

# Retour d'expérience sur la conception et la réalisation des ouvrages souterrains du site de Saint-Martin-La-Porte (TELT)

Eric MATHIEU, Jacques TRICLOT, Adrien SAITTA



Séance Technique CFMR/AFTES du 13 juin 2019



# SOMMAIRE

# SOMMAIRE

## **Présentation des chantiers actuels SMLP4**

Plusieurs ouvrages réalisés

Focus sur la traversée du Houiller Productif - Tunnel de base

## **REX de la descenderie (SMLP2)**

Spécificités du creusement - Les principaux acquis

Soutènements : domaines d'application et stratégie retenue

## **De la descenderie (SMLP2) à SMLP4**

Une transposition qui n'est pas directe

Exploitation des acquis vis-à-vis des soutènements

## **Approche observationnelle retenue spécifique**

Les scénarii retenus sur la base de l'expérience acquise

Les outils pour le choix/phasage des soutènements

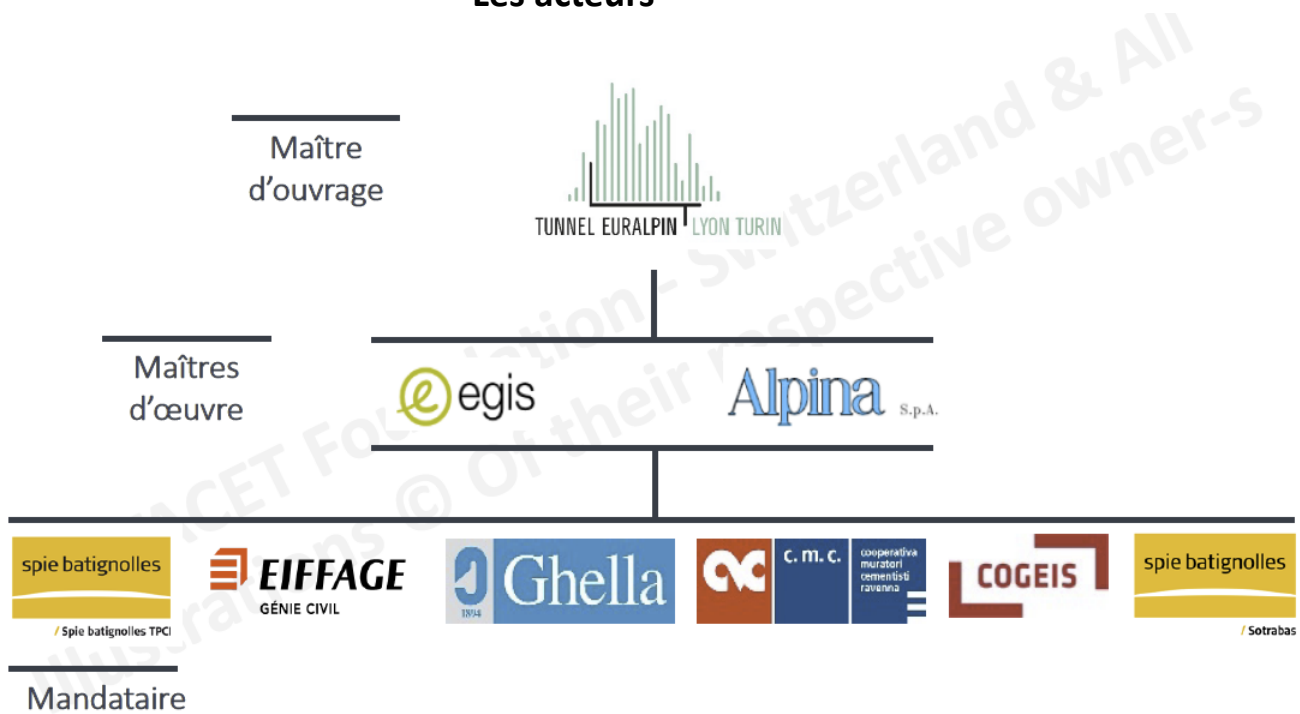
Exemples d'applications de la méthode retenue



# PRESENTATION DES OUVRAGES

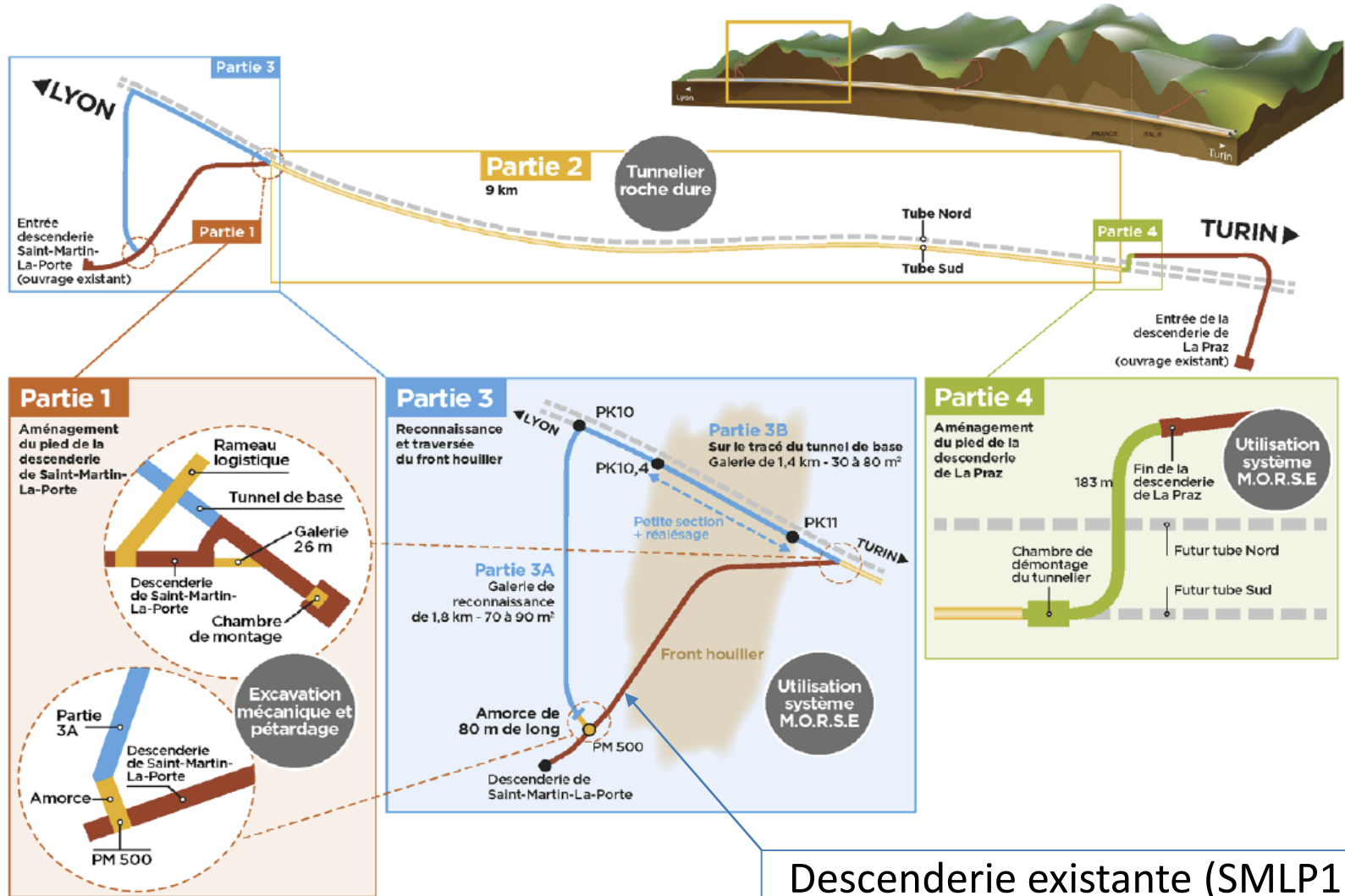
# Chantier Saint-Martin-La-Porte SMLP4

## Les acteurs

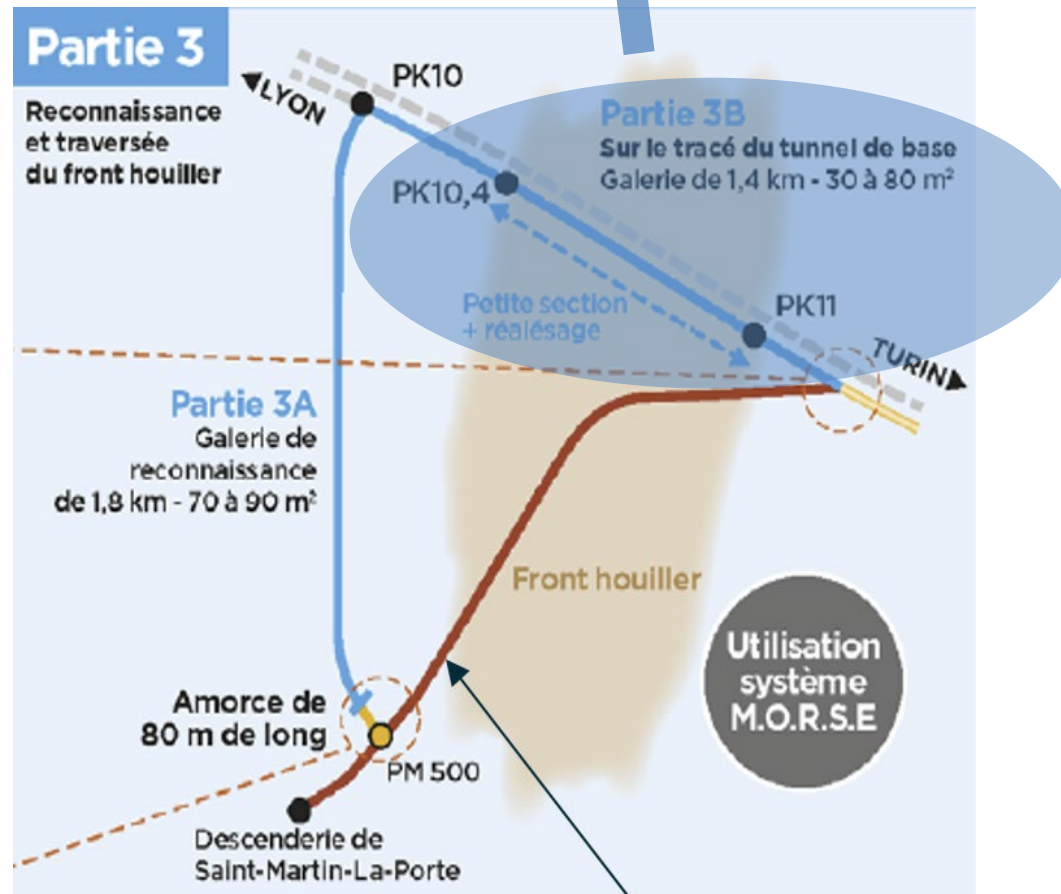


# Les ouvrages de Saint-Martin-La-Porte 4

Des ouvrages de reconnaissance dans le but d'appréhender les conditions d'exécution le long du tronçon du tunnel de base



