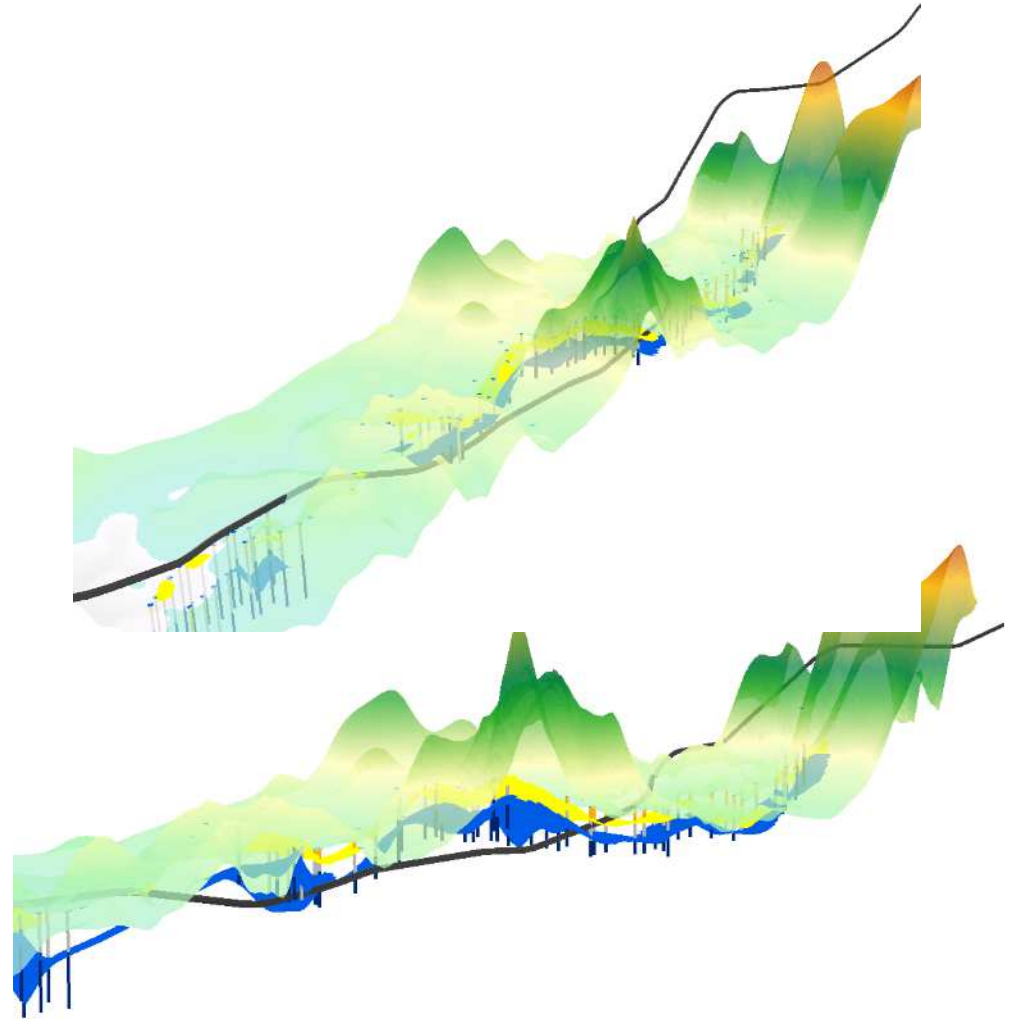
COUPE TYPE (modèle confirmé par les investigations):

- Medium dense silty sand (upper part could be aeolian deposits) – variable thickness
- Very dense silty sand (residual soil / decomposed rock) – variable thickness
- Severely to moderately weathered and crushed to closely fractured Granite or Gabrodiorite interbedded with residual soil – variable thickness
- Fresh rock (Granite or Gabrodiorite)



