



DIRECTION DEPARTEMENTALE DE L'EQUIPEMENT
DE LA MARTINIQUE

Subdivision R/EGOA

**RECONNAISSANCES PRELIMINAIRES POUR LE
PROJET DE TUNNEL SOUS LE MORNE TSF
RN.9 - PENETRANTE EST DE FORT DE FRANCE**

D. CHASSAGNEUX
P. CHUIT
Collaboration P. CHALIVAT
J. PIRAUD, J. Ph. RANÇON

Juillet 1992
R35456 ANT 4S 92

BRGM - MARTINIQUE

km 0,9 route de Didier - B.P. 394 - 97258 Fort-de-France cedex
Tél.: 19 (596) 71.88.68 - Télécopieur : 19 (596) 63.30.46 - Télex : 912 354 MR

RECONNAISSANCES PRELIMINAIRES POUR LE PROJET DE TUNNEL SOUS
LE MORNE TSF RN.9 - PENETRANTE EST DE FORT DE FRANCE

R35456 ANT 4S 92

Juillet 1992

RESUME

La Subdivision R/EGOA de la Direction Départementale de l'Équipement Martinique, avec l'aide de son conseil le C.E.T.U. a confié au BRGM Antenne de Martinique la coordination sur le terrain et l'analyse des reconnaissances géotechniques préliminaires, destinées à examiner la faisabilité du projet de tunnel de la pénétrante est (400 m de long environ).

Cinq binômes "sondage destructif avec essais pressiométriques et enregistrement de paramètres / sondage carotté avec prises d'échantillons pour essais au laboratoire" ont été ainsi réalisés.

Les reconnaissances ont été difficiles, peu d'échantillons ont pu être prélevés et leur représentativité est à discuter, certains paramètres mesurés n'ont pas la fiabilité nécessaire (essais d'eau en particulier).

Une analyse géologique poussée a été menée et des essais spéciaux, au laboratoire, ont dû être mis en place.

Géologiquement les variations de faciès lithologiques sont importantes. Interstratification, hétérogénéité latérale et verticale, altération, hydrothermalisme, fracturation des unités lithologiques sont constatés. Des corrélations ont été faites entre les différents sondages et sept formations principales sont distinguées.

Des tableaux synthétiques rendent compte des différents paramètres géotechniques acquis pour chacune de ces formations, avec classifications correspondantes ; les valeurs pressiométriques sont dispersées. Les matériaux rocheux intéressés par le projet ont des caractéristiques globalement faibles.

Le tracé Nord a été particulièrement examiné. L'ouvrage futur recoupera les zones de battement de nappe ; des argiles potentiellement gonflantes, la tenue des terrains, (soutènement important à prévoir presque partout), celle des têtes et les tassements de surface au vu du faible recouvrement sont les autres difficultés principales du projet.

Par D. CHASSAGNEUX et P. CHUIT

Avec la collaboration de P. CHALIVAT, J. PIRAUD, J.Ph. RANÇON

TABLE DES MATIERES

1. CADRE DU PROJET

2. SITUATION GEOGRAPHIQUE

3. CONTEXTE GEOLOGIQUE

3.1. Rappel géologique

3.2. Le morne TSF

3.3. Cadre structural

3.4. Aléa sismique

4. DEFINITION DE LA CAMPAGNE DE RECONNAISSANCES

5. REALISATION DE LA CAMPAGNE DE RECONNAISSANCE

5.1. Implantations

5.2. Organisation des reconnaissances

5.3. Déroulement de la campagne

5.3.1 - Difficultés liées du terrain

5.3.2 - Difficultés propres à l'entreprise

5.3.3 - Réactions et adaptations

a) à court terme

b) à long terme

6. RESULTATS

6.1. Lithologie

6.2. Sondages avec essais pressiométriques

6.3. Essais de perméabilité in situ

6.4. Essais en laboratoire

6.5. Enregistrement des paramètres de forage

7. INTERPRETATION

7.1. Géologie

7.2. Hydrogéologie

7.3. Caractéristiques géotechniques

7.4. Classification

8. APPORT DES RESULTATS DE LA RECONNAISSANCE

8.1. Deux tracés possibles

8.2. Approche sommaire de la méthode d'exécution du tunnel

8.2.1 - Abattage des terrains

8.2.2 - Tenue des terrains

9. CONCLUSIONS

FIGURES DANS LE TEXTE

Figure 1 : Plan de situation à 1/25.000

Figure 2 : Tracé de la pénétrante Est de Fort de France à 1/20.000

Figure 3 : Implantation des deux tracés de l'ouvrage à 1/20 00

Figure 4 : Extrait de la carte géologique de la Martinique à 1/50.000

Figure 5 : Tracé de la faille de Chateauboeuf à 1/20.000 - Extrait du rapport BRGM : "Evaluation de l'aléa sismique sur l'île de la Martinique - Région Martinique / BRGM"

Figure 6 : Implantation des reconnaissances à 1/2800

Figure 7 : Corrélations lithologiques entre sondages carottés

Figure 8a: Diagramme de classification pour le mode d'abattage des terrains

Figure 8b: Diagramme de classification pour la tenue des terrains

TABLEAUX DANS LE TEXTE

Tableau 1 : Synthèse des essais en laboratoire

Tableau 2 : Séquence lithostratigraphique déduite des sondages carottés ; du plus récent au plus ancien : 1 à 7

Tableau 3 : Cotes piézométriques - fluctuation le long du tracé du tunnel

Tableau 4 : Principaux paramètres géomécaniques des 7 formations principales

Tableau 5 : Caractérisation des discontinuités et altérabilité des 7 formations principales - Analyse visuelle

Tableau 6 : Classification géomécanique de BENIAWSKI - coulées d'andésite

Tableau 7 : Classification AFTES - coulées d'andésite

ANNEXES JOINTES AU RAPPORT

Annexe 1 : Résultats des essais pressiométriques	4S. ANT. 7072 n° 1 à 5
Annexe 2 : Résultats des essais de perméabilité in situ	4S. ANT. 7073 n° 1 à 3
Annexe 3 : Résultats des essais en laboratoire	
3.1- Description des échantillons par le laboratoire	4S. ANT. 7074 n° 1 à 4
3.2- Essais granulométriques	4S. ANT. 7075 n° 1 à 10
3.3- Essais de cisaillement CD	4S. ANT. 7076 n° 1 à 8
3.4- Essais triaxiaux UU	4S. ANT. 7077 n° 1 à 5
3.5- Essais de compression uniaxiale, avec mesure de module et de la vitesse des ondes	4S. ANT. 7078 n° 1 à 10
3.6- Essais d'abrasivité (CERCHAR)	4S. ANT. 7079
3.7- Essais de diffractométrie aux rayons X pour détermination minéralogique d'échantillons argileux	4S. ANT. 7080 n° 1 à 2
Annexe 4 : Résultats des enregistrements de paramètres	4S. ANT. 7081 n° 1 à 13
Annexe 5 : Classification de BENIAWSKI	4S. ANT. 7082
Annexe 6 : Classification AFTES	4S. ANT. 7083 n° 1 à 10

- Annexe 7 : Photographies des carottes
Logs stratigraphiques, localisation des échantil-
lons, indications géomécaniques et AFTES 4S. ANT. 7084
n° 1 à 18
- Annexe 8 : Coupe synthétique simplifiée du tracé Nord du
tunnel 4S. ANT. 7085
échelle des X : 1/1000 - échelle des Y : 1/500

1. CADRE DU PROJET

Le trafic provenant actuellement de l'Est de Fort de France pénètre dans la ville par l'autoroute et se scinde en deux axes principaux :

la route de Sainte-Thérèse ;
la rocade de Fort de France.

L'axe de Ste Thérèse est chargé, il est sous-dimensionné pour ce trafic.

Un nouvel axe est programmé : la pénétrante est qui reliera l'autoroute (échangeur de chateauboeuf) au centre ville (échangeur du Port de commerce). Une partie du tracé est déjà réalisé (cf. figure 1 et figure 2).

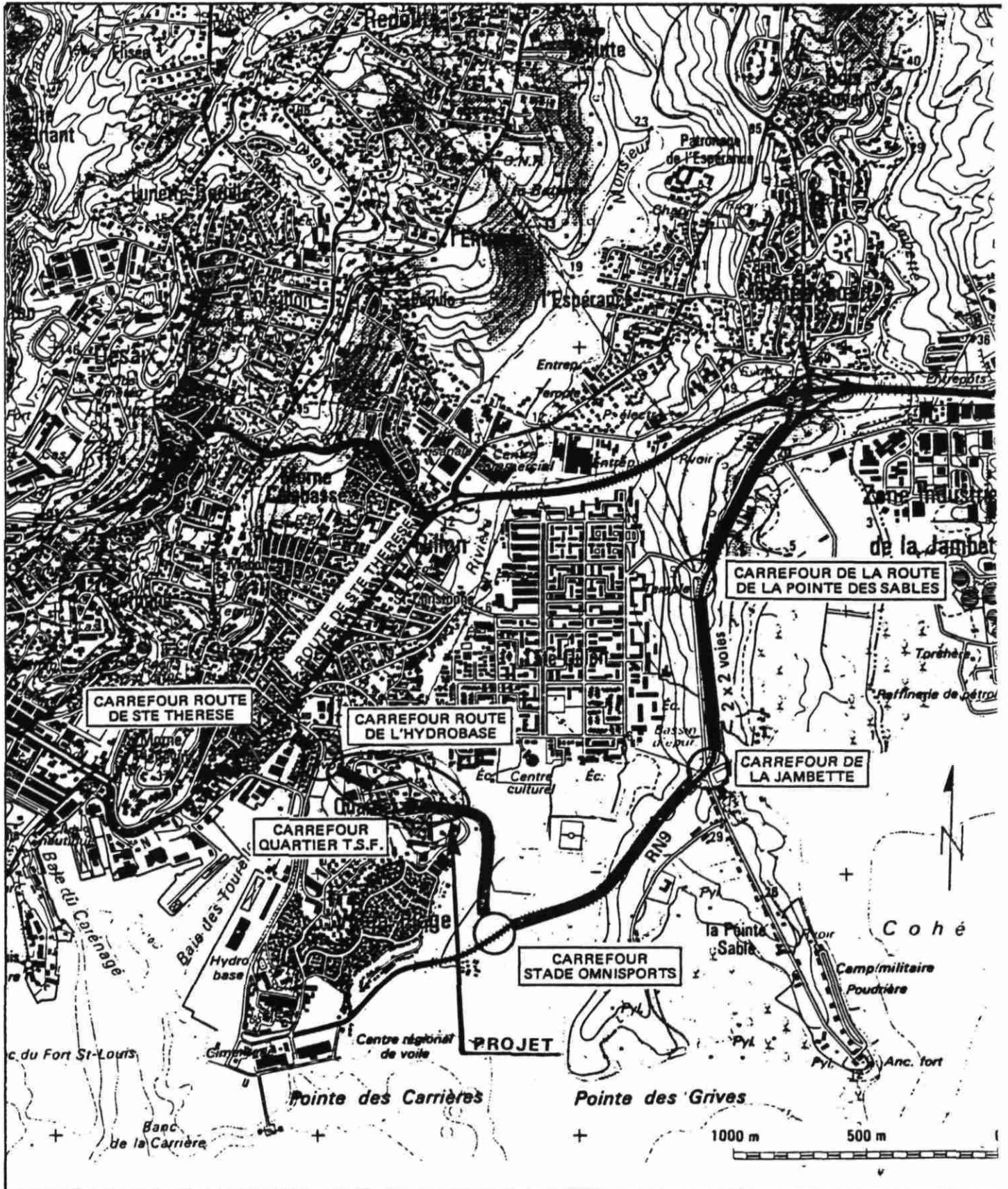
Le long du parcours de cette nouvelle voie, un tunnel est prévu sous le morne TSF. La D.D.E. et son Conseil, le C.E.T.U, ont sollicité pour cela l'agence Antilles du BRGM par ordre de service n° 824 et 13 du marché 89920. Il s'agit de coordonner et analyser les reconnaissances préliminaires nécessaires à l'examen géotechnique des possibilités de réaliser ce passage en tunnel, selon deux tracés qui diffèrent par leur moitié Est.

La longueur estimée du tunnel est de l'ordre de 400 m.

Figure 1 : Plan de situation à 1/25.000



Figure 2 : Tracé de la pénétrante Est de Fort de France à 1/20.000



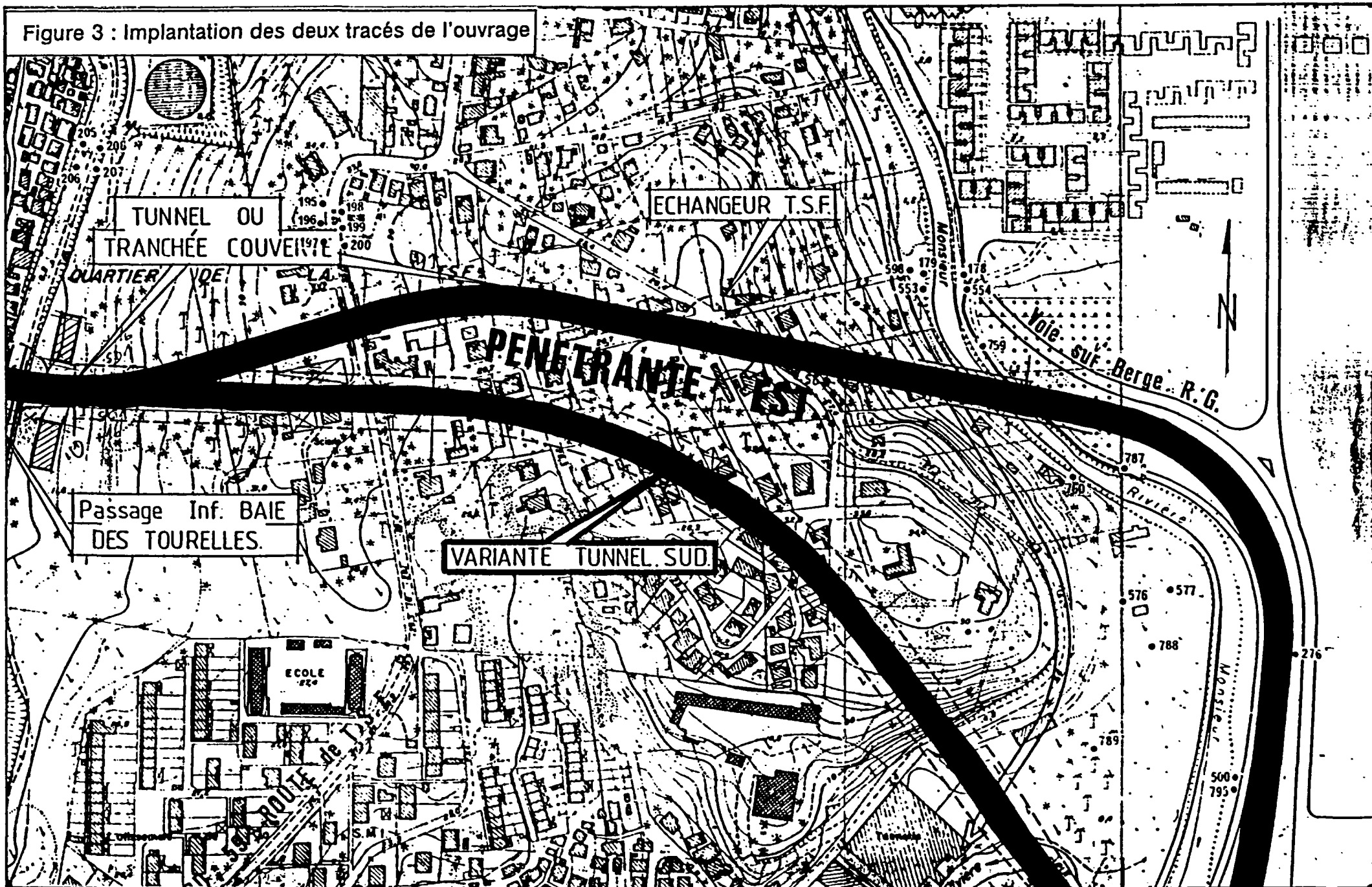
2. SITUATION GEOGRAPHIQUE

L'implantation géographique de l'ouvrage apparaît sur la figure 3.

Les deux tracés du tunnel traversent un morne d'orientation Nord-sud : le morne TSF. Les flancs du morne présentent une pente régulière, à l'Ouest de 20 à 30 %, à l'Est plus élevée, de l'ordre de 50 % en moyenne. La zone sommitale est sub-horizontale, cotée à + 30 m NGM environ.

L'extrémité ouest de ce tunnel se situerait à la cote + 3 m NGM au lieu dit des Tourelles. L'extrémité Est, à la cote + 9 / 10 m NGM, se situe à proximité de la rivière Monsieur, au Sud de la cité Dillon.

Figure 3 : Implantation des deux tracés de l'ouvrage



3. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Il convient de consulter le rapport BRGM 89 MTQ 182 qui constitue une étude bibliographique du secteur.

3.1 - RAPPEL GEOLOGIQUE : chaîne volcanique sous-marine du Vauclin - Pitault

Après les prémices aquitaniens et surtout burdigaliens (série de Ste Anne), une grande structure volcanique commence son édification sur la retombée occidentale et entre les deux paléo-îles du complexe de base oligocène : la chaîne volcanique sous-marine du Vauclin - Pitault. Pendant plusieurs millions d'années vont alterner phases volcaniques et périodes de sédimentation calcaire. Cette chaîne affleure du Marin, au Sud, jusqu'aux contreforts méridionaux et orientaux du morne Jacob, au Nord.

Au niveau de Fort de France, au quartier TSF, se trouve une coulée d'andésite à clinopyroxène débitée en petits prismes polygonaux ou en coussins de tailles décimétriques à plurimétriques, à peine ébauchés. D'après la carte géologique de la Martinique, la zone étudiée est constituée par une andésite peu porphyrique miocène (α m 2b) qui, sur critère radiochronologique, constitue le témoin le plus occidental de l'activité de la chaîne volcanique Vauclin - Pitault (figure 4).

3.2 - LE MORNE TSF

Géologiquement deux zones se distinguent :

- à l'Est, des coulées d'andésite (α m 2b) plus ou moins altérées et fortement fissurées ;
- à l'Ouest, des alluvions et colluvions du type tufs à blocs, des formations pon- ceuses...

Ces formations se sont mises en place par coulées successives dans un contexte fluvio-marin.

Des paléovallées chenalisaient les différentes coulées, reprises ensuite par le réseau hydrographique. Ce réseau créait de nouvelles dépressions dans lesquelles les "coulées" suivantes se mettaient en place.

Ce mode de dépôt se traduit par une très grande variation latérale et verticale des faciès.

3.3 - CADRE STRUCTURAL : la faille de Chateauboeuf

La zone centrale de l'île de la Martinique est structurée en horst et grabens, le principal graben correspondant à la zone morphologiquement déprimée du Lamentin, en bordure de laquelle est située la ville de Fort de France.

Au Nord du quartier TSF, la faille de Chateauboeuf met en contact des formations miocènes (compartiment nord) avec des tuffites pliocènes (compartiment sud) (figure 4).

Sur le terrain, la faille se traduit par une fissuration et une altération hydrothermale importante : fragmentation des éléments de lave favorisant les circulations des fluides hydrothermaux qui altèrent les matériaux.

3.4 - ALEA SISMIQUE

La Martinique est classée en zone III des règles parasismiques de construction actuellement en vigueur (PS 69/82).

Un double problème se pose à l'égard de la faille de Chateauboeuf et de son influence sur le projet du tunnel :

- tracé réel de la faille par rapport à l'emprise du projet ;
- sa classification en termes d'activité tectonique et sismique.

L'état actuel des connaissances sur la sismicité en Martinique est synthétisé dans le document : "Etude et prévention du risque sismique aux Petites Antilles - Evaluation de l'aléa sismique sur l'île de la Martinique - Région Martinique / BRGM" (1991).

En fonction des données de terrain, le tracé de la faille est compris dans une bande, plus ou moins large, dite bande d'incertitude (cf. figure 5). Le tracé du tunnel est en dehors de cette bande. Cependant, des phénomènes connexes (fracturation secondaire, hydrothermalisme associé...) peuvent être rencontrés.

Les données recueillies sur la sismicité historique sont trop imprécises et trop partielles pour permettre d'établir s'il s'agit ou non d'une faille sismiquement active.

Figure 4 : Extrait de la carte géologique de la Martinique à 1/50.000

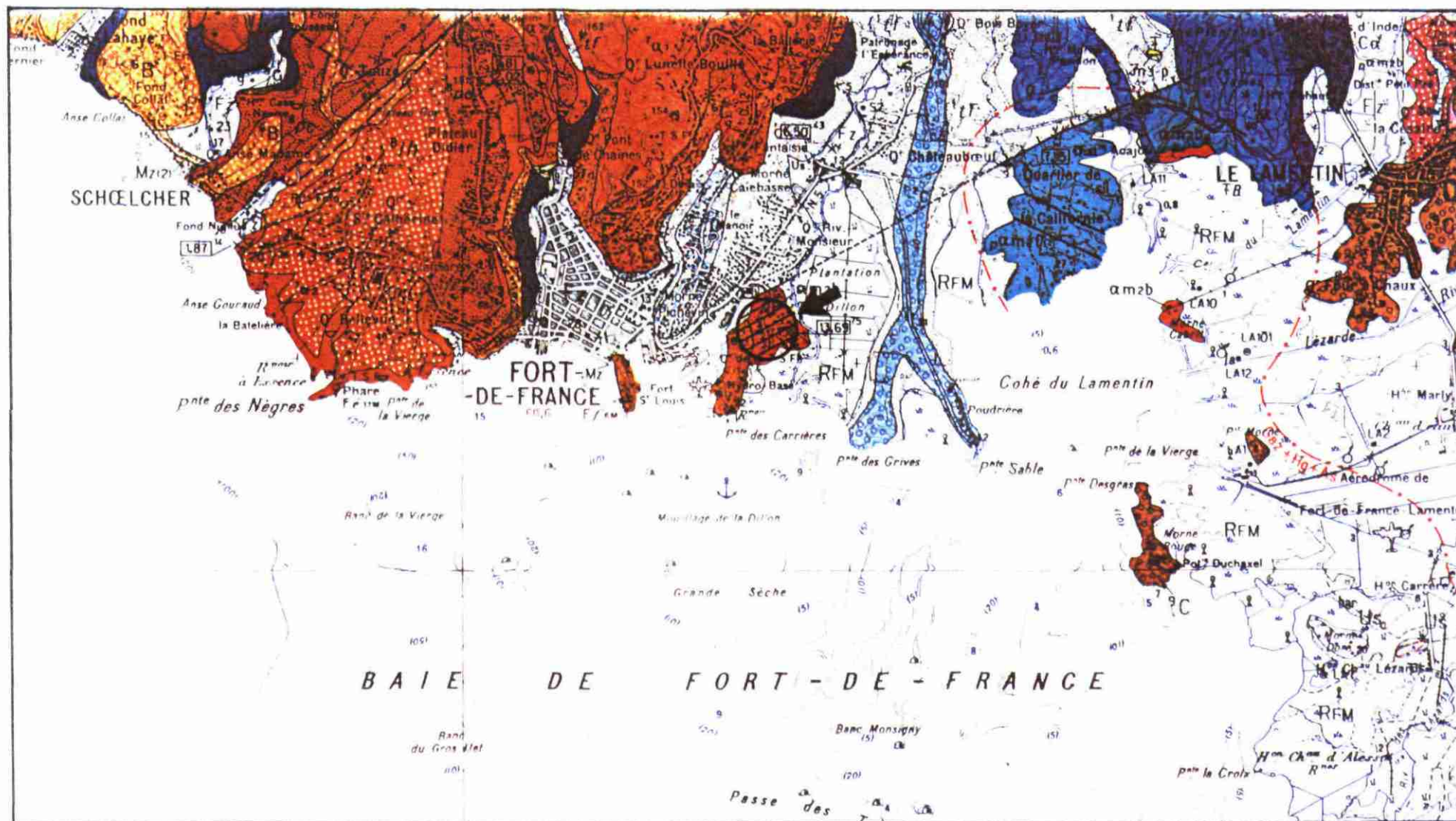
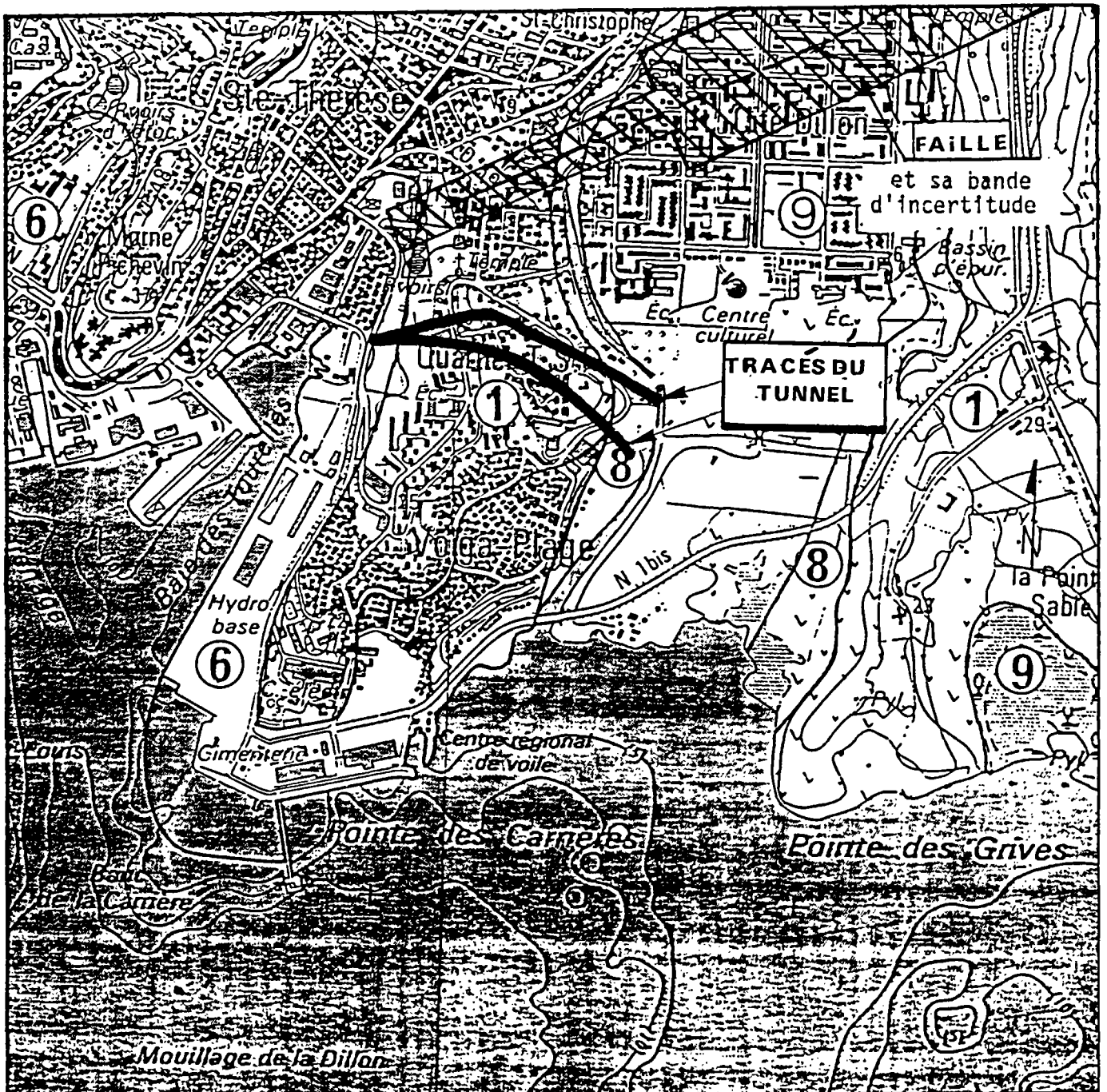


Figure 5 : Tracé de la faille de Chateauboeuf - Extrait du rapport BRGM :
"Evaluation de l'aléa sismique sur l'île de la Martinique - Région
Martinique / BRGM"



4. DEFINITION DE LA CAMPAGNE DE RECONNAISSANCES

Le but de la campagne de reconnaissances était double :

- identifier la nature et l'état des séries rencontrés sur le tracé du tunnel ;
- caractériser leurs propriétés physiques et mécaniques à partir d'essais in situ et en laboratoire.

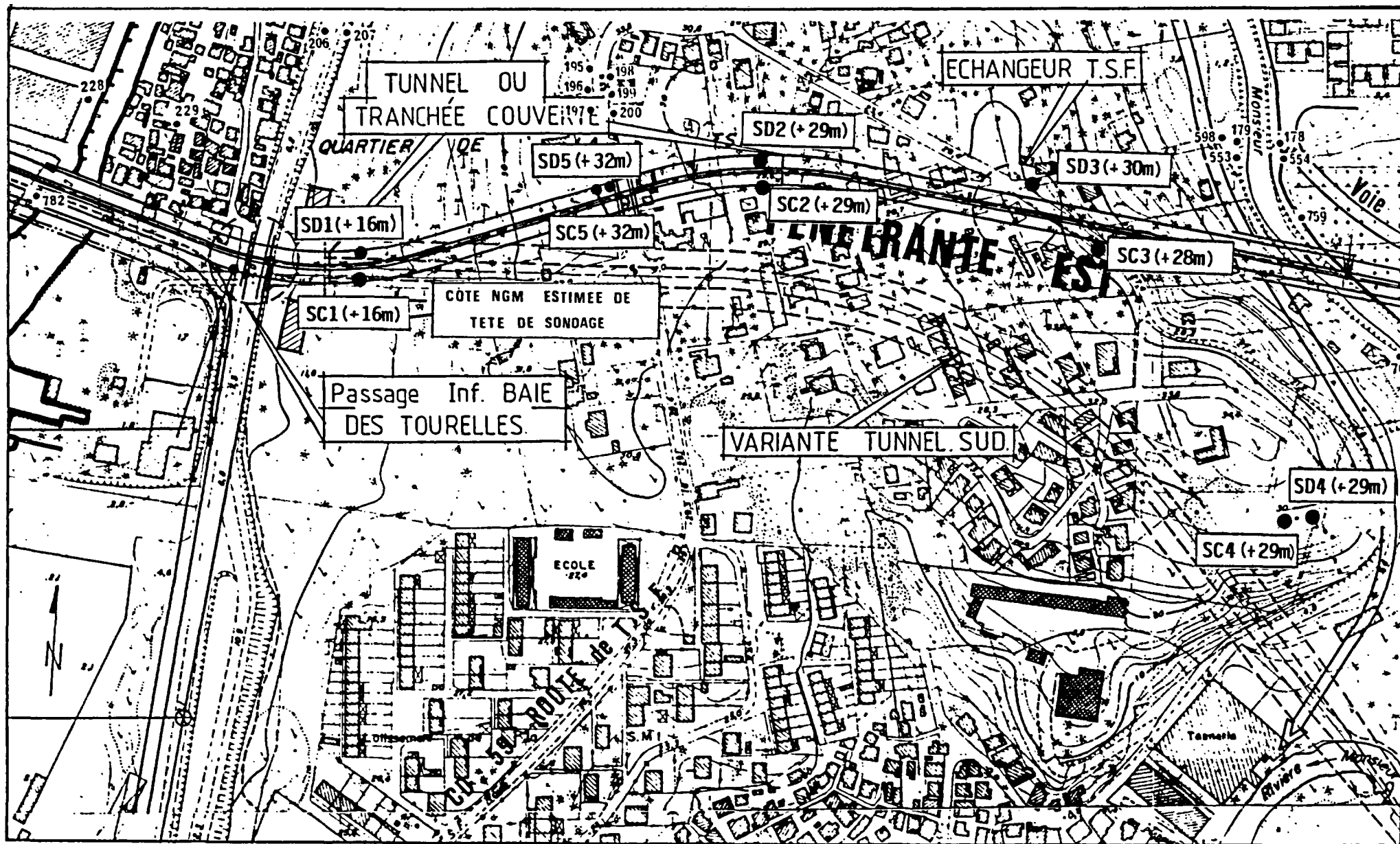
Par ailleurs, les données hydrauliques (mesures de perméabilité, venues d'eau, suivi piézométrique dans le temps) constituaient des paramètres importants à acquérir.

Initialement, il était prévu :

- 4 sondages carottés jusqu'à la cote + 5 m NGM (cote fixée par le C.E.T.U.) avec prélèvement de 27 échantillons pour analyses en laboratoire des propriétés physiques et mécaniques ; la possibilité d'utilisation de carottier double et triple enveloppe - MAZIER - avait été demandée par le BRGM ;
- 4 sondages destructifs avec enregistrement des paramètres de forage et essais pressiométriques tous les mètres, en jumelage avec les carottes ;
- des essais d'eau type Lefranc ou Lugeon dans les sondages carottés ;
- d'équiper de piézomètres les sondages carottés.

L'implantation de ces sondages est représentée en figure 6.

Figure 6 : Implantation des reconnaissances



5. REALISATION DE LA CAMPAGNE DE RECONNAISSANCE

Il s'agit ici, notamment, de relater les difficultés particulières rencontrées et leurs incidences sur les résultats ou le contenu de l'étude. Chaque point technique spécifique, si nécessaire, est par ailleurs approfondi dans les parties résultats et interprétation correspondantes (paragraphe 6 et 7).

5.1 - IMPLANTATION

La D.D.E. et le C.E.T.U. ont désigné les secteurs "Tourelles", "central TSF", "Dillon Nord" et "Dillon Sud" comme sièges des 4 jumelages carottés / pressiomètres. Ces implantations théoriques ont du évidemment être adaptées aux contraintes physiques du site (notamment habitat relativement dense, réseaux, autorisations des propriétaires, sécurité des usagers, impératifs propres à l'entreprise de sondages...etc).

Sur le terrain, le BRGM a assuré la coordination entre les différents intervenants et a rendu compte par écrit, régulièrement, des adaptations à réaliser. Ainsi, par exemple, sur le site "Dillon Nord", des contraintes de place et de sécurité ont empêché la réalisation proche du sondage carotté et du sondage destructif qui l'accompagne (environ 60 m de distance). Dans tous les cas, le début de foration était conditionné par l'aval du client quant aux adaptations envisagées.

Ces adaptations, compte tenu de la topographie du secteur ont quelquefois conduit à de légères modifications des longueurs de sondages pour respecter la cote basse à atteindre (fixée par le C.E.T.U.) : + 5 m NGM. Un levé X, Y, Z définitif, à la charge du client, s'avérait d'autant plus nécessaire, pour chaque sondage. A notre connaissance, il n'y en a pas eu à ce jour.

5.2 - ORGANISATION DES RECONNAISSANCES

Au niveau tâches, l'ensemble des opérations de forage (carottage ou destructif), d'essais (pressiométriques ou essais d'eau), de mesures (piézométriques en cours de sondages, enregistrement de paramètres) relevaient de l'entreprise SIF BACHY.

Pour la seule partie sondages, la mission du BRGM consistait en un suivi simple comportant :

- coordination entre les intervenants, notamment pour adapter les implantations théoriques ;
- compte rendus d'évolution à la D.D.E. (et/ou C.E.T.U. si nécessaire) ;
- orientations en fonction de l'avancée (pour la prise d'échantillons par exemple) ;
- vérification de la conformité générale des essais menés (et non pas suivi permanent des essais) ;
- vérification des cotes atteintes en fin de sondage vis à vis du programme préalablement défini ;
- dépouillement des essais d'après les fiches techniques de l'entreprise.

5.3 - DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE

Les comptes rendus BRGM ont mis notamment en évidence que l'avancée des reconnaissances rencontrait des difficultés et que certains de ses objectifs seraient difficilement atteints. La télécopie DC/043/90, qui fait suite à de réguliers échanges téléphoniques, en fait une sorte de constat.

Ces difficultés sont essentiellement de deux ordres.

5.3.1 - Difficultés liées au terrain

Elles concernent les possibilités de prélèvement et la fracturation.

L'extrême hétérogénéité du secteur, tant à l'échelle de l'affleurement qu'à celle de l'échantillon (souvent composé d'éléments rocheux et d'une matrice, plus ou moins liés), a rendu les prélèvements très difficiles. L'entreprise a dû trouver sur le terrain le système optimal, aboutissant à la meilleure récupération possible avec les conditions de prélèvement les plus satisfaisantes, ce qui n'est pas évident. Pour les matériaux de type blocs de petites dimensions, aucun système d'échantillonnage efficace n'est envisageable. Seuls les terrains les plus homogènes ont pu être prélevés mais souvent avec remaniement. Les zones rocheuses, très fracturées ou fissurées, n'avaient souvent pas les caractéristiques géométriques habituellement requises pour essais (longueur, élançement...). De longues portions de sondage (notamment SC.3 et SC.4) n'ont

produit aucun échantillon pour test. L'indice RQD (Rock Quality Designation) est dans la plupart des cas égal à 0 %.