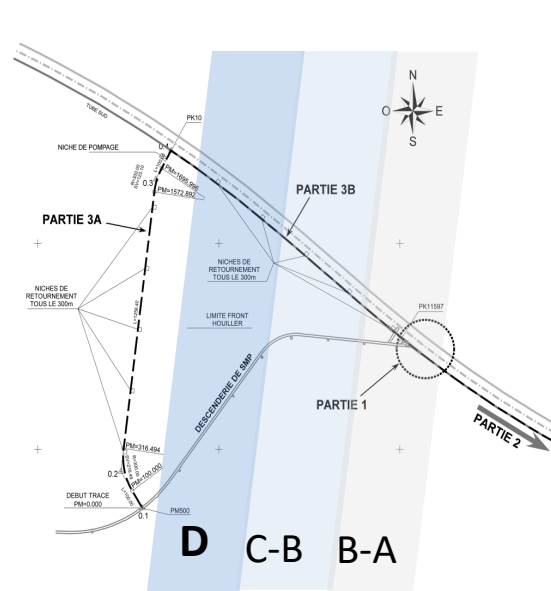
# Présentation de cet après-midi : Traversée du Houiller Productif au niveau du tunnel de base



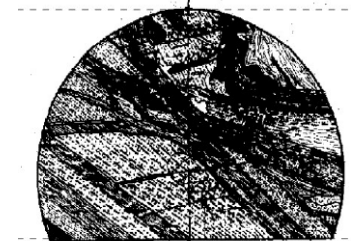
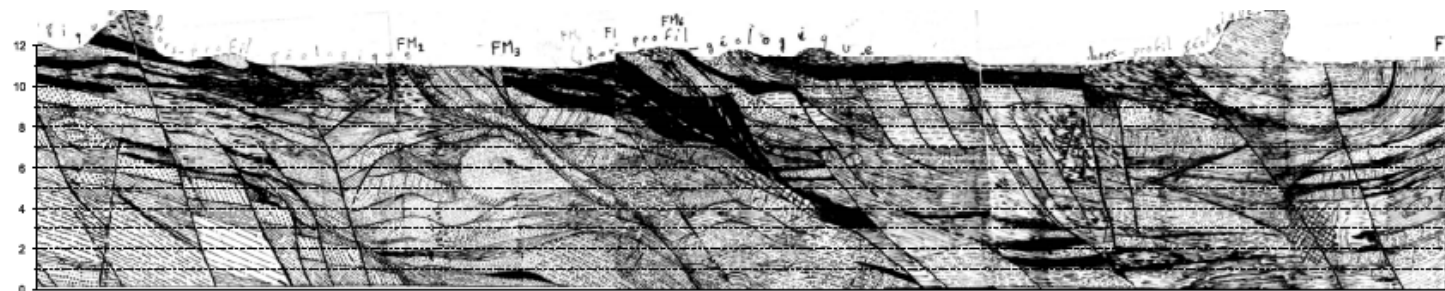


**REX de la Descenderie (SMLP1 et 2)**





<p><b>Classe D</b> Schistes <b>graphiteux</b> et <b>charbonneux</b></p>	<p><b>Classe C</b> Mixte <b>dominante schisteuse</b></p>	<p><b>Classe B</b> <b>Mixte gréseux / schisteux</b> (% variable)</p>	<p><b>Classe A</b> Plus homogène forte <b>dominante gréseuse</b></p>
<p>PM 850 à 1550 Conv . Ø = 600 à 1200 mm et jusqu'à 2200 mm</p>	<p>PM 1550 à 1850 Conv . Ø = 300 à 400 mm</p>	<p>PM 1850 à 2150 Conv . Ø &lt; 200 mm</p>	<p>PM &gt; 2150</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fortes convergences</li> <li>• Effet différé important</li> <li>• Forte anisotropie</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Soutènement souple et semi-rigide</li> <li>• Reprofilage et /ou réalésage</li> <li>• Anneau blocage justifié à MT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Convergences moyennes à fortes</li> <li>• Effet différé modéré</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Soutènement souple et semi-rigide</li> <li>• Reprofilage potentiel et limité</li> <li>• Anneau blocage justifié à MT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Convergences modérées</li> <li>• Effet différé faible</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Phase semi-rigide réduite</li> <li>• Anneau blocage non justifié à MT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Convergences faibles</li> <li>• Peu d'effet différé</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Phase semi-rigide non justifiée.</li> <li>• Anneau blocage non justifié à MT</li> </ul>



TRÈS FORTE HÉTÉROGÉNÉITÉ DU HOUILLER PRODUCTIF



### LES CONDITIONS

- Houiller productif
- **SCHISTEUX CHARBONNEUX/TECTONISÉ**
- Couverture de 250m à 450m
- $K_0 = 1,2$

### LES CONSTATS

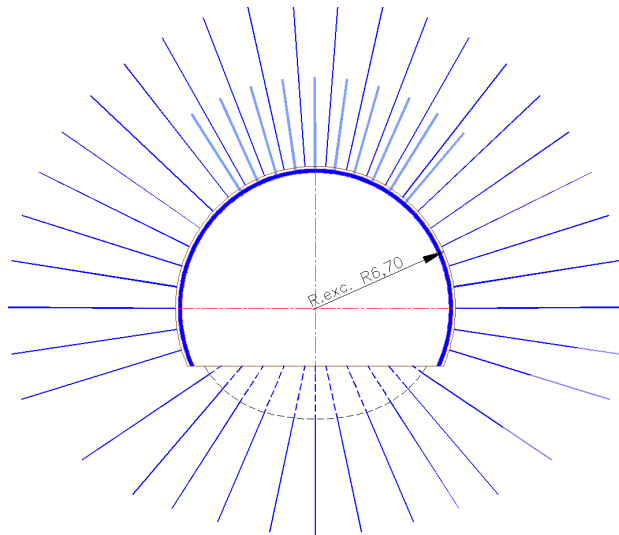
- Forte anisotropie
- Forte hétérogénéité
- Forte convergence
- Faible extrusion
- Effet différé marqué

### LES DEMANDES

- Stabilité du front
- Autoriser des convergences fortes
- Maîtrise progressive des convergences
- Homogénéisation des déformations
- Blocage des déformations



**STRATÉGIE DE MISE EN ŒUVRE DES SOUTÈNEMENTS**



Soutènement « souple » à front

Boulons radiaux et boulons de front

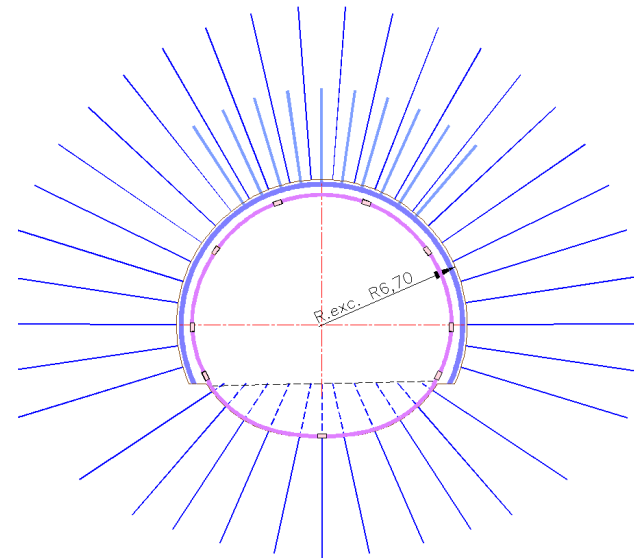
Cintres coulissants TH



### STRATÉGIE DE MISE EN ŒUVRE DES SOUTÈNEMENTS

Soutènement « Semi-rigide » – pose différée

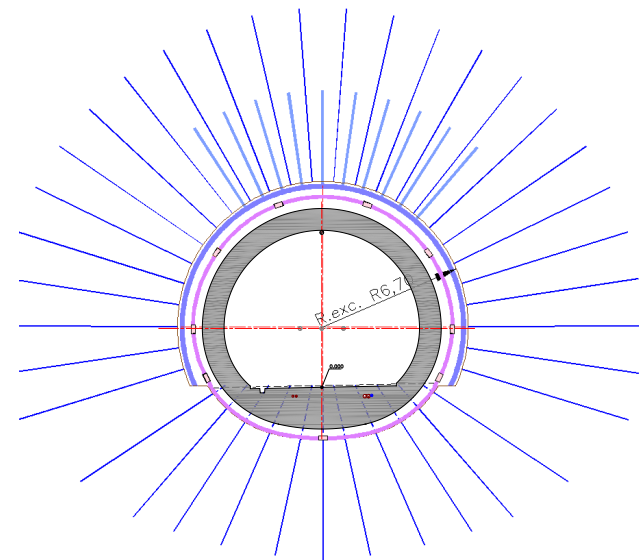
Coque Béton Projeté + Eléments compressibles





**STRATÉGIE DE MISE EN ŒUVRE DES SOUTÈNEMENTS**

Anneau de blocage – Long Terme





### STRATÉGIE DE MISE EN ŒUVRE DES SOUTÈNEMENTS

#### Le Bilan

- Maîtrise de la géométrie de l'excavation
- Avancement régulier (limite l'effet temps)
- Réduction des convergences - amplitude de 50-60%
- Maîtrise des convergences - Baisse des vitesses de 90%
- Homogénéisation des déformations
- Réduction des sollicitations dans l'anneau béton (de 60%)

## RETOUR EXPÉRIENCE de SMLP2 - LES ACQUIS

- Boulons VTR
- Boulonnage radial
- Cintre coulissants TH
- Coque BP + Éléments compressibles HDC
- reprofilage / réalésage

## ACTIONS DES ÉLÉMENTS DE SOUTÈNEMENT

- ⇒ action sur la sécurité de la zone du front
- ⇒ action sur l'extrusion du front
- ⇒ action sur maîtrise de la régularité des excavations
  
- ⇒ action sur les convergences de la zone du front
- ⇒ action sur les la couronne de terrain autour de l'excavation (armature du massif)
  
- ⇒ action sur la sécurité de la zone du front
- ⇒ action sur la régularité de l'avancement (vitesse d'avancement)  
donc indirectement sur le facteur temps
  
- ⇒ action sur la maîtrise des convergences
- ⇒ action sur l'homogénéisation des déformations
- ⇒ action sur les convergences différées (ralentissement)
- ⇒ action sur la régularité de l'avancement (vitesse d'avancement)  
donc indirectement sur le facteur temps
  