Gestion des données

- ❑ Utilisation d'InterraGIS (SYSTRA) pour la gestion de tous les données géotechniques par bases de données géo-référencées
- ❑ Interface web pour saisie des données depuis le site
- ❑ Interprétation 3D des données et mise à jour rapide du modèle de référence à travers les différentes campagnes de reconnaissance



Caractérisation

GEOTECHNICAL UNITS (UGT)		NSPT		
UGT 6	Composed of medium dense sands, containing gravel and/or silt in various percentages, mainly lying within 5-10 m of depth from the ground level, split in two sub-units	-		
UGT 6B	SPT values lower than 30 at very shallow depths, generally not exceeding 5 m	< 30		
UGT 6A	SPT values ranging between 30 and 50, generally not exceeding 10 m depth	30 – 50		
UGT 5	Composed of dense to very dense sand and, occasionally, by gravel layers; it results of the full weathering of the underlying rock mass (weathering W6), and is classified as a residual soil of granular consistence. It shows SPT>50	> 50		
GEOMECHANICAL UNITS (UGM)		RMR	GSI	UCS [MPa]
UGM 4	Identifies highly weathered rocks (W4): more than half of the rock mass is decomposed (residual soil) and fresh or discolored rock is present as a discontinuous framework or as corestones.	17 – 27	24 – 30	5 – 15
UGM 3	Identifies moderately weathered rocks (W3), with a generally close joint spacing (from very closely to moderately wide, F5 to F3)	27 – 52	33 – 52	30 – 70
UGM 2	Identifies slightly weathered rock (W1 or W2), with closely to moderately wide spaced joints (F4 or F3)	47 – 80	50 – 75	55 – 120
UGM 1	Identifies fresh or slightly weathered rock (W1 or W2), with widely to extremely widely joint spacing (F2 or F1)	64 – 91	64 – 86	55 – 120

- Fracturation (F) et l'altération (W) pour la composante rocheuse
- Résultats SPT pour les sols
- 4 unités géomécaniques, dont une à comportement dominé par la composante sol résiduel (UGM4)
- 2 unités géotechniques principales

		Low fracturing		High fracturing			
		F1	F2	F3	F4	F5	F6
Low weathering	W1						
	W2	UGM 1		UGM 2			
	W3				UGM 3		
	W4					UGM 4	
High weathering	W5						UGT 5&6

Rock behavior

Soil like behavior

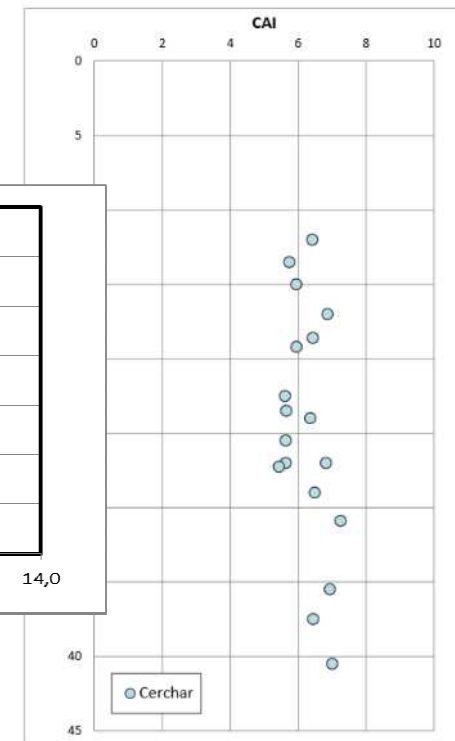
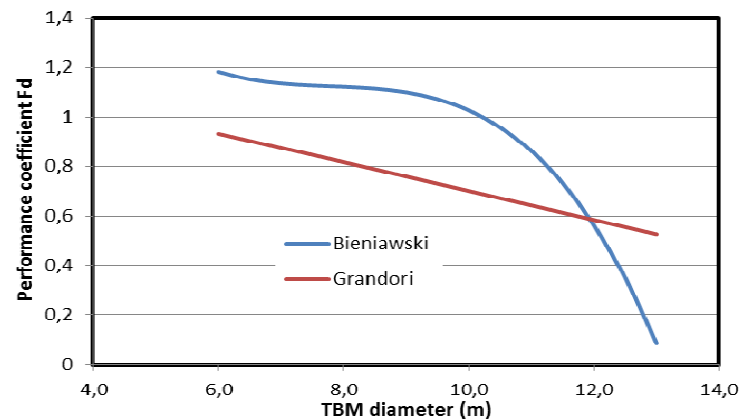
Residual Soil