Les conséquences techniques ont été :

- retard d'avancement ;
- déficit important d'échantillons à tester ;
- essais difficiles à réaliser vu le remaniement et les quantités insuffisantes de matériaux.

De manière plus générale, la représentativité des échantillons se pose vis à vis de formations si hétérogènes.

5.3.2 - Difficultés propres à l'entreprise

■ Il était prévu au départ que les enregistrements des paramètres de forage auraient lieu en premier, ce qui, avec les résultats pressiométriques, devait notamment orienter les prises d'échantillons des carottages. Cependant, suite à des pannes répétées du système d'acquisition, cela n'a pratiquement jamais été possible.

■ L'hétérogénéité des terrains constatée (roches très fracturées, sables compactés, éléments rocheux dans une matrice terrigène ou argileuse... etc) a compliqué la tâche des sondeurs. Souvent, lors des essais d'eau les absorptions constatées ont été réellement très faibles. Cela a induit des essais longs et moins précis.

Cependant, il a été constaté :

- un manque de préparation du matériel avant le lancement des opérations. Le matériel d'essai LUGEON n'était pas opérationnel pendant une bonne partie du chantier. En SC.4, par exemple, certains essais LEFRANC ne convenaient pas au matériau testé. C'est seulement sur le SC.5, sondage supplémentaire, que de tels essais ont pu être réalisés.

- un manque de rigueur quant à la notation des paramètres d'essai. Tour à tour, il manque certaines conditions sur les comptes-rendus : diamètre intérieur du tube ou de la poche, niveau d'eau avant l'essai, temps pris au chronomètre cumulés ou non, schéma précis de l'ensemble des tubes utilisés pour le calcul des pertes de charge, mode de foration utilisé...etc. Ceci est renforcé par le fait qu'à la fin des sondages aucune coupe technique digne de ce nom n'est fournie. Elle devrait comporter les différentes conditions régnant lors du forage : mode de foration, outils, diamètres, perte d'eau constatée, pourcentages de récupération... etc.

- quelques lacunes particulières : défaut de saturation dans des formations hors nappe.

5 3.3 - Réactions et adaptations

La difficulté du terrain et les points évoqués précédemment ont conduit à un déficit d'échantillons à tester et à une interprétation particulièrement ardue des essais d'eau dont la fiabilité reste limitée.

a) A court terme

Après en avoir averti le client, le BRGM a tenté de réduire l'incidence de ces difficultés sur les résultats de l'étude.

Il fallait notamment assister l'entreprise dans le déroulement des essais d'eau. Ceci a été fait en allant au-delà des temps impartis au départ pour le suivi. C'était malheureusement difficile puisque les temps nécessaires à la résolution des problèmes d'implantation et à la coordination s'étaient avérés beaucoup plus lourds que prévu. Seul le SC.5 a bénéficié d'un suivi spécifique, ses conditions contractuelles ayant été fixées ultérieurement.

Par ailleurs, ont été réalisés :

- une saturation systématique au préalable dans les zones non saturées de façon à arriver à un palier ou une évolution proportionnelle des mesures ;
- la répétition de plusieurs essais successifs sur une seule passe, d'essais à charge constante et à charge variable, pour obtenir la perméabilité par différents moyens ;
- une sensibilisation aux problèmes de carottage en terrain difficile aboutissant à la venue en Martinique d'un spécialiste métropolitain de l'entreprise ;
- une journée de formation, par les ingénieurs BRGM, sur les essais d'eau au responsable de sondages de l'entreprise, avec remise de documents écrits ;
- des essais Lugeon dès que le matériel était opérationnel (sondage SC.5).

■ Compte tenu de l'hétérogénéité globale, un couple de sondages supplémentaires a été proposé. Il a permis de préciser le profil en long, réduire le déficit d'échantillons, réaliser des essais Lugeon. Il était par ailleurs justifié par la seule recherche de l'interface entre les formations géologiques de l'est et de l'ouest du projet.

■ Au niveau des essais au laboratoire des adaptations et/ou essais particuliers ont été utilisés de façon à tirer le meilleur parti des échantillons prélevés. On peut citer entre autres :

- certains écrasements ont été réalisés sur éprouvettes intactes au diamètre du carottage et simplement tronçonnées ;

- il était prévu au départ des essais triaxiaux sur échantillons consolidés non drainés avec mesure de la pression interstitielle mais il fut très souvent impossible d'obtenir des éprouvettes correctes et il n'y avait pas assez de matériau. Aussi, ont été adoptés :

. pour la détermination, des paramètres C_{uu} , ϕ_{uu} , des triaxiaux de type Canadien. Cela consiste à mettre en cellule une seule éprouvette et à appliquer sur celle-ci les quatre contraintes de confinement successives, chaque contrainte étant appliquée juste avant la rupture ;

. pour les mesures de caractéristiques C' , ϕ' , ce type d'essai ne convient pas et il est nécessaire de disposer impérativement d'au moins trois éprouvettes. Comme cela est souvent impossible et que les caractéristiques mesurées seront celles de la matrice, une reconstitution des matériaux, en éliminant les > 5 mm et en recomplantant aux poids volumique et teneurs en eau naturelles a été appliquée.

b) A long terme

L'expérience a démontré qu'une coordination étroite entre l'entreprise et le BRGM s'avérait indispensable pour la réalisation des essais d'eau. Elle devrait consister en :

- une réflexion générale, préalable, visant à déterminer des moyens adaptés aux faibles perméabilités et aux sols hétérogènes, essais LEFRANC par absorption, essais LUGEON, au pressiomètre, etc...?

- une préparation du matériel en commun avec l'entreprise. Vérification systématique des moyens envisagés.

- une réalisation des mesures par le BRGM avec adaptation éventuelle du mode opératoire initialement prévu.

Enfin, une coupe technique précise et complète devra être fourni par l'entreprise.

Bien évidemment, le C.E.T.U. devrait participer, en amont, à la définition des moyens à utiliser, en liaison avec le BRGM.

6. RESULTATS

6.1 - LITHOLOGIE

La coupe lithologique de chaque sondage carotté est décrite avec précision en annexe 7. Les photographies des carottes et les logs synthétiques, y sont consignés également. Le pourcentage de récupération estimé est en général faible ; il n'atteint localement 100 % que dans certaines formations homogènes et cohérentes, telles que les andésites massives rencontrées dans le sondage SC.3.

6.2 - SONDAGES AVEC ESSAIS PRESSIOMETRIQUES

Les résultats des essais figurent en annexe 1. Une synthèse a été faite à partir de 110 essais concernant l'ensemble des catégories de terrain. Cette synthèse est reportée dans le tableau 4 du paragraphe 7.3.

De manière générale, la grande variabilité géométrique des formations géologiques en terrain volcanique impose la prudence dans les corrélations entre sondages voisins. Cette prudence doit être particulière ici compte tenu des variations constatées localement.

6.3 - ESSAIS DE PERMEABILITE IN SITU

34 essais de perméabilités ont été réalisés entre Novembre 1989 et Mars 1990. 28 sont interprétables, 25 fournissent des valeurs de perméabilité, 12 ont été très difficiles d'interprétation pour les raisons évoquées au paragraphe 5, 2 sont issus de Lugeon ; L'ensemble des résultats figure en annexe 2.

Les valeurs sont très dispersées notamment en raison de la grande diversité des faciès et de l'hétérogénéité géologique et granulométrique des formations. Toutefois, il semble que les perméabilités mesurées soient très, voire anormalement faibles. En général, par exemple la perméabilité des sables s'étale de 10^{-6} m/s (pour des sables très argileux) à 10^{-3} m/s (pour des sables

propres). Cependant, afin de tester des formations qui restent globalement assez peu perméables, il conviendra d'envisager, par exemple :

- d'utiliser plus systématiquement l'essai LUGEON ;
- d'employer d'autres appareillages.

L'acquisition de nombreuses valeurs de perméabilité fiables sera l'un des objectifs principaux de la campagne à venir. Ce point nécessite à lui seul une réflexion approfondie.

6.4 - ESSAIS EN LABORATOIRE

Dix échantillons ont été prélevés :

- soit par APM : échantillons "intacts" sous gaine, pris par battage d'un carottier, ce qui sous-entend une consistance réduite (sols peu raides)
- soit par CP : carotte paraffinée, correspondant à des tronçons prélevés dans les caisses lors du carottage et paraffinés ultérieurement. Le remaniement est plus ou moins limité selon le type d'outil utilisé.

Ils ont fait l'objet des essais suivants, au laboratoire central du BRGM à Orléans :

- mesure de la teneur en eau w , de la densité sèche γ_d et de la densité apparente γ_h , limites d'atterberg (WL, IP), granulométrie ;
- mesure de la résistance à la compression simple R_c avec détermination du module de déformation E , mesure de la célérité des ondes longitudinales V_L ;
- mesure des caractéristiques mécaniques consolidées drainées à la boîte de Casagrande ;
- mesure des caractéristiques non consolidées non drainées à l'essai triaxial, souvent de type Canadien ;
- essais CERCHAR sur les échantillons rocheux ;
- essais de détermination minéralogique d'échantillons argileux par diffractométrie aux rayons X.

Les adaptations consécutives à la qualité des prélèvements sont décrites au paragraphe 5.3.3.

Les résultats figurent dans le tableau 1 suivant et les feuilles d'essais sont reportées en annexe 3. Une synthèse partielle figure dans le tableau 4 du paragraphe 7.3.

Remarques sur les résultats des essais en laboratoire

- Les densités γ_d sont faibles, qu'il s'agisse de "sables", de ponces ou d'andésites altérées ($\gamma_d \simeq 12$ à 13 KN/m^3) ce qui suppose une très forte porosité et une forte teneur en eau. Ces valeurs semblent faibles bien que déjà constatées aux Antilles où les roches sont soumises à une altération et argilisation importante.

- Un seul échantillon vraiment rocheux a été testé, il s'agit de l'andésite à 145 MPa du SC.4.

- Les analyses par diffractométrie aux rayons X montrent la présence d'interstratifiées (peu de smectite pure) avec des pourcentages de smectites majoritaires et des pourcentages globalement importants d'argiles potentiellement gonflantes (cf. annexe 3.7).

6.5 - ENREGISTREMENT DES PARAMETRES DE FORAGE

Compte tenu du déroulement de ces enregistrements, les feuilles d'essai sont livrées sans interprétation, en annexe 4.

ECHANTILLONS		TYPE DE PRELEVEMENT	W %	γ_d (KN/M3)	γ_h (KN/M3)	WL	IP
SC1	sables argileux alluvionnaires 5,7 / 6,3 m	CP	34	11,80	15,8		
	conglomérats fluviolatiles 7,2 / 7,5 m	APM	38,5	12,3	17,0	77	29
SC5	sables grossiers avec blocs 4,2 / 4,5 m	CP	48,1	12,6	18,6	89	51
	formation bréchique 11,2 / 11,5 m	CP	49,7			55	18
	ponces remaniées 12,7 / 13,0 m	CP	33	13	17,3		
	tuf ponceux 14,0 / 14,3 m	CP	37,8	12,3	16,9		
SC2	ponces remaniées 5,8 / 6,3 m	APM	48,6	12,2	18,1		
	ponces remaniées 10,7 / 11,2 m	APM	33,4	11,1	14,8	58	
	ponces remaniées 11,7 / 12,2 m	APM	50,8	10,7	16,2		
	andésites hydrothermalisée 20,1 / 20,5 m	APM	28,3	12,7	16,3		
SC3	andésite hydrothermalisée 2,0 / 2,5 m	APM	37,8	11,9	15,3	80	36
	andésite hydrothermalisée 5,0 / 5,5 m	APM	28,3	13,9	17,8		
SC4	andésite "massive" saine 6,0 / 6,2 m	tronçon de carotte					
	andésite hydrothermalisée 13,6 / 14,0 m	APM	18,4	17	20,1	76	44
	brèches andésitiques 14,8 / 15,0 m	APM	15,2	17,8	20,5	57	25

TABLEAU 1 :

Synthèse des essais en laboratoire

% <5 mm	% < 80 μ m	VL m/s	E (MPa)	Rc (MPa)	Cuu (KPa) Triaxial canadien	C' (KPa) PIC	ϕ' PIC	C' (KPa) residuel	ϕ' residuel
100	70				104 < <131	15	25	0	25
100	66	847	30,7	0,15					
65	44								
99	29	1130	250	1,33					
69	13	1095	23,5	0,18	42 < < 67				
		552	63,2	0,22					
100	84				66 < < 85	?	?	0	29
100	51	989	91,9	0,24					
100	57	728	?	0,05					
100	42	1204	25	0,06	29 < < 57	40	24	25	18
		5432	45761	145					
					54 < < 82	75	25	35	29
64	24	1268	29,5	0,07					

7. INTERPRETATION

7.1 - GEOLOGIE

Plusieurs informations sont fournies par les reconnaissances réalisées (sondages carottés) :

- les variations latérales de faciès lithologiques, entre les formations des différents sondages, sont nombreuses. Ce phénomène classique en terrain volcanique a été accentué, dans l'ensemble de l'agglomération de Fort de France, par la présence de paléovallées chenalisant les coulées volcaniques et mettant en jeu un réseau hydrographique remaniant les formations ;

- en coupe verticale, plusieurs formations sont interstratifiées, correspondant à des coulées d'andésite, des formations ponceuses et des niveaux alluvionnaires sableux ou conglomératiques ;

- les formations ponceuses, généralement remaniées sont essentiellement présentes dans les sondages SC.1, SC.5 et SC.2 alors que les sondages SC.3 et SC.4 recoupent principalement des coulées d'andésite qui peuvent être massives (bien que fissurées), bréchiques et/ou hydrothermalisées.

Les formations ponceuses sont situées, le plus souvent, au-dessus des andésites. Les niveaux alluvionnaires, marquant des périodes d'inactivité volcanique, sont interstratifiés à tous les niveaux de la colonne lithostratigraphique ;

- l'altération hydrothermale (fragmentation des éléments de lave et dépôts de matériaux hydrothermaux sur les plans de fissure) de certaines coulées doit probablement être imputée à l'importante faille NE-SW de Chateauboeuf, qui passe à quelques centaines de mètres au Nord du site.

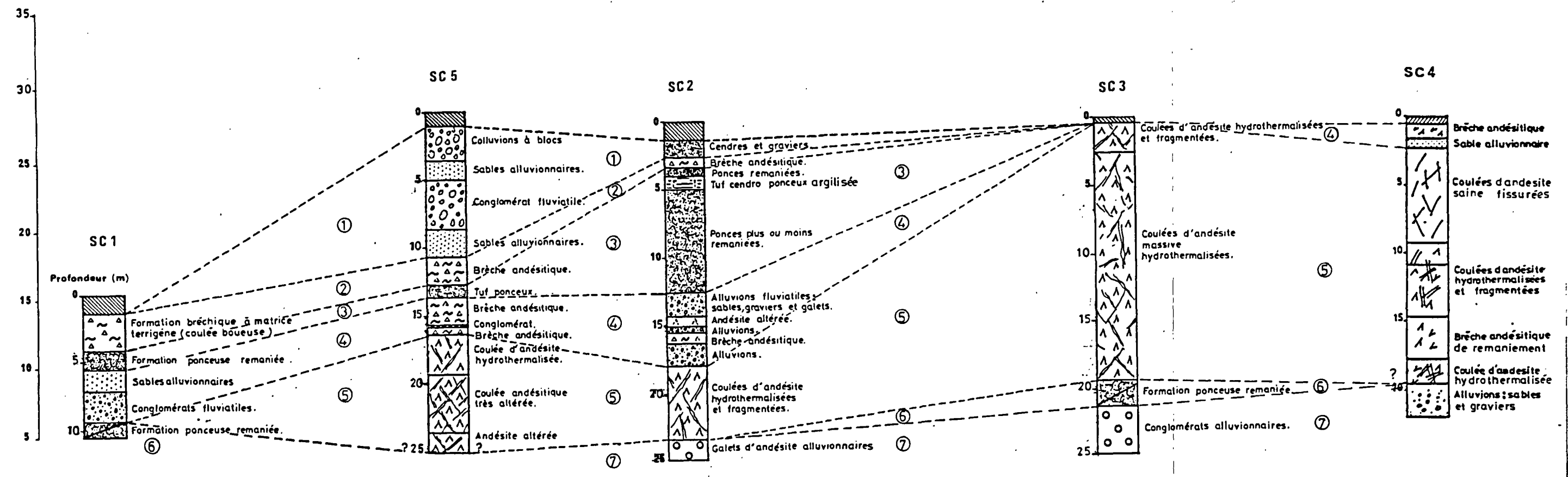
Cette faille a provoqué sur une large bande la fracturation de la roche et véhiculé les fluides hydrothermaux minéralisateurs.

En se basant sur la similitude de leur faciès, la plupart des formations géologiques recoupées par les sondages, ont été corrélées (figure 7 et tableau 2).

Les corrélations lithostratigraphiques effectuées, à partir de 5 sondages, ne prétendent toutefois pas donner une image fidèle de la configuration géométrique des terrains du sous-sol. Leur objet est de donner une indication quant à l'organisation spatiale des formations géologiques du secteur étudié.

Figure 7 : Corrélations lithologiques entre sondages carottés

ALTITUDE
en(m NGM)



N°	FORMATIONS GEOLOGIQUES	LITHOFACIES	LOCALISATION		
			SONDAGE	PROFONDEUR	COTE NGM ESTIME (m)
1	colluvions et alluvions fluviales	cendres et graviers colluvions à blocs cm à dm alluvions à blocs cm à dm conglomérats (blocs $\phi > 30$ cm) sables et alluvions	SC2	1.2 / 2.4 m	27.8 / 26.6
			SC5	0.0 / 3.4 m	30 / 26.6
			SC5	3.4 / 5.0 m	26.6 / 25.0
			SC5	5.0 / 8.4 m	25.0 / 21.6
			SC5	8.4 / 10.5 m	21.6 / 19.5
2	brèches à éléments andésitiques	coulée boueuse à matrice terrigène et blocs d'andésite cm à dm brèche andésitique (blocs d'andésite porphyriques dm) brèches andésitiques (blocs cm à dm)	SC1	1.2 / 4.0 m	14.8 / 12.0
			SC2	2.4 / 3.3 m	26.6 / 25.7
			SC5	10.5 / 12.7 m	19.5 / 17.3
3	formations ponceuses +/- remaniées	ponces remaniées ponces remaniées tuf cendro-ponceux argilisé ponces remaniées tuf ponceux	SC1	4.0 / 5.2 m	12.0 / 10.8
			SC2	3.3 / 4.0 m	25.7 / 25.0
			SC2	4.0 / 5.0 m	25.0 / 24.0
			SC2	5.0 / 12.5 m	24.0 / 16.5
			SC5	12.7 / 13.5 m	17.3 / 16.5
4	alluvions fluviales (sables, gravier, conglomérats) μ brèches andésitiques	sables et graviers conglomérats (blocs $\phi > 50$ cm) sables, graviers et galets blocs d'andésite altérée sables et graviers blocs d'andésite bréchifiée sables et graviers brèche andésitique conglomérat brèche andésitique : blocs sains cm à dm sables	SC1	5.2 / 7.0 m	10.8 / 9.0
			SC1	7.0 / 9.7 m	9.0 / 6.3
			SC2	12.5 / 14.4 m	16.5 / 14.6
			SC2	14.4 / 15.0 m	14.6 / 14.0
			SC2	15.0 / 15.5 m	14.0 / 13.5
			SC2	15.5 / 16.3 m	13.5 / 12.7
			SC2	16.3 / 18.0 m	12.7 / 11.0
			SC5	13.5 / 15.6 m	16.5 / 14.4
			SC5	15.6 / 15.8 m	14.4 / 14.2
			SC4	0.4 / 1.7 m	28.6 / 27.3
SC4	1.7 / 2.2 m	27.3 / 26.8			

tableau 2 : Séquence lithostratigraphique déduite des sondages carottés (1 à 7 : du plus récent au plus ancien)

N°	FORMATIONS GÉOLOGIQUES	LITHOFACIES	LOCALISATION		
			SONDAGE	PROFONDEUR	COTE NGM ESTIME (m)
5	coulées d'andésite	andésite altérée (argilisée)	SC2	18.0 / 20.6 m	11.0 / 8.4
		andésitique hydrothermalisée	SC2	20.6 / 23.4 m	8.4 / 5.6
		andésite bréchifiée et hydrothermalisée	SC3	0.3 / 2.5 m	27.7 / 25.5
		andésite massive hydrothermalisée	SC3	2.5 / 19.4 m	25.5 / 8.6
		andésite saine fissurée	SC4	2.2 / 9.2 m	26.8 / 19.8
		andésite hydrothermalisée	SC4	9.2 / 11.2 m	19.8 / 17.8
		andésite remaniée (éléments cm)	SC4	11.2 / 14.8 m	17.8 / 14.2
		éléments andésitiques cm emballés dans une matrice terrigène	SC4	14.8 / 17.7 m	14.2 / 11.3
		éléments cm à dm de lave hydrothermalisée	SC4	17.7 / 19.6 m	11.3 / 9.4
		andésite hydrothermalisée	SC5	16.3 / 19.2 m	13.7 / 10.8
		andésite vacuolaire hydrothermalisée (tout ou base de coulée)	SC5	19.2 / 23.5 m	10.8 / 6.5
	andésite vacuolaire très altérée	SC5	23.5 / 25.2	6.5 / 4.8	
6	formation ponceuse remaniée	à éléments mm à dm, argilisée avec éléments andésitiques mm à cm	SC1	9.7 / 10.0 m	6.3 / 6.0
			SC3	19.4 / 21.4 m	8.6 / 6.6
7	alluvion fluviales	galets d'andésite	SC2	23.4 / 25.0 m	5.6 / 4.0
		conglomérats	SC3	21.4 / 25.0 m	6.6 / 3.0
		sables grossiers et graviers	SC4	19.6 / 21.7 m	9.4 / 7.3

Sept formations principales ont été caractérisées (tableau 2).

Une coupe géologique du tracé Nord du tunnel a été établie sur la base des indications fournies par les sondages (annexe 8) avec comme principales formations rencontrées :

- A l'Ouest, des niveaux alluvionnaires (graviers et galets), des séquences de ponces remaniées et des formations bréchiques à matrice importante (type coulée boueuse) ;
- A 100 / 150 m environ de l'entrée ouest, la base du tunnel devrait rencontrer des coulées de lave andésitique, alors que le toit devrait se situer soit dans les formations alluvionnaires, ponceuses ou bréchiques, soit dans les laves andésitiques ;
- Vers 250 m environ de l'entrée ouest, le tracé devrait traverser en totalité les laves andésitiques.

Le long du tracé du tunnel, les différentes formations doivent se caractériser par :

- une hétérogénéité de faciès lithologique au sein d'une même formation ;
- d'importantes variations latérales et verticales des formations, liées au mode de dépôt ou d'écoulement dans des creux topographiques et à leur remaniement par le réseau hydrographique ;
- une fissuration importante des laves andésitiques (le refroidissement des coulées de lave induisant un diaclasage par rétraction thermique) ;
- une fracturation et d'importants dépôts hydrothermaux, en particulier au sein des laves andésitiques (attribuées à la proximité d'un accident majeur).

7.2 - HYDROGEOLOGIE

La présence d'eau dans les terrains traversés par les sondages est attestée par les résultats des mesures piézométriques (tableau 3).

Tableau 3 - Cotes piézométriques (m NGM)
Fluctuations le long du tracé du tunnel

	SC.1	SC.5	SC.2	SC.3	SC.4
Cote NGM de tête forage (en m)	≈ 16	≈ 32	≈ 29	≈ 28	29
21 - 02 - 91	-	≤ 5	15,51	12,66	-
07 - 05 - 91	7,34	≤ 5	15,57	10,03	-
26 - 07 - 91	10,50	≤ 5	15,57	13,42	-
27 - 11 - 91	HS	≤ 5	17,00	13,36	-
31 - 12 - 91	HS	≤ 5	15,00	11,00	10,80

Le piézomètre SC.5 est toujours apparu sec lors des mesures, la nappe se situerait donc (au cours de la période de mesures) à une cote inférieure à celle du fond du piézomètre), soit $\leq +5$ m NGM ou alors ce piézomètre est colmaté.

Le piézomètre SC.4, situé à l'intérieur d'une propriété privée n'a pu être mesuré que le 31 Décembre 1991.

Les piézomètres SC.1 et SC.3 font apparaître des variations saisonnières (basses eaux en carême, remontée des niveaux au début de l'hivernage). L'amplitude des variations observées sur quelques mois (jusqu'à 3/4 m) est caractéristique d'une nappe libre rechargée par les précipitations, mais aussi probablement dans ce secteur urbanisé, par des fuites de réseaux ; ("on sait que l'assainissement se heurte, en France, à un véritable problème d'étanchéité : sur 100 litres d'eaux usées, 50 environ sont perdues", explique Georges MOREAU, responsable de l'Agence de l'eau Artois - Picardie - le Moniteur n° 4592 - Novembre 91 - p.38).

Les niveaux d'eaux semblent très grossièrement suivre la topographie (cote de la nappe plus élevée au piézomètre SC.3 qu'au SC.1). Cependant, des anomalies peuvent apparaître à la faveur de secteurs plus perméables. La présence de nappes perchées, situées à des cotes supérieures, n'est également pas à exclure (piézomètre SC.2). L'absence de notation précise des conditions de foration est ici pénalisante.

L'ouvrage, réalisé aux cotes + 3 m NGM à l'ouest et + 9 m NGM à l'Est, va recouper le(s) nappe(s) d'eau souterraine ou pour le moins traverser leur zone de battement (cf. annexe 8).

Une partie du tracé de l'ouvrage sera donc construite sous nappe. Vu la perméabilité moyenne à faible mesurée en sondages (annexe 3), les débits d'exhaure ne seront peut-être pas très importants. Des venues d'eau plus brutales ne sont cependant pas à exclure, soit à la faveur de secteurs fracturés ou très perméables intrinsèquement (des pertes totales ou partielles ont été observées lors de la foration) soit lors du recoupement d'éventuelles nappes perchées.

Cependant, dans la mesure où le morne TSF présente une individualité morphologique, les réserves des nappes d'eau souterraines qu'il renferme sont relativement faibles. Le débit des venues d'eau susceptibles de se produire va donc décroître progressivement après leur occurrence. Mais la gravité instantanée de telles venues d'eau n'est pas diminuée pour autant, avec toutes les conséquences en matière de déstabilisation du front, d'entraînement de matériau, voire de fontis en surface.

7.3 - CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

Les valeurs des principaux paramètres géomécaniques sont synthétisés dans le tableau 4.

Notons que les résultats des essais pressiométriques sont très dispersés et qu'il y a une incertitude importante sur l'attribution de telle valeur à tel terrain. A notre avis, l'utilisation de valeurs moyennes est dangereuse. La fiabilité de certains essais d'eau étant limitée, une réserve est également à faire. Ces deux paramètres sont donc inclus au tableau dans un seul souci de synthèse mais doivent être utilisés avec la prudence qui s'impose.

L'analyse visuelle des sondages carottés permet de caractériser les discontinuités et l'altérabilité du massif rocheux. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 5.

FORMATION		1	2	3	4	5	6	7
TYPE D'ESSAI		COLLUVIONS ET ALLUVIONS FLUVIATILES	BRECHES A ELEMENTS ANDESITQUES	FORMATIONS PONCEUSES +/- REMANIEES	ALLUVIONS FLUVIATILES ET MICROBRECHES ANDESITQUES	COULEES D' ANDESITE	FORMATION PONCEUSE +/- REMANIEE	ALLUVIONS FLUVIATILES
Pressiomètre	Ep (MPa)	7 / >100	2 / >100	16 / 60	12 / > 100	5.5 / 100 (1)	57 / 100	94 / > 100
	Pl (MPa)	0.4 / > 4.0	0.8 / >4.0	2.2 / >4.0	1.3 / > 4.0	1.0 / > 4.0 (1)	>4.0	> 4.0
essais d'eau	K (m/s)	3 10E-7/6 10E-7	4 10E-6/5 10E-7	3 10E-7/1,3 10E-8	5 10E-7/1 10E-9	1 10E-5/1,1 10E-8	1.2 10E-7	4.7 10E-8
ESSAIS EN LABORATOIRE	Rc (MPa)			0.2 à 1.3	0.5	0.05 / 145		
	Rc moyen (MPa)			0.6	0.5	(2)		
	VL(m/s)			550 / 1130	850	730 / 5430		
	VL moyen (m/s)			920	850	(2)		
	E (MPa)			63 / 250	30	25 / 45760		
	E moyen (MPa)			90	30	(2)		
	Cuu (KPa)			40 / 85	100 / 130	30 / 80		
	W %	48	50	33 / 51	38	15 / 38		
	W moyen	48	50	40	38	25		
	δd (KN/M3)	12		11.0 / 13.0	12	12.0 / 18.0		
	δd (KN/M3) moyen	12		11.8	12	14.8		

Tableau 4 : Principaux paramètres géomécaniques des 7 formations principales

(1) les valeurs des sept premiers mètres du SD3 sont faibles à moyennes

(2) il est fortement déconseillé de considérer une moyenne pour des valeurs aussi dispersées

FORMATIONS REMARQUES VISUELLES	N°1 COLLUVIONS ET ALLUVIONS FLUVIATILES	N°2 BRECHES A ELEMENTS ANDESITIQUES	N°3 FORMATIONS PONCEUSES +/- REMANIEES
ETAT GENERAL	* formation sédimentaire hétérogénéité lithologiques différentes series : - argileuse - sableuse - à blocs > 30cm sains	* blocs d'andésites cm à pluridm pris dans une matrice terrigène existence probable d'un granoclassement	*ponces plus ou moins remaniées
ALTERATION	* globalement sain altération localisée par circulation de fluides hydrothermaux, principalemt à l'interface des séries	* globalement sain altération localisée par fluides hydrothermaux	* très tendres pouvant être altérées à complètement argilisées
DISCONTINUE POUR MATERIAUX ROCHEUX	* sol	* sol (à gros éléments)	* presque un sol (plutôt qu'une roche) les zones les moins remaniées (# roche) présentent une frac- turation importante

TABLEAU 5: Caractérisation des discontinuités et altération des sept formations principales. Analyse visuelle

<p>N°4 ALLUVIONS FLUVIATILES ET MICROBRECHES ANDESITIQUES</p>	<p>N°5 COULEES D'ANDESITE</p>	<p>N°6 FORMATION PONCEUSE +/- REMANIEE</p>	<p>N°7 ALLUVIONS FLUVIATILES</p>
<p>* formation sédimentaire grande hétérogénéité lithologique, différentes series : - sables - graviers - conglomérats (blocs pluridécimétriques)</p>	<p>* coulée d'andésite sous différents états: - bréchifiée avec des éléments relativement sains mais présentant une forte densité de fissures (fissures de flux et fissures de refroidissement) se débitant en blocs pluridécimétriques</p>	<p>* ponces plus ou moins remaniées</p>	<p>* formation alluvionnaire type graviers et sables grossiers</p>
<p>* certaines zones sont compactes, type conglomérats consolidés à matrice saine, d'autres au contraire sont très tendres altération localisée par fluides hydrothermaux</p>	<p>- hydrothermalisée allant du simple dépôt de minéraux dans les plans de fissures, à l'altération (débit en petits éléments polygonaux) jusqu'à l'argilisation complète de la roche</p>	<p>* argilisée à tendre mais compacte</p>	<p>* globalement sain éléments cm sains</p>
<p>* sol (les zones compactes semblent fracturées)</p>		<p>plutôt sol dans le SC1, plus rocheux dans le SC3 avec fracturation</p>	<p>* sol</p>

7.4 - CLASSIFICATION

Diverses classifications sont proposées pour caractériser les massifs rocheux. Seule la formation 5 (coulées d'andésite) a été analysée, les autres formations correspondant à des sols.

Ces andésites ont été étudiées selon :

- la classification de BENIAWSKI (annexe 5) ;
- la classification AFTES (annexe 6).

Leur application est reportée dans les tableaux 6 et 7. Selon la classification de BENIAWSKI, la qualité géomécanique des coulées andésitiques est mauvaise à très mauvaise (note RMR = 24, classe IV à V).

Les coulées d'andésite sont caractérisées par :

- une altération moyenne à totale ;
- une charge hydraulique faible et une perméabilité faible à moyenne ;
- une forte à très forte densité des discontinuités, sans orientations privilégiées ;
- des caractéristiques mécaniques de très faible qualité et une résistance très faible (à partir des échantillons en laboratoire).

Cependant, il faut reconnaître que ces classifications sont peu adaptées aux roches volcaniques. Les roches volcaniques présentent en effet :

- des variations importantes de faciès (zone très altérée localement...) ;
- une fissuration liée à la mise en place (figure de flux, fissure de refroidissement...), "sans" directions de la fissuration

Ces caractéristiques sont mal rendues par les classifications classiques.

Tableau 6 : Classification géomécanique de BENIAWSKI (1978)
 Pour la série rocheuse 5 : coulées d'andésite

	Note
■ $\sigma_c < 3 \text{ MPa}$	0
■ RQD < 25 %	3
■ Espacement des joints de 6 - 20 cm à < 6 cm	7
■ Caractéristiques des joints :	12
- lisse à légèrement rugueuse	
- ouverture 1 - 5 mm à < 1 mm	
- persistants	
- remplissage < 5 mm	
■ Venues d'eau	7
- estimée : < 25 l/min par 10 m de tunnel (à la faveur de fractures et zones hydrothermalisées le débit pourrait être plus important)	
- conditions générales : milieu saturée $H_w < 10 \text{ m}$	
■ L'orientation et pendage des joints sont inconnus, influencés par le mode de mise en place : figure de flux et de refroidissement.	5
Total	24

N°/ appellation	GEOLOGIE	HYDROGEOLOGIE		DISCONTINUITÉ DU MASSIF ROCHEUX					CARACTERISTIQUES MECANIKES			
	état d'altération (AM)	charge hydraulique	perméabilité du massif	densité ID	RQD	orientation	organisation	comportement mécanique	IQ	résistance	potentiel de gonflement	état de contrainte
5 coulée d'andésite	AM3 à AM5 moyennement à complètement altérée	H1 charge faible	K2 (3) faible à moyenne localement forte (perte d'eau)	ID5 (4) densité très forte à forte	0% à 10% 20%	à priori pas d'orientation privilegiée	N5 nombreuses discontinuités sans hiérarchisation ni constante dans la répartition	? coté ouest à l'affleurement, les blocs se déchaussent facilement au marteau	IQ5 densité de micro- fissures, pores et minéraux altérés très élevée qualité très basse (attention même remarque que pour la résistance)	R5 à R2 exceptionnell ATTENTION essais de laboratoire sur quelques matériaux seulement, la roche peut-être # saine à complément altérée	non mesuré dans les zones argilisées le potentiel de gonflement est peut-être important	CN2 rapport Rc / σ < 1 dans les andésites altérées

TABLEAU 7 : Application de la classification AFTES aux coulées d'andésite

8. APPORT DES RESULTATS DE LA RECONNAISSANCE POUR DEFINIR LES METHODES D'EXECUTION DES OUVRAGES

8.1 - DEUX TRACES POSSIBLES

Deux tracés ont été proposés (cf. figure 3) :

- variante tunnel nord
- variante tunnel sud.

Peu de reconnaissances ont été réalisées le long du tracé sud. Seul le sondage SC.4 est à proximité de ce tracé. Ce sondage fait apparaître des andésites "massives", "saines" mais très fissurées, de la cote + 29 m NGM à la cote + 19 m NGM environ ; ensuite les andésites sont hydrothermalisées et fragmentées.

Ce tracé est le plus éloigné de la faille du Lamentin nord, cependant insuffisamment pour ne pas en subir les effets.

A priori, les deux tracés diffèrent très peu de par la nature des terrains traversés. Le tracé sud, plus long que le tracé nord, devrait traverser la série andésitique sur une longueur plus importante. Cette série est apparue soit "massive", saine mais fracturée, soit hydrothermalisée et altérée.

Pour comparer ces deux tracés, il y aurait lieu d'accorder une attention particulière aux conditions géotechniques des entrées Est et Ouest, qui sont très souvent les points les plus délicats, à la fois du point de vue de la stabilité du tunnel lui-même (très faible couverture) et des déblais d'accès (excavation au pied d'une pente potentiellement instable). Une telle comparaison nécessite une étude géotechnique détaillée qui sort du cadre du présent rapport. A priori, on peut cependant avancer que l'entrée Est se présente de manière beaucoup plus favorable dans le tracé sud du fait de la très forte pente du versant (dénivelée de 25 m sur 40 m) dans lequel le tunnel pénétrerait perpendiculairement. Cette forte pente est probablement l'indice d'une roche plus massive et donc de meilleures conditions de stabilité en talus et en tunnel.