- ⇒ action sur la capacité de convergences de la section





DE SMLP2

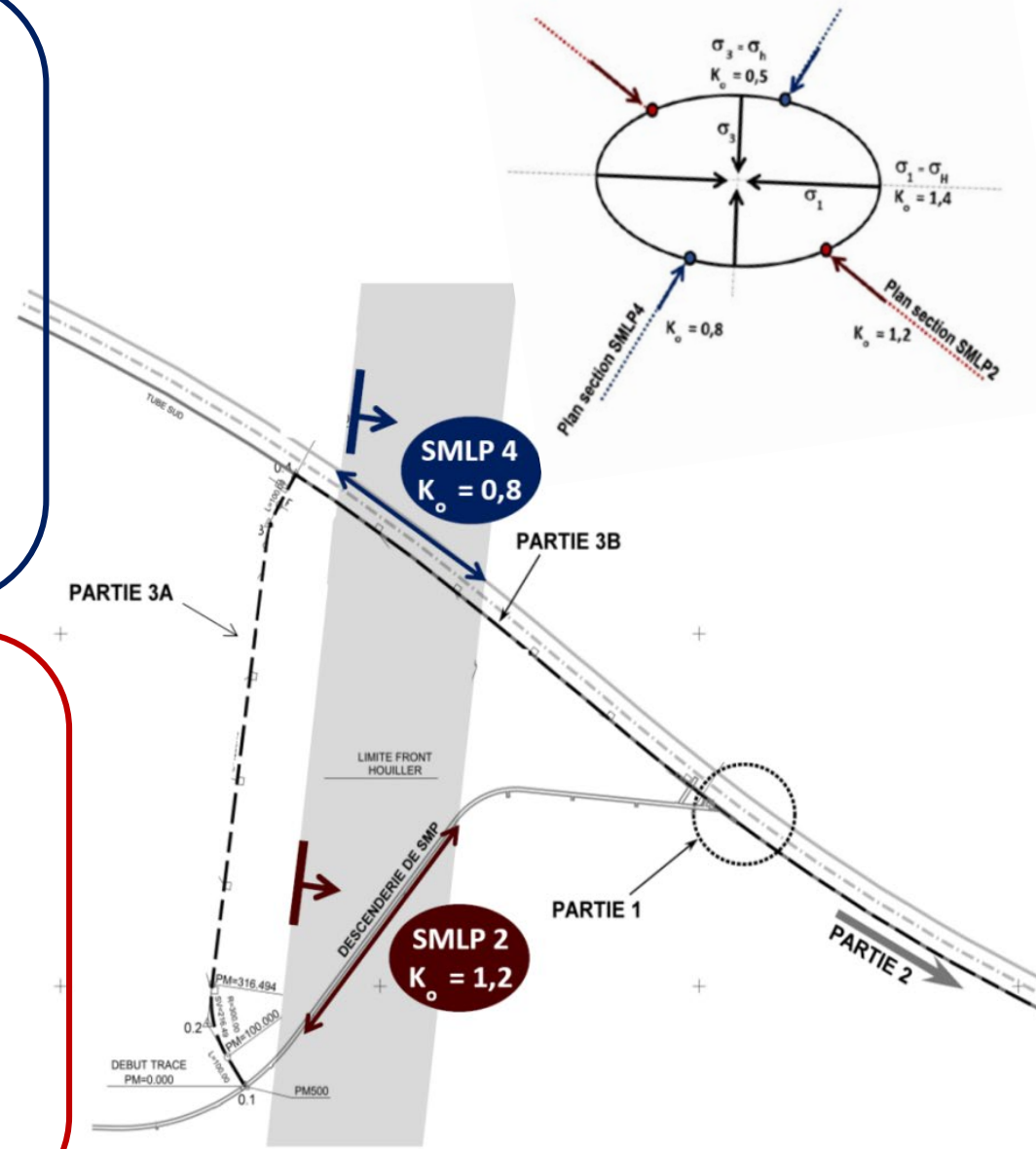


A SMLP4

## DE SMLP2 A SMLP4 : DEUX CONTEXTES DIFFÉRENTS

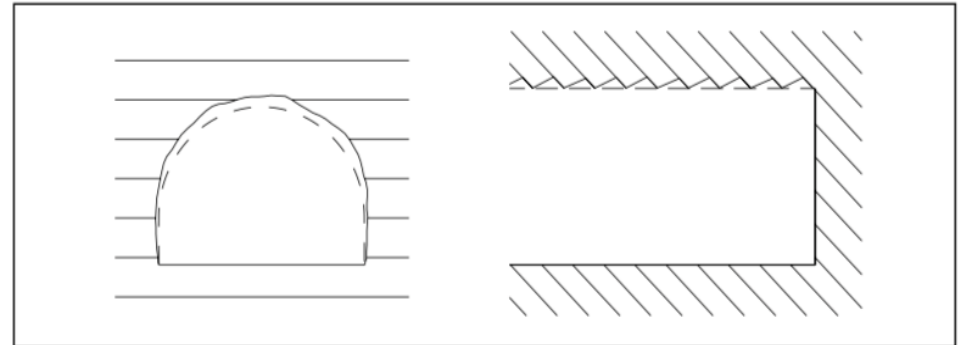
- ⇒ sur SMLP4 : 6,50 m  
Rayon excavation maximale  
en section complète (Grande section)
- ⇒ Hauteur de Couverture HP SMLP4  
Couverture constante : **H = 650 m**
- ⇒ Creusement SMLP4  
⊥ à la **contrainte principale mineure  $\sigma_3$**   
(horizontale)
- ⇒ sur SMLP4 le rapport de contrainte  
horizontale/verticale est estimé à  **$K_0 = 0.8$**

- Rayon excavation SMLP2 : 6,70 m  
5,40 m (P7 bis) à 6,70 (DSMxx)
- Hauteur Couverture HP SMLP2  
La couverture varie : **H = 250 à 400 m**
- Creusement SMLP2  
⊥ à la **contrainte principale majeure  $\sigma_1$**   
(horizontale)
- Le rapport de contrainte horizontale/verticale  
de SMLP2 est égal à  **$K_0 = 1.2$**



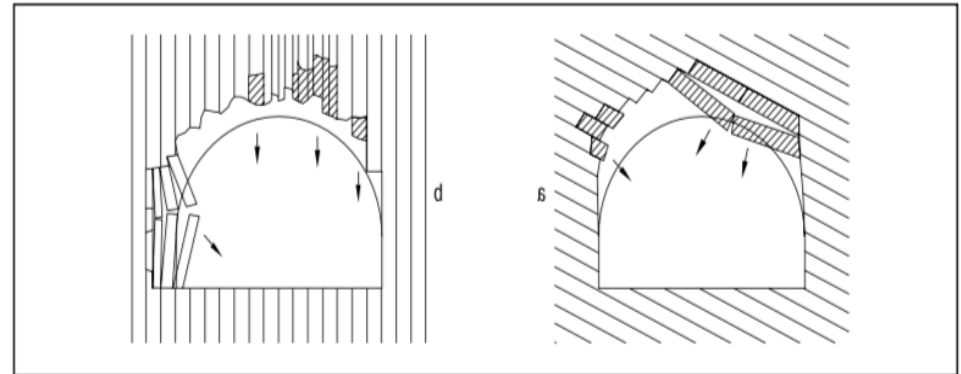
# DE SMLP2 A SMLP4 : DEUX CONTEXTES DIFFÉRENTS

## Schéma type SMLP4

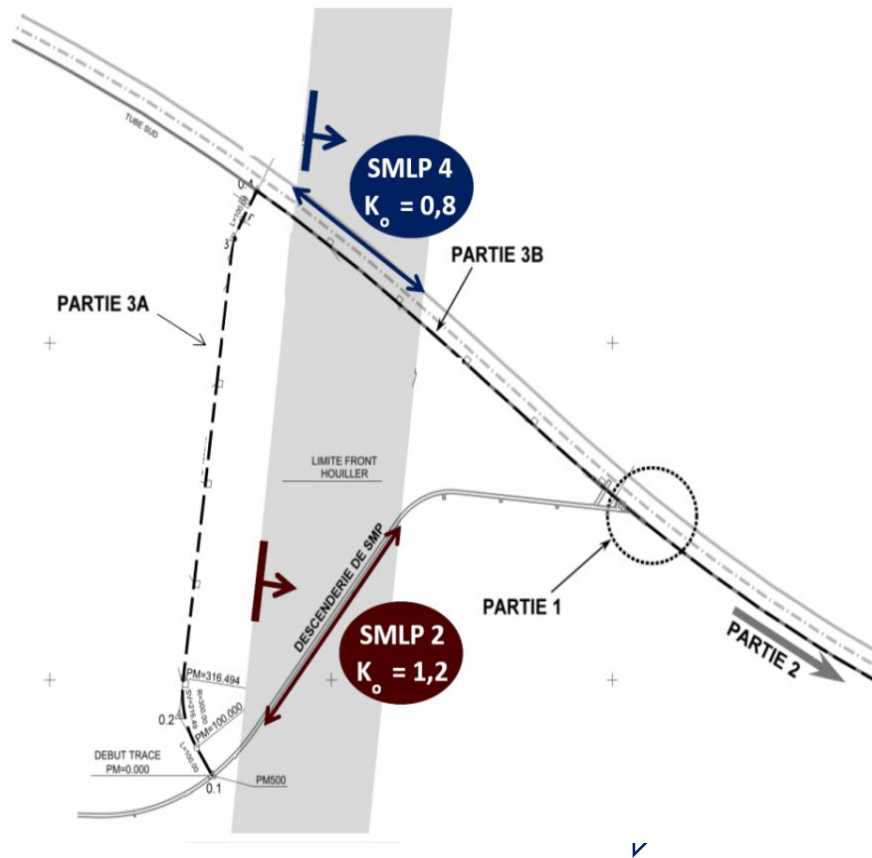


3 - Galerie en travers-bancs : d'autant moins de hors-profilés que le pendage est plus proche de la verticale

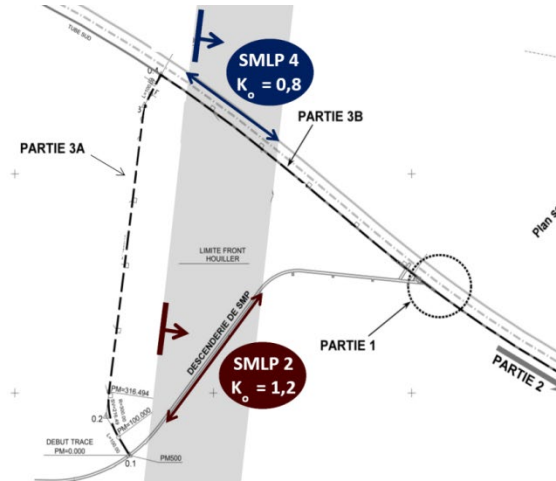
## Schéma type SMLP2



2 - Galerie en direction : a) pendage oblique b) pendage vertical  
 - hors-profilés importants  
 - flexion des couches minées tangentes à la paroi (boulonnage)  
 - risque d'effondrement de panneaux importants dans le cas de pendage vertical



# DE SMLP2 A SMLP4 : DEUX CONTEXTES DIFFÉRENTS ET DES INCERTITUDES CONCERNANT SMLP4



**UNE TRANSPOSITION de SMLP2 à SMLP4 qui n'est pas directe**

Des incertitudes

- **Effet de la profondeur**
- **Effet de l'orientation de SMLP4:** vis-à-vis des contraintes principales et des grandes structures
- **Hétérogénéité des terrains et effet d'échelle**
- Comportement **Moyen et Long Terme**



**Compléments de reconnaissances préalables au creusement du Houiller au niveau du tunnel de base**



**METHODE OBSERVATIONNELLE**

## MÉTHODE OBSERVATIONNELLE - SCENARI



SCENARI

PREVISIONS INITIALES					
Attendues		Intermédiaires		Extrêmes	
Conditions attendues plus favorables que SMLP2		Conditions du massif SMLP2 avec Ko SMLP4		Conditions identiques à SMLP2	
Cas I	Cas II	Cas II	Cas III	Cas III	Cas IV
H = 600 m	Ko = 0.8	H = 600 m	Ko = 0.8	H = 600 m	Ko = 1.2
Convergences sur Ø (mm)	Zone Plastique (m)	Convergences sur Ø (mm)	Zone Plastique (m)	Convergences sur Ø (mm)	Zone Plastique (m)
1100 -1400	8 à 12 m	1600-2000	20 m	> 2000	30 m

Cas I	Cas II	Cas III	Cas III'	Cas IV
-------	--------	---------	----------	--------

- **Conditions *attendues* - CAS I à CAS II**

Correspond au HP sous 600 m de couverture avec  $Ko = 0,8$  et une orientation favorable des structures par rapport à l'axe du tunnel. (perpendiculairement à celles rencontrées sur SMLP2)

- **Conditions *intermédiaires* - CAS II à CAS III**

Correspond au HP sous 600 m de couverture avec  $Ko \approx 1$  et une orientation favorable à intermédiaire des structures par rapport à l'axe du tunnel.

- **Conditions *extrêmes/défavorables* - CAS III' et CAS IV**

Correspond au HP sous 600 m de couverture avec  $Ko \geq 1,2$  et une orientation des structures identique à celle observée sur SMLP2.