Caractérisation – points d'attention

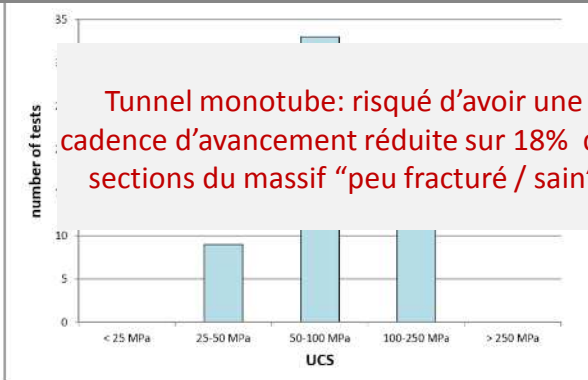
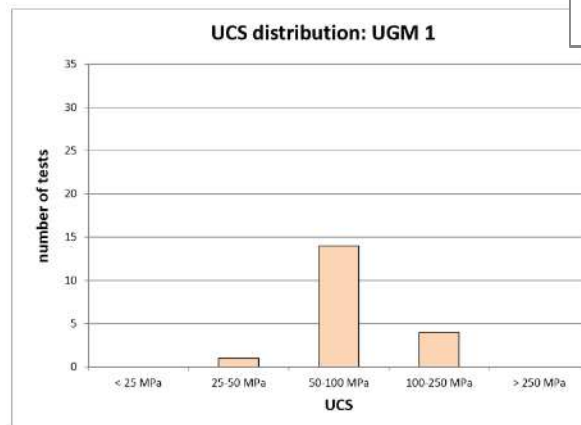
UGT	description	γ (kN/m ³)	D_R (%)	N_{SPT}	c' (kPa)	ϕ' (°)	k_0	E_s (MPa)	k (m/s)
UGT 6B	poorly graded sand with silt	18,0	60 - 70	15 - 30	---	35	0,426	12 - 24	$10^{-5} - 10^{-4}$
UGT 6A	poorly graded sand with silt and gravel	19,0	70 - 80	35 - 45	---	39	0,371	30 - 40	$10^{-5} - 10^{-3}$
UGT 5	residual soil	19,0	> 80	> 50	20	41	0,344	40 - 50	$10^{-5} - 10^{-3}$

UGM	description	γ (kN/m ³)	UCS (MPa)	R _r
UGM 1	fresh to slightly weathered rock, joints widely spaced	27,0	60 - 100	63
UGM 2	fresh to slightly weathered rock joints moderately to closely spaced	27,0	60 - 100	47
UGM 3	moderately weathered rock, joints moderately to very closely spaced	26,5	20 - 50	26
UGM 4	highly weathered rock, joints closely to very closely spaced	26,0	5 - 15	17

Abrasivité
très élevée

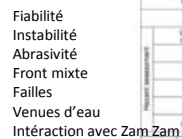


: CERCHAR Abrasiveness Index (CAI) profile with depth (ACES campaign)



Tunnel monotube: risqué d'avoir une cadence d'avancement réduite sur 18% des sections du massif "peu fracturé / sain"

18% des résultats de σ_c entre 100 et 250MPa (UGM 1/2)