8.2 - APPROCHE SOMMAIRE DE LA METHODE D'EXECUTION DU TUNNEL

Une réalisation en tranchée couverte nécessiterait, dans le cadre du projet, une hauteur de fouille de 20 à 25 m, dans un environnement urbanisé.

En souterrain, deux aspects doivent être analysés : l'abattage des terrains et la tenue de l'excavation.

8.2.1 - Abattage des terrains

Le mode d'abattage des terrains dépend de deux paramètres principaux : la résistance et la fracturation de la roche. Le BRGM a établi une classification des conditions d'abattage sous forme d'un diagramme, présenté en figure 8a, qui comporte en abscisse la résistance à la compression simple et en ordonnée le module de fracturation du terrain.

Cinq classes sont distinguées, les moyens d'abattage traditionnels correspondant à ces classes sont :

- A : explosif
- B : explosif ou machines d'abattage ponctuel en roches dures
- C : machine d'abattage en roches tendres, fraise, marteau hydraulique
- D : fraise, marteau hydraulique, pelle
- E : pelle chargeur.

D'après ce diagramme, les séries rencontrées sur le tracé du tunnel sont, globalement classées en bas de la classe E, et localement en D.

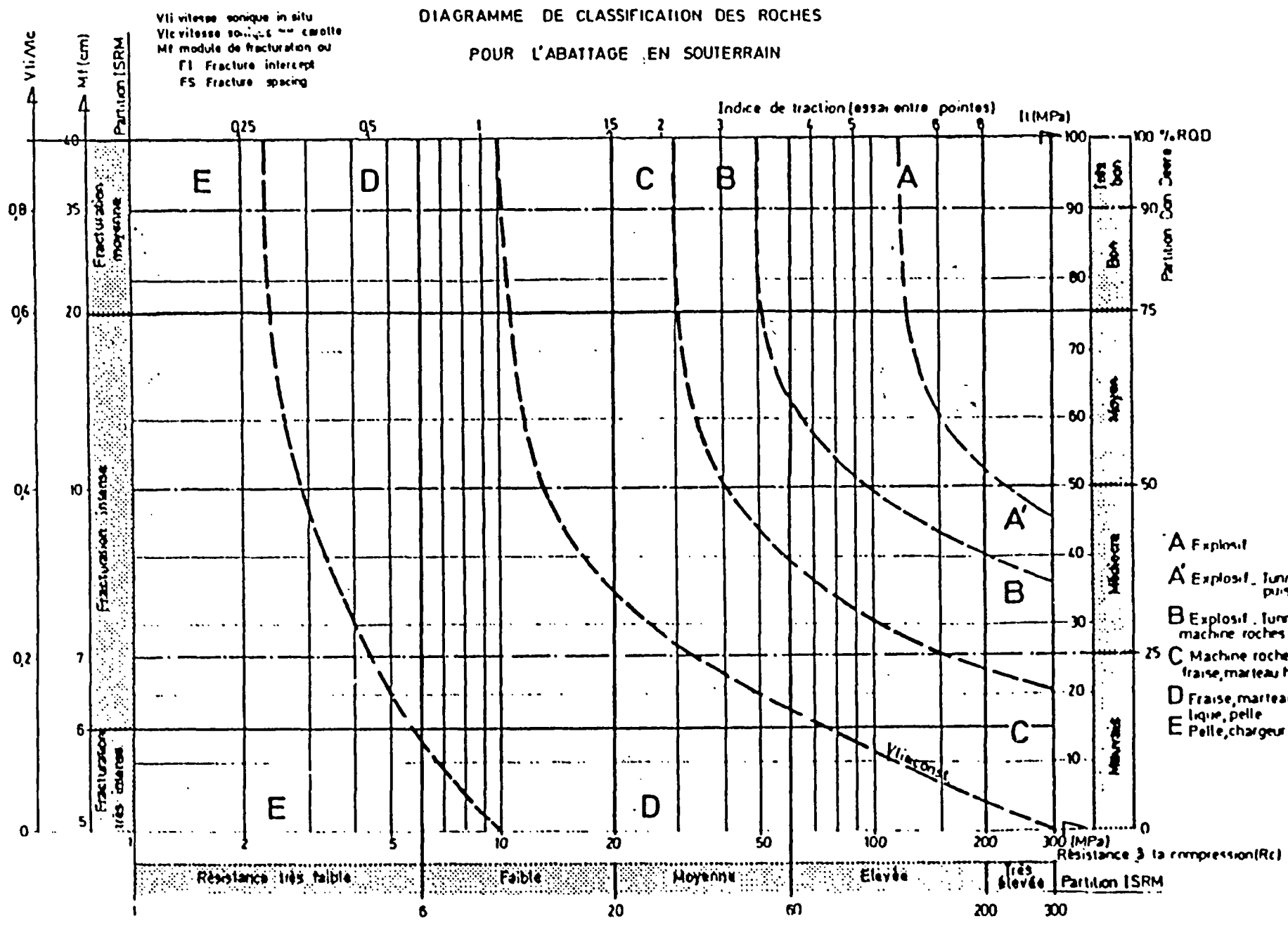
L'abattage des terrains pourrait se faire principalement à la pelle puissante et avec des engins pour "roches tendres" (fraises, marteau hydraulique).

8.2.2 - Tenue des terrains

La tenue des terrains dépend de nombreux paramètres parmi lesquels trois sont particulièrement importants :

- fracturation du massif
- résistance du terrain
- état de contrainte régnant à la paroi du tunnel.

Figure 8a: Diagramme de classification pour le mode d'abattage des terrains



Le diagramme de la figure 8b tient compte de ces trois paramètres. Le facteur $R_c/3\gamma H$, étant ici de l'ordre de 0,15 dans les andésites altérées et les ponces, on peut prévoir que les terrains traversés par le tracé du tunnel correspondront à la classe E et très localement à D dans les andésites saines. Un soutènement très important est donc à prévoir presque partout.

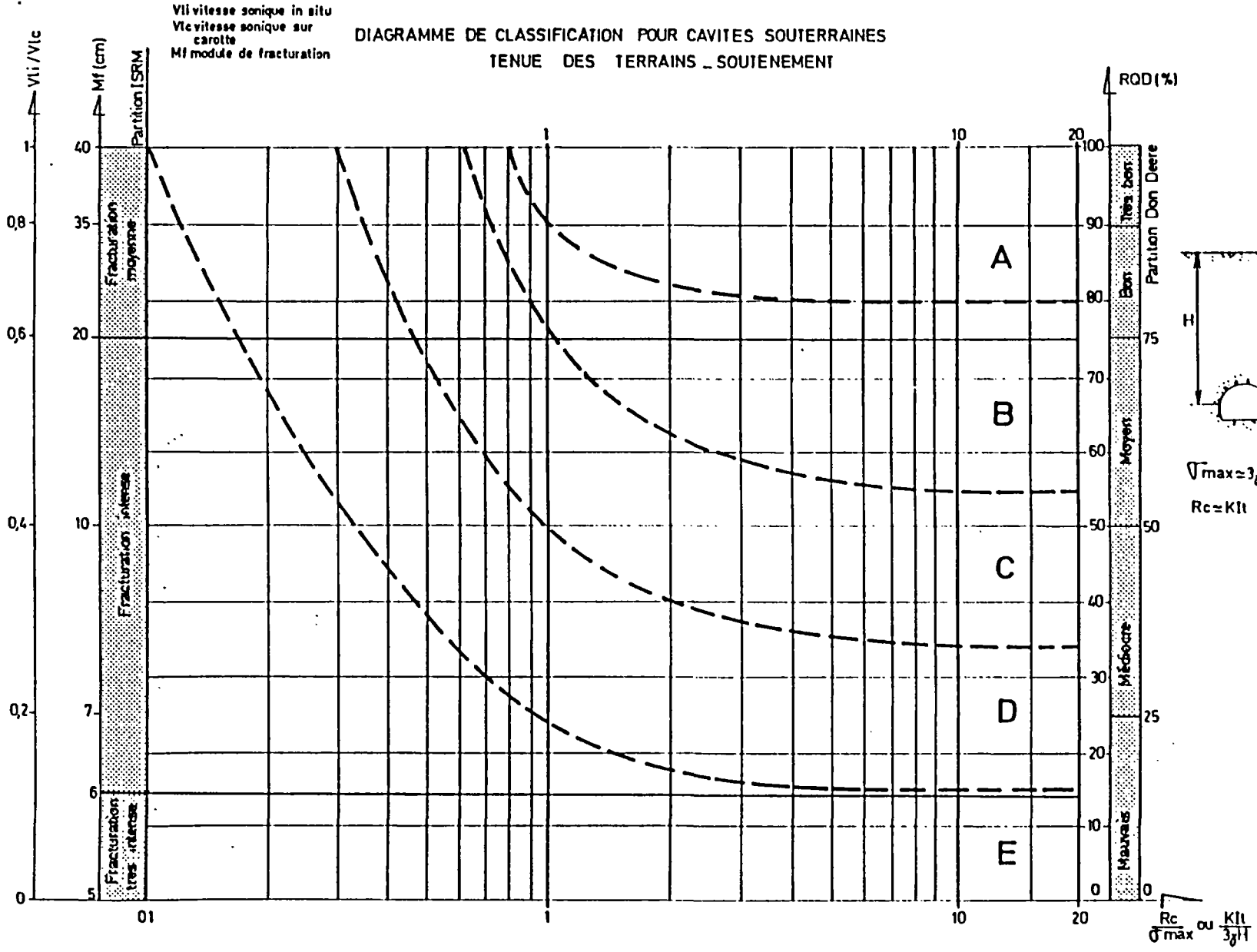
Du fait de la très faible couverture du tunnel (10 à 15 m) se pose un problème très grave de tassements en surface dans les zones sous bâti, qui sont nombreuses. Pour limiter ces tassements, deux méthodes se présentent a priori, sous réserve que l'on puisse effectivement rabattre temporairement la nappe sous le niveau du radier pendant les travaux :

- la méthode des prévoûtes PERFOREX avec creusement en pleine section
- la nouvelle méthode autrichienne en section divisée (par exemple avec 2 galeries latérales ogivales).

Du fait de l'hétérogénéité et du manque de cohésion de certains terrains, surtout côté ouest, des injections préalables de consolidation effectuées depuis la surface pourraient s'avérer localement nécessaires.

S'il s'avère aléatoire de rabattre correctement la nappe, l'option tunnelier pourrait être examinée malgré le très faible linéaire à creuser - surtout si l'on décide de faire deux tubes indirectionnels dès la première phase. Cette solution est bien sûr coûteuse ; mais, associée à la pose de voussoirs en béton armé préfabriquée, elle peut permettre de limiter les tassements en surface si elle est bien maîtrisée par l'entreprise.

Figure 8b: Diagramme de classification pour le mode d'abattage des terrains



9. CONCLUSIONS

■ Le contexte géologique du secteur concerné par le projet de tunnel est caractérisé par une très grande variation latérale et verticale des faciès lithologiques. Le mode de mise en place et de formation des différents matériaux en est à l'origine. L'analyse géologique préalable a été confirmée en cela par les reconnaissances par sondages. Outre ces importantes variations, on a pu noter l'interstratification de plusieurs formations et leur remaniement, notamment en ce qui concerne les formations ponceuses. Les andésites, massives à l'origine, sont très souvent fissurées, bréchifiées, hydrothermalisées. Les phénomènes mécaniques et hydrothermaux associés au jeu de la faille de Chateauboeuf peuvent en être la cause. Au total sept formations principales ont été individualisées.

Les corrélations entre sondages qui sont fournies ne représentent qu'une image de l'organisation spatiale des formations rencontrées.

■ Concrètement, sur le terrain, l'hétérogénéité des matériaux, leur altération, leur fissuration ont rendu difficile l'avancée des reconnaissances, le déroulement des essais et le prélèvement d'échantillons. Très peu ont pu être acquis et beaucoup étaient paraffinés après carottage faute d'avoir pu les prélever intacts. Cela a nécessité un travail fin et des adaptations nombreuses au laboratoire afin d'en tirer les meilleures informations possibles. La représentativité de ces échantillons par rapport à l'ensemble de la formation dont ils sont issus est à relativiser.

Des pannes ou des matériels non disponibles, un certain nombre d'informations manquantes en cours d'essai ont alourdi ces difficultés. De ce fait, les enregistrements de paramètres ou les valeurs de perméabilité obtenues n'ont pas la fiabilité habituelle. Le BRGM a tenté de réduire l'incidence de ces problèmes par différents moyens, tout en définissant, pour l'avenir, un mode de fonctionnement précis. L'interprétation géotechnique en est évidemment compliquée. Les tableaux synthétiques doivent être examinés en tenant compte de ces remarques et en modulant les résultats fonction de l'hétérogénéité constatée et de la dispersion des valeurs. Les descriptions géologiques, celles des échantillons, prennent donc d'autant plus d'importance, qui leur a été consacrée en conséquence.

■ Le projet Nord interprété indique qu'à l'Ouest des séries alluvionnaires, des ponces remaniées et des formations bréchiqes sont en présence.

A 100/150 m environ de l'entrée ouest, la base du tunnel devrait rencontrer des formations andésitiques, le toit soit les andésites soit des séries alluvionnaires ou ponceuses bréchiqes.

A partir de 250 m environ de l'entrée ouest, le projet nord devrait être entièrement dans les séries andésitiques souvent altérées, hydrothermalisées, quelquefois massives mais fracturées.

■ Le tracé sud devrait traverser la série sur une plus grande longueur. Un examen particulier des têtes en tant que points les plus délicats, sera nécessaire pour orienter ce choix. A priori, sa sortie semble se présenter de manière plus favorable. Cependant un seul couple de sondages le caractérise, ce qui est peu.

■ L'ouvrage recoupera les nappes d'eau souterraines ou traversera leur zone de battement. Des nappes perchées et des venues d'eau brutales ne sont cependant pas à exclure malgré les perméabilités faibles mesurées.

■ Les principaux paramètres géomécaniques des sept formations principales sont synthétisés dans le tableau 4; la dispersion des valeurs est importante notamment celles issues des essais pressiométriques. Il convient donc de les utiliser avec prudence. Pour les raisons évoquées précédemment, une réserve s'applique également aux essais d'eau. Les caractéristiques des discontinuités et de l'altération sont données dans le tableau 5. Enfin, les matériaux rocheux sont caractérisés au moyen des classifications existantes AFTES et de BENIAWSKI, qui ne sont pas forcément très adaptées aux roches volcaniques. Ces laves ont globalement des caractéristiques faibles.

■ Du point de vue de l'abattage, le projet est envisageable à la pelle puissante et avec des engins pour "roches tendres" (fraises, marteau hydraulique). Pour la tenue des terrains, un soutènement important est à prévoir presque partout. Globalement, les analyses par diffractométrie révèlent des taux importants d'argiles potentiellement gonflantes, ce qui aggrave ce problème. Etant donné la très faible couverture du terrain un problème grave de tassement en surface est à examiner.

Une proposition pour définir une reconnaissance complémentaire sera remise par ailleurs au client.

ANNEXE N°1
Résultats des essais pressiométriques

ANNEXE N°2
Résultats des essais de perméabilité in situ

SONDAGE SC1 PROFONDEUR D'ESSAI	FORMATION TESTEE	TYPE D'ESSAIS ET PERMEABILITE (m/s)		REMARQUES EVENTUELLES
2 à 2,5 m / terrain naturel	Formation bréchique à fragments andésitiques dm, (matrice terrigène)	LEFRANC - charge constante 8,1 10E-6		- matériau hétérogène : matrice avec nombreux blocs dm
5,5 à 6 m	sables et graviers compacts séparés par un paléosol	LEFRANC- charge constante 5,4 10E-8		- compaction importante, litage
9 à 9,5 m	brèche conglomératique	LEFRANC - charge constante 4,4 10E-7	LEFRANC - charge variable 5,0 10E-7	

SONDAGE SC5 PROFONDEUR D'ESSAI	FORMATION TESTEE	TYPE D'ESSAIS ET PERMEABILITE (m/s)		REMARQUES EVENTUELLES
4,5 à 5 m	sables, et blocs de natures différentes (laves, éléments de coulée boueuse)	LEFRANC - charge constante 2,7 10E-7		- légère compaction, hétérogénéité
7 à 8 m	conglomérats fluviatiles	LUGEON essai ininterprétable		- fuite n'ayant permis qu'une pression effective de 3,8 bar puis remontée d'eau en surface
9 à 10,5 m	niveau alluvionnaire, sables grossiers et petits blocs d'andésite	LEFRANC - charge constante 5,4 10E-7		
17 à 19 m	coulée d'andésite porphyrique hydrothermalisée, fragmentée	LUGEON 6,9 10E-6		- pertes de charge non prise en compte - fracturation importante - pression effective maximale atteinte : 7,8 bar - épuisement réserve d'eau lors du dernier palier en pression décroissante - manque de paliers en basse pression
22,5 à 24 m	andésite porphyrique hydrothermalisée, très altérée	LUGEON 1,2 10E-5		- pression effective maximale atteinte : 5,8 bar - pertes de charge non prise en compte - manque de paliers en basse pression - épuisement réserve d'eau lors du dernier palier en pression décroissante

SONDAGE SC2 PROFONDEUR D'ESSAI	FORMATION TESTEE	TYPE D'ESSAIS ET PERMEABILITE (m/s)		REMARQUES EVENTUELLES
2,4 à 2,9 m	blocs d'andésite porphyrique altérée	LEFRANC - charge constante 5,9 10E-7	LEFRANC - charge variable 4,8 10E-7	hétérogénéité et matériau décohéré
5,8 à 6,3 m	brèche ponceuse remaniée	LEFRANC - charge constante 2,5 10E-8	LEFRANC - charge variable 2,4 10E-8	@ matériau remanié de par sa formation
9 à 9,5 m	brèche ponceuse remaniée	LEFRANC - charge constante 2,7 10E-7	LEFRANC - charge variable 1,3 10E-7	matériau remanié de par sa formation
12 à 12,5 m	brèche ponceuse remaniée	LEFRANC - charge constante 1,3 10E-8		@ matériau remanié de par sa formation
15 à 15,5 m	sables graviers et petits blocs avec matrice terrigène	LEFRANC - charge constante 1,1 10E-9		@ composante terrigène à alluvions remaniées
18 à 18,5 m	coulées d'andésite très altérée (argilisée) ????	LEFRANC - charge constante 1,1 10E-8		@
21,3 à 21,8 m	lave andésitique hydrothermalisée éléments se débitant	LEFRANC - charge constante 3,9 10E-7	LEFRANC - charge variable 1,2 10E-7	
24 à 24,5 m	galets, coulée d'andésite		LEFRANC - charge variable 4,7 10E-8	@

SONDAGE SC3 PROFONDEUR D'ESSAI	FORMATION TESTEE	TYPE D'ESSAIS ET PERMEABILITE (m/s)		REMARQUES EVENTUELLES
2,9 à 3,4 m	andésite massive hydrothermalisée ensemble homogène et induré	LEFRANC - charge constante 6,8 10E-8	LEFRANC - charge variable	@
5,5 à 6 m	andésite massive hydrothermalisée ensemble homogène et induré	LEFRANC - charge constante 4,1 10E-7	LEFRANC - charge variable 4,7 10E-7	
8,5 à 9 m	andésite massive hydrothermalisée auto-fragmentation	LEFRANC - charge constante 7,8 10E-7	LEFRANC - charge variable 6,0 10E-7	
11,5 à 12 m	andésite massive hydrothermalisée auto-fragmentation	LEFRANC - charge constante 1,3 10E-7	LEFRANC - charge variable 1,0 10E-7	
17,5 à 18 m	andésite massive hydrothermalisée auto-fragmentation	LEFRANC - charge constante 1,4 10E-7	LEFRANC - charge variable 2,0 10E-7	@
21,0 à 21,6 m	ponce remaniée	LEFRANC - charge constante 1,2 10E-7	LEFRANC - charge variable 1,2 10E-7	@

SONDAGE SC4 PROFONDEUR D'ESSAI	FORMATION TESTEE	TYPE D'ESSAIS ET PERMEABILITE (m/s)		REMARQUES EVENTUELLES
3 à 3,5 m	andésite massive très fissurée se décomposant en blocs cm à dm	LEFRANC		absorption totale, essai inadapté (matériel lugeon non disponible)
6 à 6,5 m	andésite massive très fissurée se décomposant en blocs cm à dm	LEFRANC		absorption totale, essai inadapté (matériel lugeon non disponible)
9 à 9,5 m	deux formations testées simultanément (voir coupes correspondantes)	LEFRANC		absorption totale, essai inadapté (matériel lugeon non disponible)
11,3 à 11,8 m	éléments de lave andésitique cm à dm	LEFRANC - charge constante 2,9 10E-8	LEFRANC - charge variable	@ éléments remaniés et désolidarisés
14 à 14,5 m	éléments de lave andésitique cm à dm	LEFRANC - charge constante 1,7 10E-5	LEFRANC - charge variable 1,8 10E-5	@ éléments remaniés et désolidarisés
17 à 18 m	éléments andésitiques cm, emballés dans une matrice terrigène	LEFRANC - charge constante 5,4 10E-6	LEFRANC - charge variable 6,1 10E-6	forte hétérogénéité

@ Ce signe indique une interprétation spécialement difficile, soit à cause de données techniques imprécises, soit en raison d'aléa de mesure (contournement packer) ou de courbe anormale (nom stabilisation du débit)...etc

ANNEXE N°3
Résultats des essais en laboratoire

ANNEXE N°3.1
Description des échantillons par le laboratoire

DESCRIPTION DES ECHANTILLONS

SC.1 5,70 / 6,05 m

Alternance millimétrique de sable fin argileux, beige et d'argile plastique, brune. Essai triaxial UU de type Canadien.

SC.1 6,05 / 6,35 m

Roche décomposée en sable moyen à grossier, peu argileux, induré, brun verdâtre. Trois fissures ouvertes.

Essai de cisaillement CD sur un échantillon écrêté à 10 mm, séché et reconstitué à γ_h et w naturelles.

SC.1 7,20 / 7,50 m

Roche décomposée avec structure rocheuse peu apparente.
Sable moyen argileux, peu compact, brun-verdâtre avec quelques graviers, fissure fermée remplie de produits noirs.

Essai de compression simple. Aucun autre essai n'est réalisable. Manque de matériau.

SC.5 4,20 / 4,50 m

Argile sableuse et graveleuse ; aspect lité, bariolé gris-brun, plastique.

Quelques gros galets empêchant la réalisation d'essai mécanique.

SC.5 11,30 / 11,50 m

Roche décomposée

Sable argileux, peu plastique à graviers, gris à verdâtre, peu dense, friable à mou.

Aucun essai mécanique possible.

SC.5 12,70 / 13,00 m

Tuf volcanique

Roche très altérée

Sable fin argileux, peu plastique, homogène, beige, assez dense, ferme.

Essai de compression simple.

SC.5 14,00 / 14,30 m

Tuf volcanique

Sable argileux et graviers, compact à peu friable. Quelques fissures remplies de produits argileux.

Echantillon trop petit ; aucun essai mécanique possible.

SC.2 5,80 / 6,30 m

Roche décomposée

Sable argileux brun à bariolé, peu compact, peu dense avec blocs rocheux.

Essai triaxial UU de type Canadien.

Méthode utilisée car manque de matériau relativement homogène pour préparer plusieurs éprouvettes.

SC.2 10,70 / 11,20 m

Ponce remaniée, homogène, très friable.
Sable peu argileux et graveleux, lâche, mou.

Compression simple sur échantillon intact.

SC.2 11,70 / 12,20 m

Roche décomposée en sable fin argileux, brun à légèrement bariolé, plus graveleux entre 11,70 et 12,00 m. Matériau mou, lâche.

Triaxial UU de type Canadien (méthode utilisée par manque de matériau).

Cisaillement CD, éprouvettes intactes.

SC.2 20,10 / 20,50 m

Roche très altérée avec structure visible.
Sable argileux avec graviers, bariolé, dense, ferme.

Essai de limites d'atterberg non réalisable car manque de matériau inférieur à 0,4 mm.

Essai de compression simple.

SC.3 2,00 / 2,50 m

Roche décomposée en sable argilo-graveleux, très hétérogène, bariolé brun-verdâtre.

Essai de compression simple, éprouvette très difficile à préparer ; nécessité de surfacer les bases au plâtre.

SC.3 5,00 / 5,50 m

Andésite hydrothermalisée. Roche décomposée. Argile sableuse, jaune-verdâtre, graveleuse, avec quelques blocs gris peu altérés. Matériau hétérogène, dense, ferme.

Essai de compression simple.

Essai triaxial UU de type Canadien.

Essai cisaillement CD sur matériau reconstitué à δ_h et w naturelle.

SC.4 13,65 / 14,05 m

Roche décomposée.

- Argile sableuse, graveleuse, assez compacte, brune.
- une passée fracturée subhorizontale ouverte.

Essai triaxial UU de type Canadien.

SC.4 14,80 / 15,05 m

Roche décomposée

Sable fin argileux, graveleux avec quelques galets brunâtres, traces de rouille.

Matériau brunâtre, peu dense, ferme.

Essai de compression simple.

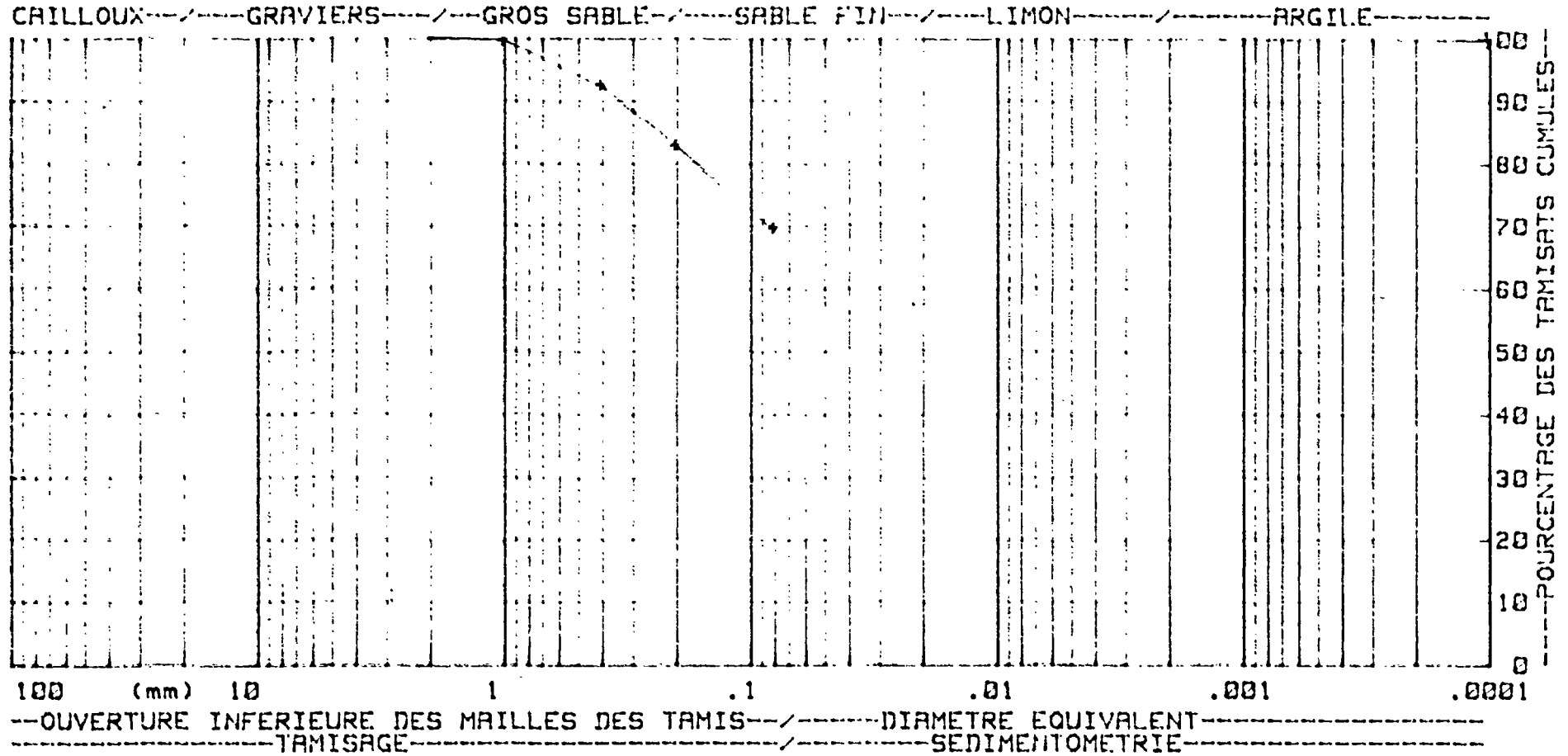
ANNEXE N°3.2
Essais granulométriques

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

B.R.G.M. Ingénierie Géotechnique

CHANTIER : FORT DE FRANCE RN9

SABLE ALLUVIONNAIRE



(ESSAIS SUIVANT NORMES ET MODES OPERATOIRES NF P18-560, NF P18-550, G-4/1970, G-6/1970)

Référence : SC1 5.7/6.05m



AFFAIRE _____

Operateur CABROL B

Contrôle par MATIFAT JM

Date _____

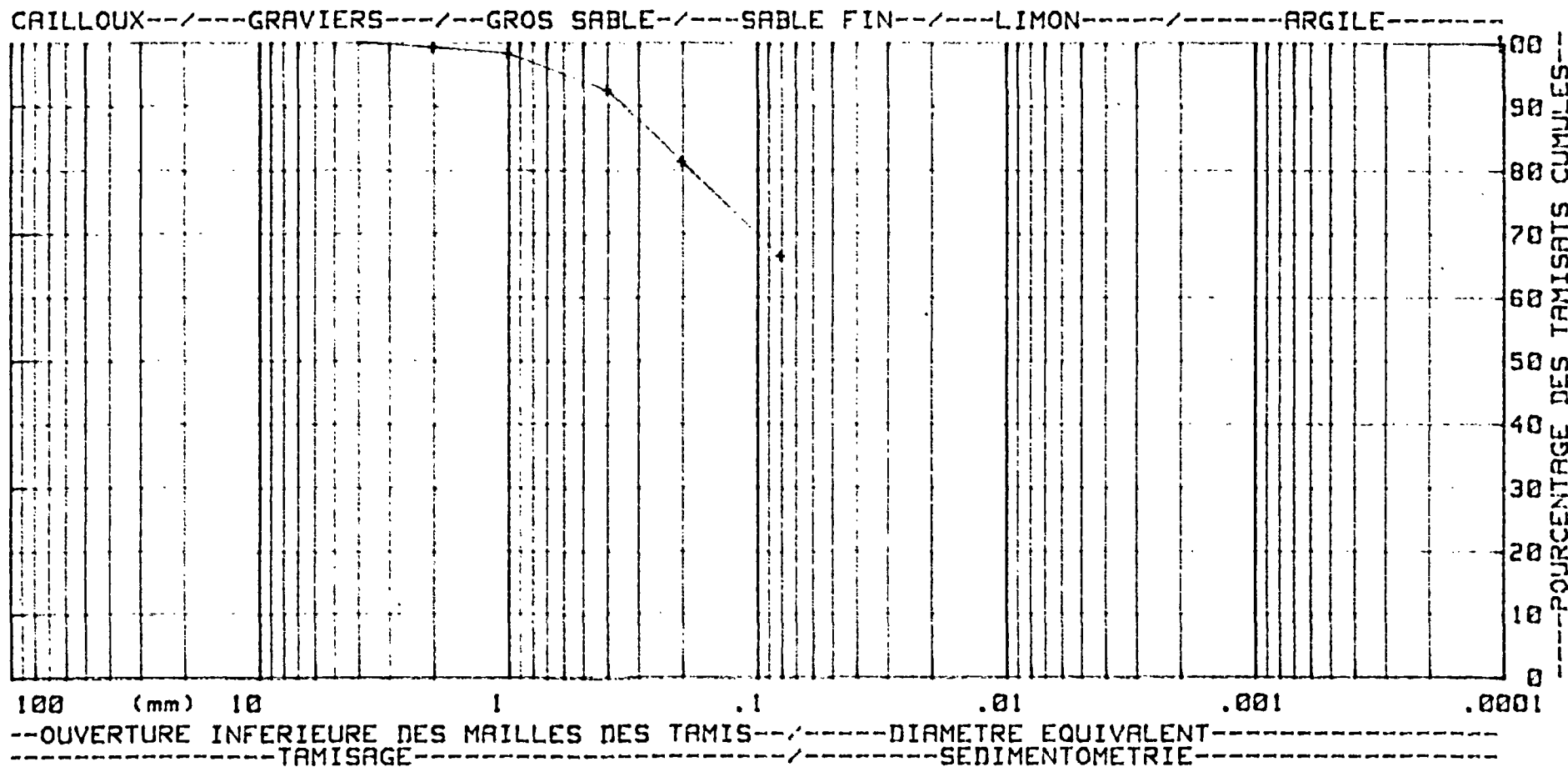
Bordereau n° _____

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

B.R.G.M. Ingénierie Géotechnique

CHANTIER : FORT DEFRANCE RN9

CONGLOMERAT



(ESSAIS SUIVANT NORMES ET MODES OPERATOIRES NF P10-560, NF P10-598, G-4/1970, G-5/1970)

Référence : SC1 7.2/7.5m

AFFAIRE _____

Operateur CARROL R Contrôle par MATIEAT JM Date _____

Bordereau n° _____



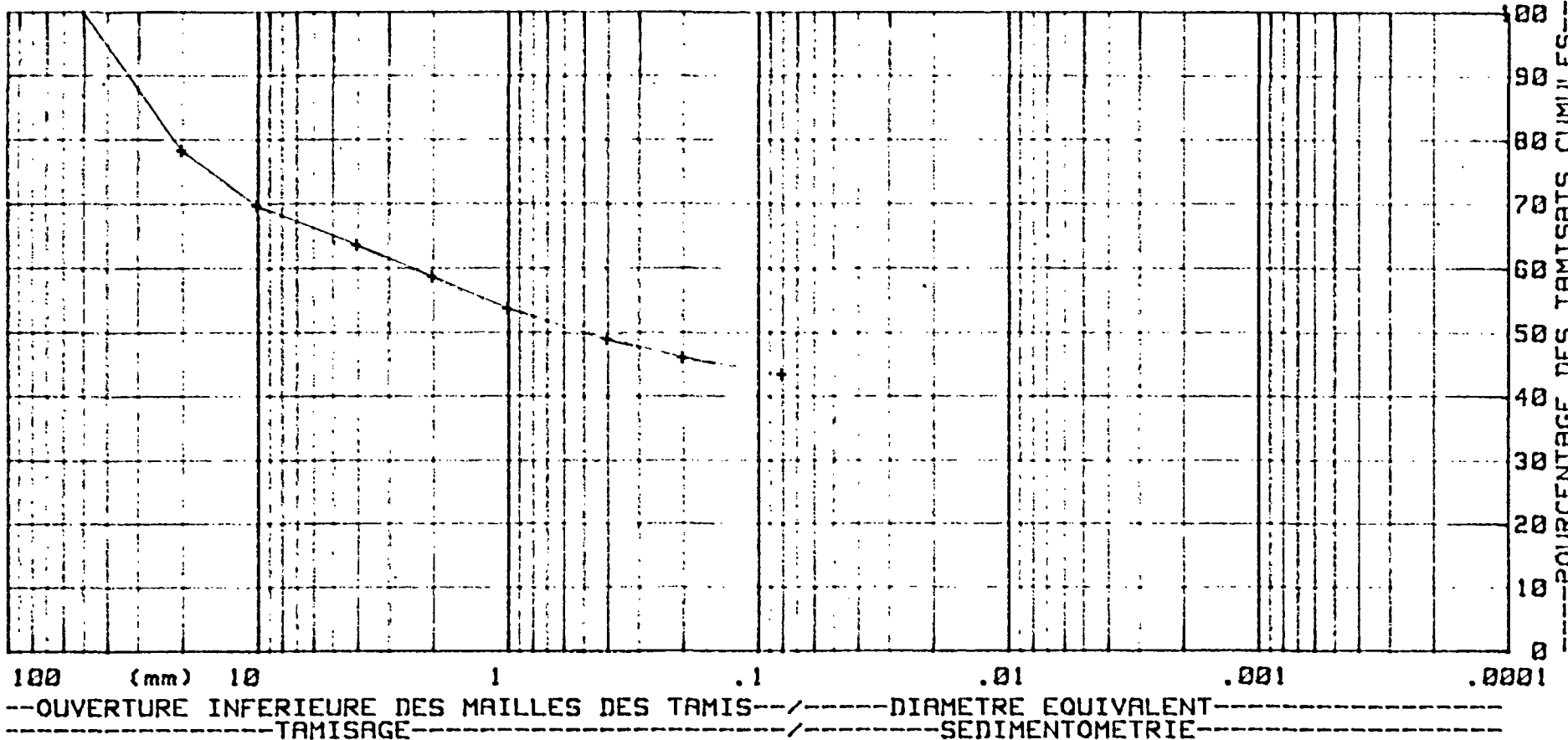
ANALYSE GRANULOMETRIQUE

B.R.G.M. Ingénierie Géotechnique

CHANTIER : FORT DE FRANCE RN9

SABLE ARGILEUX

CAILLOUX---/---GRAVIERS---/---GROS SABLE---/---SABLE FIN---/---LIMON---/---ARGILE---



(ESSAIS SUIVANT NORMES ET MODES OPERATOIRES NF P10-560, NF P10-590, G-4/1970, G-6/1970)