# DE SMLP2 A SMLP4 : L'EXPLOITATION DES ACQUIS

## CAPACITÉ DES SOUTÈNEMENTS – CRITERES DE SUIVI



### SOUTÈNEMENT SOUPLE

- ⇒ **C<sub>1</sub>** : Convergences sur le diamètre < 100 cm à 25 m du front (en présence d'un soutènement semi-rigide au-delà),
- ⇒ **C<sub>2</sub>** : Vitesse de convergence :
  - < 5 cm/jour, moyen entre 0 et 5 m du front (7 cm/j maxi)
  - < 3-4 cm/jour au-delà.



### SOUTÈNEMENT SEMI-RIGIDE

- ⇒ **C<sub>3</sub>** : Convergences sur le diamètre < 60 cm à 90 m du front,
- ⇒ **C<sub>4</sub>** : Vitesse de convergence :
  - < 3 mm/jour au-delà de 50 m du front de taille (hors zone influence du front),



### ANNEAU DE BLOCAGE

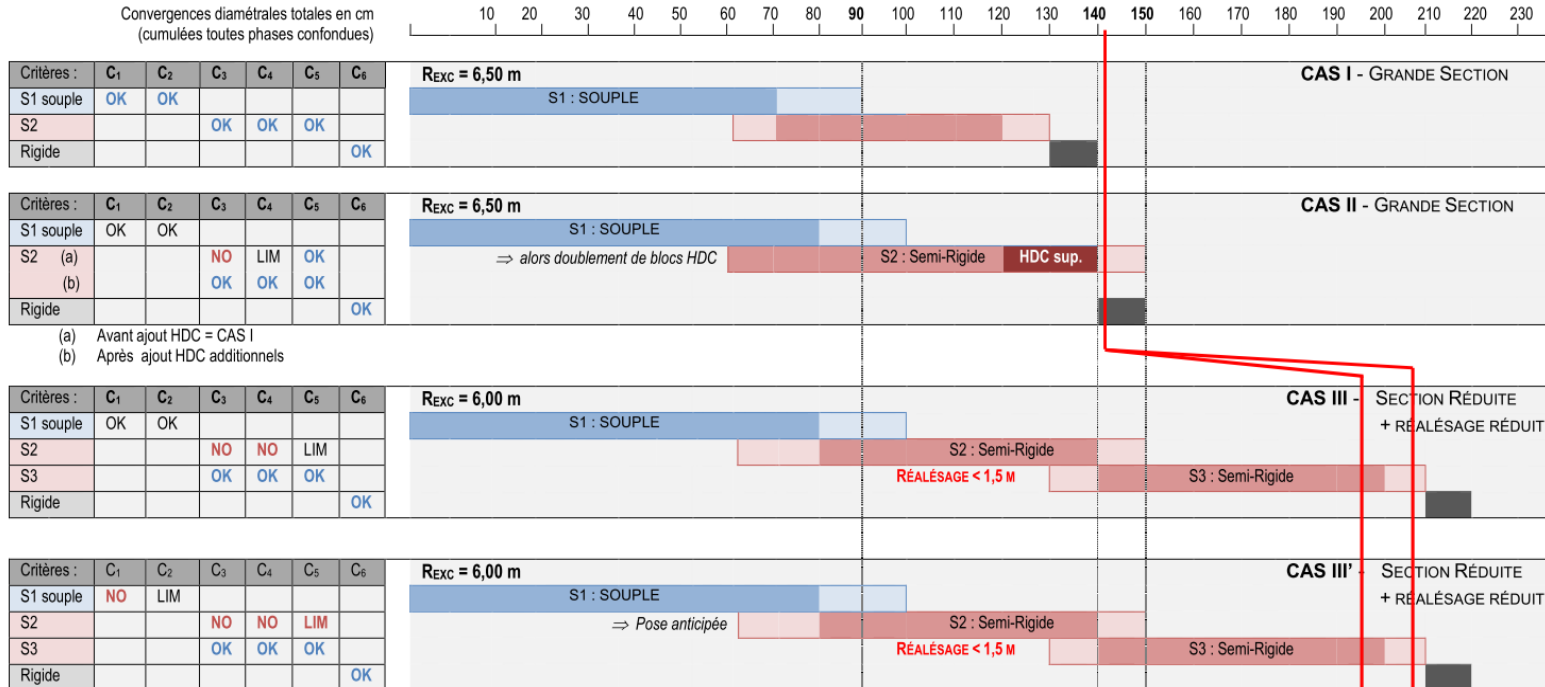
- ⇒ **C<sub>6</sub>** : Vitesses de convergences sur le diamètre < 1-2 mm/jour à 100 m du front sur le soutènement semi-rigide,

- ⇒ **En fonction des capacités des soutènements**
- ⇒ **En fonction des convergences**
- ⇒ **Indépendamment des caractéristiques du massif**

# MÉTHODE OBSERVATIONNELLE - SCENARI

# COMBINAISON SCENARI / CRITÈRES

## CAS GÉNÉRAUX



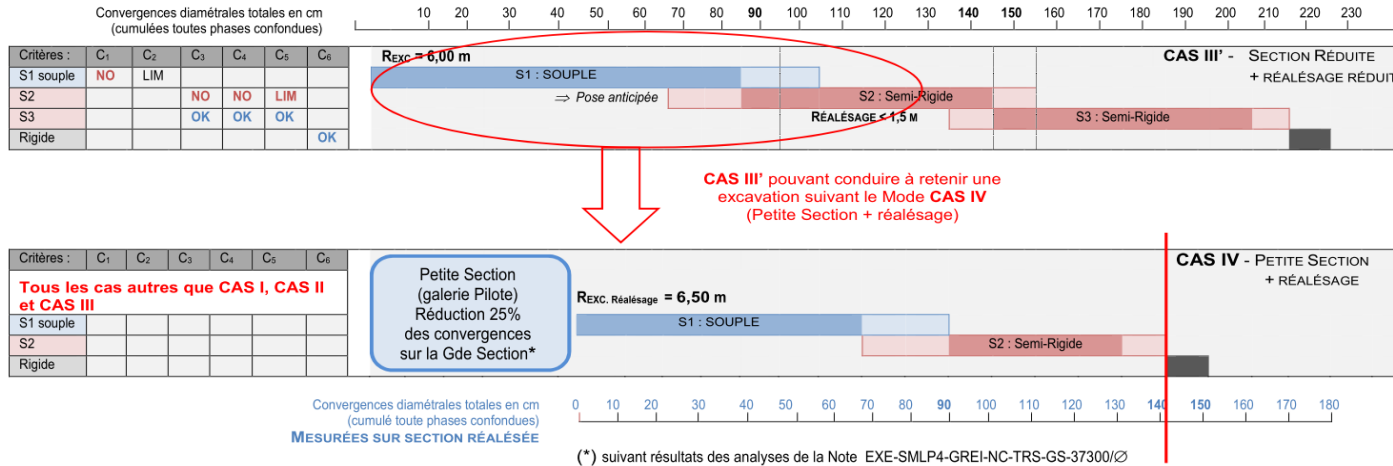
**Ligne Rouge** de convergence diamétrale limite  
Permettant de maintenir un gabarit intrados  
du soutènement à R = 5,35 m



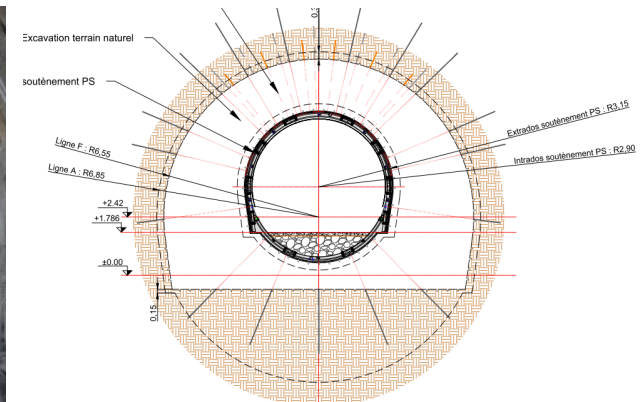
# MÉTHODE OBSERVATIONNELLE - SCENARI

# COMBINAISON SCENARI / CRITÈRES

## CAS PARTICULIERS



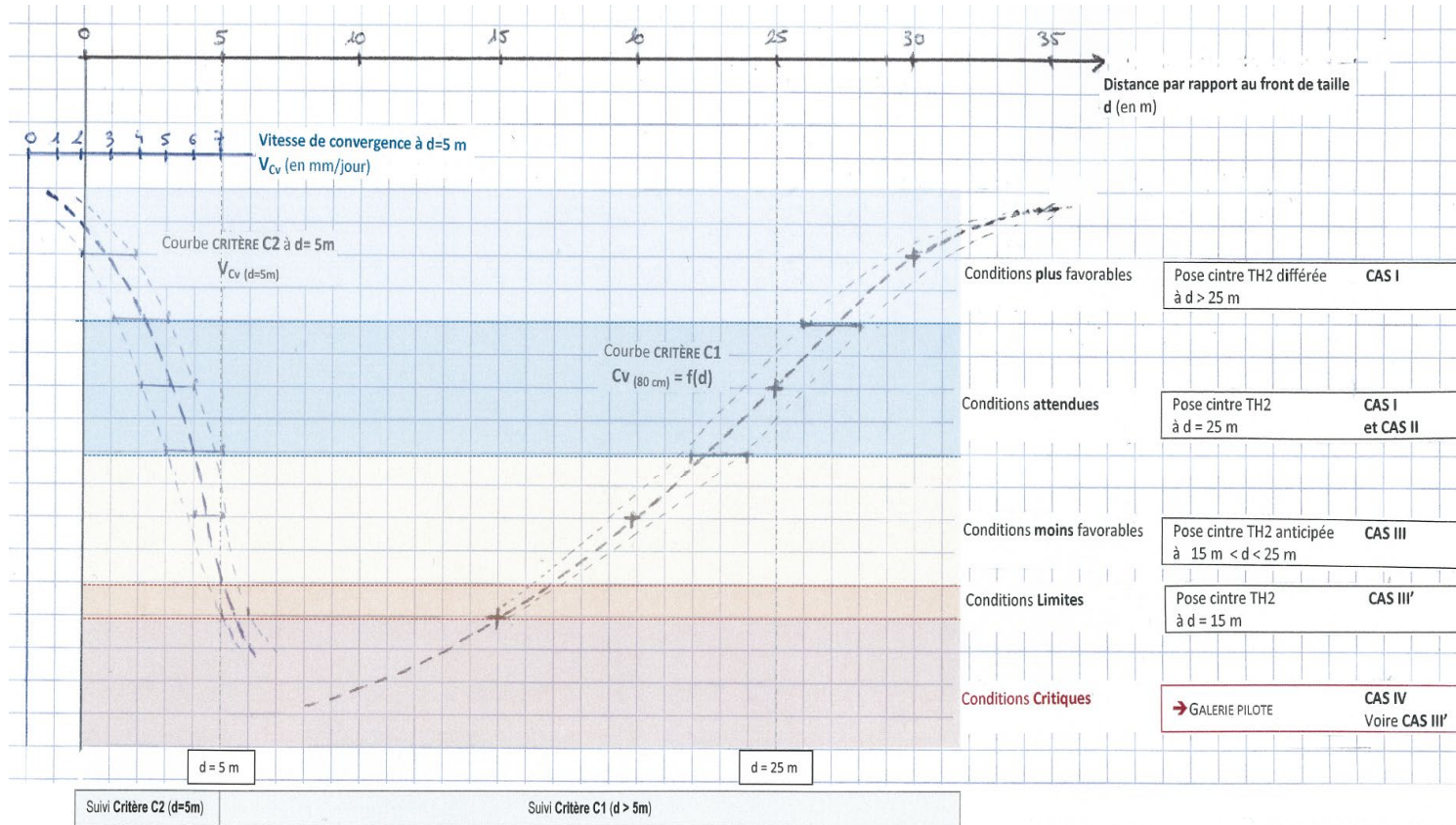
- Besoin d'améliorer les connaissances
- Passage en **PETITE SECTION + RÉALÈSAGE**
- **Grande Section** (R = 6,50 m)
- **Petite Section** (R = 3,15 m)