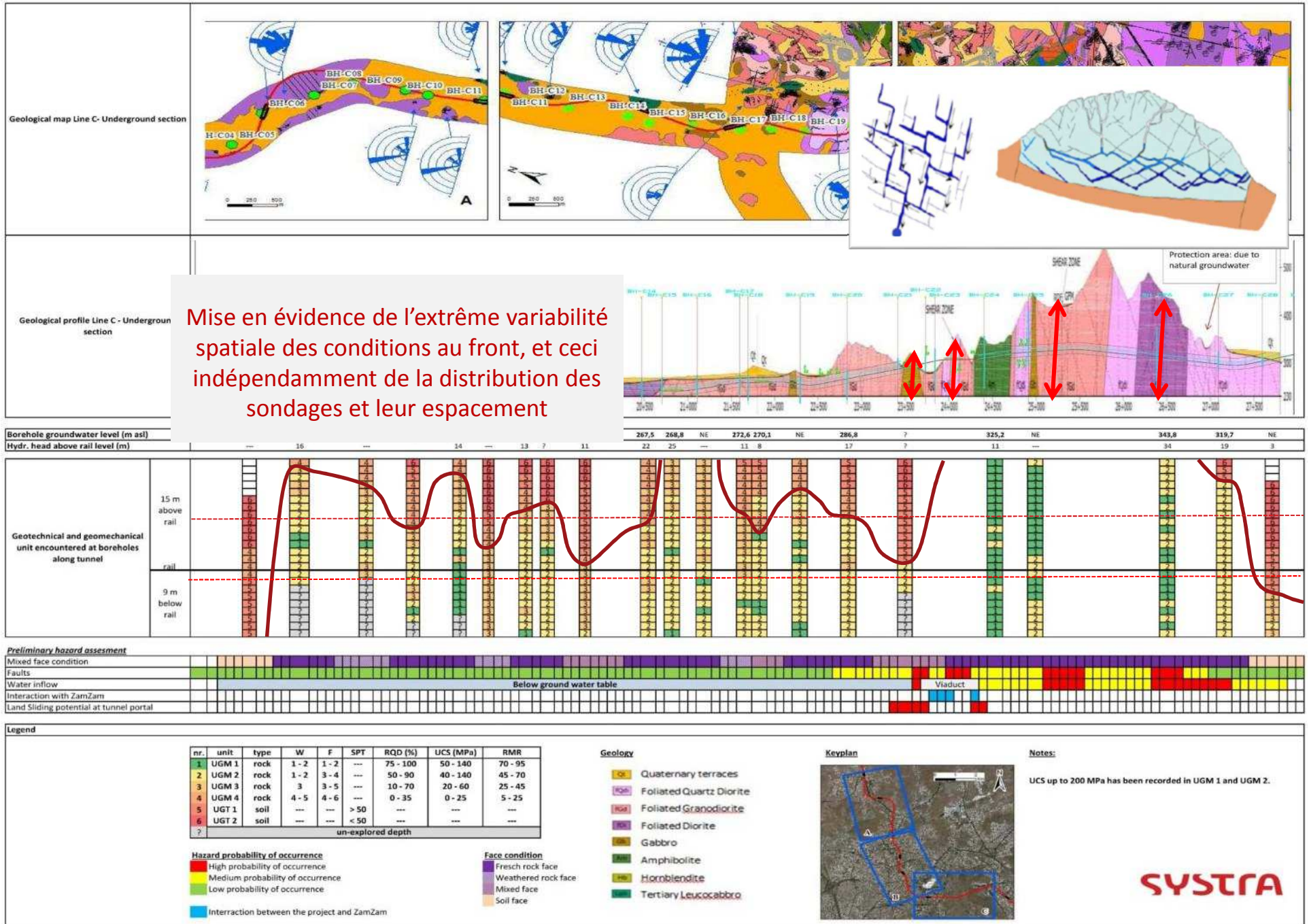




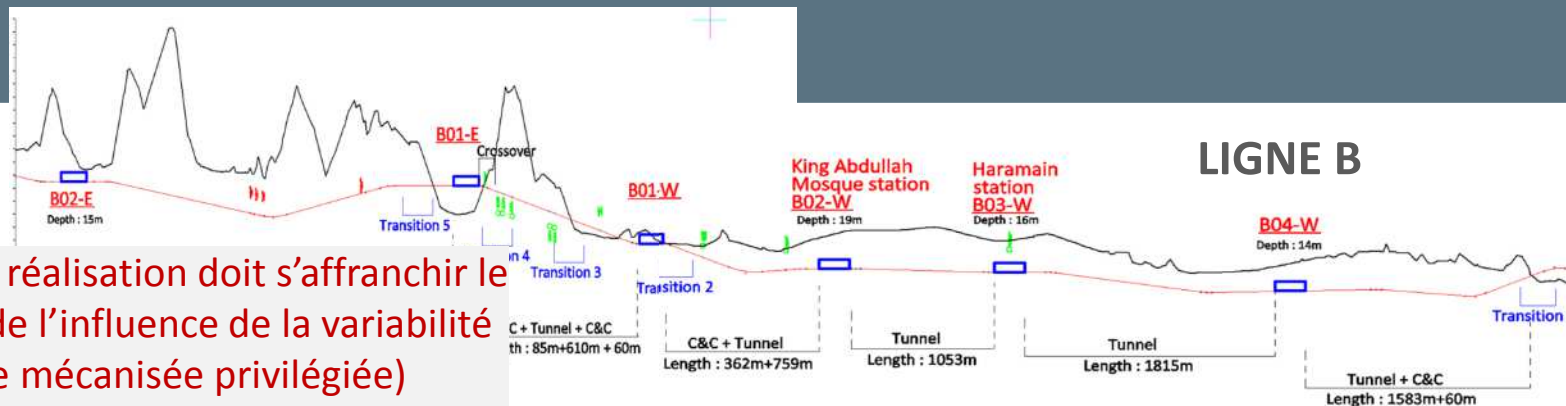
Influence sur les méthodes constructives

SYSTRA

Preliminary geotechnical and geomechanical profile Line C - Underground section



Tunnels



La méthode de réalisation doit s'affranchir le plus possible de l'influence de la variabilité (méthode mécanisée privilégiée)

- ☐ Identification des scénarios au front
- ☐ Quantification de l'occurrence

9 km de tunnels, dont 4.3 km in zone urbaine
2.7 km sous grande couverture



Configuration	Classification	Tunnel section in Urban Area (KAAR area until B01-W station)		Tunnel section in a less dense urban area (From B01-W to B02-E)		Total underground stretch	
		Length	Percentage	Length	Percentage	Length	Percentage
Main Soil	UGT1-UGT2 (nr°5-6)	760m	15%	280m	8%	1040	11%
Mixed face	Soil at the crown + weathered to fresh rock at the base (UGM4 to UGM1)	1150m	20%	---	---	1150	12%
Fractured rock	Mainly (UGM 3-4)	1150m	20%	---	---	1150	12%
Slightly fractured to fresh rock	Mainly (UGM 1-2)	2540m	45%	3300m	92%	5840	65%



Conclusions

SYSTRA

- 
- ❑ Le contexte: zone contrainte, moyens relativement limités, qualité des résultats à évaluer attentivement et temps extrêmement serré
 - ❑ Malgré les conditions pas toujours optimales, les points suivants restent fondamentaux:
 - conceptualisation d'un modèle de référence au plus tôt
 - approche rigoureuse d'élaboration des données et d'identification des incertitudes
 - façon de communiquer les points d'attention
 - le registre des risques et sa contractualisation
 - ❑ Sur ces bases, les reconnaissances faites on permis de piloter clairement la conception et justifier clairement les choix



CONFIDENCE MOVES THE WORLD

SYSTRA