Référence : SC5 4.2/4.5m

AFFAIRE _____

Operateur CABROL B

Contrôle par MATHEAT JM

Date _____

Bordereau n° : _____

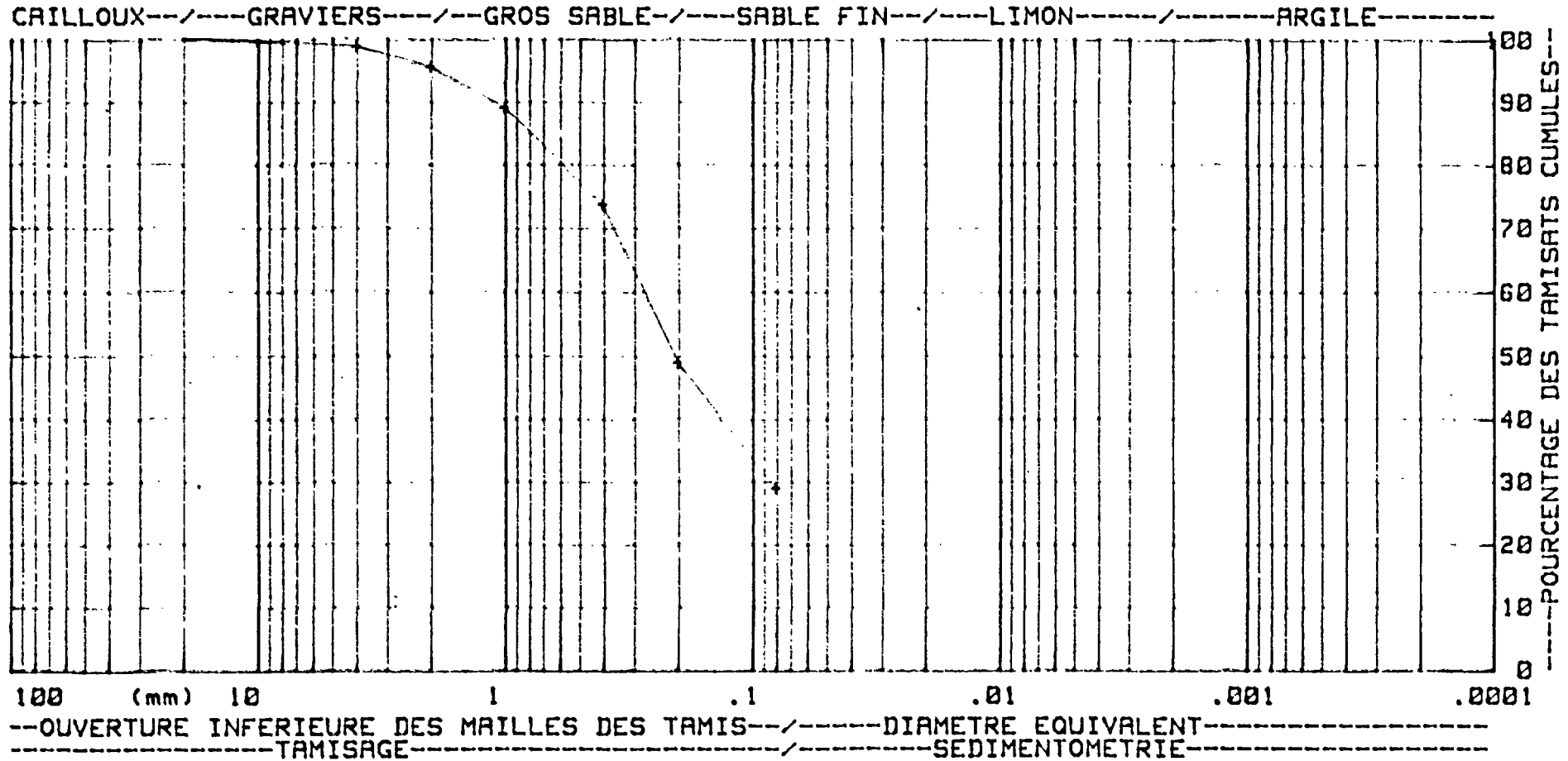


ANALYSE GRANULOMETRIQUE

B.R.G.M. Ingénierie Géotechnique

CHANTIER : FORT DE FRANCE RN9

TUF



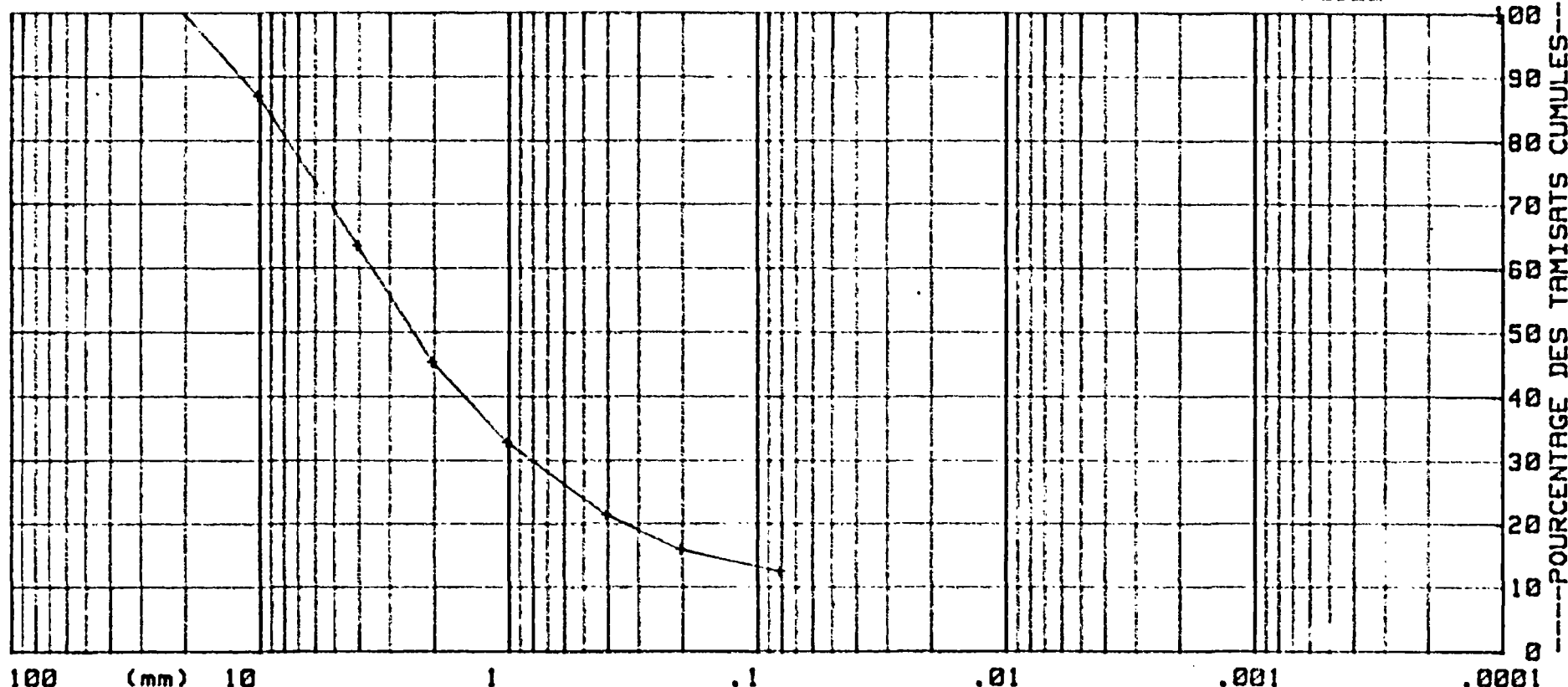
ANALYSE GRANULOMETRIQUE

B.R.G.M. Ingénierie Géotechnique

CHANTIER : FORT DE FRANCE RN9

PONCES REMANIEES

CAILLOUX --- / --- GRAVIERS --- / --- GROS SABLE --- / --- SABLE FIN --- / --- LIMON --- / --- ARGILE ---



100 (mm) 10 1 .1 .01 .001 .0001
 ---OUVERTURE INFERIEURE DES MAILLES DES TAMIS--- / ---DIAMETRE EQUIVALENT---
 ---TAMISAGE--- / ---SEDIMENTOMETRIE---

(ESSAIS SUIVANT NORMES ET MODES OPERATOIRES NF P10-560, NF P10-590, G-4/1970, G-6/1970)

Référence : SC-2 5.8/6.3m

AFFAIRE _____

Operateur MATIEAT JM

Controle par SARDELLA F

Date _____

Bordereau n° _____



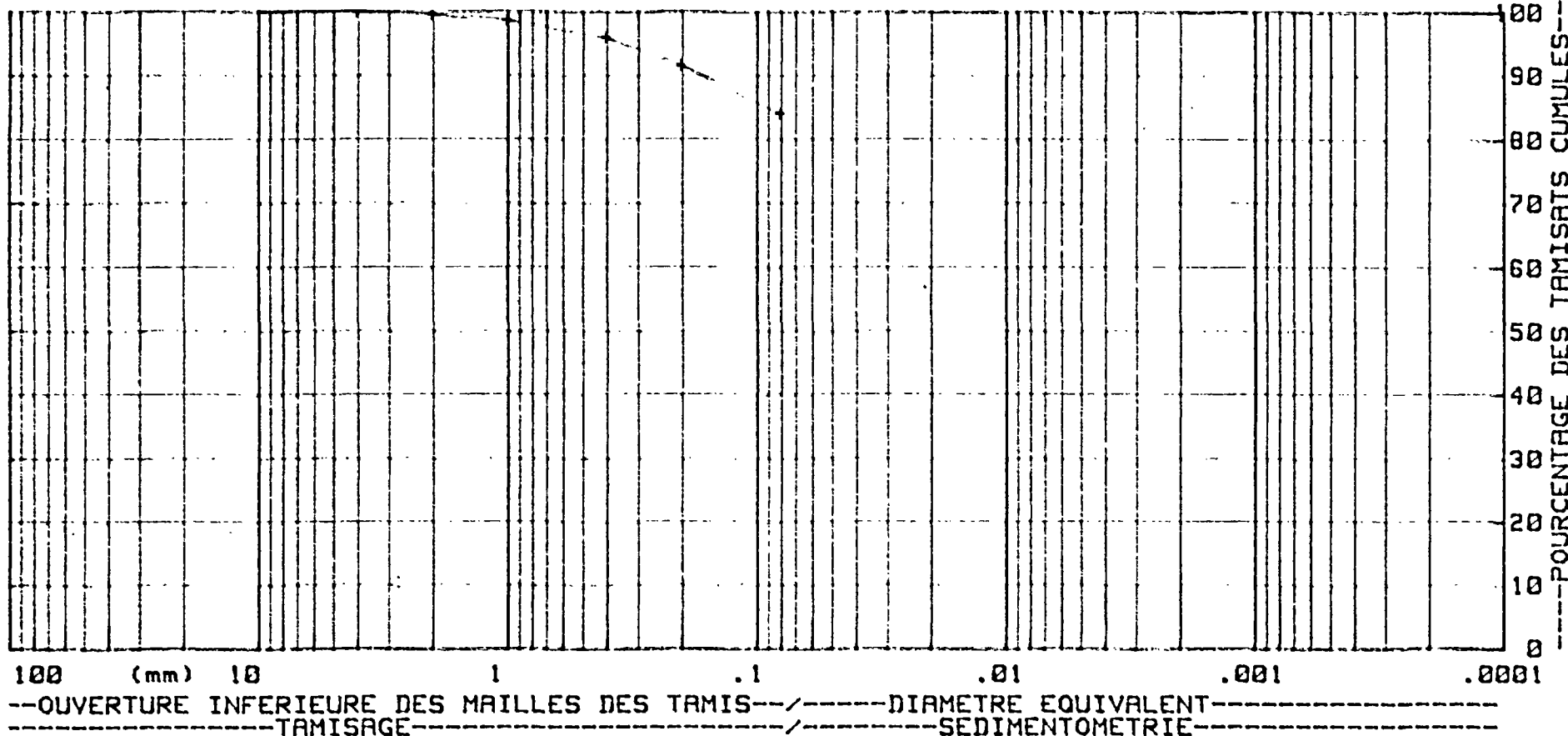
ANALYSE GRANULOMETRIQUE

B.R.G.M. Ingénierie Géotechnique

CHANTIER : FORT DE FRANCE RN9

PONCES

CAILLOUX---/---GRAVIERS---/---GROS SABLE---/---SABLE FIN---/---LIMON---/---ARGILE---



100 (mm) 10 1 .1 .01 .001 .0001
 ---OUVERTURE INFERIEURE DES MAILLES DES TAMIS---/---DIAMETRE EQUIVALENT---
 ---TAMISAGE---/---SEDIMENTOMETRIE---

(ESSAIS SUIVANT NORMES ET MODES OPERATOIRES NF P10-560, NF P10-590, G-4/1970, G-6/1970)

Référence : SC2 11.7/12.2

AFFAIRE

Operateur CABROL B Controle par MATIFAT JM Date _____
 Bordereau n° : _____

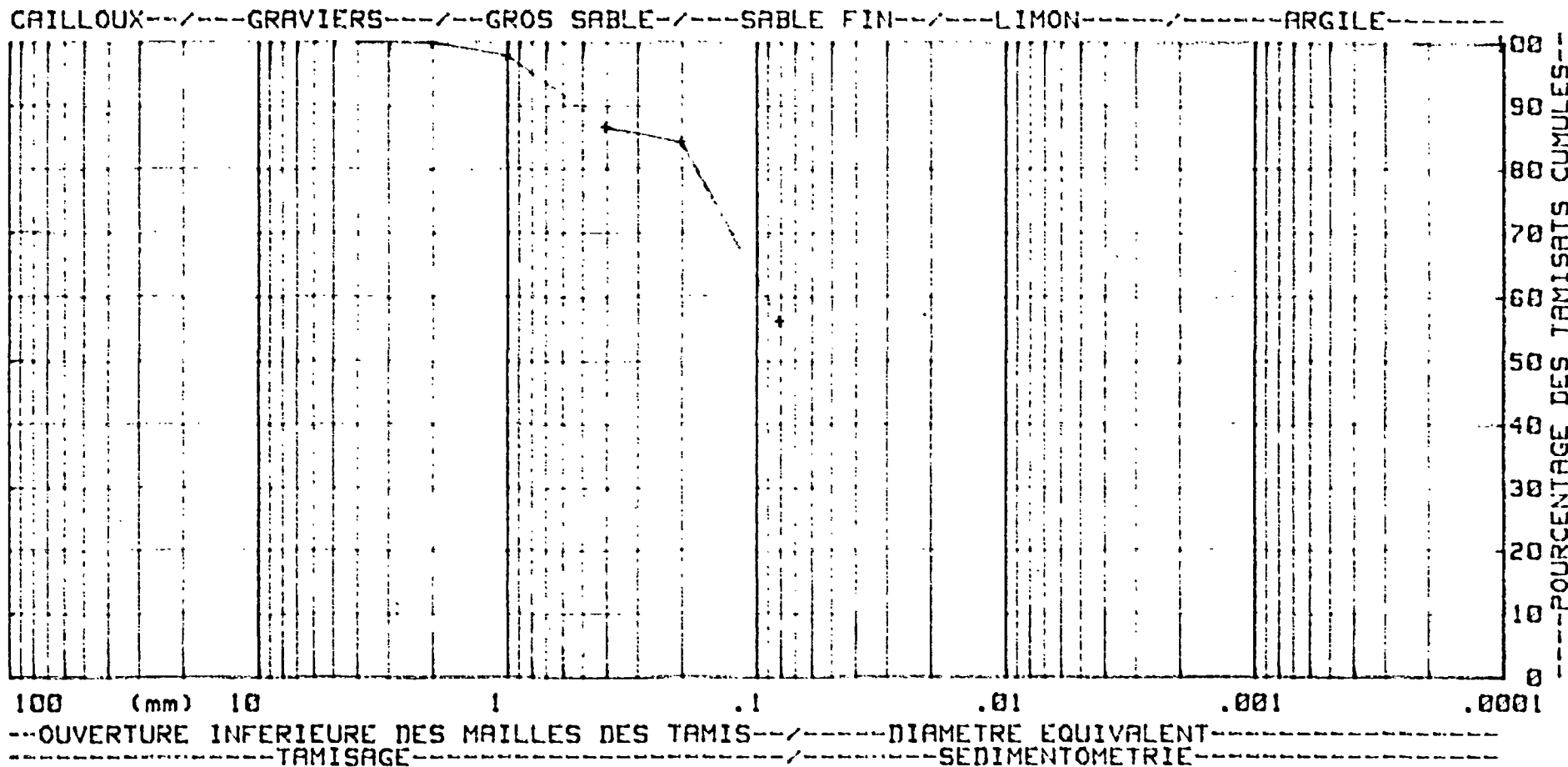


ANALYSE GRANULOMETRIQUE

B.R.G.M. Ingénierie Géotechnique

CHANTIER : FORT DE FRANCE RNS

ANDESITE DECOMPOSEE



(ESSAIS SUIVANT NORMES ET MODES OPERATOIRES NF P18-560, NF P18-590, G-4/1970, G-6/1970)

Référence : SC3 2.0/2.5m



AFFAIRE _____

Operateur CABROL B

Contrôle par MATIFAT JM

Date _____

Bordereau n° _____

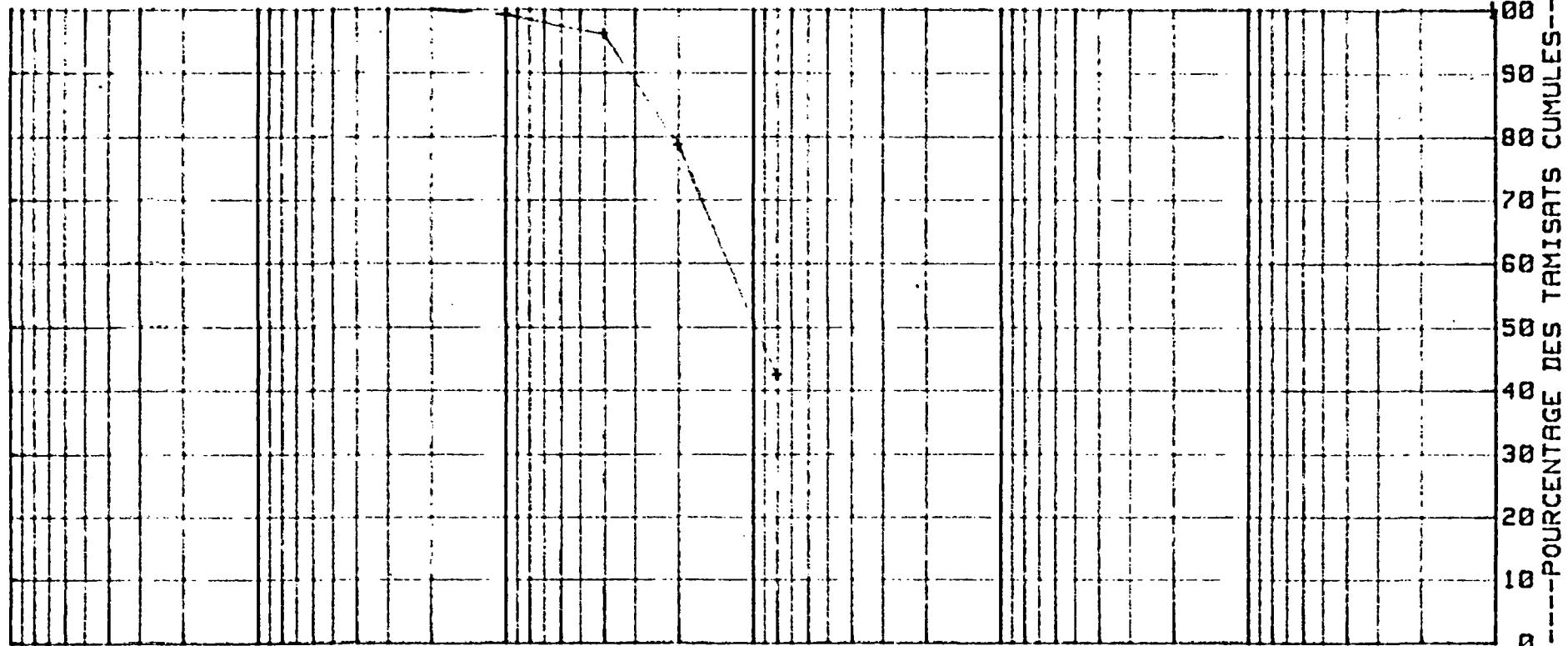
ANALYSE GRANULOMETRIQUE

B.R.G.M. Ingénierie Géotechnique

CHANTIER : FORT DE FRANCE RN9

Andésite décomposée

CAILLOUX---/---GRAVIERS---/---GROS SABLE---/---SABLE FIN---/---LIMON---/---ARGILE---



100 (mm) 10 1 .1 .01 .001 .0001

--OUVERTURE INFERIEURE DES MAILLES DES TAMIS--/---DIAMETRE EQUIVALENT---
 ---TAMISAGE---/---SEDIMENTOMETRIE---

(ESSAIS SUIVANT NORMES ET MODES OPERATOIRES NF P18-560, NF P18-598, G-4/1978, G-6/1978)

Référence : SC 3 5.0 / 5.5m

AFFAIRE _____

Operateur CABROL B

Contrôle par MATIEAT JM

Date _____

Bordereau n° : _____

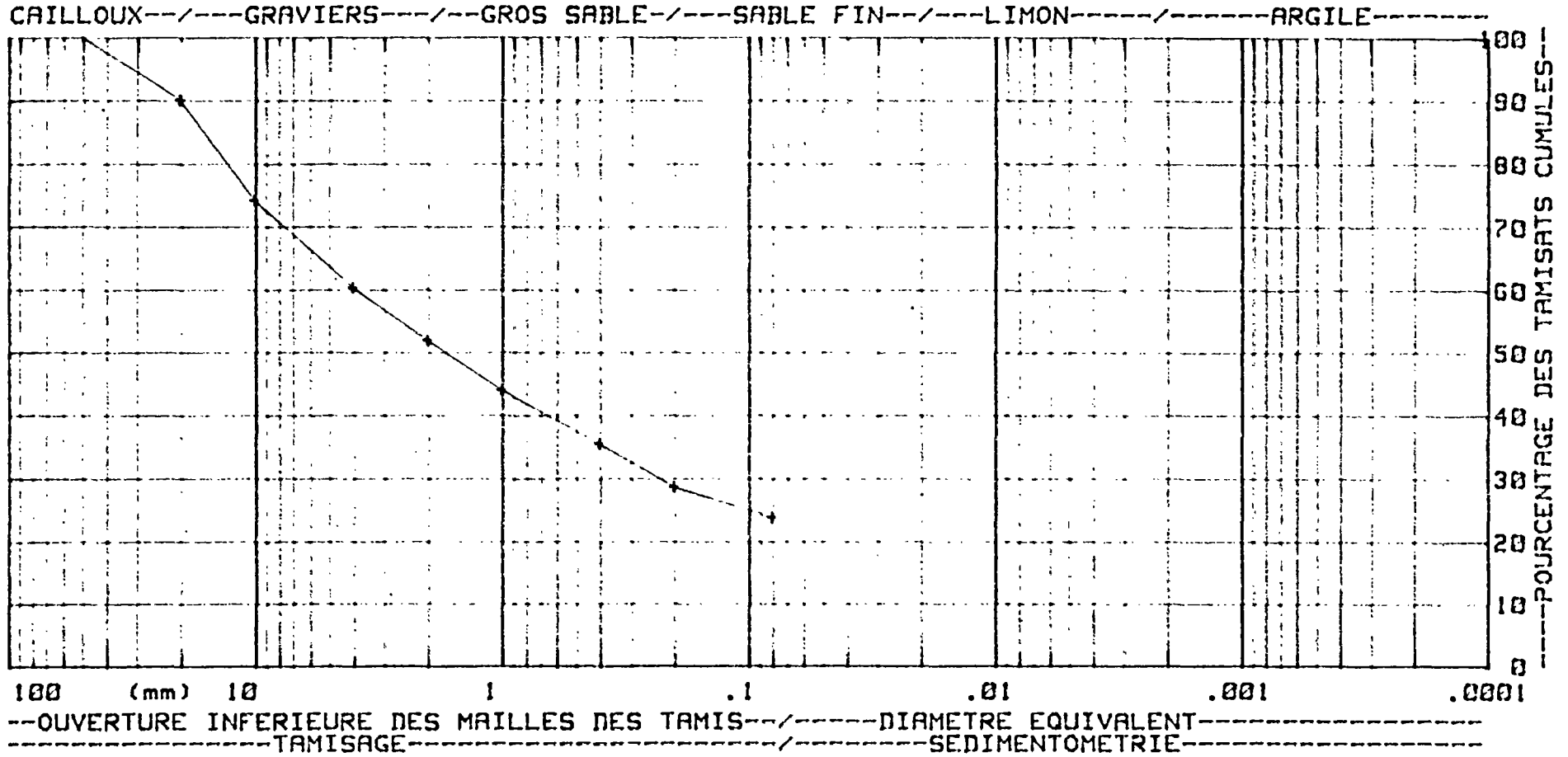


ANALYSE GRANULOMETRIQUE

B.R.G.M. Ingénierie Géotechnique

CHANTIER : FORT DE FRANCE RNS

BRECHE



(ESSAIS SUIVANT NORMES ET MODES OPERATOIRES NF P18-560, NF P18-558, G-4/1970, G-6/1970)

Référence : SC4 14.8/15.05m

AFFAIRE _____

Operator CABROL B

Contrôle par MATIFAT JM

Date _____

Bordereau n° : _____



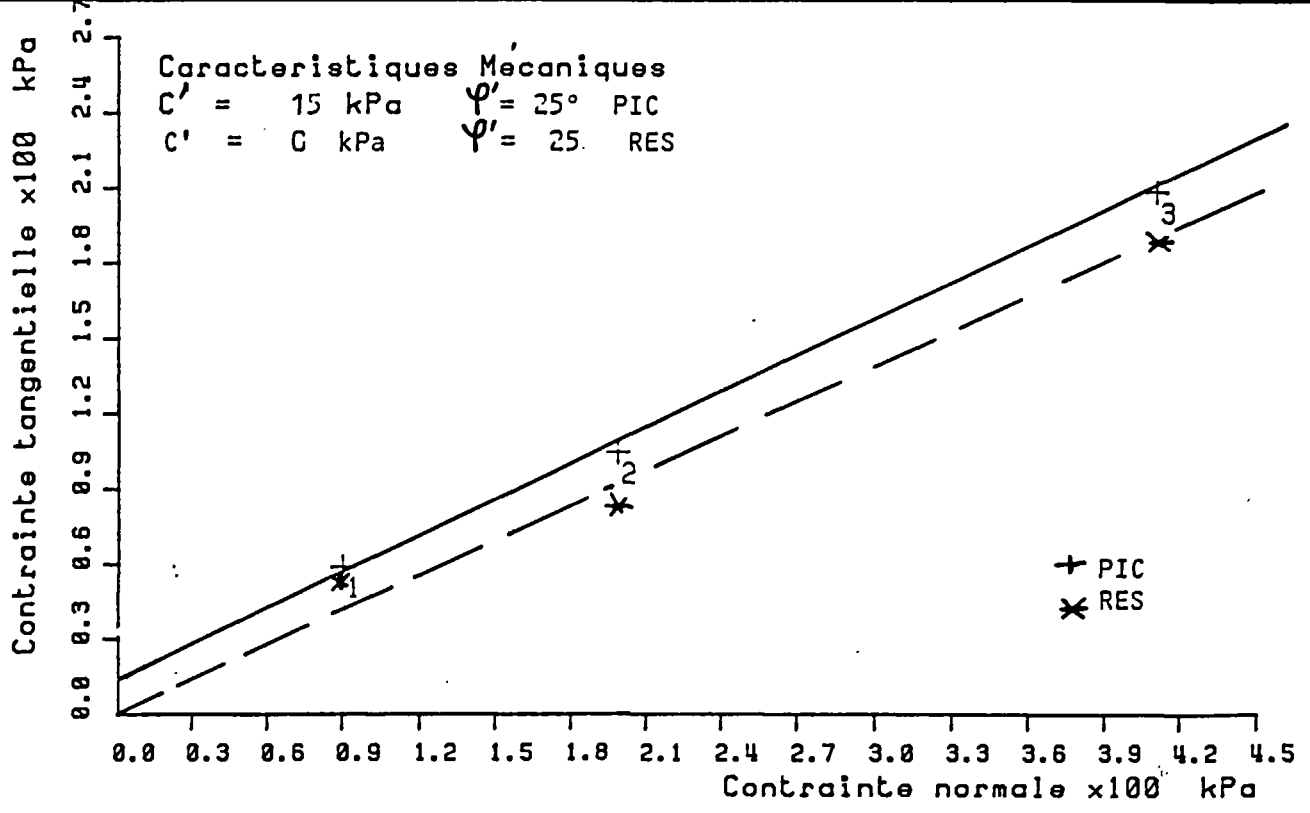
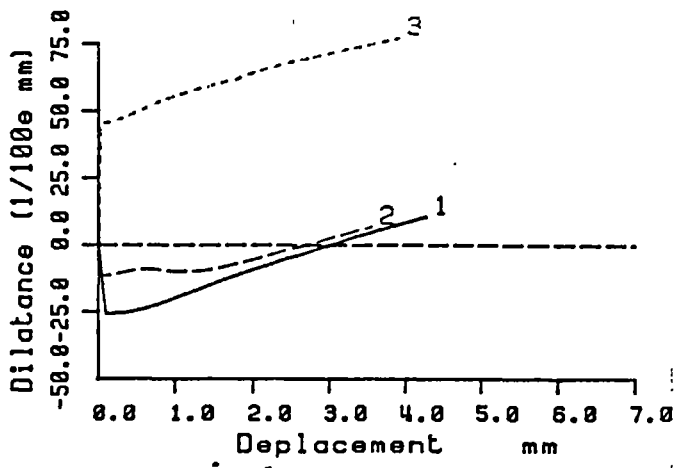
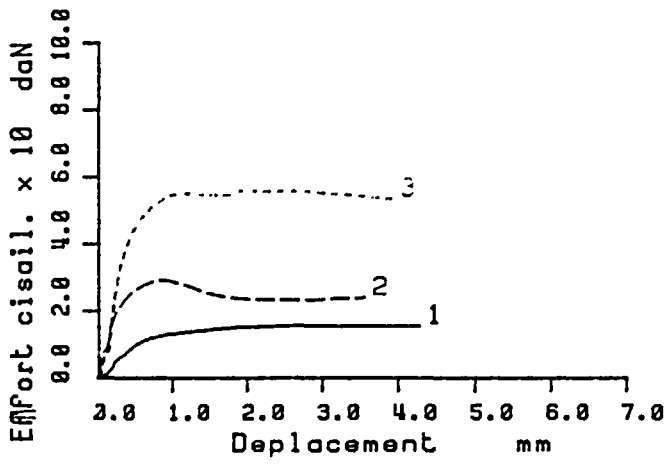
ANNEXE N°3.3
Essais de cisaillement CD

ANNEXE N°3.3
Essais de cisaillement CD

ESSAI DE CISAILLEMENT CD

Chantier : FDF RN9 Date : 12.12.90
 Prelevement : SC1 Prof. : 5.80 m - 6.10 m
 Nature : ARGILE SABLEUSE Etat : REMANIE

Observation :





INGENIERIE GEOTECHNIQUE

AFFAIRE _____

Operateur _____

Contrôle par _____

Date _____

Bordereau n° : _____

ESSAI DE CISAILLEMENT CD

Chantier : RN9 FDF

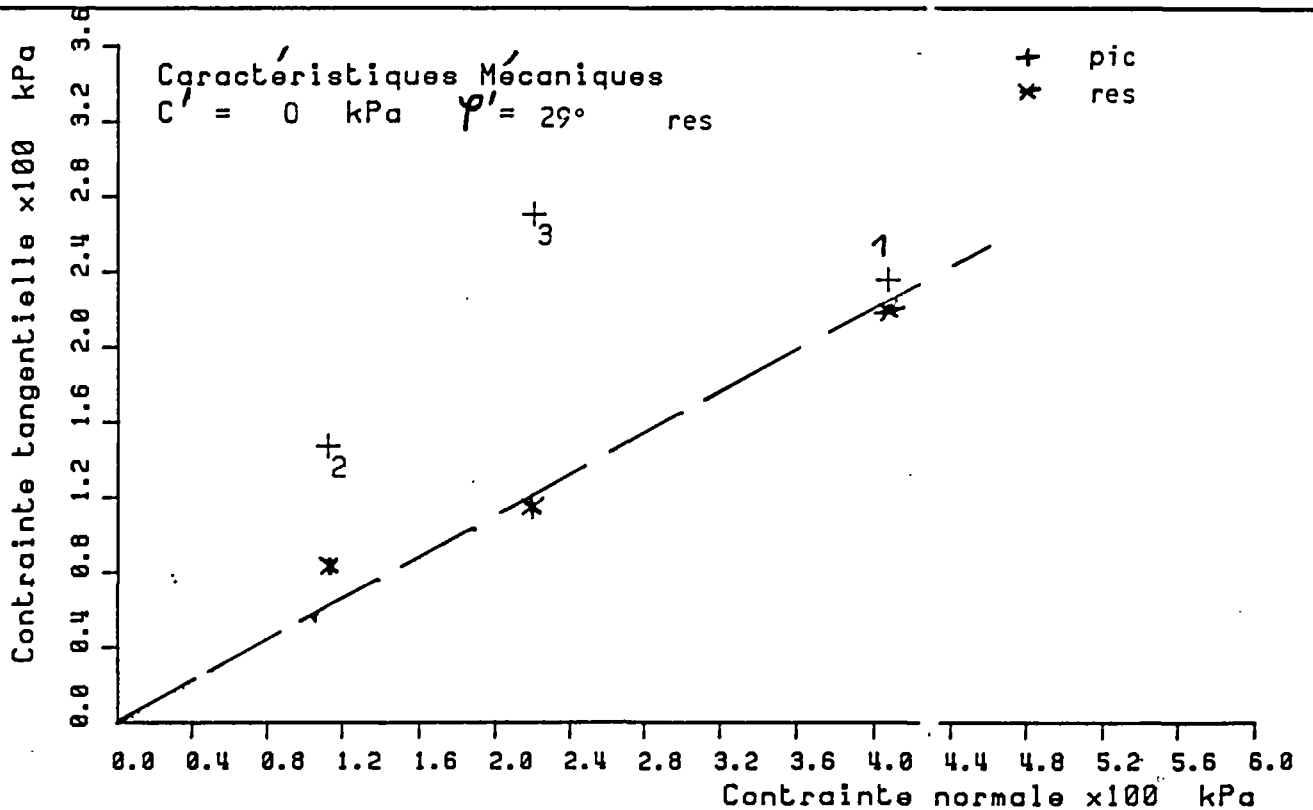
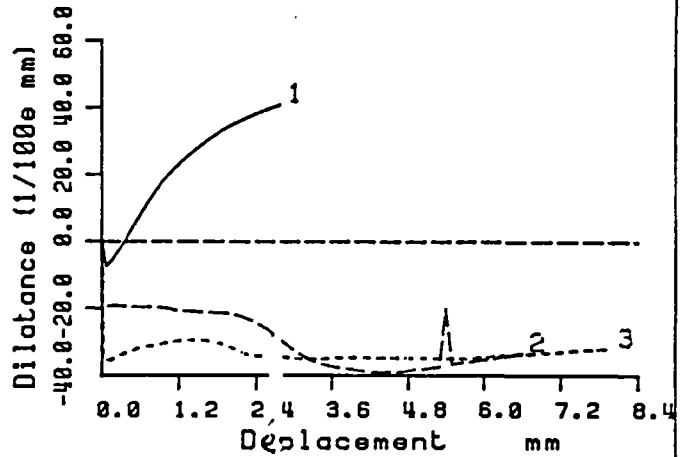
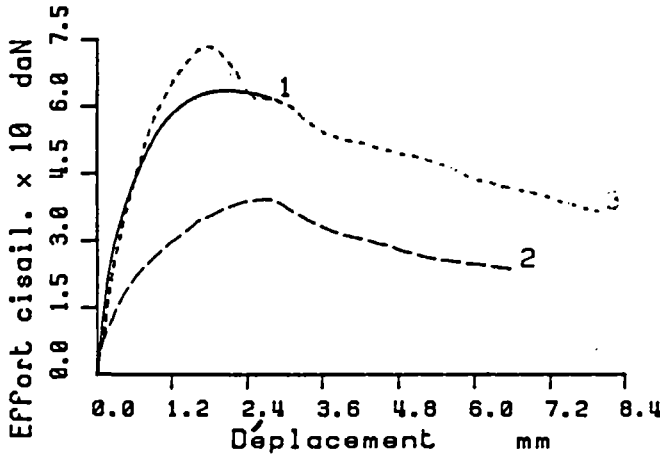
Date : .4.12.90