# MÉTHODE OBSERVATIONNELLE - Outils de Suivi

# EXEMPLE : ABAQUE DE SUIVI DES CONVERGENCES

## PHASE SOUPLE



**Critère C1** (d = 25 m)

- Amplitude de la convergence diamétrale mesurée < 80 cm

**Critère C2** (d = 5m)

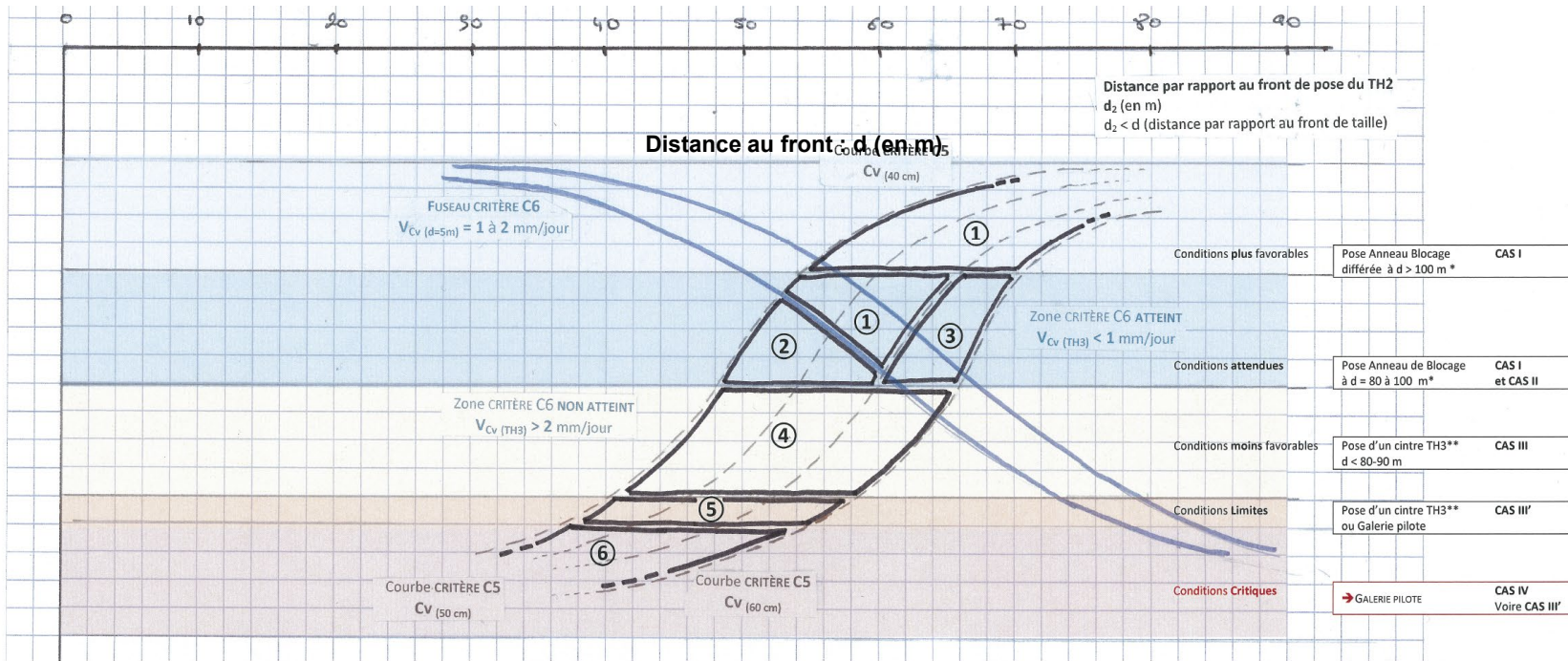
- Vitesse d'évolution de la convergence diamétrale 4 à 7 cm/jours

Critère C2 (5 m < d < 25 m)

- Vitesse d'évolution de la convergence diamétrale 3 à 4 cm/jours

## PHASE SEMI-RIGIDE

de 30 à 90 m du front



- ① Pose Anneau de Blocage
- ② pose Anneau de Blocage avec reprofilage éventuel
- ③ Pose Anneau de Blocage avec reprofilage
- ④ Pose second soutènement semi-Rigide - Cintre TH3
- ⑤ Analyse détaillée à réaliser : TH3 ou galerie Pilote
- ⑥ Galerie Pilote

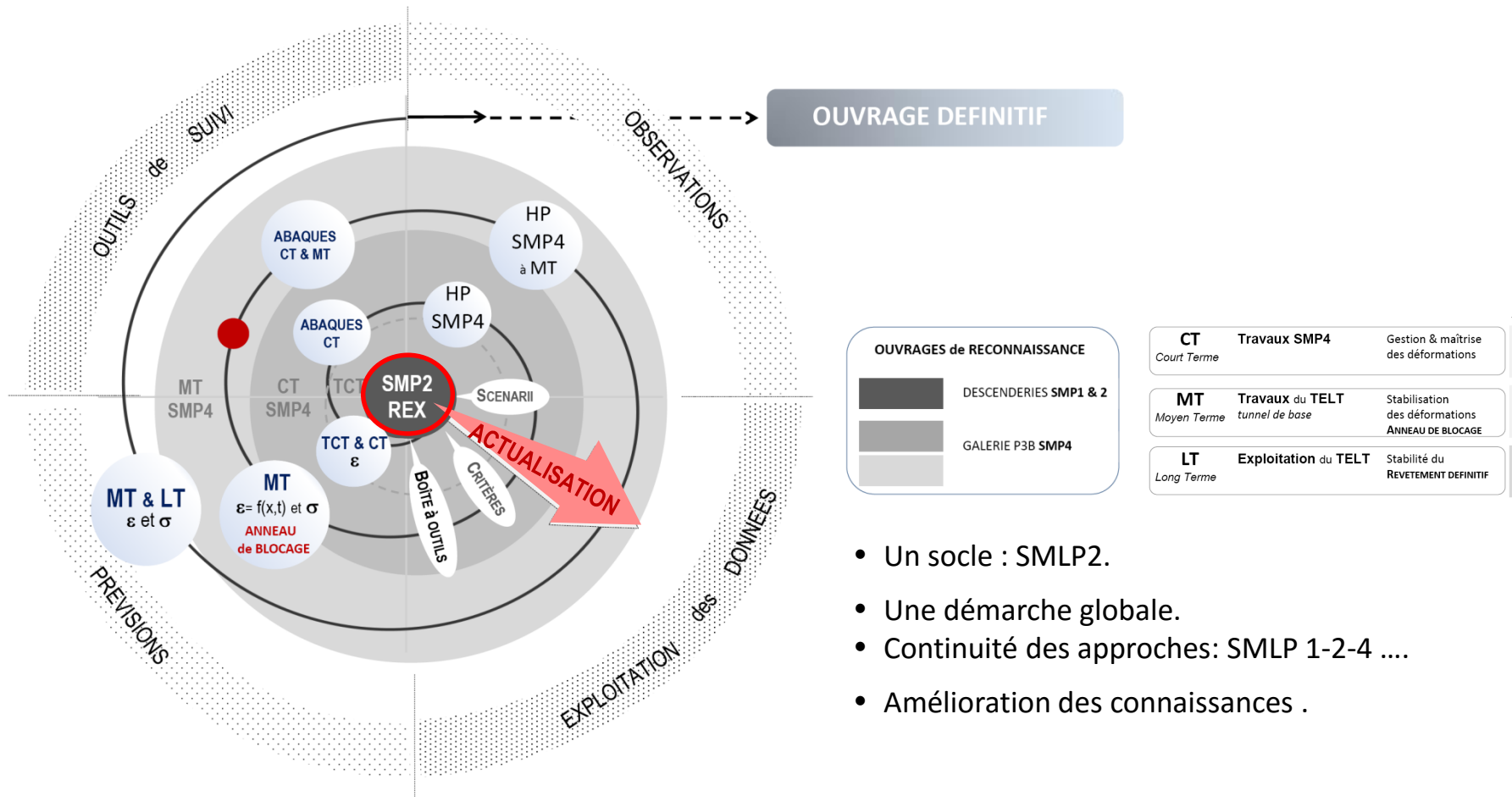
### Abaque pour Soutènement de Phase B (semi-rigide) avec 8 blocs HDC.

8 HDC comprimés à 40%  $\Rightarrow$  capacité de convergence diamétrale de 40 cm  
 8 HDC comprimés à 50%  $\Rightarrow$  capacité de convergence diamétrale de 50 cm

(\*)  $d$  : distance au front de taille

(\*\*) Second soutènement semi-rigide nécessaire pour réduire les convergences et la vitesse de convergence avant la pose de l'anneau de blocage.

# MÉTHODE OBSERVATIONNELLE - Principe SMLP4

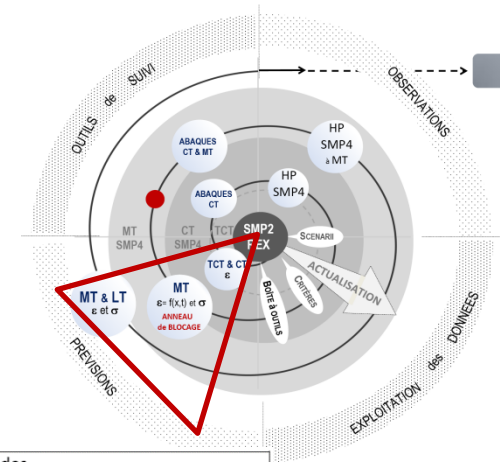


- Un socle : SMLP2.
- Une démarche globale.
- Continuité des approches: SMLP 1-2-4 ....
- Amélioration des connaissances .

# APPROCHES CALCULATOIRES - Les différentes approches

## Difficulté à prendre en compte l'ensemble des comportements observés dans le Houiller Productif de Classe D :

- Anisotropie
- Aux fortes convergences correspond de faibles extrusions
- Loi de comportement avec l'effet du temps
- Hétérogénéité et l'effet d'échelle
- Comportement de l'anneau de blocage



### ⇒ Approches Croisées

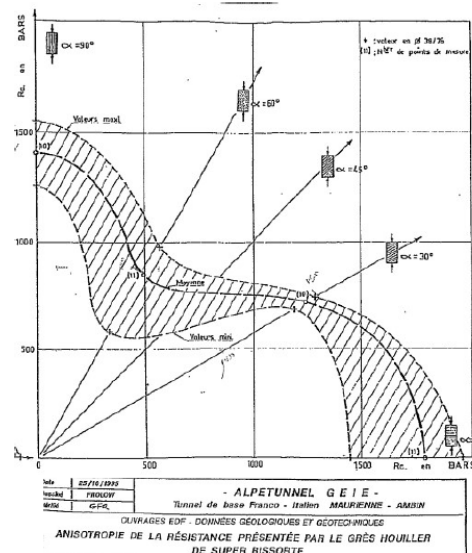
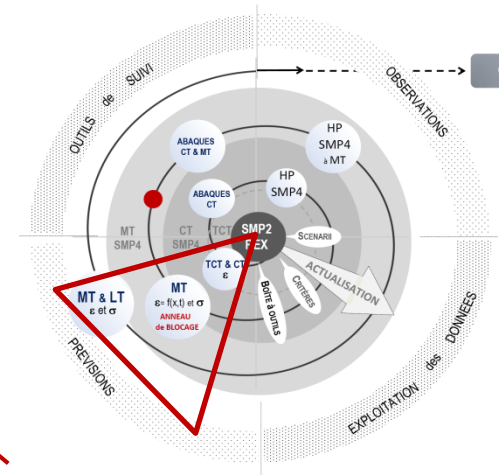
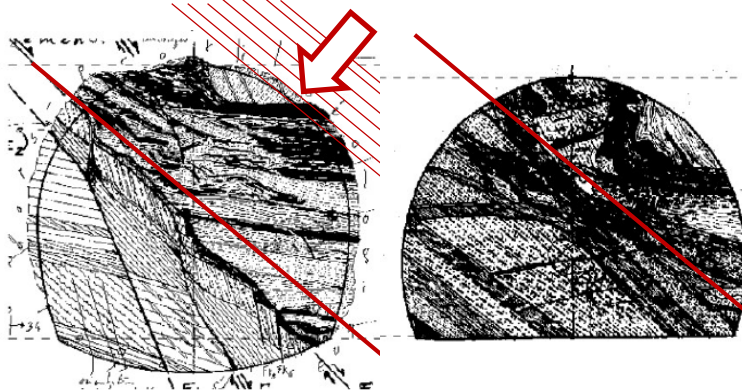
### ⇒ Approches multiples

### ⇒ Travaux en fourchette

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Approches Semi-empiriques <i>Par exemple : Cv-CF, Loi de Sulem...</i></li> </ul>	Calculs en déformation.	CT MT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estimations rapides</li> <li>- Calage sur les mesures d'auscultation.</li> <li>- Prise en compte du facteur temps</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Approche EF 2D/3D avec des modèles numériques simplifiés avec Loi élasto-plastique  Identiques à celles utilisées pour les études et rétro-analyses de la phase EXE des travaux de SMLP1 et SMLP2.</li> </ul>	calculs en déformation. Analyse en sollicitation	CT MT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modèles simples et Calculs rapides</li> <li>- Rétro-analyse (auscultation et instrumentation)</li> <li>- Estimations des sollicitations.</li> <li>- Difficulté à prendre en compte le facteur temps</li> <li>- Difficulté à prendre en compte l'anisotropie</li> <li>- Choix du taux de déconfinement (sauf 3D)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Approche EF 3D avec des lois de comportement Elasto-Visco-Plastique.                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- modèle <b>CVISC+U</b> développé par l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées</li> <li>- modèle <b>SHELVIP</b> développé par Polytechnico TURIN</li> </ul> </li> </ul>	Calculs en déformation. Calculs en sollicitation.	CT MT LT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modèles lourds</li> <li>- Rétro-analyse (auscultation et instrumentation)</li> <li>- Prise en compte du phasage réel.</li> <li>- Prise en compte de l'effet différé.</li> <li>- Intégration d'une anisotropie.</li> <li>- Calculs des sollicitations.</li> <li>- Nécessite une bonne connaissance</li> <li>- Nombreux paramètres (13 paramètres)</li> </ul>

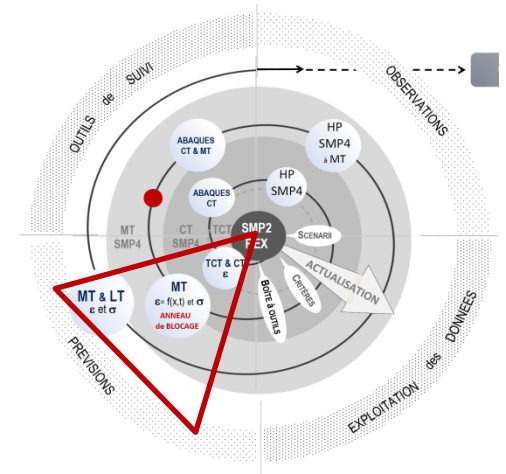
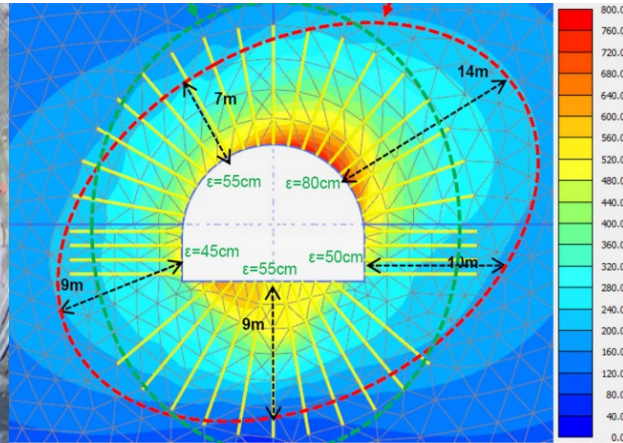
### ⇒ Cohérence et complémentarité des approches

## APPROCHES CALCULATOIRE - Ex. Prise en compte de l'Anisotropie

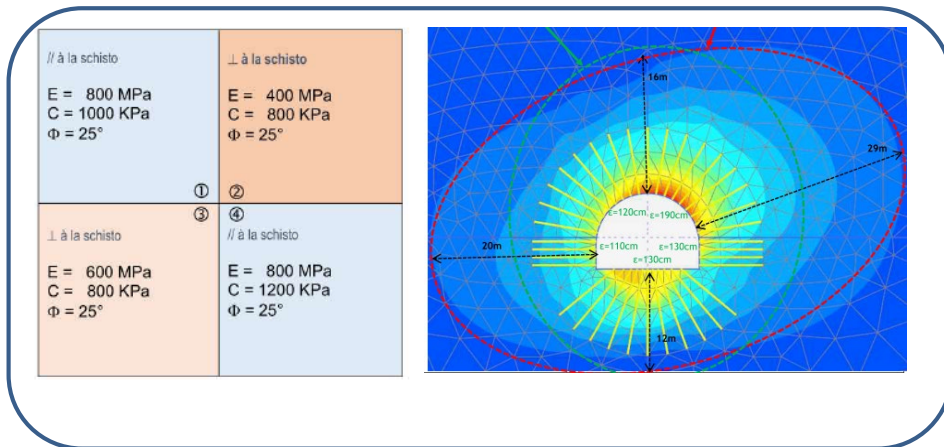


- La plus grande convergence a lieu dans le sens perpendiculaire à la schistosité.
- Le comportement du tunnel dans cette direction est marqué par la rupture par flambement des bancs de schistes qui sont tangents à la paroi.

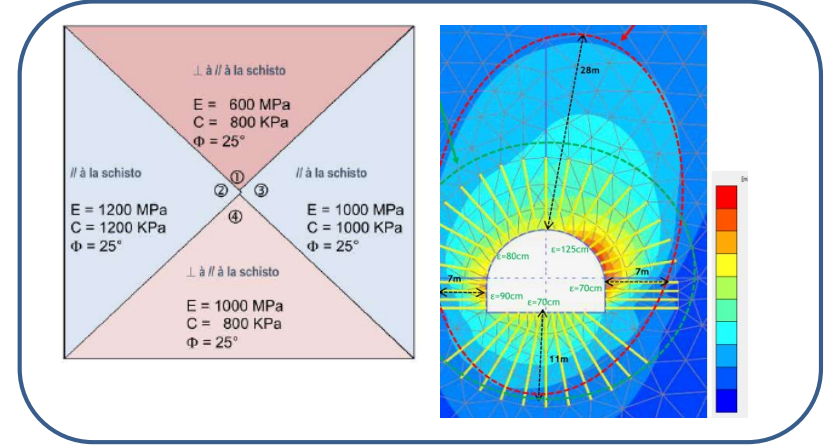
# APPROCHES CALCULATOIRE - Ex. Prise en compte de l'Anisotropie



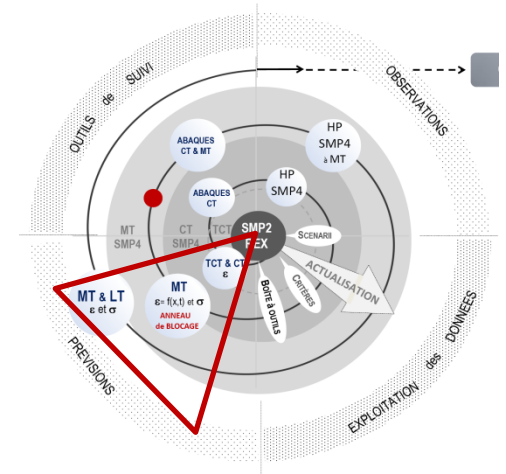
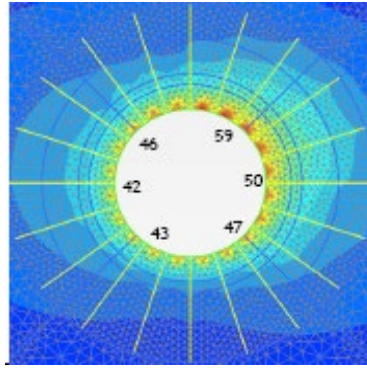
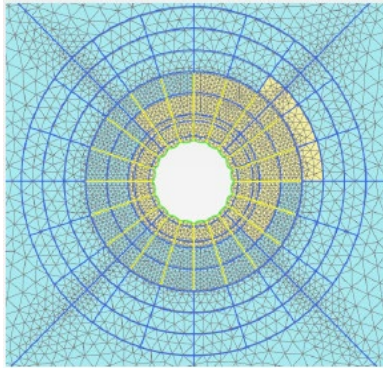
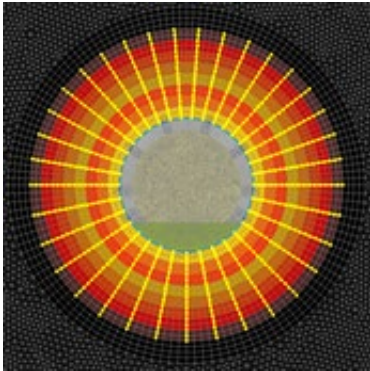
## Scenario SMLP4 - Cas IV (contexte SMLP2)



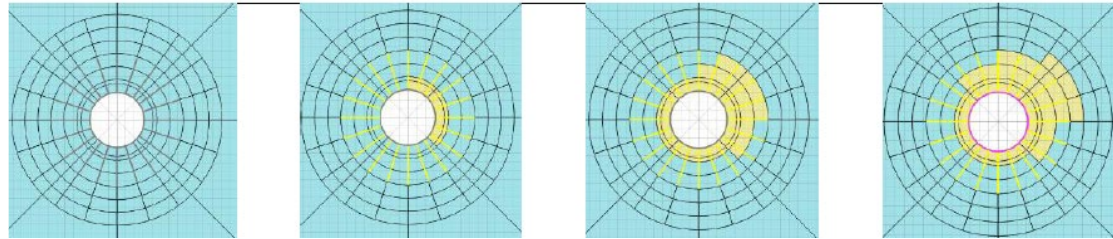
## Scenario SMLP4 - Cas II



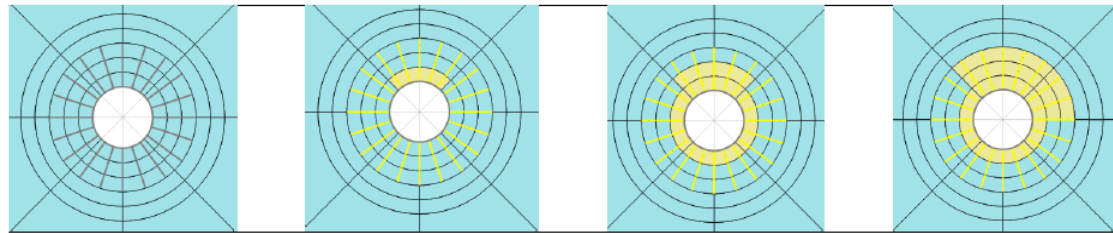
# APPROCHES CALCULATOIRE - Ex. Prise en compte de la dégradation