Prelevement : SC2

Prof. : 11.70 m - 12.20 m

Nature : ARGILE SABLEUSE Etat : INTACT

Observation :



ESSAI DE CISAILEMENT CD

CHANTIER : FDF RN9 DATE : 12.12.90
PRELEVEMENT : SO1 PROF. : 5.50 m - 6.10 m
NATURE : ARGILE SABLEUSE ETAT : REMANIE

ESSAIS	1	2	3	4	5
Diamètre (mm)	60.00	60.00	60.00	-	-
Hauteur (mm)	25.00	25.00	25.00	-	-

CHARACTERISTIQUES DES ESSAIS

σ normale (kPa)	85.00	195.00	359.00	-	-
Vit. essai (mm/min)	0.020	0.020	0.020	-	-

ETAT INITIAL DES ECHANTILLONS

Poids volumique sec (kN/m ³)	11.80	11.80	11.80	-	-
Teneur eau (%)	34.00	34.00	34.00	-	-
Degré satur. (%)	72.	72.	72.	-	-

ETAT FINAL DES ECHANTILLONS

Poids volumique sec (kN/m ³)	12.00	12.00	12.00	-	-
Teneur eau (%)	49.10	49.10	49.10	-	-
Degré satur. (%)	100.	100.	100.	-	-

RESULTATS

σ corrigé (kPa)	90.05	195.51	410.72	-	-
τ max (kPa)	58.56	104.31	208.55	-	-



INGENIERIE GEOTECHNIQUE

AFFAIRE _____

Operateur _____

Contrôle par _____

Date _____

Bordereau n° : _____

ESSAI DE CISAILLEMENT CD

Chantier : RN9 FDF

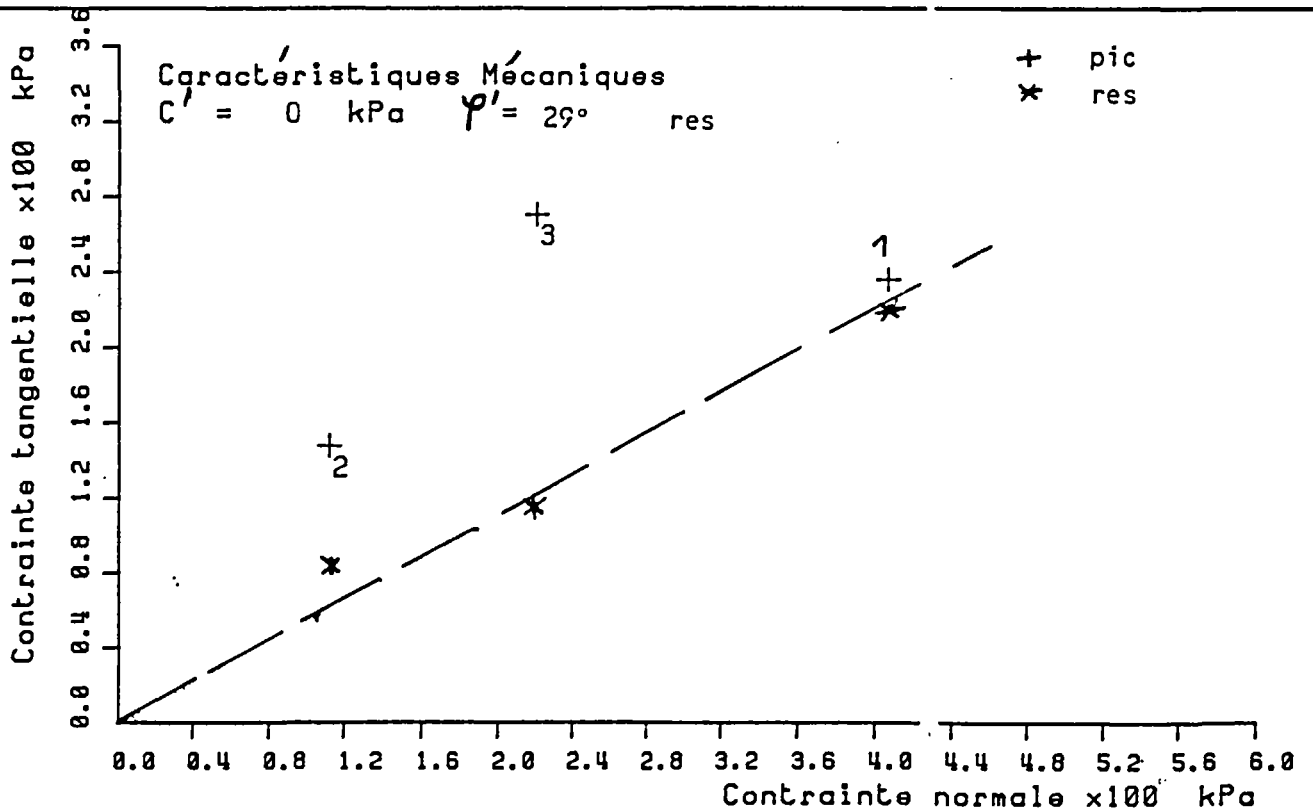
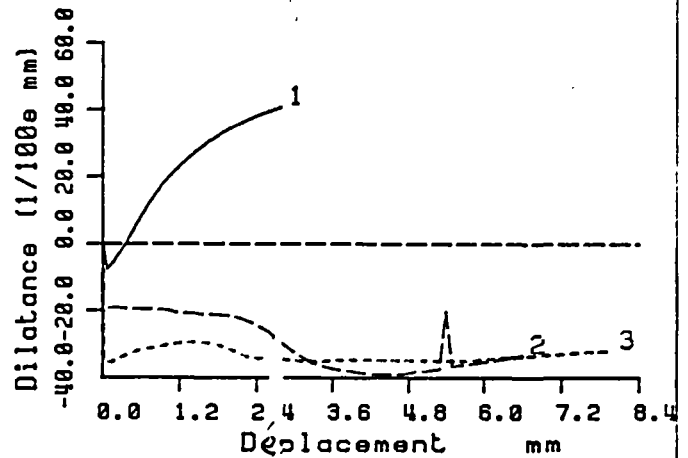
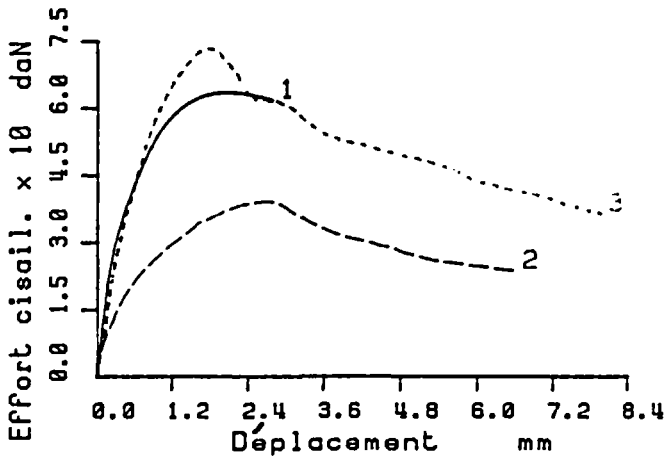
Date : .4.12.90

Prelevement : SC2

Prof. : 11.70 m - 12.20 m

Nature : ARGILE SABLEUSE Etat : INTACT

Observation :





INGENIERIE GEOTECHNIQUE

AFFAIRE _____

Operateur _____

Contrôle par _____

Date _____

Bordereau n° : _____

ESSAI DE CISAILLEMENT CD

Chantier : FDF RN9

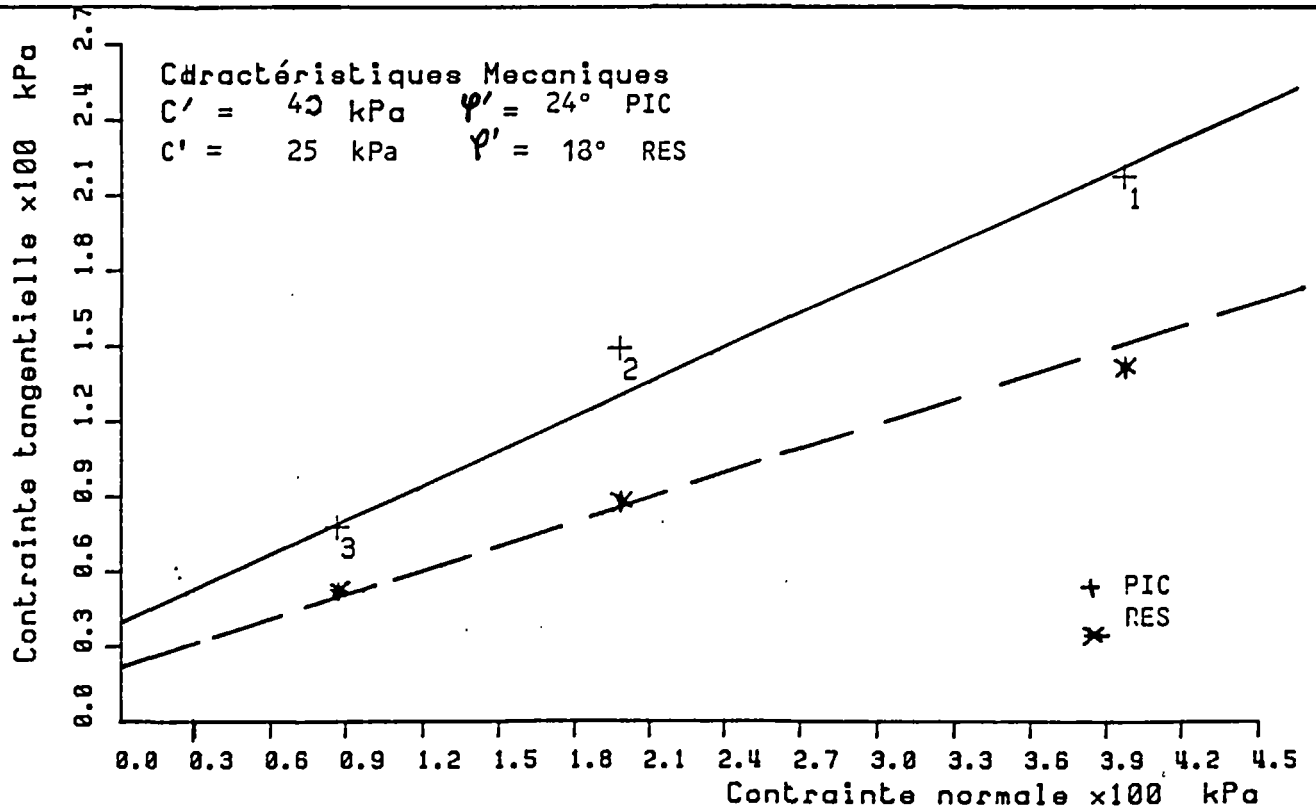
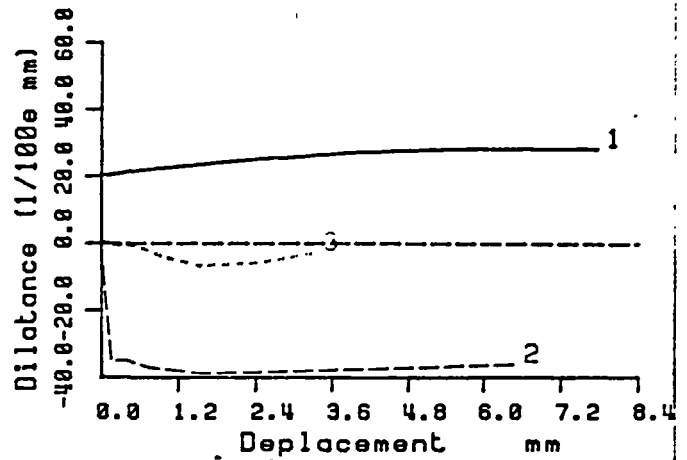
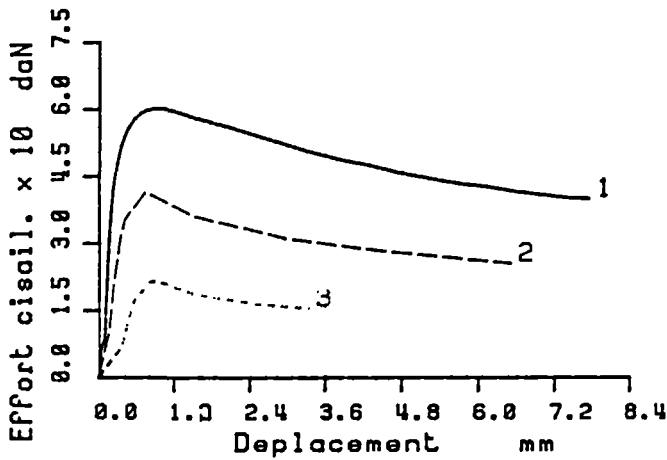
Date : 10.12.90

Prelevement : SC3

Prof. : 5.00 m - 5.50 m

Nature : SABLE ARGILEUX Etat : REMANIE

Observation :



ESSAI DE CISAILLEMENT CD

CHANTIER : RN9 FOF | DATE : 14.12.90
PRELEVEMENT : SC2 | PROF. : 11.70 m - 12.20 m
NATURE : ARGILE SABLEUSE | ETAT : INTACT

ESSAIS	1	2	3	4	5
Diametre (mm)	60.00	60.00	60.00	-	-
Hauteur (mm)	3.50	3.50	3.50	-	-

CARACTERISTIQUES DES ESSAIS

σ normale (kPa)	389.00	106.00	212.00	-	-
Vit. essai (mm/mn)	0.020	0.020	0.020	-	-

ETAT INITIAL DES ECHANTILLONS

Poids volumique sec (kN/m ³)	10.70	10.70	10.70	-	-
Teneur eau (%)	50.80	50.80	50.80	-	-
Degré satur. (%)	91.	91.	91.	-	-

ETAT FINAL DES ECHANTILLONS

Poids volumique sec (kN/m ³)	11.00	11.00	11.00	-	-
Teneur eau (%)	59.70	59.70	59.70	-	-
Degré satur. (%)	100.	100.	100.	-	-

RESULTATS

σ corrigé (kPa)	406.66	112.35	220.52	-	-
τ max (kPa)	235.29	146.88	270.27	-	-

ESSAI DE CISAILEMENT CD

CHANTIER : FOF RNF DATE : 10.12.90
PRELEVEMENT : SD3 PROF. : 5.00 m - 5.50 m
NATURE : SABLE ARGILEUX ETAT : REMANIE

ESSAIS	1	2	3	4	5
Diamètre (mm)	60.00	60.00	60.00	-	-
Hauteur (mm)	25.00	25.00	25.00	-	-

CARACTERISTIQUES DES ESSAIS

σ normale (kPa)	389.00	195.00	85.00	-	-
Vit. essai (mm/min)	0.020	0.020	0.020	-	-

ETAT INITIAL DES ECHANTILLONS

Poids volumique sec (kN/m ³)	13.90	13.90	13.90	-	-
Teneur eau (%)	28.30	28.30	28.30	-	-
Degré satur. (%)	83.	83.	83.	-	-

ETAT FINAL DES ECHANTILLONS

Poids volumique sec (kN/m ³)	14.00	14.00	14.00	-	-
Teneur eau (%)	30.00	30.00	30.00	-	-
Degré satur. (%)	89.	89.	89.	-	-

RESULTATS

σ corrigé (kPa)	397.17	198.18	86.71	-	-
τ max (kPa)	217.16	146.80	77.17	-	-



AFFAIRE _____		
Operateur _____	Contrôle par _____	Date _____
_____		Bordereau n° _____

ESSAI DE CISAILLEMENT CD

Chantier : FDF RN9

Date : 12.90

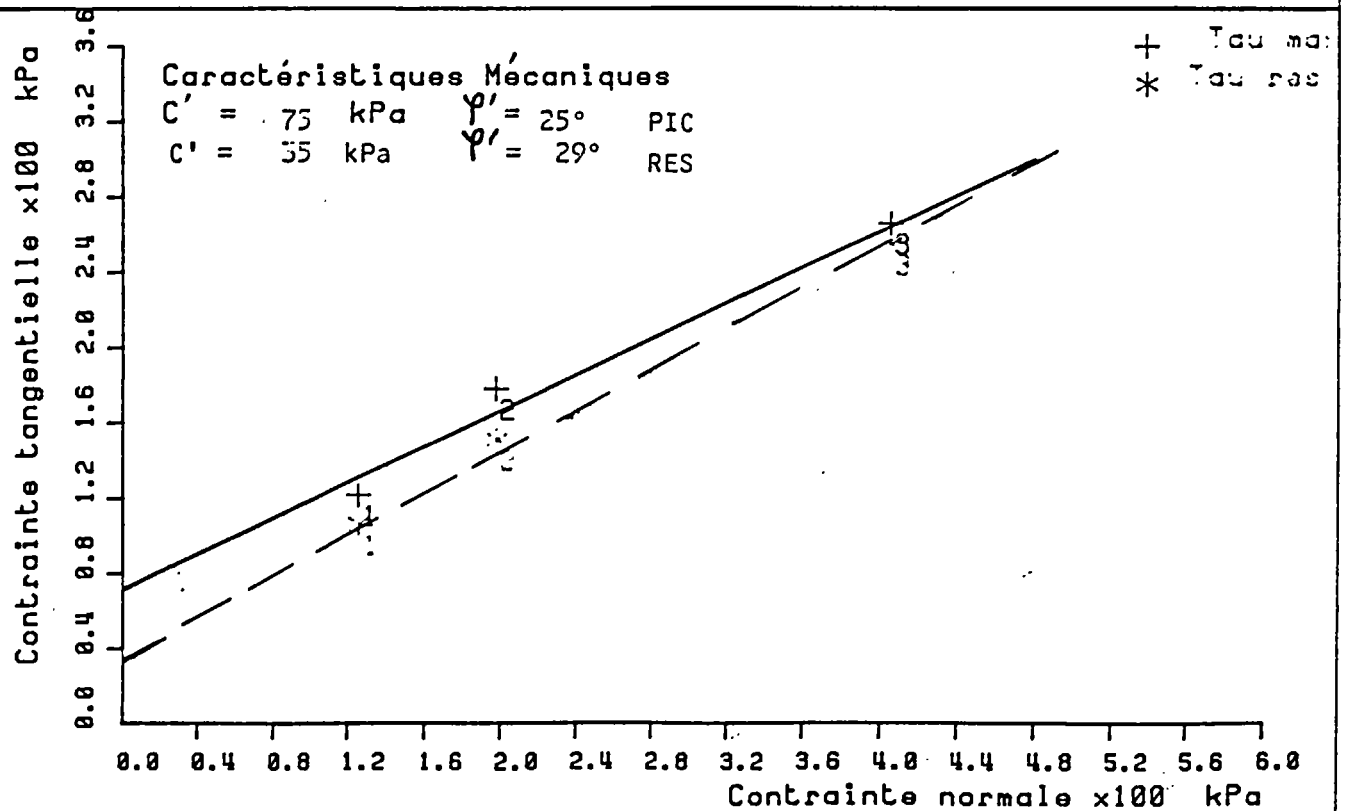
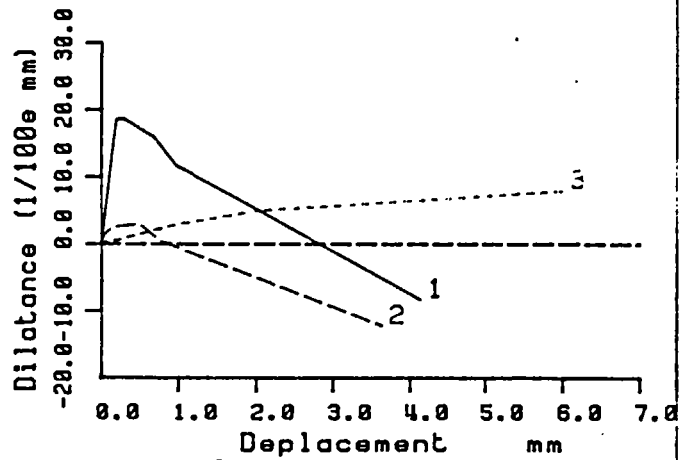
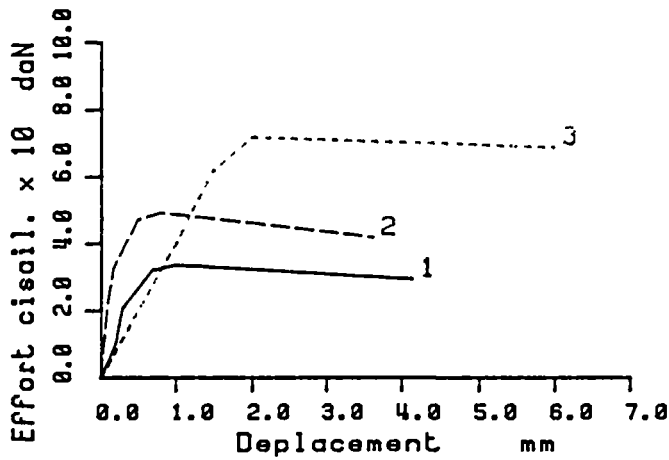
Prélèvement : SC4

Prof. : 13.65 m - 14.05 m

Nature : ARGILE

Etat : COMPACTE

Observation :



ANNEXE N°3.4
Essais triaxiaux UU



INGENIERIE GEOTECHNIQUE

AFFAIRE _____

Operateur _____

MATIEAT JM

Contrôle par _____

SARDELLA E

Date _____

Bordereau n° : _____

ESSAI TRIAXIAL UU

Chantier... : FORT DE FRANCE RNS

Date : 05.12.90

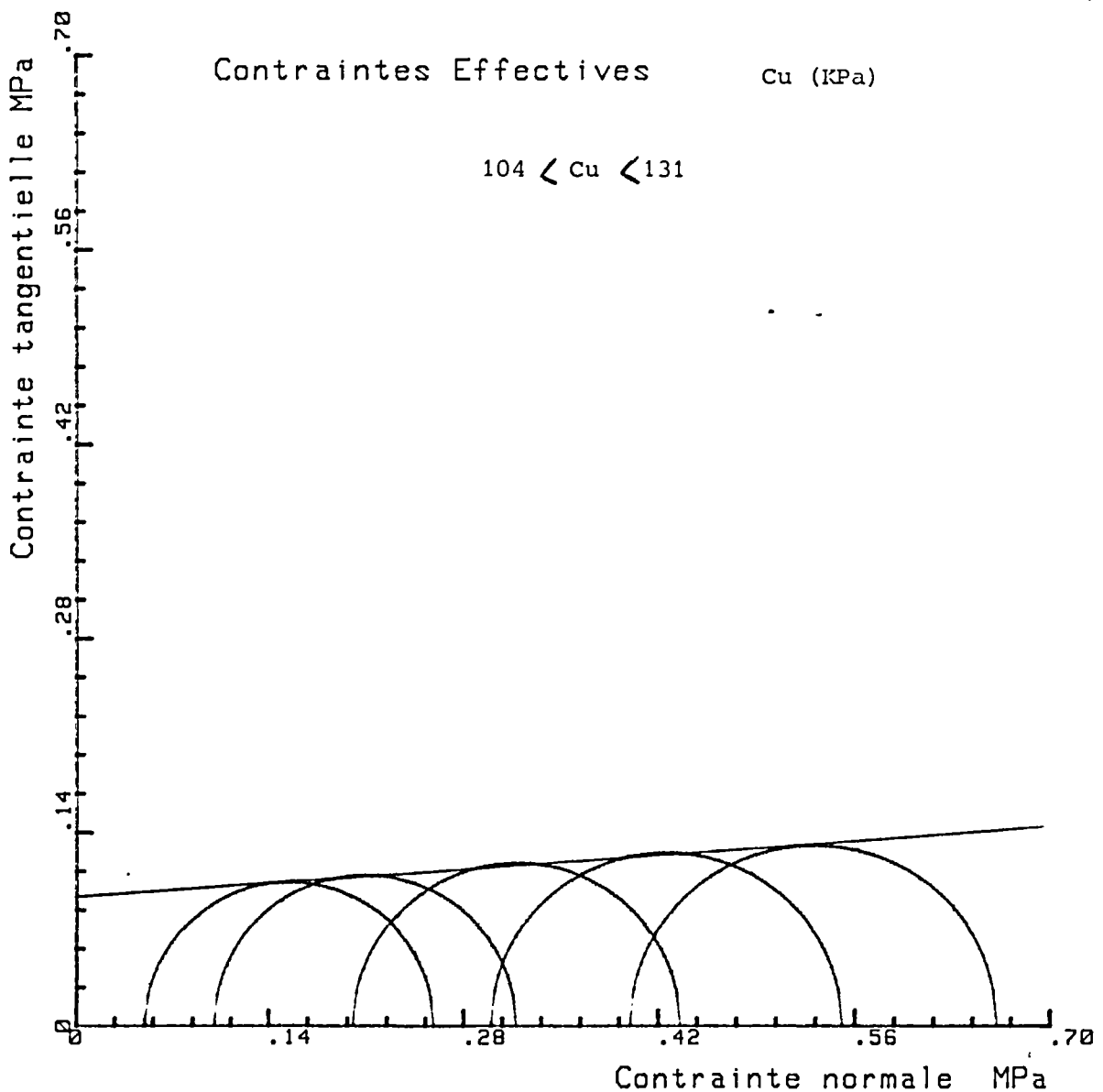
Prélèvement : SC1

Prof. : 5.7/6.05m

Nature..... : SABLE ET ARGILE

Etat : INTACT

Observation : Alternance millimétrique de sable fin beige et d'Argile brune plastique





INGENIERE GEOTECHNIQUE

AFFAIRE _____

Operateur _____

MATIFAT JM

Contrôle par _____

SARDELLA E

Date _____

Bordereau n° : _____

ESSAI TRIAXIAL UU

Chantier... : FORT DE FRANCE RN9

Date : 04.12.90

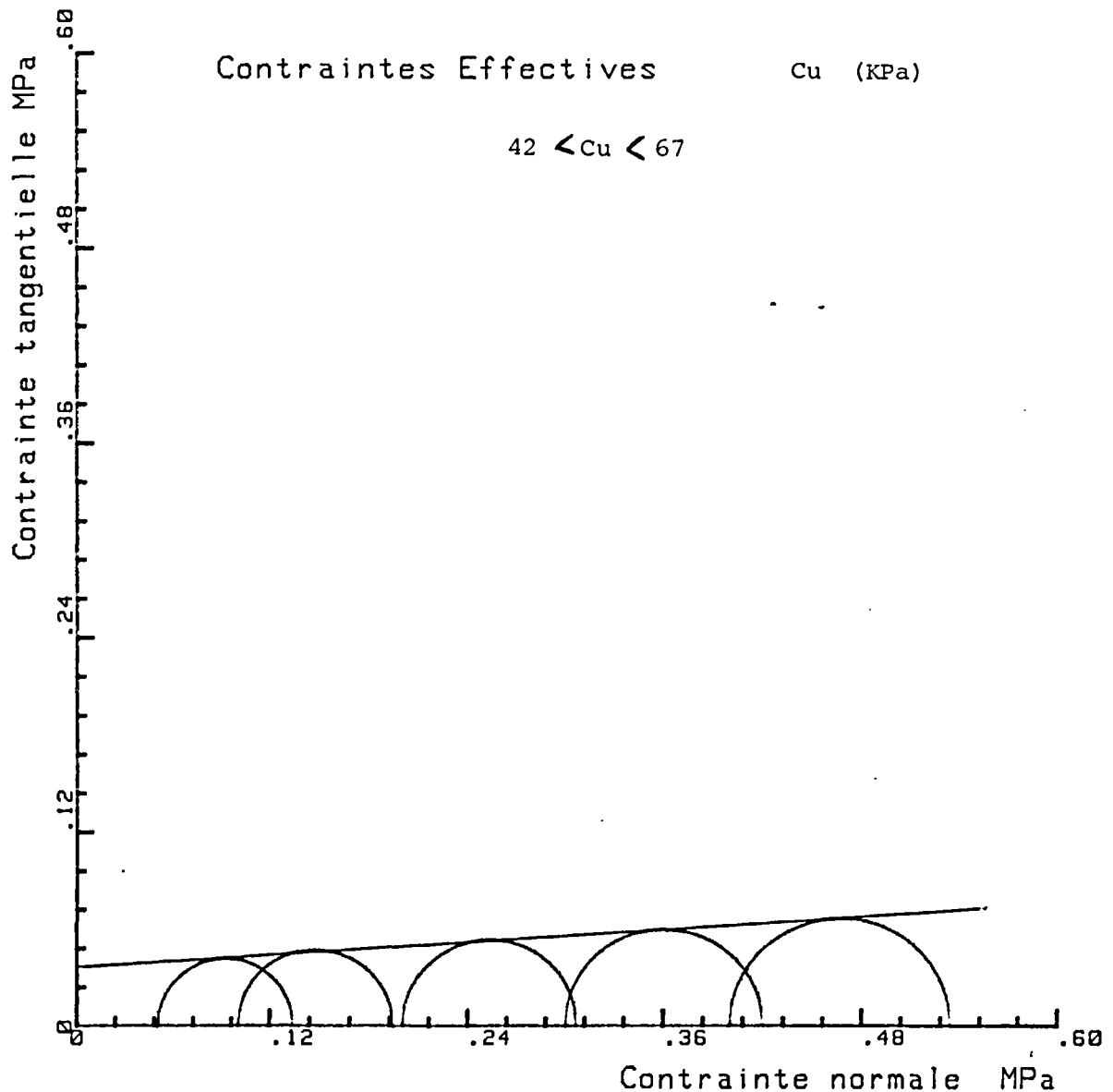
Prélèvement : SC 2

Prof. : 5.8/6.3

Nature..... : PONCES REMANIEES

Etat : INTACT

Observation : ROCHE DECOMPOSEE BRUNE
SABLE GROSSIER ET GRAVIERS
QUELQUES BLOCS ROCHEUX





INGENIERIE GEOTECHNIQUE

AFFAIRE _____

Operateur _____

MATTEAT JM

Contrôle par _____

SARDELLA F

Date _____

Bordereau n° : _____

ESSAI TRIAXIAL UU

Chantier... : FORT DE FRANCE RNS

Date : 05.12.90

Prélèvement : SC2

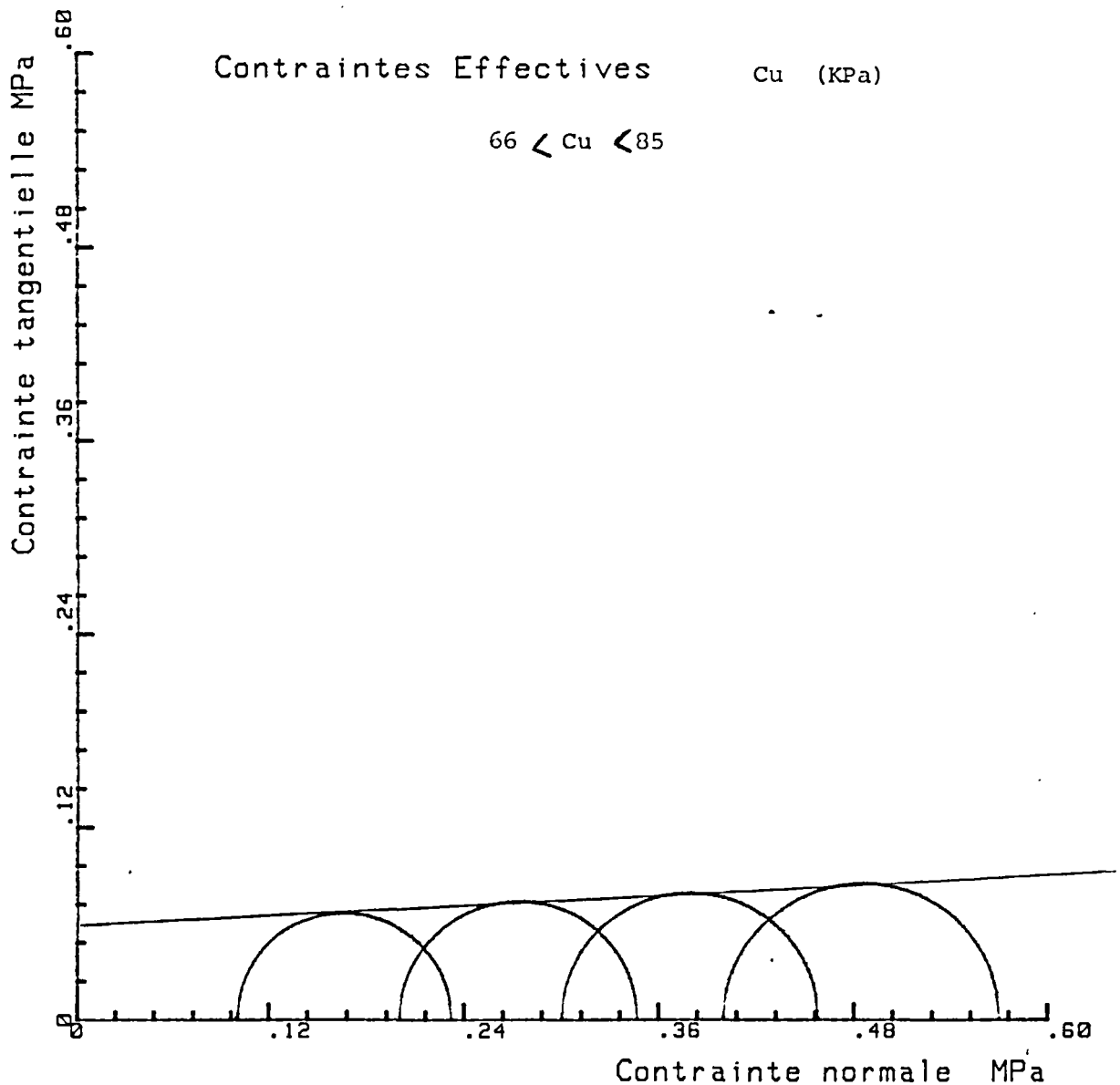
Prof. : 11.7/12.2m

Nature..... : PONCE REMANIEE

Etat : INTACT

Observation :

Roche décomposée brune légèrement bariolée
Argile sableuse à passée graveleuse (11.7/12.0)