SCENARIO: CAS II



SCENARIO: CAS II





# APPROCHES CALCULATOIRES - Loi visco-élasto-plastique

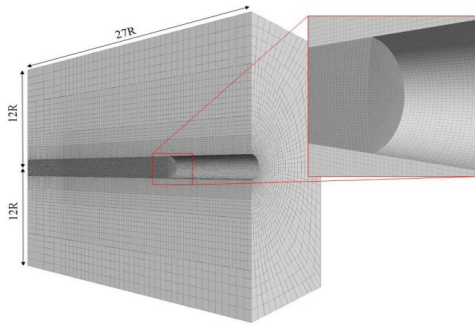
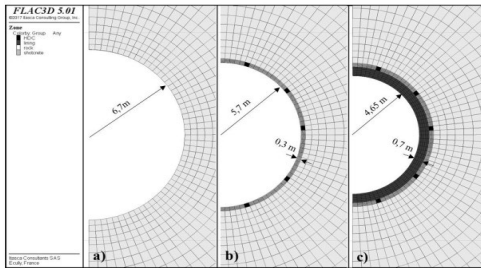
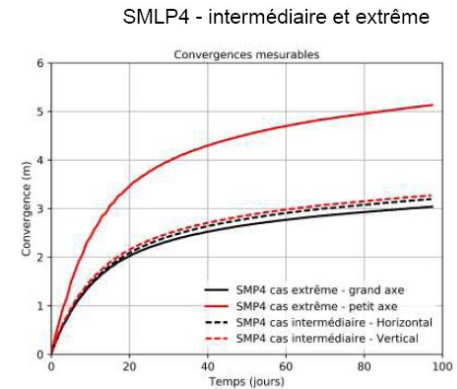
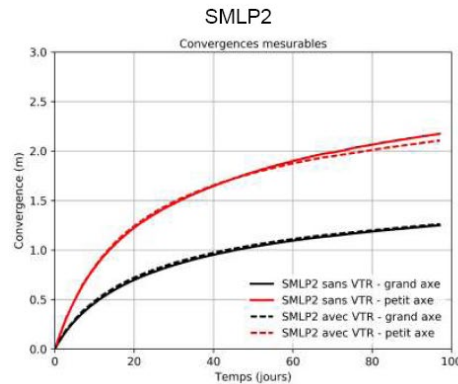
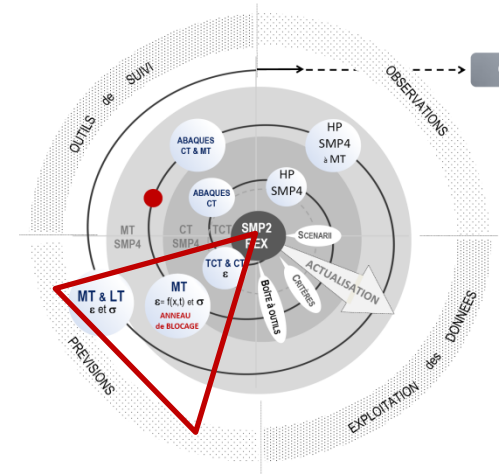


Figure 2 : Maillage tridimensionnel utilisé.



Paramètres		Jeu 1	Jeu 2
Caractéristiques élastiques	module de Young, $E$ (MPa)	650	650
	coefficient de Poisson, $\nu$ (-)	0.3	0.3
	module de cisaillement de Kelvin, $G_K$ (MPa)	250	250
Viscosité	viscosité de Kelvin, $\eta_K$ (GPa.day)	6.25	1.25
	viscosité de Maxwell, $\eta_M$ (GPa.day)	35.0	10.0
	cohésion $c$ (MPa)	0.50	0.70
Résistance de la roche	angle de frottement $\phi$ (°)	26	26
	angle de dilatance $\phi'$ (°)	0	0
	résistance en traction $\sigma_t$ (MPa)	8.5e-3	8.5e-3
Résistance des joints	cohésion de joint $c_j$ (MPa)	0.30	0.50
	angle de frottement de joint $\phi_j$ (°)	23	23
	angle de dilatance de joint $\phi'_j$ (°)	0	0
	résistance en traction $\sigma_{jt}$ (MPa)	8.5e-3	8.5e-3

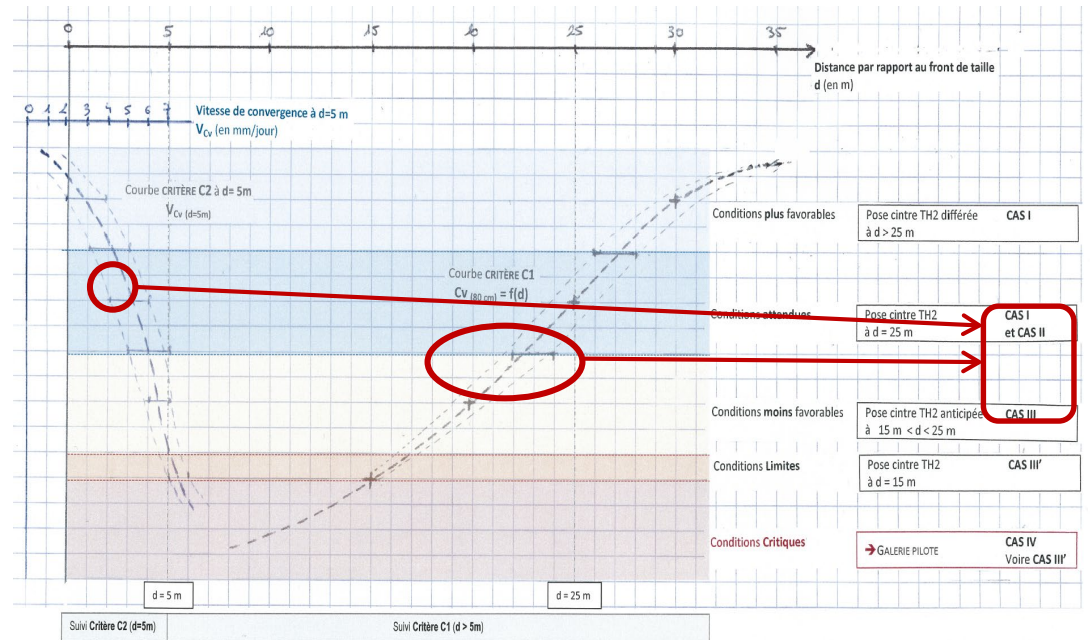
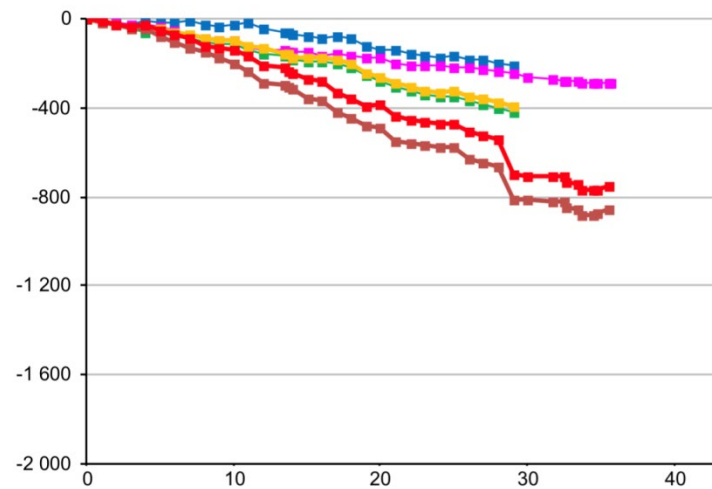
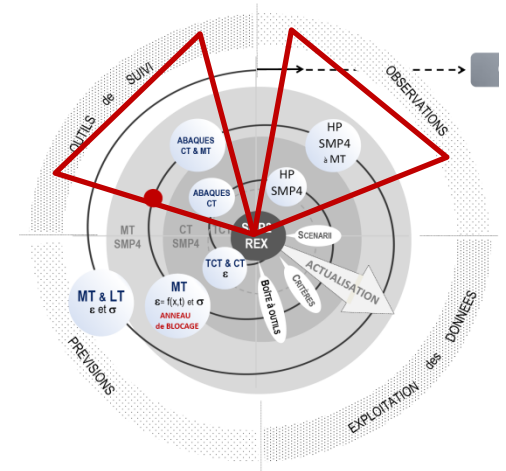
- Le comportement du terrain est représenté par un modèle visco-élasto-plastique anisotrope.
- + introduction d'un modèle de joint omniprésent (Ubiquitous joint) qui représente la direction des plans de faiblesse pour introduction l'anisotropie liée à la schistosité.



# EXPLOITATION - EXEMPLE PK 10+285



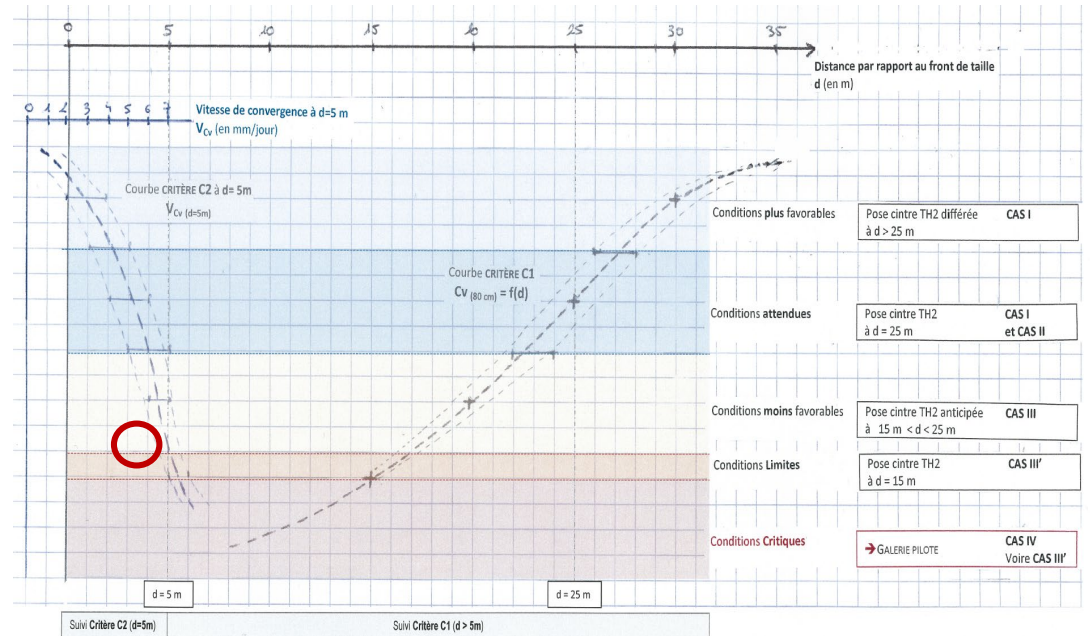
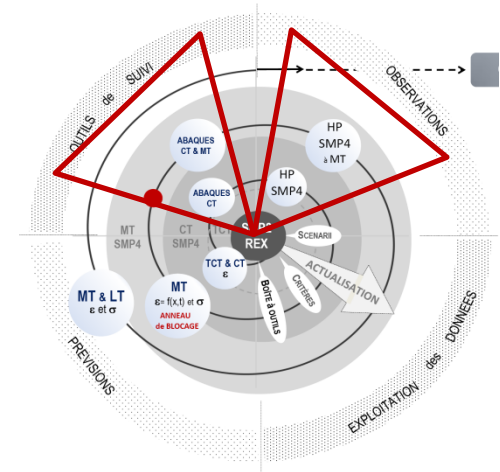
- Excavation Grande section.
- Cas Général: Cas II à Cas III



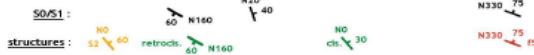
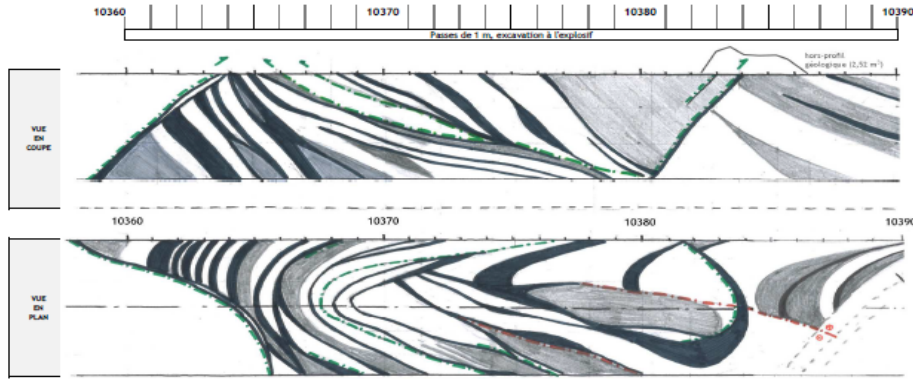
# EXPLOITATION - EXEMPLE PK 10+298



- Evolution rapide vers Scenarii Cas IV .
- Cas Particulier: **Passage Petite section**



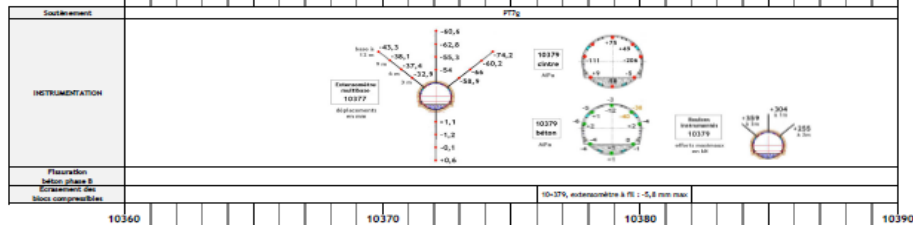
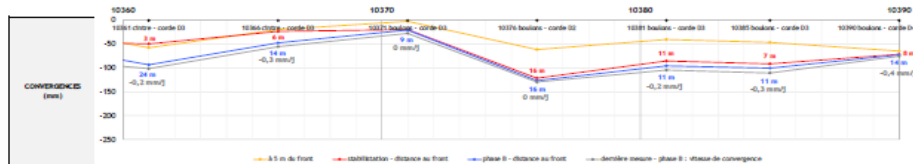
# EXPLOITATION - EXEMPLE PK 10+298



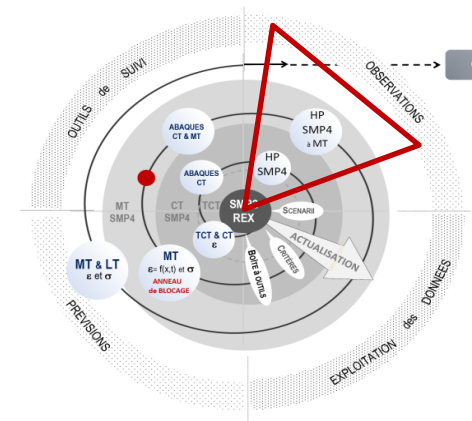
Discontinuités		S0/S1	
schistosités	S2	1	
schistosités	S1		
fractures	F1a		
	F1b		
	F1c		
	F1d		
sèches	S1a		
	S1b		

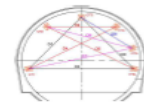
RMK	x 45	46	46	46	43	x	x	x	47	41	x	42	42	x	50	x	52	39	41	43	x	x	x	
SS	x 45-50	45-50	45-50	45-50	45-50	x <td>x <td>x <td>45-50</td> <td>38-40</td> <td>x <td>45-50</td> <td>40-45</td> <td>x <td>50-55</td> <td>x <td>45-55</td> <td>35-40</td> <td>35-40</td> <td>40-45</td> <td>x <td>x <td>x <td>x </td></td></td></td></td></td></td></td></td>	x <td>x <td>45-50</td> <td>38-40</td> <td>x <td>45-50</td> <td>40-45</td> <td>x <td>50-55</td> <td>x <td>45-55</td> <td>35-40</td> <td>35-40</td> <td>40-45</td> <td>x <td>x <td>x <td>x </td></td></td></td></td></td></td></td>	x <td>45-50</td> <td>38-40</td> <td>x <td>45-50</td> <td>40-45</td> <td>x <td>50-55</td> <td>x <td>45-55</td> <td>35-40</td> <td>35-40</td> <td>40-45</td> <td>x <td>x <td>x <td>x </td></td></td></td></td></td></td>	45-50	38-40	x <td>45-50</td> <td>40-45</td> <td>x <td>50-55</td> <td>x <td>45-55</td> <td>35-40</td> <td>35-40</td> <td>40-45</td> <td>x <td>x <td>x <td>x </td></td></td></td></td></td>	45-50	40-45	x <td>50-55</td> <td>x <td>45-55</td> <td>35-40</td> <td>35-40</td> <td>40-45</td> <td>x <td>x <td>x <td>x </td></td></td></td></td>	50-55	x <td>45-55</td> <td>35-40</td> <td>35-40</td> <td>40-45</td> <td>x <td>x <td>x <td>x </td></td></td></td>	45-55	35-40	35-40	40-45	x <td>x <td>x <td>x </td></td></td>	x <td>x <td>x </td></td>	x <td>x </td>	x



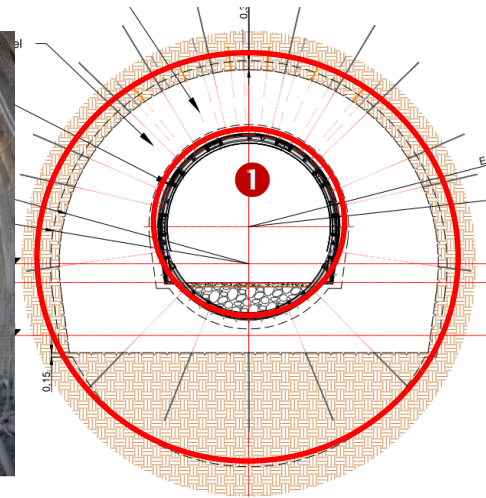
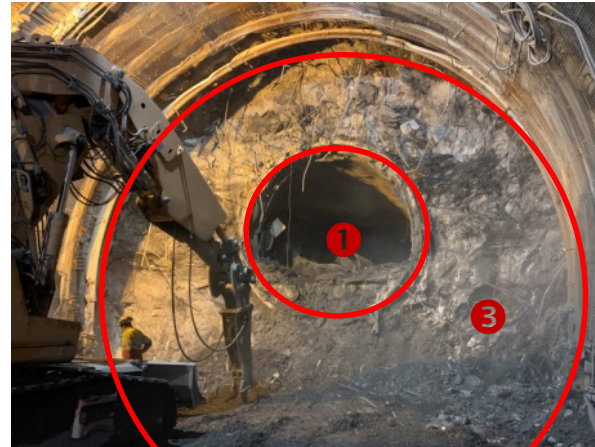
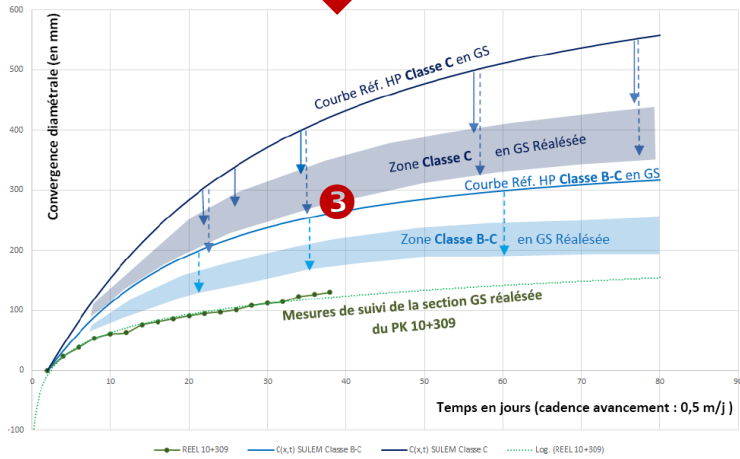
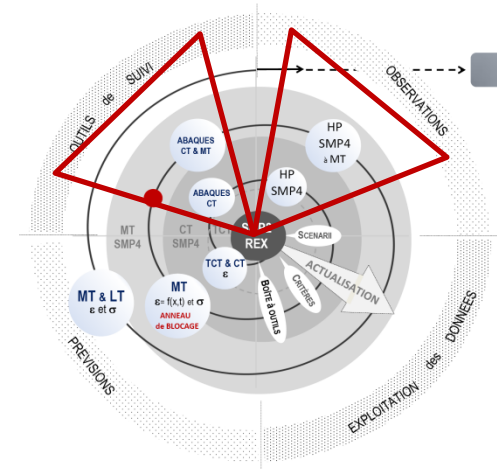
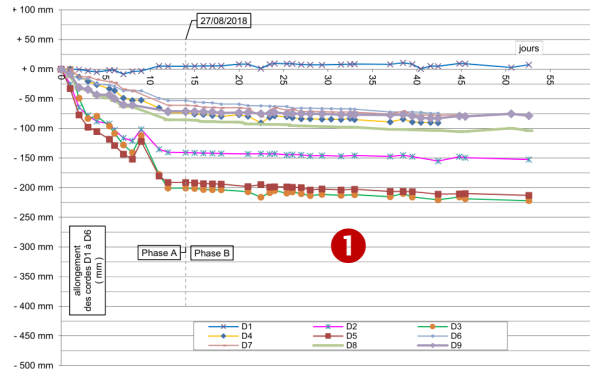
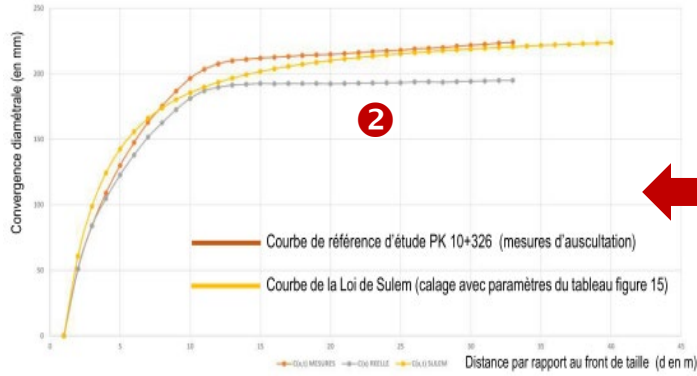
- schistes carbonneux - charbon
- schistes gréseux - pailles gréseuses
- matte-grès (pétrocalc ou pétroliques)
- zone de cisaillement délimitée (faute mineure)



- niveau de front :
- x photographies du front en perspective (équipe en poste)
- et photographie, et niveau



# EXPLOITATION - EXEMPLE PETITE SECTION PK 10+310





**CONCLUSIONS**

# Conclusions

**Capitalisation de la connaissance acquise au cours des différents chantiers de Saint-Martin-La-Porte**

**Continuité de la démarche retenue pour le creusement dans le Houiller Productif**

**Mise en œuvre d'une approche observationnelle spécifique compte-tenu des particularités**

**Evolution des outils de suivi en fonction de l'acquisition progressive des connaissances**