INGENIERIE GEOTECHNIQUE

AFFAIRE _____

Operateur _____

MATTEAT JM

Contrôle par _____

SARDELLA E

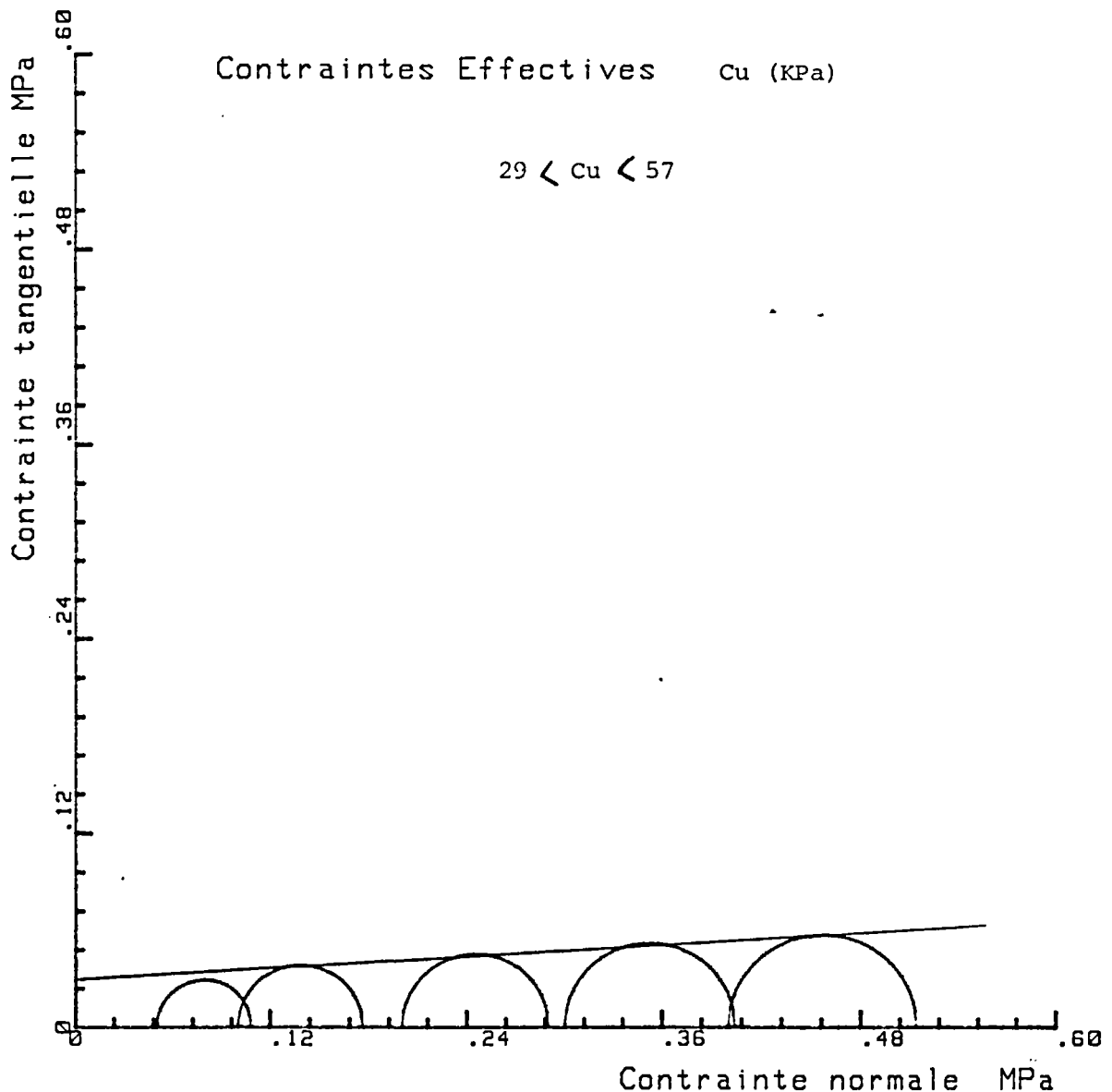
Date _____

Bordereau n° : _____

ESSAI TRIAXIAL UU

Chantier... : FORT DE FRANCE RNS Date : 04.12.90
Prélèvement : SC 3 Prof. : 5.0 / 5.5m
Nature..... : ANDESITE Etat : INTACT

Observation : Roche décomposée friable hétérogène
argile sableuse jaune verdâtre
quelques blocs rocheux gris très altérés





INGENIERIE GEOTECHNIQUE

AFFAIRE _____

Operateur _____
MATIFAT JM

Contrôle par _____
SARDELLA E

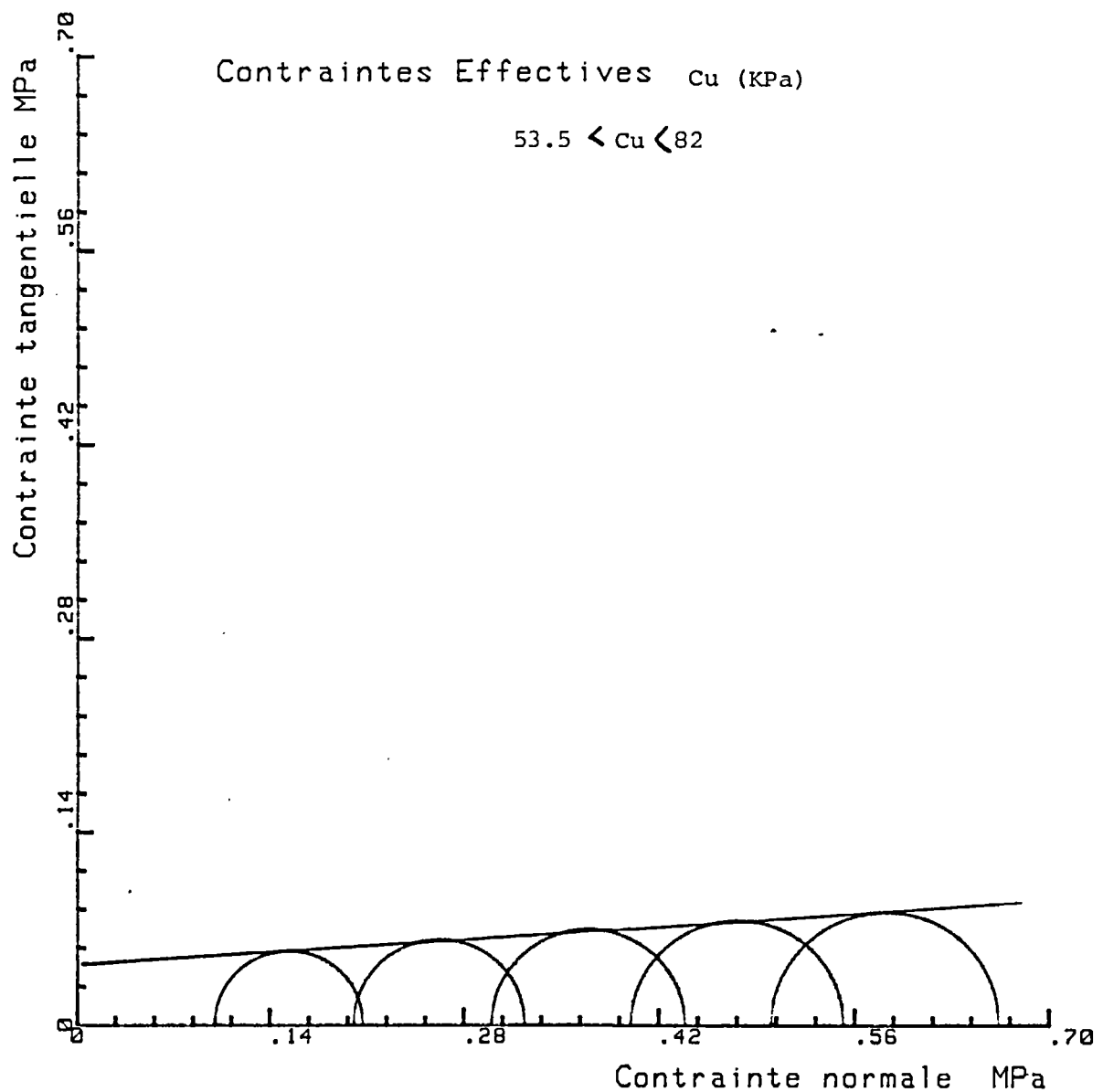
Date _____
Bordereau n° : _____

ESSAI TRIAXIAL UU

Chantier... : FORT DE FRANCE RNS Date : 05.12.90
Prélèvement : SC4 Prof. : 13.65/14.05m
Nature..... : ANDESITE Etat : INTACT

Observation :

Roche décomposée brune assez compacte
fracture ouverte subhorizontale



ANNEXE N°3.5
Essais de comprssion uniaxiale, avec mesure
de module et de la vitesse des ondes

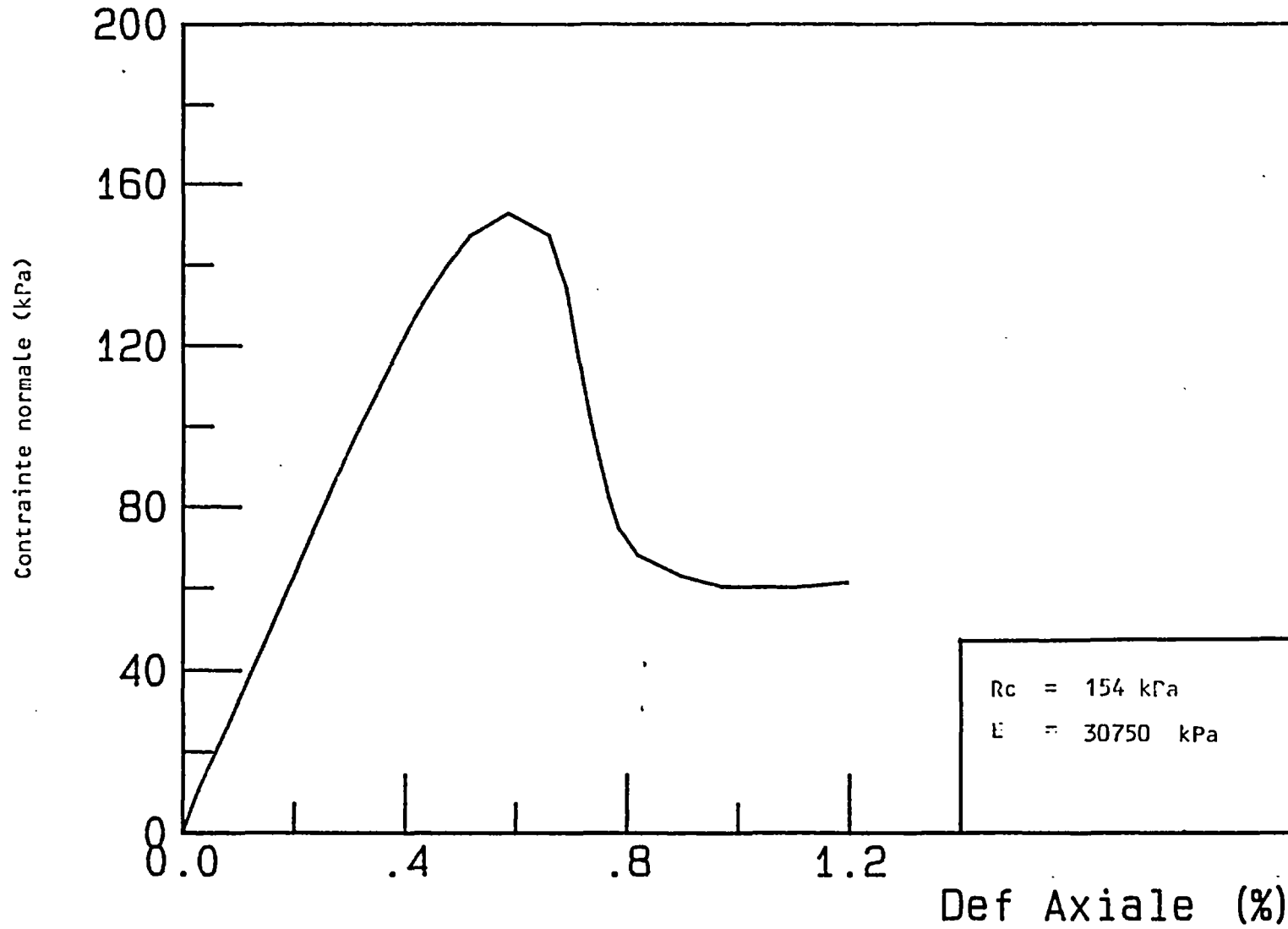
ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE

Echantillon : SC1

Profondeur : 7,20/7,50 m

Eprouvette : h : 161 mm

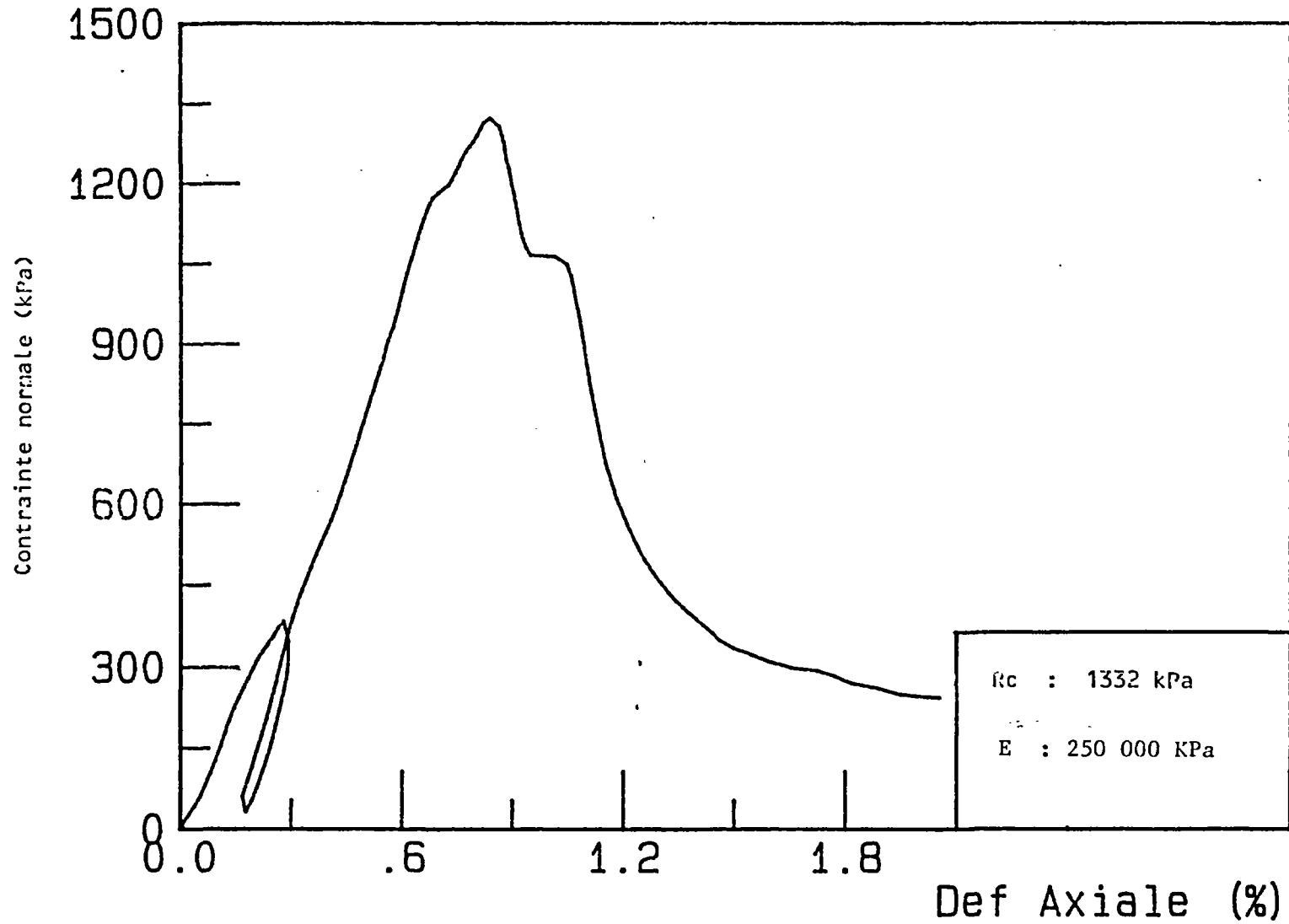
d : 76 mm



ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE

Echantillon : SC3
Profondeur : 12,70/15,00 m

Eprouvette : h : 162,6 mm
d : 62 mm



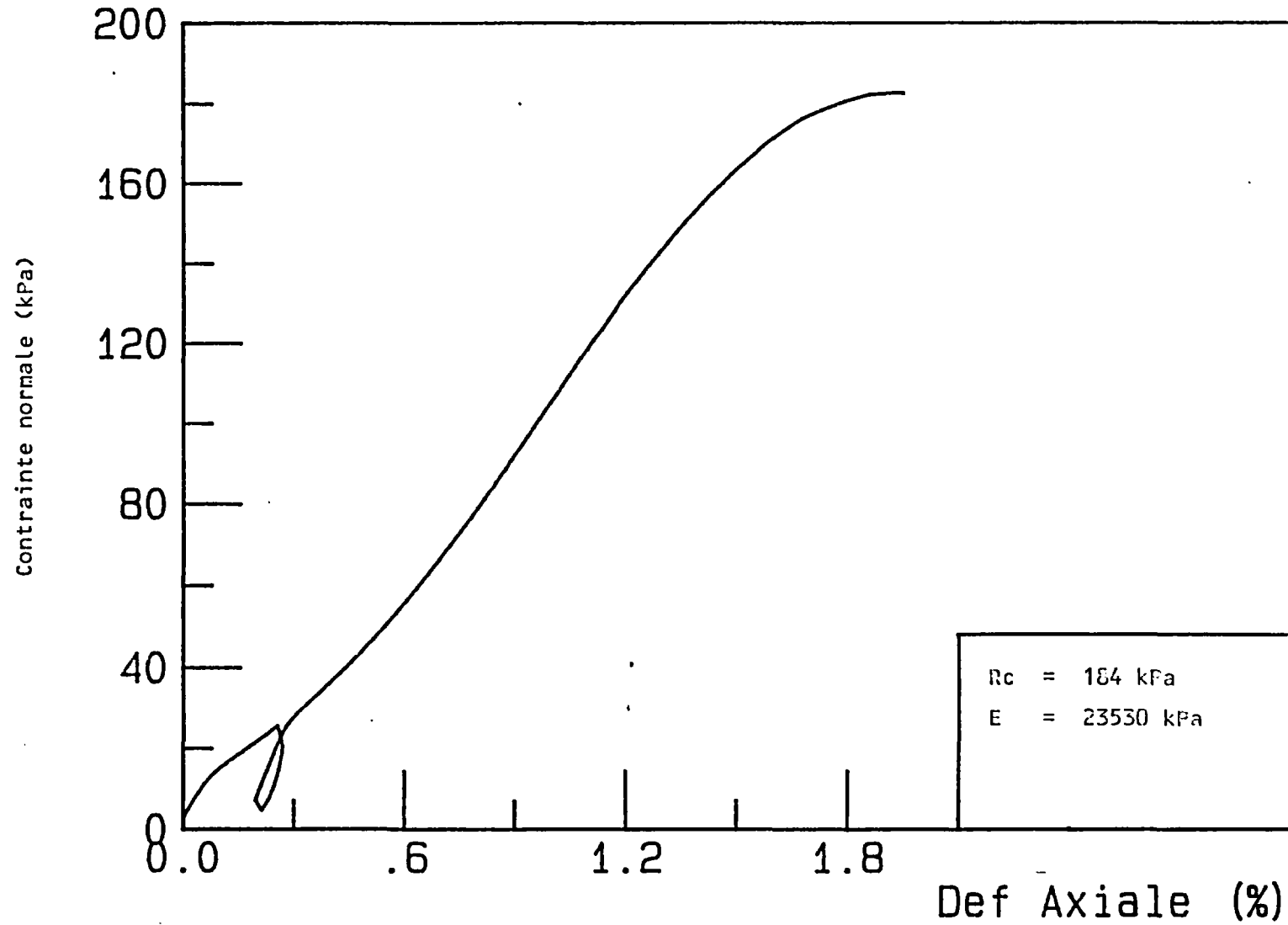
ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE

Echantillon : SC2

Profondeur : 5,80/6,30 m

Eprouvette : h : 162 mm

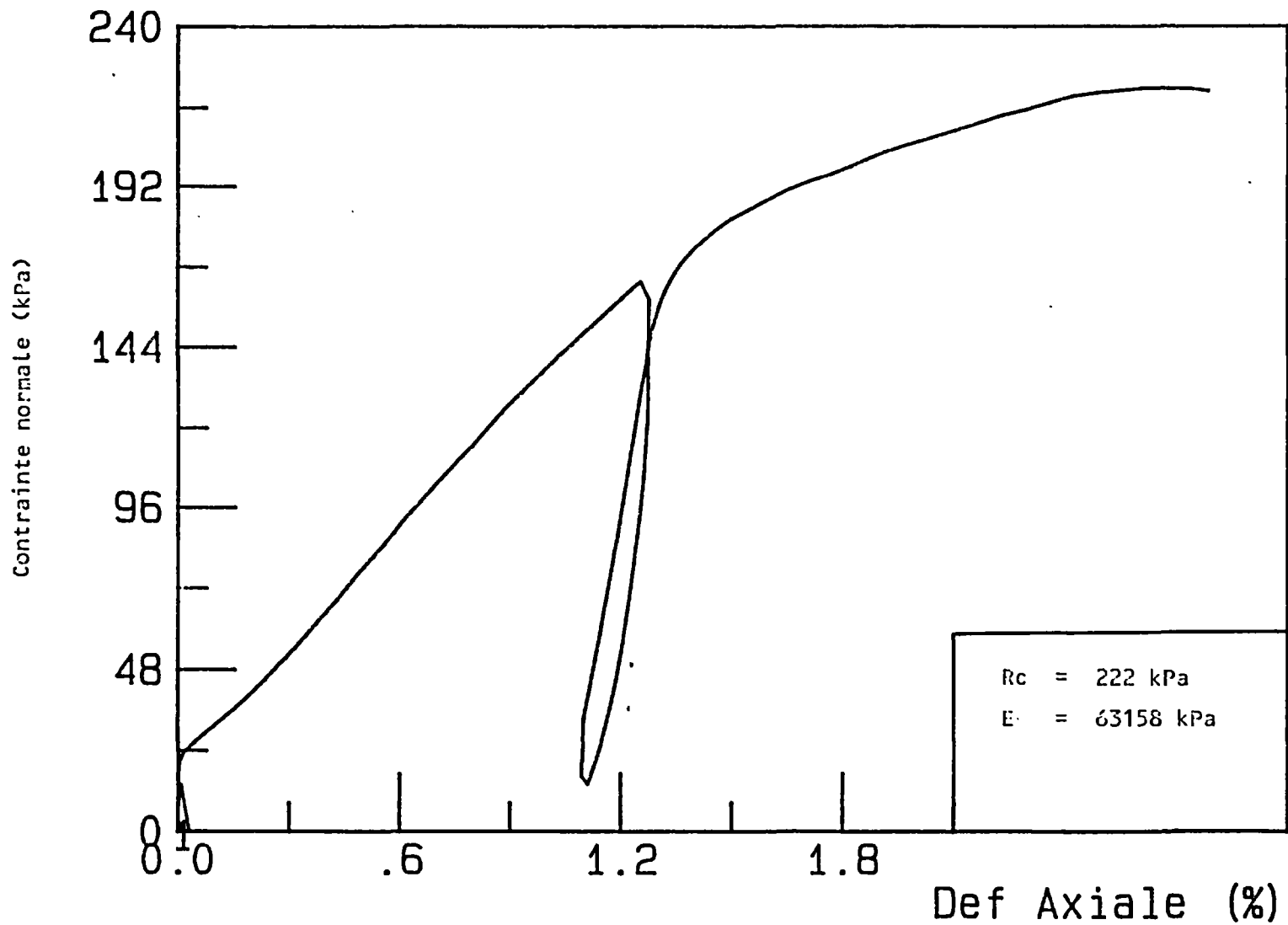
d : 77,5 mm



ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE

Echantillon : SC2
Profondeur : 10,70/11,20 m

Eprouvette : h : 182 mm
d : 76,8 mm



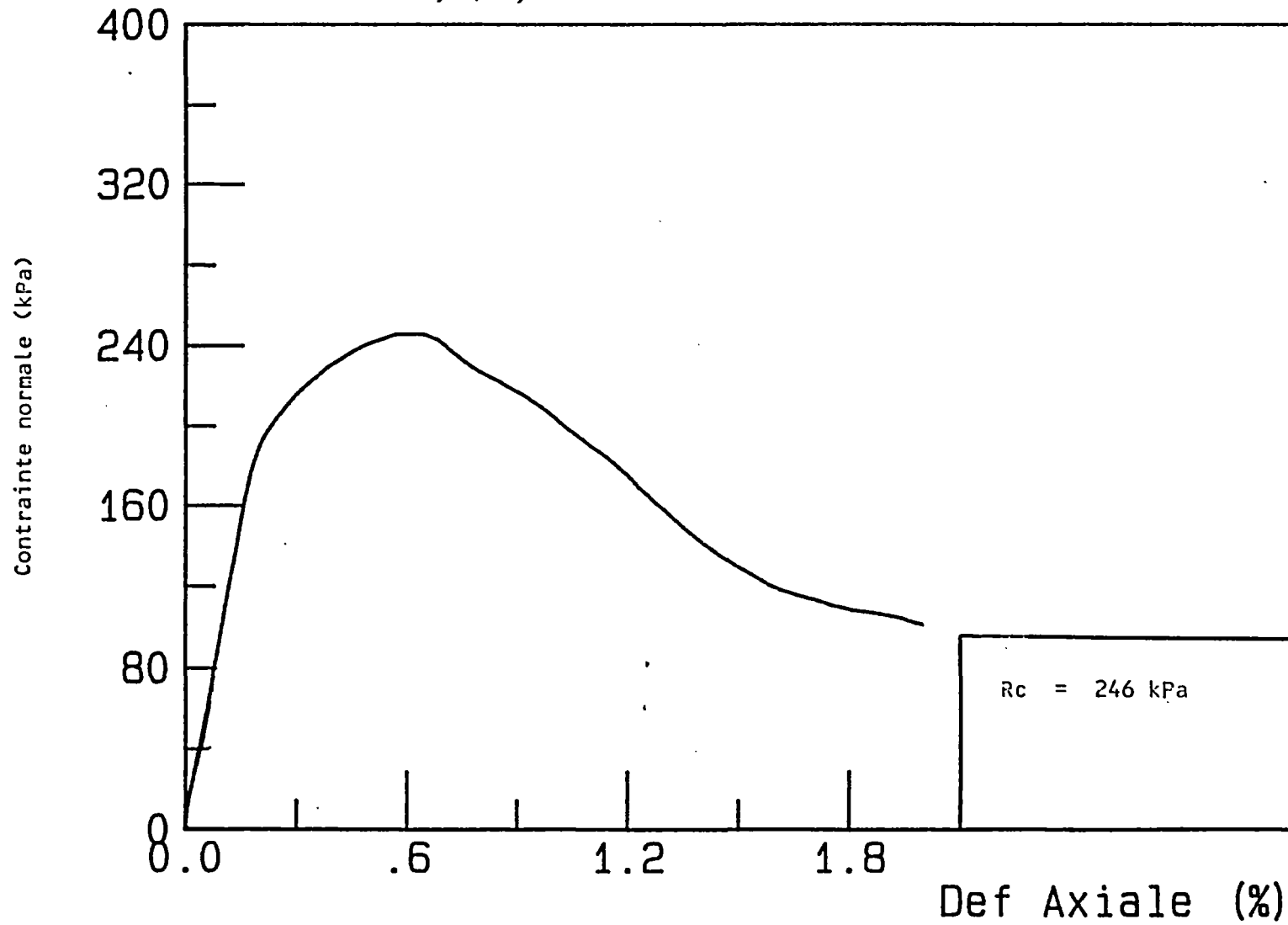
ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE

Echantillon : SC 2

Eprouvette : h : 143,4 mm

Profondeur : 20,10/20,50

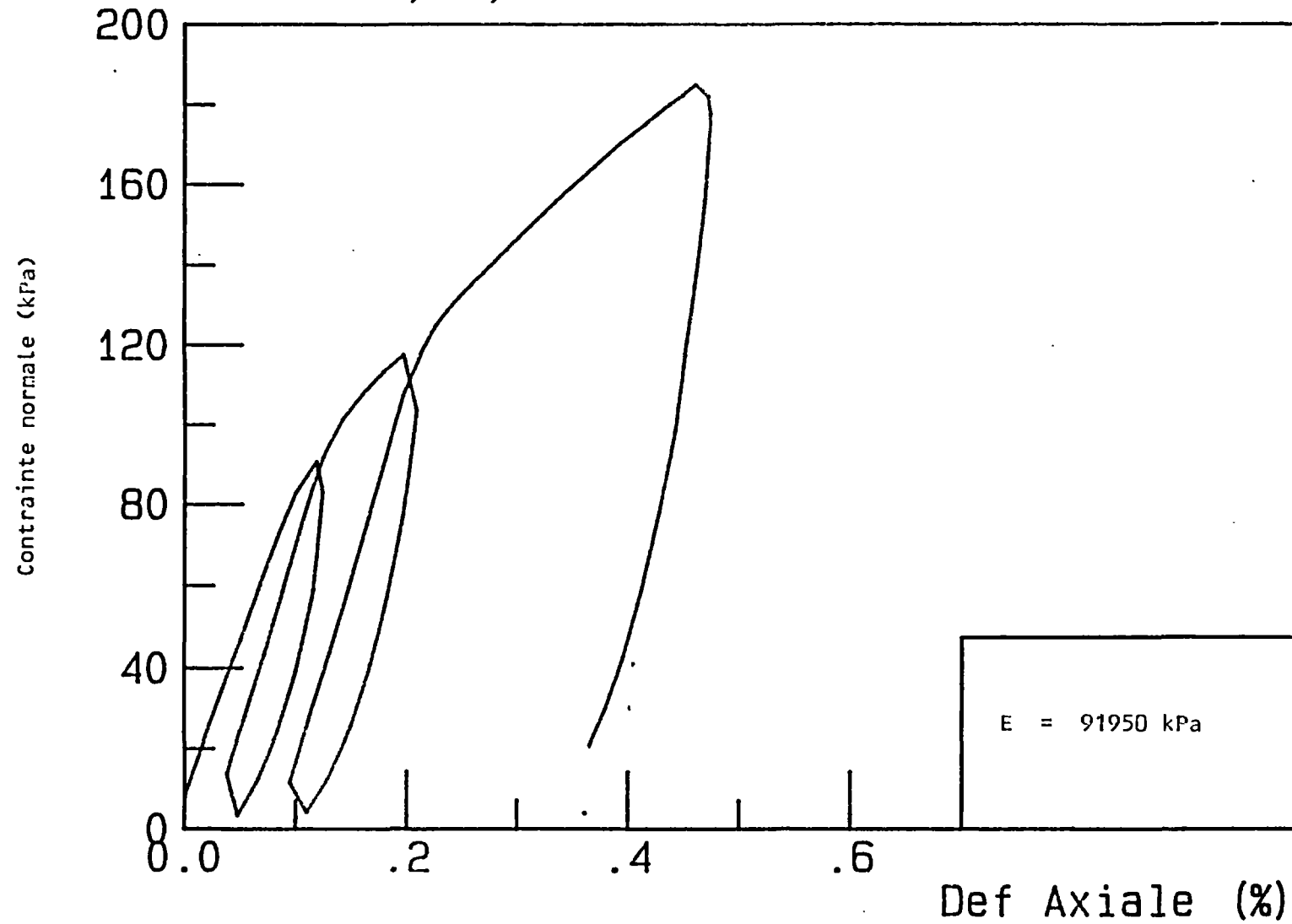
d : 77,7 mm



ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE

Echantillon : SC2
Profondeur : 20,10/20,50

Eprouvette : h : 143,4 mm
d : 77,7 mm



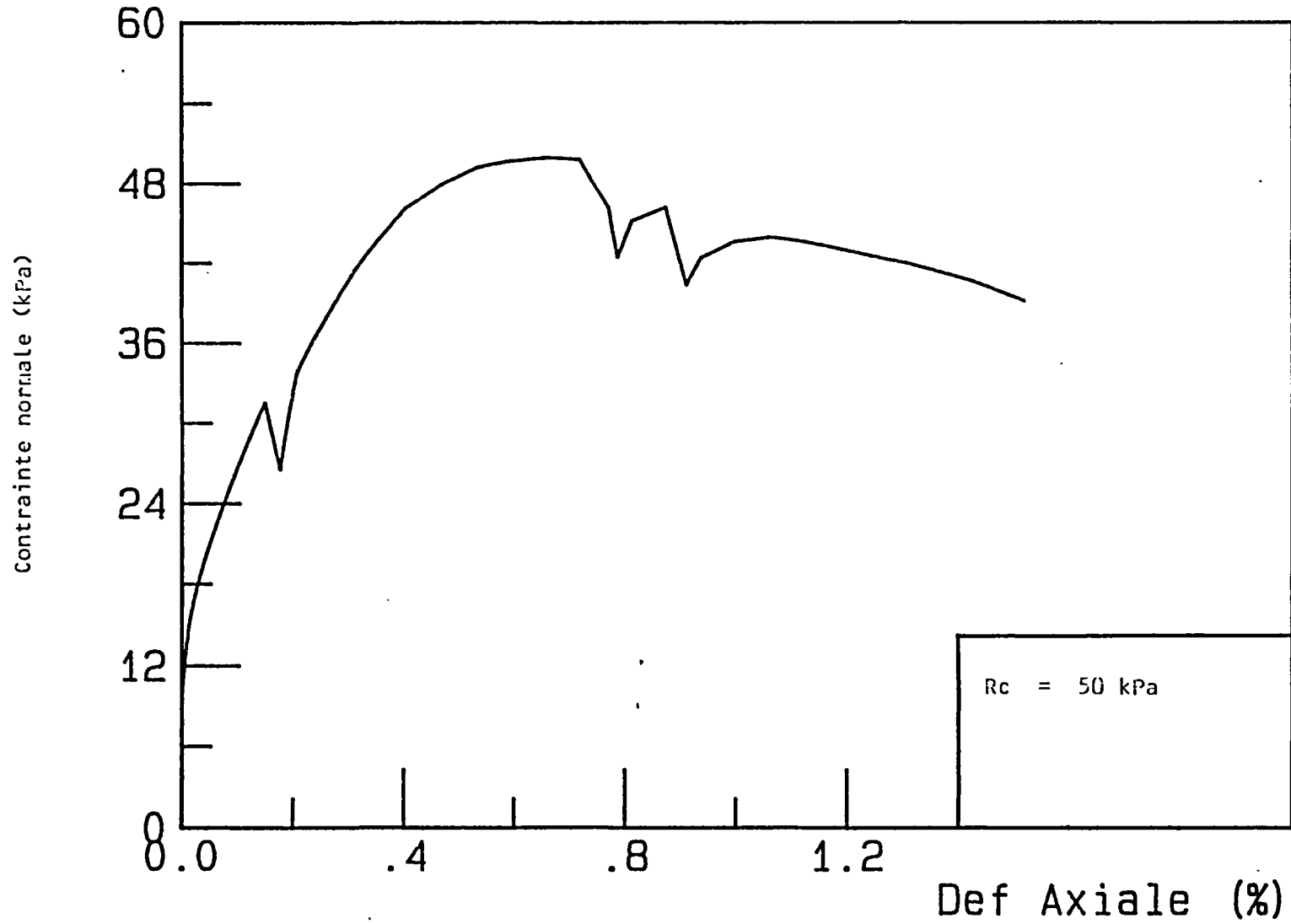
ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE

Echantillon : SC3

Profondeur : 2,00/2,50 m

Eprouvette : h : 160,1 mm

d : 78 mm



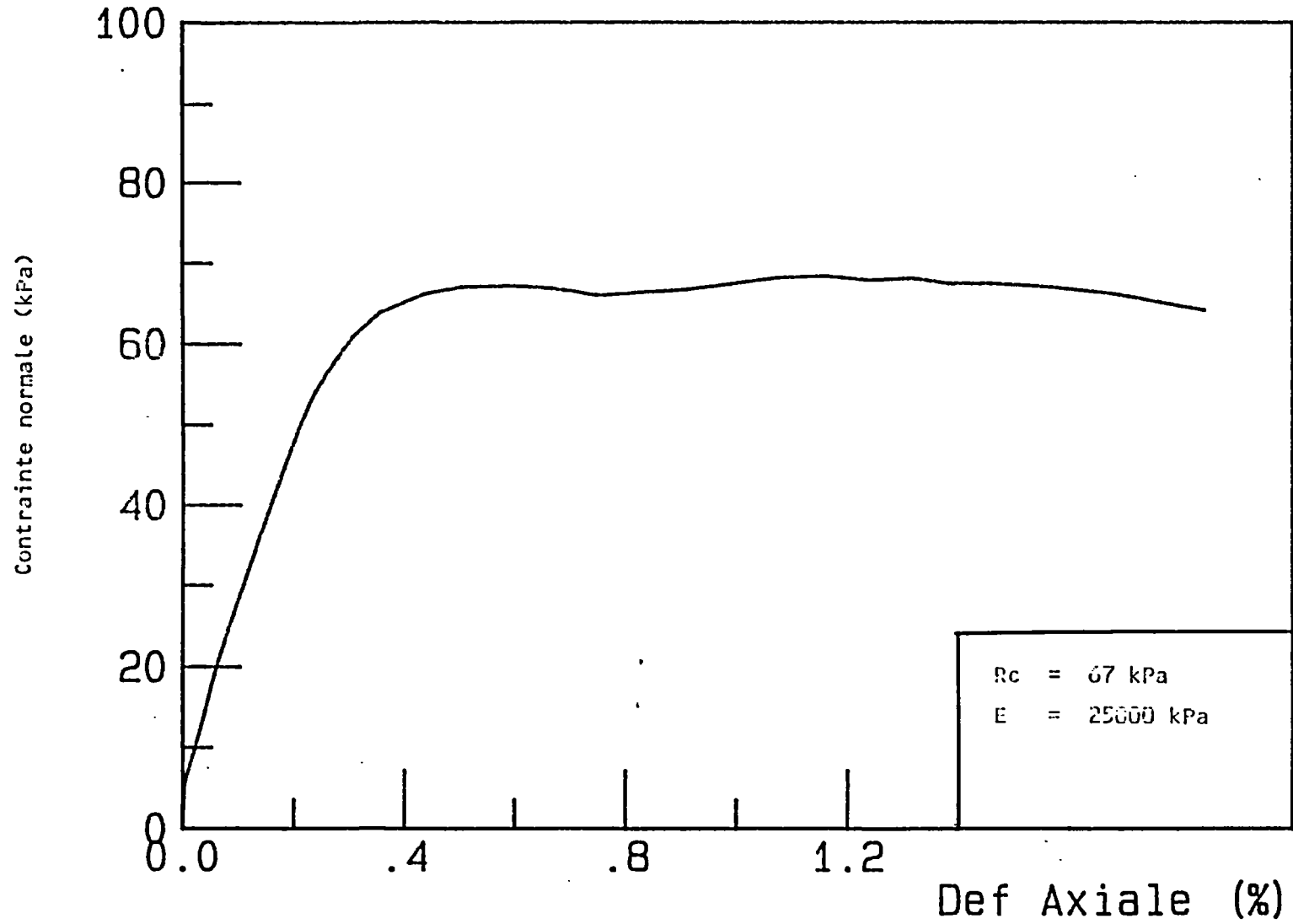
ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE

Echantillon : SC3

Profondeur : 5,00/5,50 m

Eprouvette : h : 168,00 mm

: d : 77,2 mm





AFFAIRE _____		
Operateur _____	Controle par _____	Date _____
_____	_____	Bordereau n° : _____

ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE

Etude: FORT DE FRANCE RN9

Chantier:

Date : 12.1290

Prélèvement:

Eprouvette: h 95.6 mm

Profondeur en m: 0.00

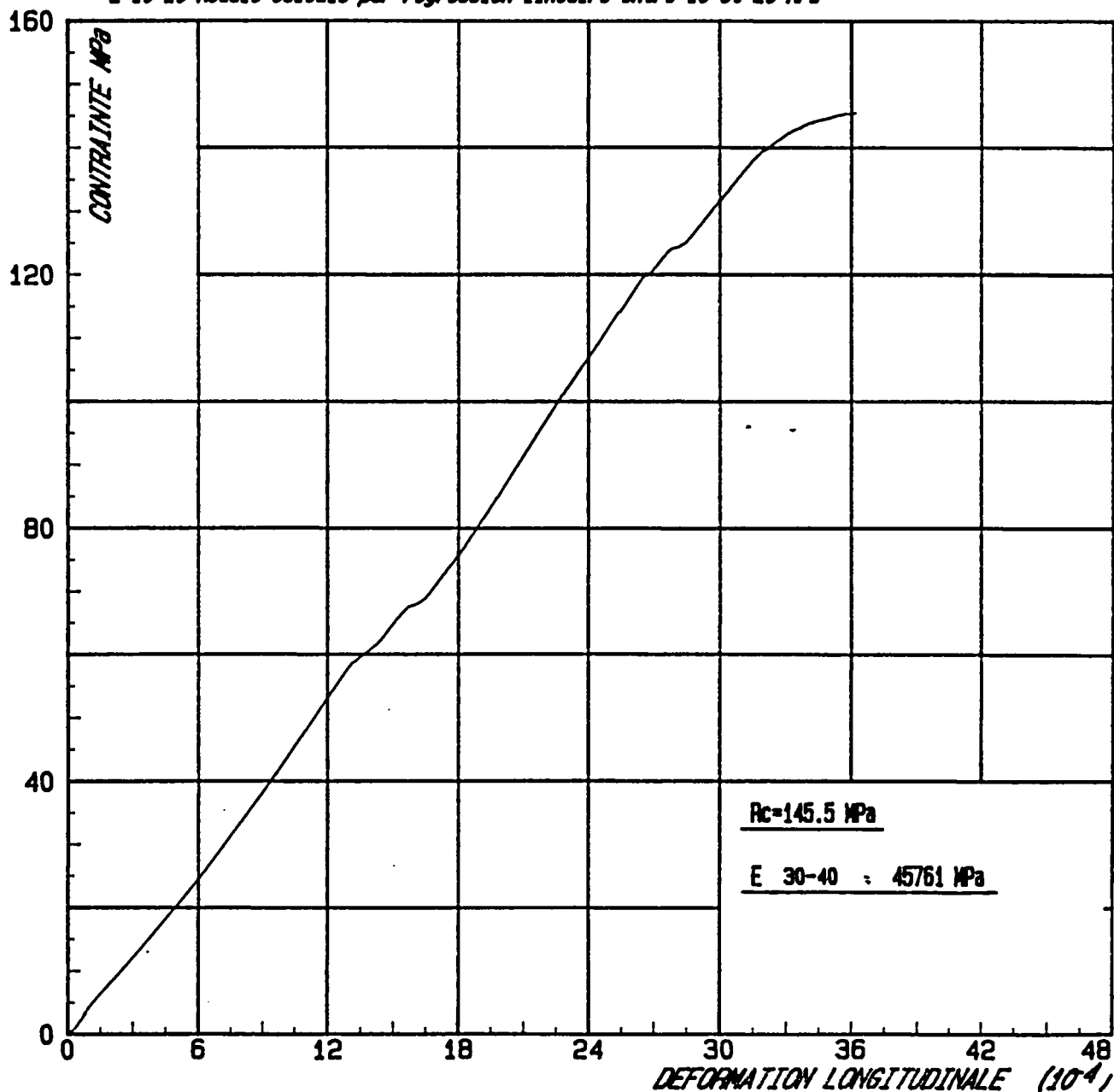
: d 50 mm

Nature: ANDESITE SAINTE

Vitesse d'essai: 0.15Pa/s

VITESSE DES ONDES LONGITUDINALES : 5432 m/s

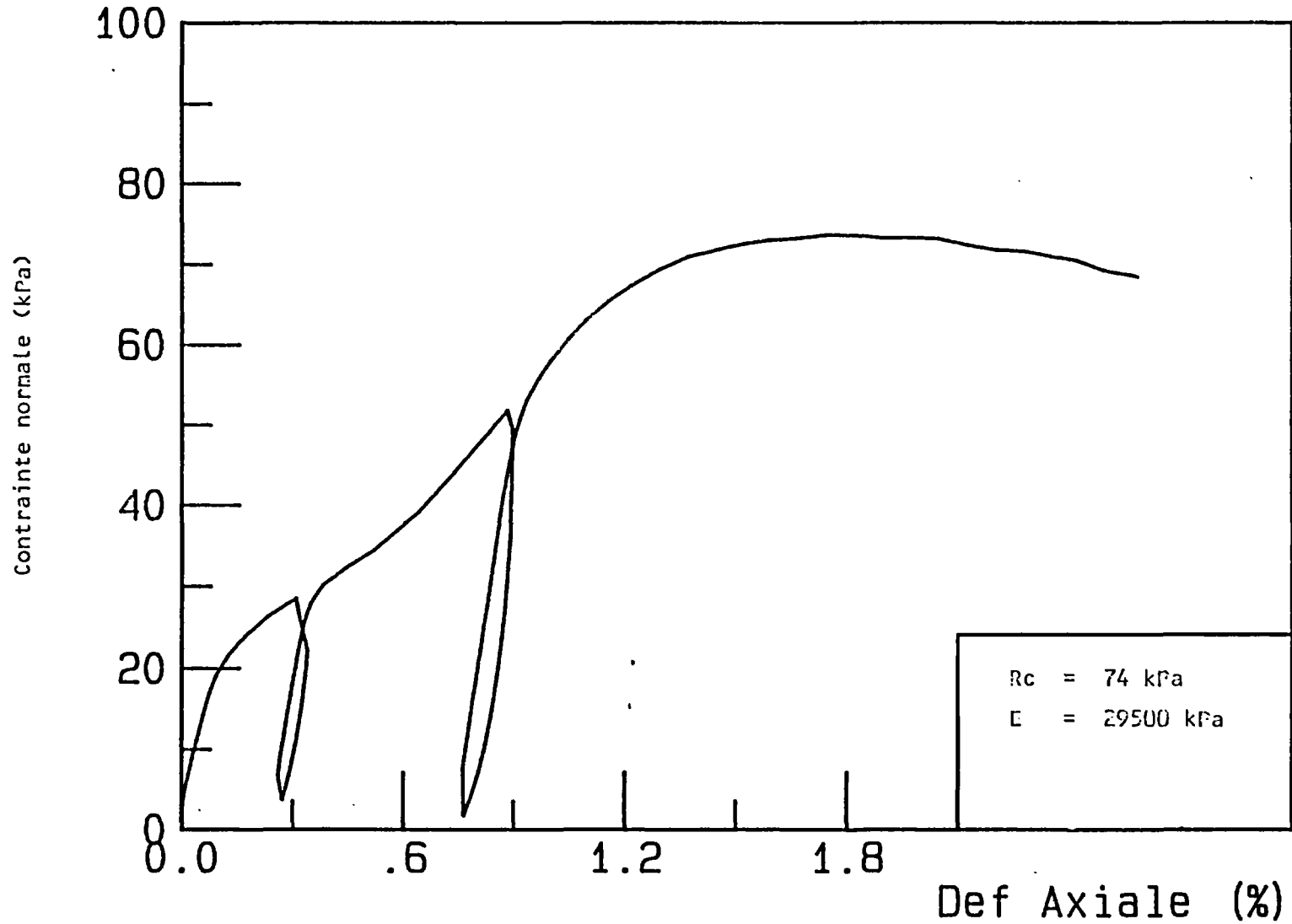
E 10-20 Module calcule par regression lineaire entre 10 et 20 MPa



ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE

Echantillon : SC4
Profondeur : 14,80/15,05 m

Eprouvette : h : 150,5 mm
d : 79,5 mm



ANNEXE N°3.6
Essais d'abrasivité (CERCHAR)

ESSAI DE DURETE ET D'ABRASIVITE CERCHAR

DURETE (pts CERCHAR)	ABRASIVITE (pts CERCHAR)	NATURE DU MATERIAU
2/2/2/2	0.3/0.3/0.4	andésite hydrothermalisée
45/19/12/35	2.3/3.1/1.6	andésite saine

ANNEXE N°3.7
Essais de diffractométrie aux rayons X pour
détermination minéralogique d'échantillons
argileux

DETERMINATION MINERALOGIQUE D'ECHANTILLONS ARGILEUX

ETUDE REALISEE PAR F. PILLARD - SGN/GEO

DEMANDEUR : E. SARDELLA - 4S/GEG

Méthode employée :

Diffractométrie de rayons X (appareillage Philips) :

- rayonnement $\text{CoK}\alpha$, monochromateur arrière en graphite,
- sensibilité : 5000 c/s,
- domaine d'exploration des spectres : 2 à 36° 2 θ ,
- évaluation des proportions sur base 10.

Préparation

Extraction de la fraction inférieure à 2 μm par mise en suspension aux ultrasons et sédimentation par centrifugation (1200 t/min pendant 15 min).

Puis confection de lames orientées :

- normale
- glycolée
- chauffée à 490° pendant 4 h.

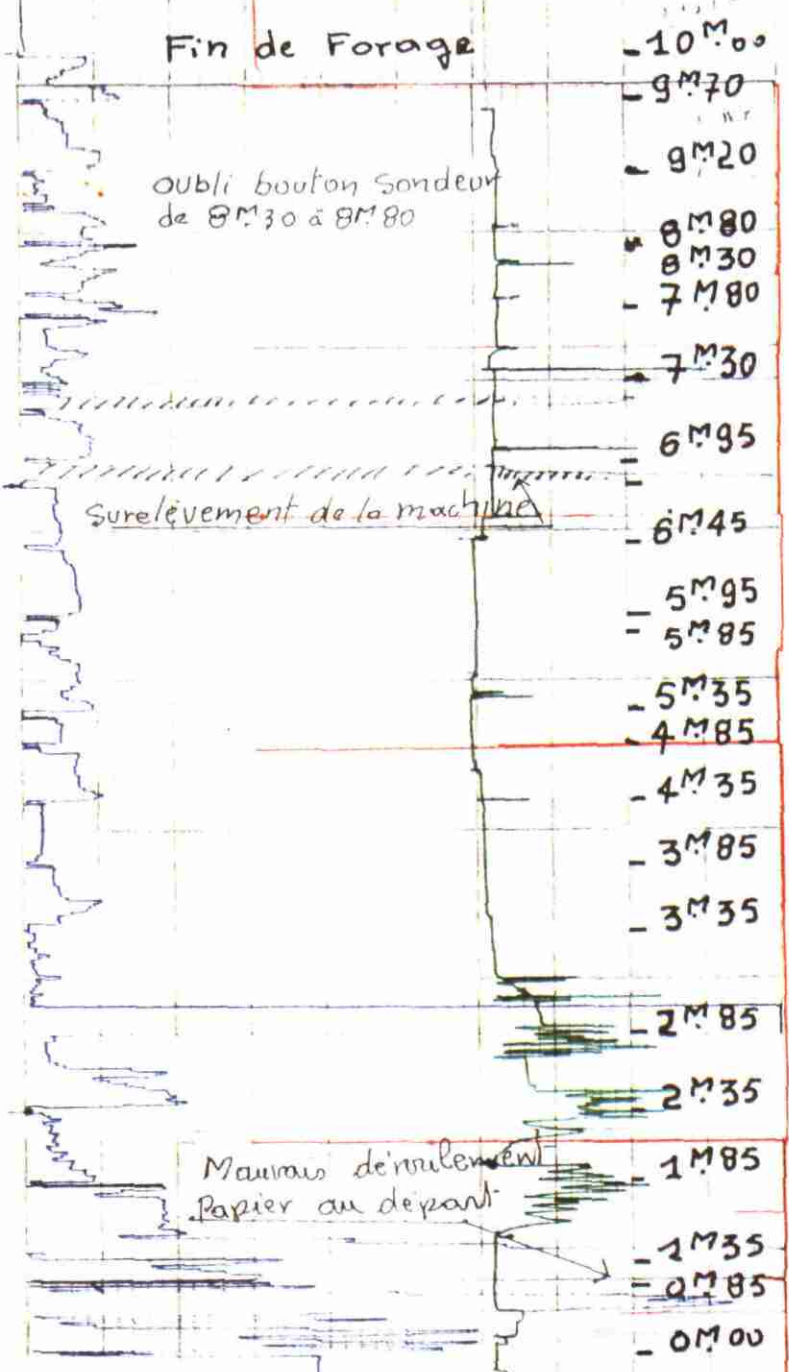
Résultats

SC2 5,8/6,3	Kaolinite (et Métahalloysite) Phase smectitique gonflante Illite/Mica (Quartz et plagioclase en traces, repérés sur le diagramme de poudre effectué en complément)	- 7,5 - 2,5 trace
SC2 10,7/11,2	Kaolinite (et Métahalloysite) Phase smectitique gonflante mal cristallisée) (Plagioclase faible - quartz en trace - cristobalite probable - sur le diagramme poudre)	- 8,5 ~ 1,5
SC2 20,1/20,3	Ro à 85 % de smectite Métahalloysite <i>infra trace</i>	10
SC3 2,0/2,5	Ro à 85 % de smectite Métahalloysite <i>infra trace</i>	10
SC3 5/5,30	Ro à 85 % de smectite Métahalloysite <i>infra trace</i>	10
SC4 14,8/15,05	Ro à ~ 73 % de smectite Métahalloysite	- 98 % - 2 %
SC5 11,2/11,5	Ro à - 57 % de smectite Métahalloysite	- 97 % - 3 %
SC4 13,65/14,05	Ro à 70 % de smectite Métahalloysite	- 97 % - 3 %

Rappel : Ro = Interstratifié irrégulier smectite-illite à divers pourcentages possibles de smectite et d'illite.

ANNEXE N°4
Résultats des enregistrements de paramètres

TUNNEL SD 1



20 40 60 80 100 120 140 160 180 200
 VA → SD 1

Echelle 1/50 (1cm de papier = 50cm terrain)

VA (vitesse d'avancement) 200M/h

Moyennage 2Cm

P.O (Pression sur l'outil) Constante 10bars

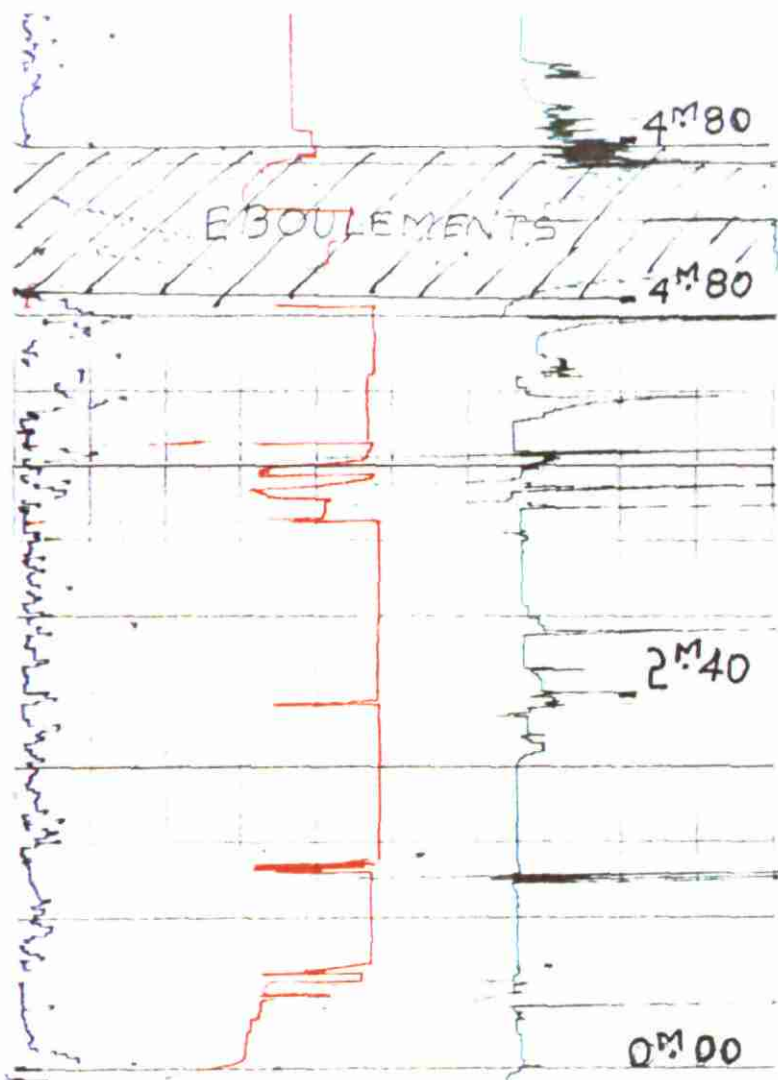
P.I. (Pression d'injection) 1Cm = 5bars

outil utilise : Taillant Ø 58 + tiges AW

Machine XCH 60

Chantier : TUNNEL R N 9

5.12 - 6.12 - 1989



20' 40' 60' 80' 100' 120' 140' 160' 180' 200'

VA

SD 5

Echelle 1/50

← VA : 200 M/H

Moyennage 2

P.O (Pression sur l'outil) 1cm = 40 bars

P.i. (Pression d'injection) 1cm = 5 bars

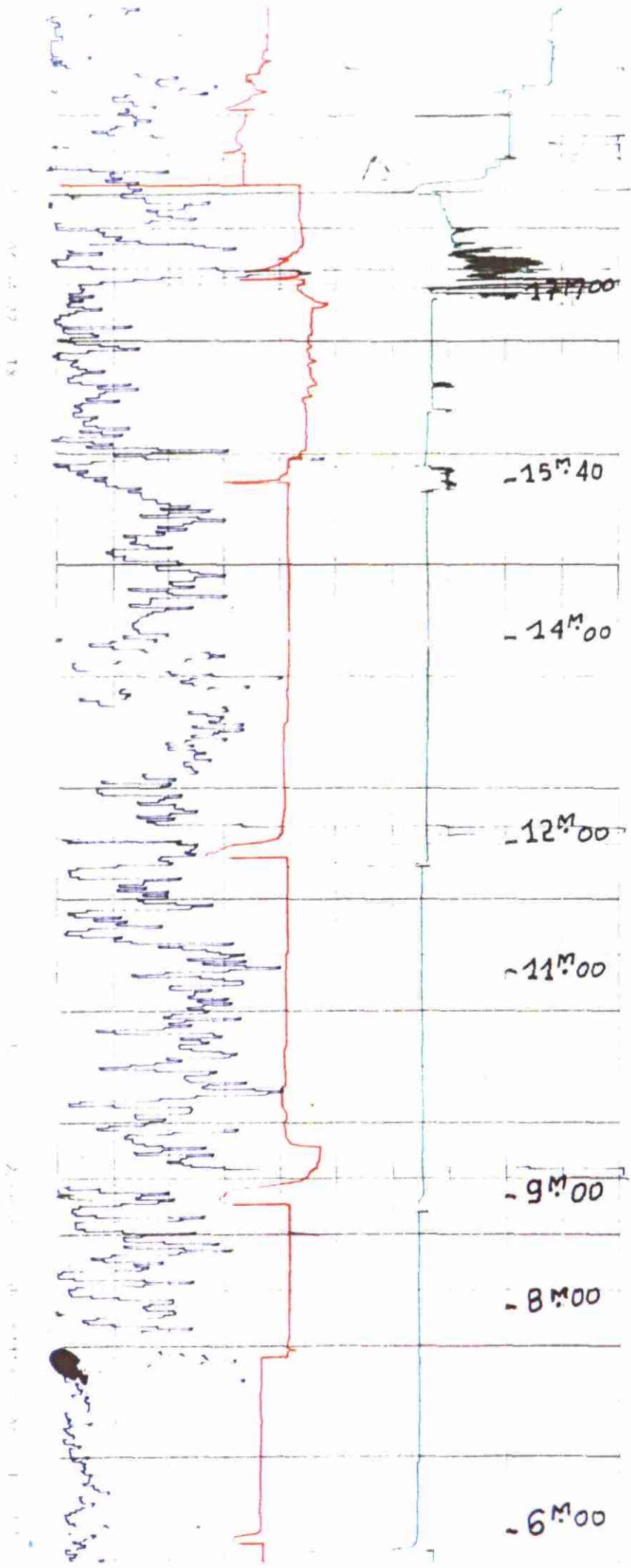
outil utilise : taillant Ø 60

avec tiges AW

Machine "D4"

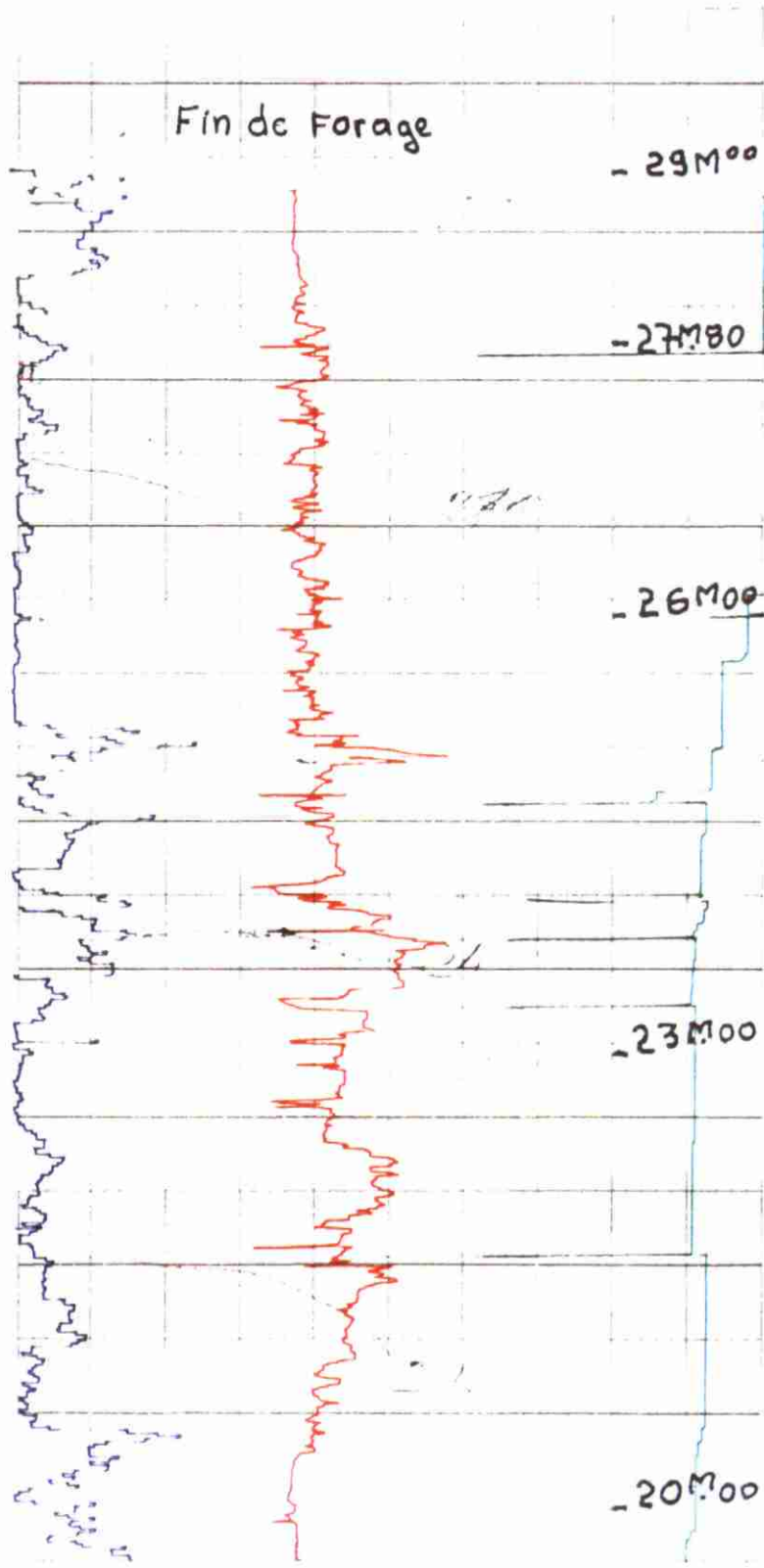
chantier: RNG TUNNEL SD5

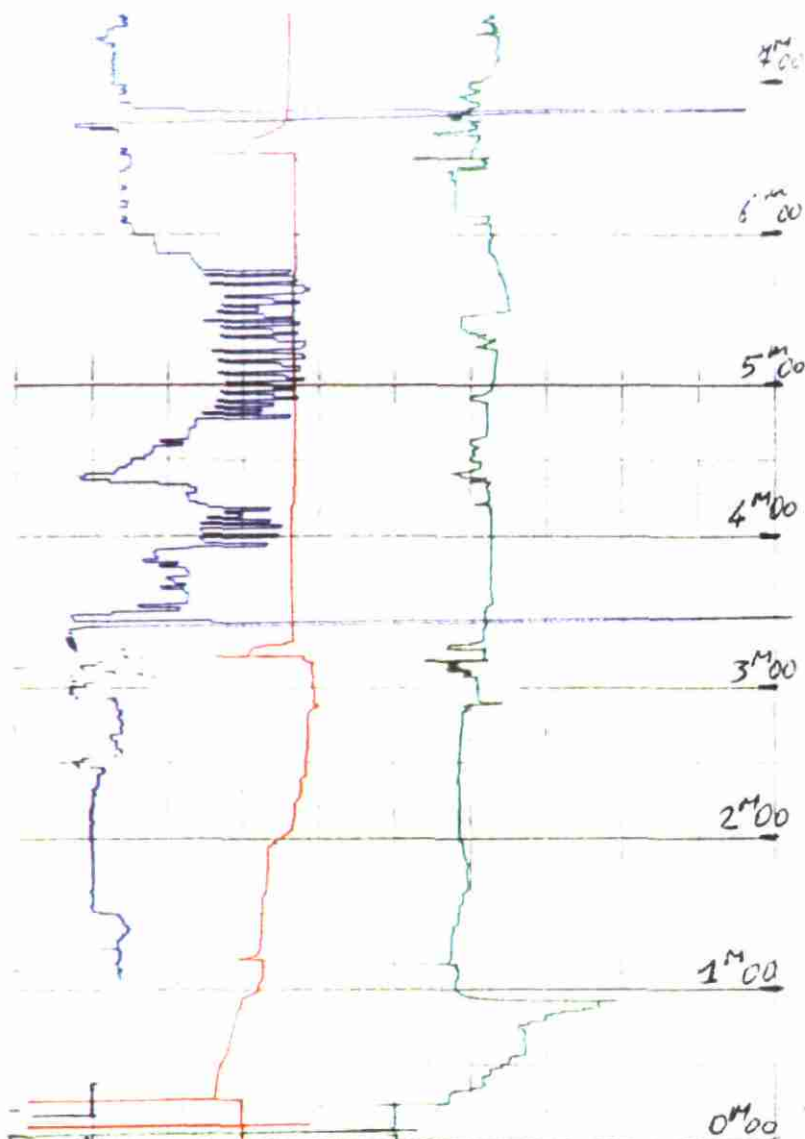
6. Mars 1990



PL 06 34
IX 11 A 5710631

2017 SA
2





Echelle 1/50 (1cm de papier = 50cm terrain)
 VA (Vitesse d'avancement) 200m/h
 moyennage 2cm

P.O (Pression sur l'outil) constante 10b

P.I (Pression d'injection) 1cm = 5b

Outil utilisé: Taillant $\phi 58$ + tiges AW

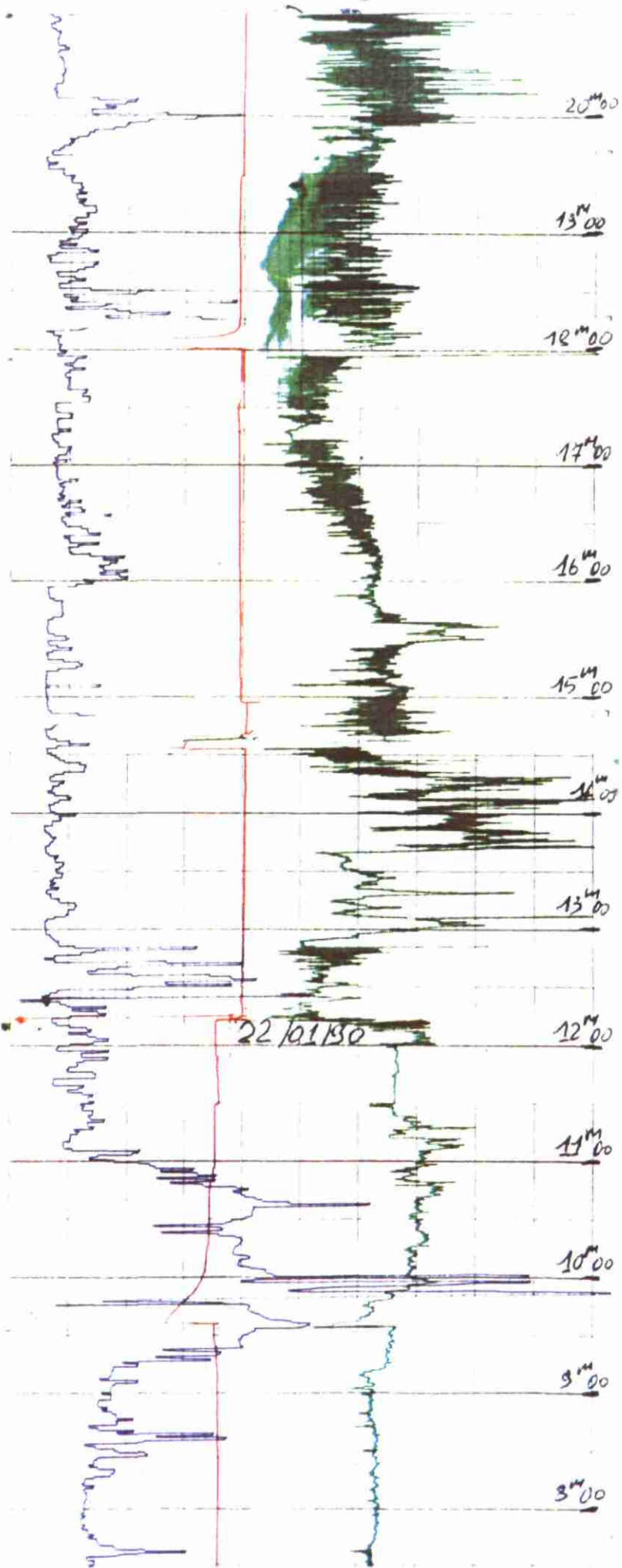
Machine D4

Chantier: RM9 Tunnel

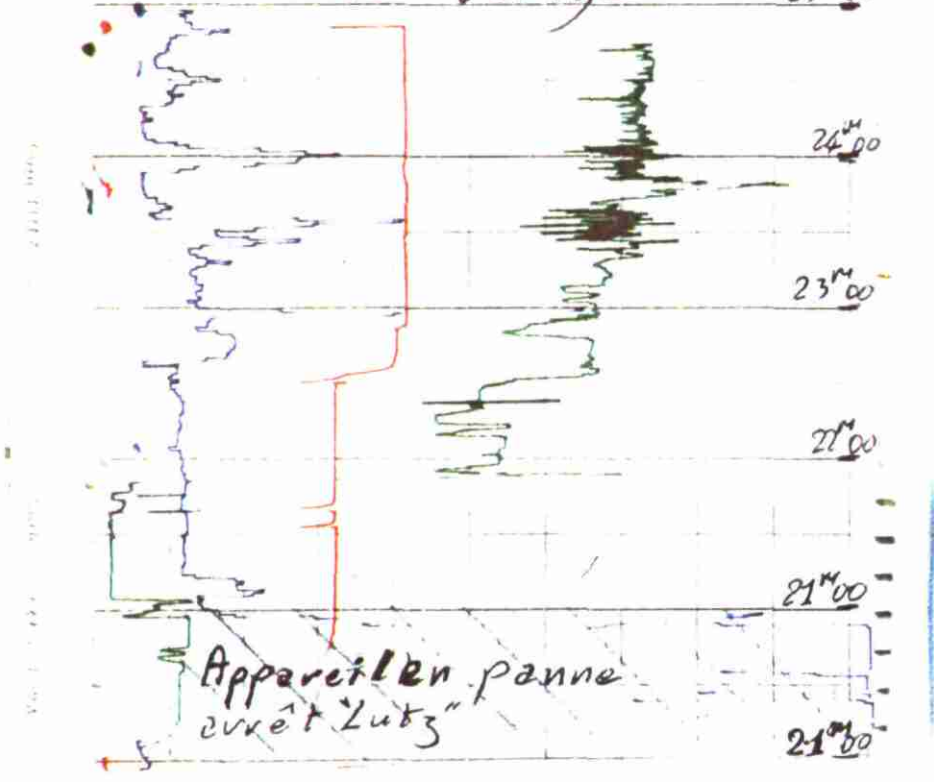
19-01 ; 22-01 1990

SD 2

2017 10 22 18:00:00 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20



Fin Fouage 25^M00



Appareil en panne
vérif. Lutz

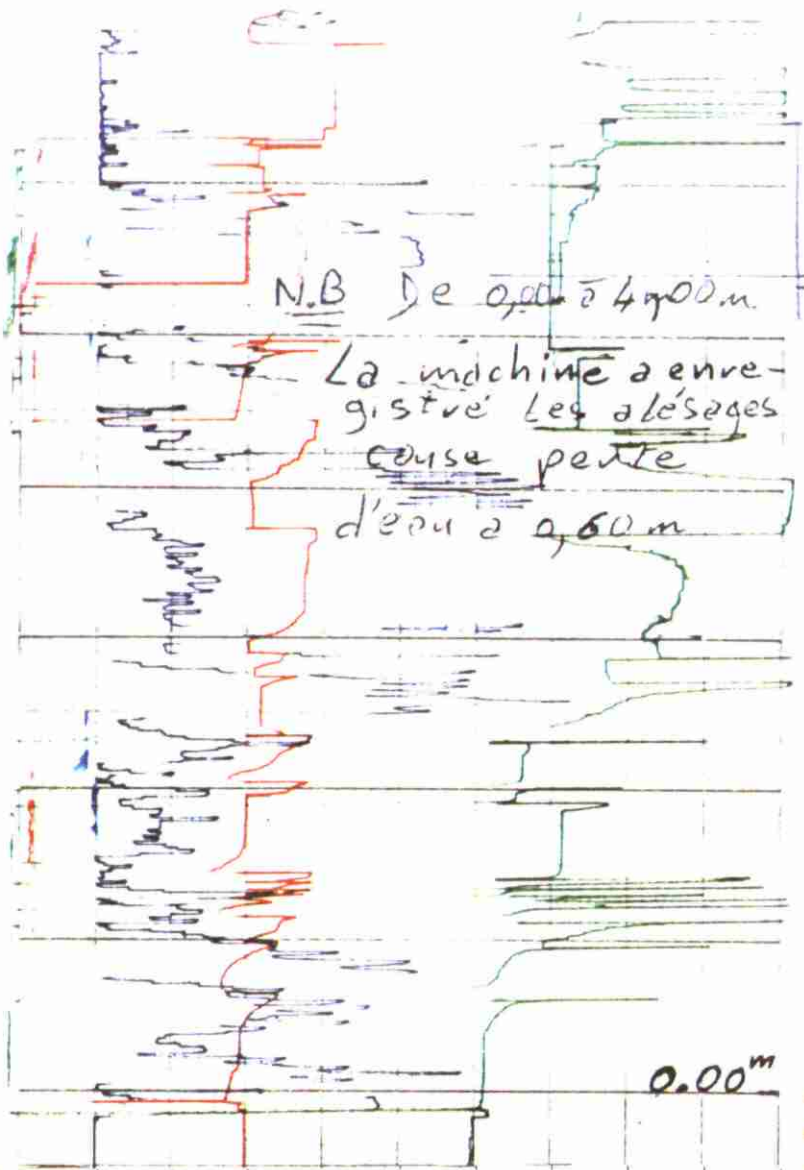
20^M00

000125 USA 5710631

on LUT7 S.A.

2000 de l'Etat

1991-01-02-90



SD3

Echelle 1/50

Moyennage 2 cm

p.o 1cm = 15 bars

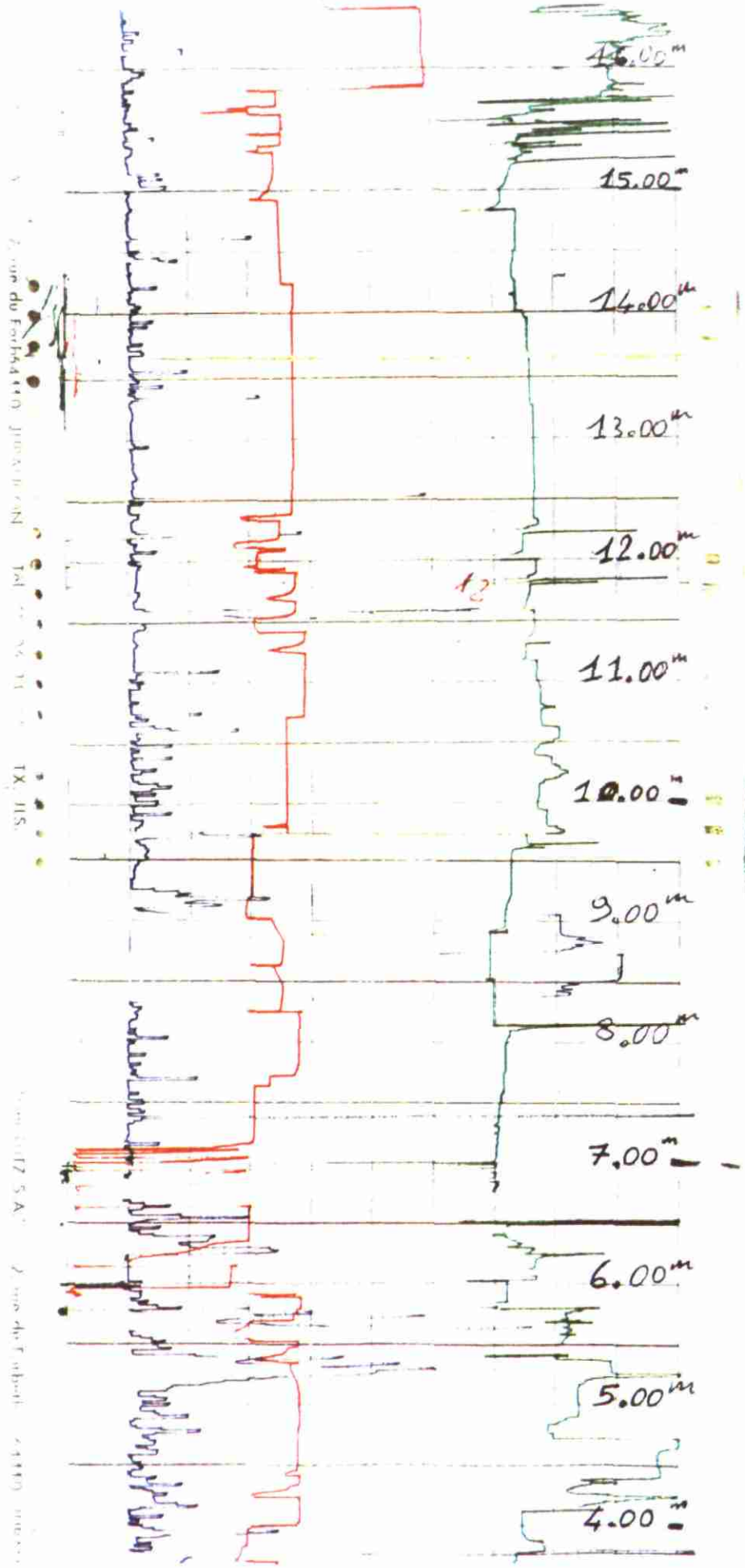
P.I 1cm = 5 bars

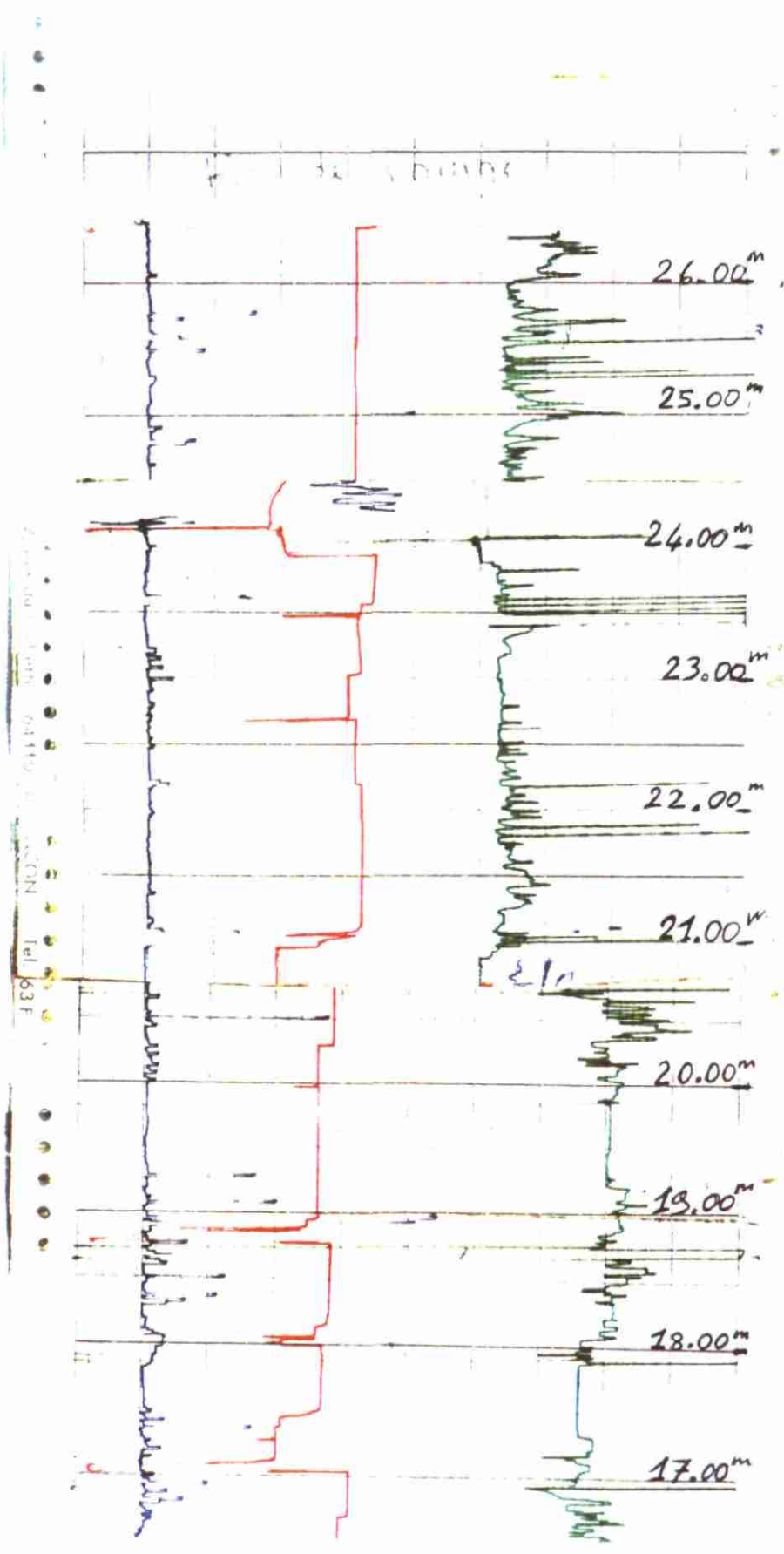
outil utilisé = taillant 58

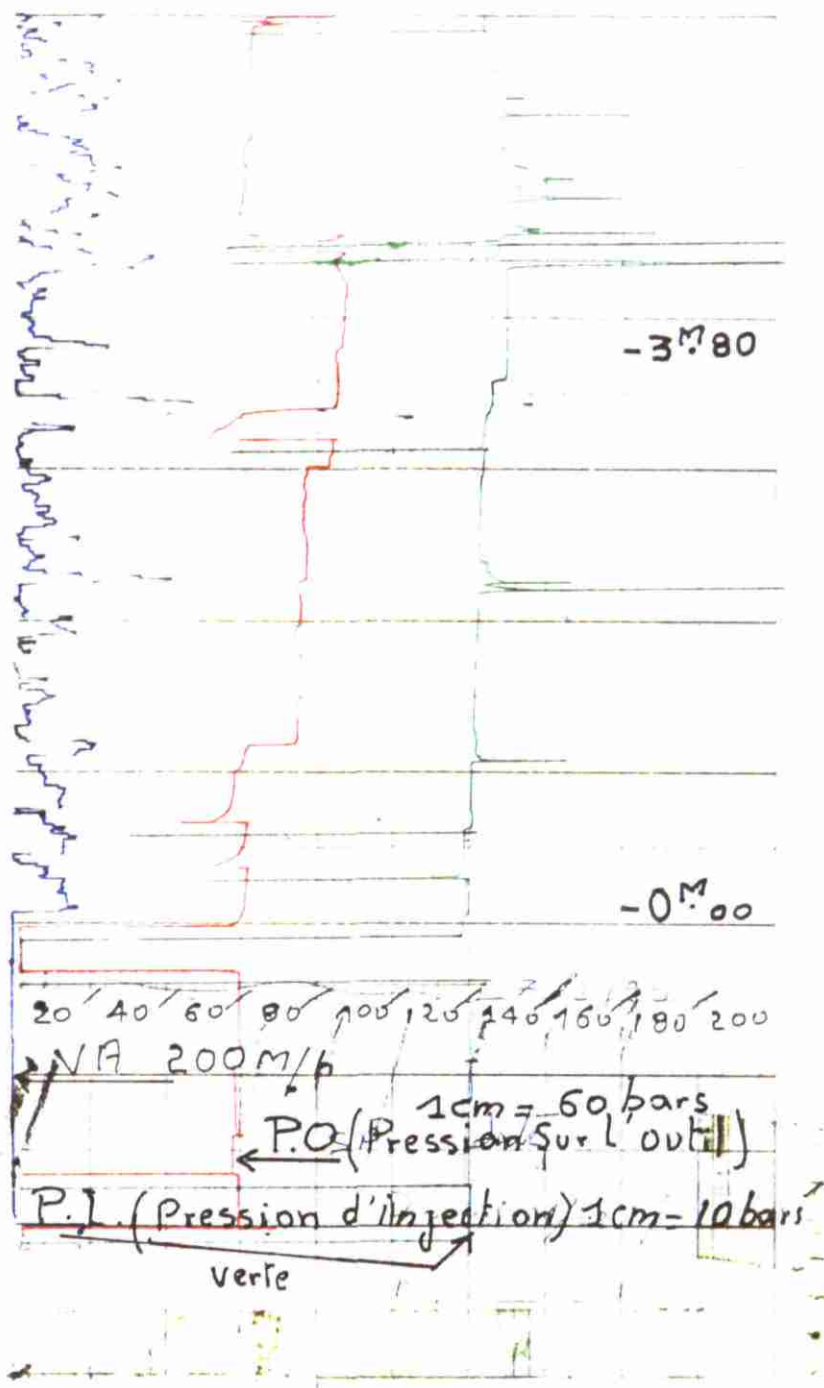
Machine D4

Chantier TUNNEL RNS

Date: Le 02-01-90







Echelle 1/50 (1cm de papier = 50cm de Terrain)

VA (Vitesse d'Avancement) 200M/h

Moyennage: 2Cm

Outil utilisé: Taillant ϕ 58

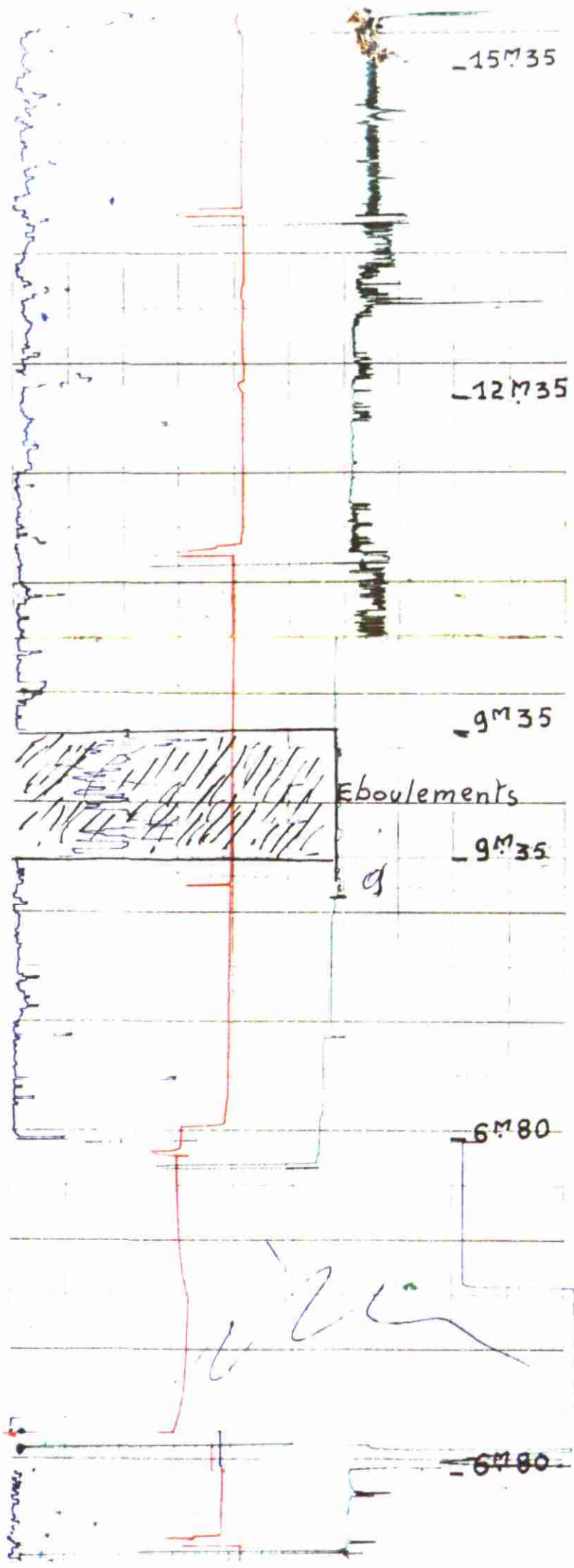
Machine TCH 100

CHANTIER: RING TUNNEL

SD 4

TX 05A 571063

TX 05A 571063



6M80

ANNEXE N°5
Classification de BENIAWSKI



A. Paramètres de classification

Paramètre		Domaine des valeurs						
1	Résist. compr. simple σ_c [MN·m ⁻²]	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	10 - 25	3 - 10	< 3
	Note	15	12	7	4	2	1	0
2	Coefficient RQD %	90 - 100	75 - 100	50 - 75	25 - 50	< 25		
	Note	20	17	13	8	3		
3	Espacement des joints	> 2 m	0,6 - 2 m	20 - 60 cm	6 - 20 cm	< 6 cm		
	Note	20	15	10	8	5		
4	Caractéristiques des joints	- très rugueux - ouverture < 0,1 mm - non persistant - paroi joint dure	- très rugueux - ouverture < 1 mm - non persistant - paroi joint dure	- légèrement rugueux - ouverture < 1 mm - persistant - paroi joint tendre	- lisse - ouverture 1 - 5 mm - persistant - remplissage < 5 mm - épaisseur	- lisse - ouverture > 5 mm - persistant - remplissage > 5 mm - épaisseur		
	Note	30	25	20	10	0		
5	Venues d'eau	l/min par 10 m tunnel	aucune	< 10 l/min	< 25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min	
	Conditions générales	complètement sec	humide	saturé $H_v < 10$ m	eau sous pression modérée $H_v 10$ à 100 m	eau sous forte pression $H_v > 100$ m		
	Note	15	10	7	4	0		

B. Note de minoration pour l'orientation des joints

Orientation et pendage des joints		Très favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très défavorable
Notes	Tunnels	0	- 2	- 5	- 10	- 12
	Fondations	0	- 2	- 7	- 15	- 25
	Pentes	0	- 5	- 25	- 50	- 60

C. Effet de l'orientation et du pendage des joints

Orientation perpendiculaire à l'axe du tunnel				Orientation parallèle à l'axe du tunnel		Pendage 0 - 20° indépendamment de l'orientation
Avancement avec pendage 		Avancement contre pendage 				
Pendage 45-90°	Pendage 20-45°	Pendage 45-90°	Pendage 20-45°	Pendage 45-90°	Pendage 20-45°	
Très favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très défavorable	Moyen	Défavorable

D. Note finale de qualité du massif rocheux

Note finale	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Classe No	I	II	III	IV	V.
Description	Excellente	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très mauvaise

Tableau 1 - CLASSIFICATION GEOMECANIQUE DE BENIAWSKI (1979)

ANNEXE N°6
Classification AFTES

A.F.T.E.S.

GROUPE DE TRAVAIL N° 1 GEOLOGIE - GEOTECHNIQUE

Texte des recommandations pour une description des massifs rocheux utile à l'étude de la stabilité des ouvrages souterrains

Ce texte de recommandations a été établi dans le cadre du Groupe de Travail n° 1 de l'AFTES. Je remercie les nombreux spécialistes qui ont apporté leur concours à l'élaboration de ce texte et toutes les personnalités qui nous ont fait part de leurs observations.

Il ne m'est pas possible de tous les citer et je les prie de bien vouloir m'en excuser. Je ferais cependant une mention particulière à l'intention de M. FOURMAINTRAUX qui a eu la lourde tâche de rédiger le texte définitif ainsi que les nombreux projets qui l'ont précédé.

*l'animateur
M. PANET*

INTRODUCTION

Ces recommandations sont destinées à définir et décrire les caractères essentiels d'un massif rocheux (réf. 1).

Une telle description doit être appliquée successivement à chacune des zones du massif rocheux individualisées auparavant sur la base des reconnaissances géologiques et définies comme relativement homogènes à partir de critères lithologiques, pétrographiques et structuraux.

Une description des massifs rocheux utile au génie souterrain doit fournir les données concernant :

1. Les conditions géologiques générales
2. Les conditions hydrogéologiques
 - charge hydraulique
 - perméabilité

3. Les discontinuités du massif rocheux

- Densité (indice global)
- Orientation
- Organisation en familles
- Comportement mécanique

4. Les caractéristiques mécaniques des roches

- identification
- résistance
- gonflement
- altérabilité

5. Les contraintes naturelles

6. La déformabilité du massif rocheux.

Il est à noter que les problèmes de forabilité posés par l'emploi de méthodes de creusement mécanique font l'objet de recommandations spécifiques élaborées par le groupe "Mécanisation de l'excavation de l'AFTES (réf. 11).

PRESENTATION

Les recommandations de ce texte ne tendent pas à donner une "classification" proprement dite des massifs rocheux. Nous avons choisi de préciser nettement les facteurs qu'il faut s'efforcer de connaître, pour l'établissement raisonné d'un projet en souterrain dans un massif rocheux, plutôt que de nous livrer à des exercices de pondérations respectives de ces facteurs dans le but d'attribuer au massif une "note" finale déterminant les conditions dans lesquelles on peut réaliser en son sein des travaux souterrains. Ces recommandations visent essentiellement l'étude des conditions de stabilité des ouvrages souterrains.

Nous pensons que l'ingénieur chargé du projet pourra ainsi disposer d'un dossier concis et complet, à partir duquel il sera possible d'analyser le poids des divers facteurs en faisant intervenir les différentes caractéristiques du projet. La généralisation de l'emploi d'une telle méthode de description devrait également faciliter la compréhension des rapports géotechniques par les entrepreneurs chargés de réaliser les travaux et permettre une meilleure utilisation des références et des réalisations antérieures.

D'autre part, le groupe de rédaction attire l'attention sur les points suivants :

Ces recommandations ne doivent cependant pas être appliquées sans discernement. Les paramètres qui ont été choisis ont paru les plus représentatifs dans le cas général, mais pour un projet particulier d'autres critères peuvent être retenus; d'autre part, au stade du projet, il n'est pas toujours possible, ni même raisonnable, de vouloir mesurer tous les paramètres mentionnés dans ce texte. Il est bien évident par exemple dans le cas d'un ouvrage souterrain profond que bon nombre de ces paramètres ne sont pas accessibles avec précision au moment de l'étude du projet.

Ces recommandations se sont largement inspirées des travaux des commissions de la Société Internationale de Mécanique des Roches. Les rédacteurs se sont attachés à retenir les paramètres et les classes de valeurs sur lesquels un consensus a été atteint au niveau international.

Ces recommandations sont provisoires, le groupe de rédaction souhaiterait qu'elles soient appliquées le plus souvent possible afin de recevoir critiques et observations sur leur utilisation dont il sera tenu compte dans une rédaction définitive.

1. - LES CONDITIONS GÉOLOGIQUES GÉNÉRALES

Les conditions géologiques sont exposées dans un rapport géologique qui est la synthèse des données provenant de l'analyse des documents existants et des résultats des études spécifiques au projet.

Le rapport géologique comprend :

(a) Une carte des affleurements accompagnée d'une carte géologique et d'un schéma tectonique et structural; ces cartes sont complétées par les coupes de sondages et des coupes géologiques permettant de bien localiser l'implantation de l'ouvrage.

(b) Une carte des formations et phénomènes superficiels (fontis, dolines, dissolutions, glissement, fauchage fluage . . .) notamment dans les zones d'implantation des têtes des ouvrages souterrains et dans les sections où ils se situent à faible profondeur.

(c) La description pétrographique et lithologique des formations rocheuses traversées en explicitant les dénominations régionales particulières. Les roches solubles (sel gemme, gypse . . .) et les formations présentant des phénomènes karstiques sont expressément signalées.

Il est recommandé d'utiliser une terminologie simple, mais cependant rigoureuse (cf. annexe 1) (réf. 8 et 9).

(d) L'état d'altération du massif rocheux dans son ensemble, décrit en établissant un zonage de l'altération suivant les classes du tableau 1 (réf. 1, 6 et 7).

CLASSE	DESCRIPTION	TERMINOLOGIE
A M 1	Pas de signe visible d'altération ou très légères traces d'altération limitées aux surfaces des discontinuités principales.	Sain
A M 2	Les surfaces des discontinuités principales sont altérées mais la roche n'est que légèrement altérée.	légèrement altéré
A M 3	L'altération s'étend à toute la masse rocheuse, mais la roche n'est pas friable	moyennement altéré
A M 4	L'altération s'étend à toute la masse rocheuse et la roche est en grande partie friable	très altéré
A M 5	La roche est entièrement décomposée et très friable. Cependant, la texture et la structure de la roche sont conservées.	complètement altéré

Notes :

(1) dans le cas de roches altérés contenant un fort pourcentage de minéraux argileux, le matériau peut présenter de la plasticité plutôt que de la friabilité.

(2) lorsque cela est possible, on précisera qu'il s'agit d'une altération essentiellement météorique ou d'une altération d'origine profonde, hydrothermale.

Fig. 1 Description de l'état d'altération du massif rocheux.

2. - LES CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

Les difficultés majeures rencontrées dans les chantiers souterrains sont très souvent liées à la présence d'eau. Les écoulements vers l'ouvrage modifient le champ des contraintes vis-à-vis de la stabilité dans un sens défavorable. Des débits importants gênent considérablement les travaux.

Les conditions hydrogéologiques sont définies par le couple (H_i, K_j) des valeurs de la charge hydraulique (H) et de la perméabilité (K)

2a.- La charge hydraulique (H).

Existant préalablement au creusement de l'ouvrage elle est exprimée en prenant pour cote de référence le

niveau du radier de l'ouvrage souterrain. Elle est décrite selon les classes du tableau de la figure n° 2

CLASSE	CHARGE HYDRAULIQUE H en m au dessus du radier de l'ouvrage souterrain	TERME DESCRIPTIF
H 1	< 10 m	faible
H 2	de 10 à 100 m	moyenne
H 3	> 100 m	forte

Fig. 2

N.B. : des variations dans le temps de cette valeur sont signalés.

2b.- La perméabilité du massif (K)

On précise le type de perméabilité, en distinguant en particulier la perméabilité liée aux discontinuités du massif et la perméabilité de la roche. On utilise pour décrire la perméabilité les classes du tableau de la figure n° 3

CLASSE	PERMEABILITE K en m/s	TERME DESCRIPTIF
K 1	< 10 ⁻⁸ m/s	très faible à faible
K 2	10 ⁻⁸ à 10 ⁻⁶ m/s	faible à moyenne
K 3	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁴ m/s	moyenne à forte
K 4	> 10 ⁻⁴ m/s	forte à très forte

Fig. 3

Remarques :

(1) Les classes des tableaux des fig. 2 et 3 ne sont évidemment pas utilisables dans le cas de régimes karstiques et demande une étude spécifique.

(2) Les perméabilités des massifs rocheux sont très souvent anisotropes, les écoulements se faisant préférentiellement dans la direction des discontinuités; la perméabilité équivalente est en toute rigueur donnée par un tenseur; pour la classification, on utilise alors le coefficient de perméabilité le plus élevé en précisant sa direction; on indique également le rapport d'anisotropie K (max.)

K (min.)

(3) Les débits sont commandés par les valeurs de la charge (H) et du module de la perméabilité (K); les contraintes dues à l'écoulement dépendent par contre de la valeur de la charge (H) et de celle du rapport d'anisotropie de la perméabilité et non plus de la valeur du module de la perméabilité.

N.B. Lorsqu'on a réalisé une galerie de reconnaissance, on doit également indiquer par tronçons homogènes, les valeurs et les variations de débits.

3. - LES DISCONTINUITÉS DU MASSIF ROCHEUX

Le terme "discontinuité" est utilisé en mécanique des roches (réf.2) dans un sens très général pour désigner toute interruption physique de la continuité du massif rocheux; il inclut tous les types de fractures, les contacts géologiques, les diaclases, les plans de stratification, de litage, de foliation et de schistosité, les clivages, les failles . . .

Les discontinuités sont souvent des structures planaires et se caractérisent essentiellement par une résistance à la traction très faible, voire nulle, dans la direction normale à leur plan.

Pour une description complète des discontinuités d'un massif, on recommande de déterminer les caractéristiques suivantes (réf. 6).

- 3a.- La densité des discontinuités affectant le massif.
- 3b.- L'orientation des discontinuités.

L'orientation du plan d'une discontinuité est donnée par le vecteur pendage P de ce plan. Ce vecteur est porté par la ligne de plus grande pente du plan et orienté dans le sens descendant.

Il est repéré par le couple (β^0, N, α_p^0) de l'angle (β) du vecteur pendage avec l'horizontale et de l'azimuth $(N \alpha_p)$ de la direction du vecteur pendage par rapport au Nord (N) (figure 1).

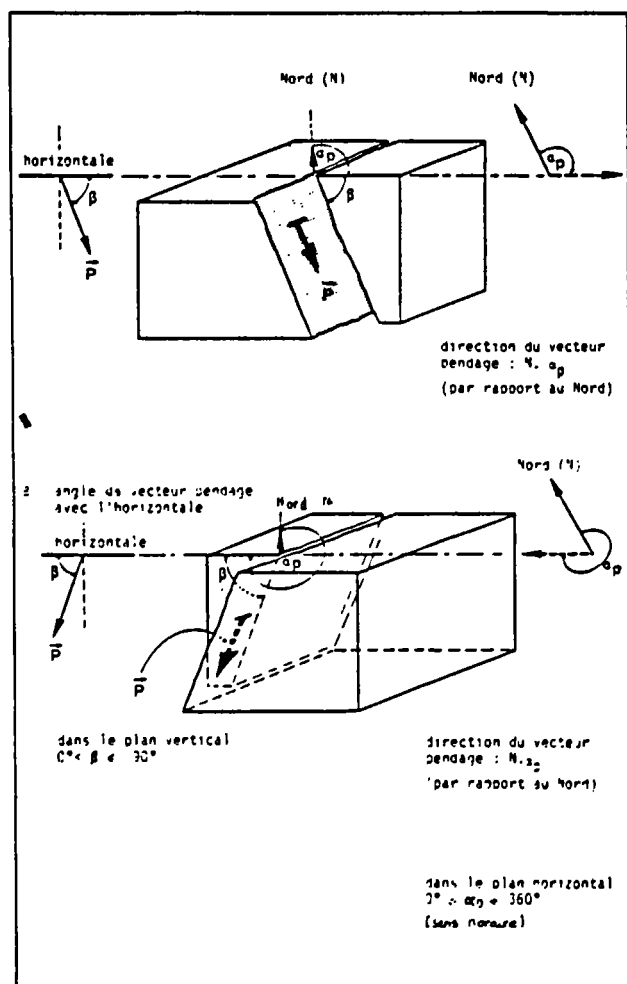


Fig. 4 Repérage de l'orientation d'un plan dans l'espace à l'aide du vecteur pendage P .

La représentation graphique conseillée conserve les relations angulaires entre les éléments décrits : elle utilise la projection stéréographique de l'hémisphère supérieure de la sphère de référence à partir de son pôle inférieur, permettant la construction de "stéréogrammes" (figures 5 et 6), établis sur le canevas dit de "Wülf."

Fig. 6 Surfaces des ellipses de distorsion dans les différents types de projections (d'après VISTELIUS, 1966).

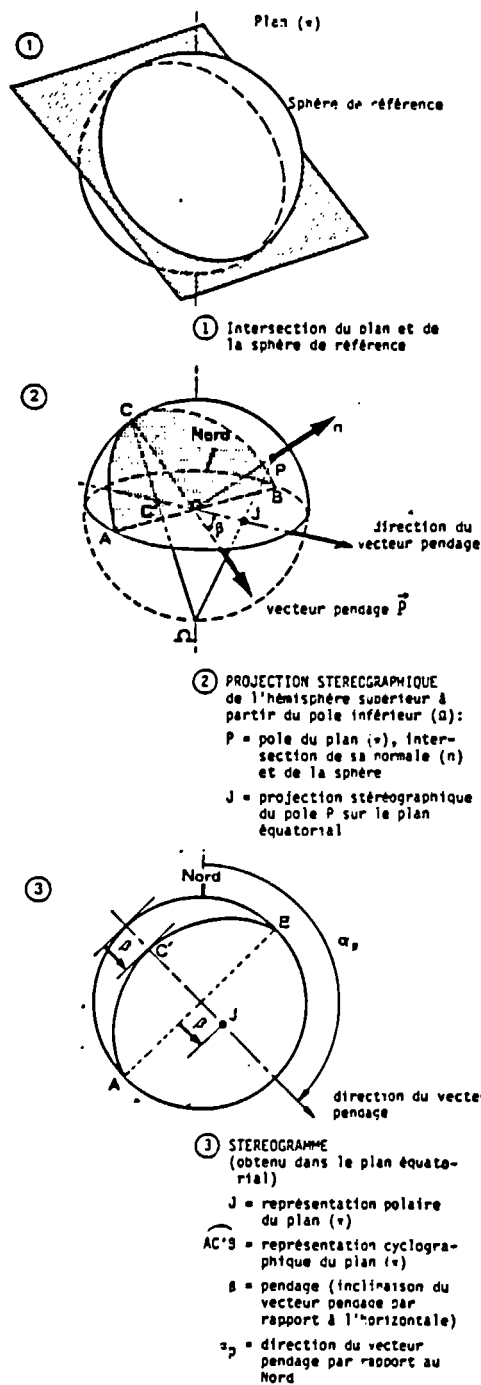
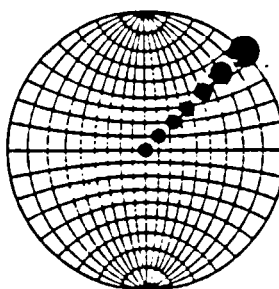


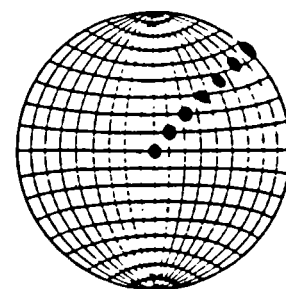
Fig. 5 Représentation graphique d'un plan (β, N, α_p^0) à l'aide de la projection stéréographique

Projection stéréographique

Projection équiréale



Canevas de Wülf (Conservation des angles)



Canevas de Schmidt (Conservation des aires)

3c.- L'organisation des discontinuités en familles.

Les joints de stratifications et le litage des roches sédimentaires constituent une famille de discontinuités parallèles ou subparallèles, de même la schistosité et la foliation des roches métamorphiques. Les diaclases et tous les autres types de discontinuités s'organisent souvent aussi en familles dont les individus sont subparallèles et ont en commun, outre la direction, divers autres des caractères décrits ci-dessous. Cette organisation apparaît à l'observation in situ et/ ou sur les stéréogrammes polaires. L'analyse statistique des orientations peut être effectuée directement sur des diagrammes polaires tracés sur un canevas, non plus de Wülf' mais de Schmidt, établi à partir d'une projection qui conserve les aires mais non les angles (projection équiaréable)..

On précise alors :

- le nombre N de familles principales de discontinuités,
- l'espacement moyen S entre les discontinuités de chaque famille,

3d.- L'ouverture des discontinuités.

Distance séparant les épontes d'une discontinuité, elle joue un rôle dans son comportement mécanique. Elle influence également les circulations d'eau dans le massif et par là les venues d'eau dans l'excavation.

3e.- La persistance.

Elle correspond à la continuité dans l'espace d'une discontinuité. Elle est limitée par l'existence de ponts de matière entre les épontes.

3f.- La morphologie des épontes.

Élément important du comportement de la discontinuité, en particulier au cisaillement, elle décrit la planéité, les irrégularités et la rugosité des surfaces des épontes.

3g.- Le remplissage.

Le comportement d'une discontinuité sans remplissage est très sensiblement différent de celui d'une discontinuité avec remplissage. On précise alors la nature, l'épaisseur et la résistance du remplissage.

La description de certaines de ces caractéristiques est détaillée ci-après.

3A.- Indice global de densité de discontinuités dans le massif.

Il n'est pas toujours possible d'accéder à une description aussi complète que ci-dessus; il est cependant toujours nécessaire d'apprécier la fréquence des discontinuités affectant le massif. Pour cela, on utilise un indice global décrivant l'état de fracturation du massif.

On a retenu comme indice de base, l'intervalle entre les discontinuités (ID), de l'anglais "Discontinuity Intercept", proposé par la commission de classification des massifs rocheux de la Société Internationale de Mécanique des Roches (réf. n° 1).

Cet indice se mesure le long d'une ligne tracée sur des affleurements naturels, sur les parois d'une galerie, à partir d'un sondage carotté, ou par endoscopie d'un sondage destructif.

Les longueurs (i) des intervalles découpés par les discontinuités adjacentes successives sont mesurées selon une direction quelconque. On retient la valeur moyenne des longueurs (i) comme valeur de (ID). La description

de la densité des discontinuités est établie d'après les classes du tableau de la fig. 7. La figure n° 8 donne un exemple détaillé de détermination de ID, que les moyens de calcul automatique rendent à l'heure actuelle aisée.

CLASSES	INTERVALLE ENTRE LES DISCONTINUITES	DENSITE DE DISCONTINUITÉ DANS LE MASSIF ROCHEUX
ID 1	> 200 cm	très faible
ID 2	60 à 200 cm	faible
ID 3	20 à 60 cm	moyenne
ID 4	6 à 20 cm	forte
ID 5	< 6 cm	très forte

Fig. 7

Important : il est plus recommandé :

- de réaliser ces mesures dans plusieurs directions.
- d'établir l'histogramme des longueurs (i) pour chaque direction de mesure
- de calculer l'écart-type σ (i) correspondant et le coefficient de variation

$$CV = \frac{\sigma(i)}{(ID)}$$

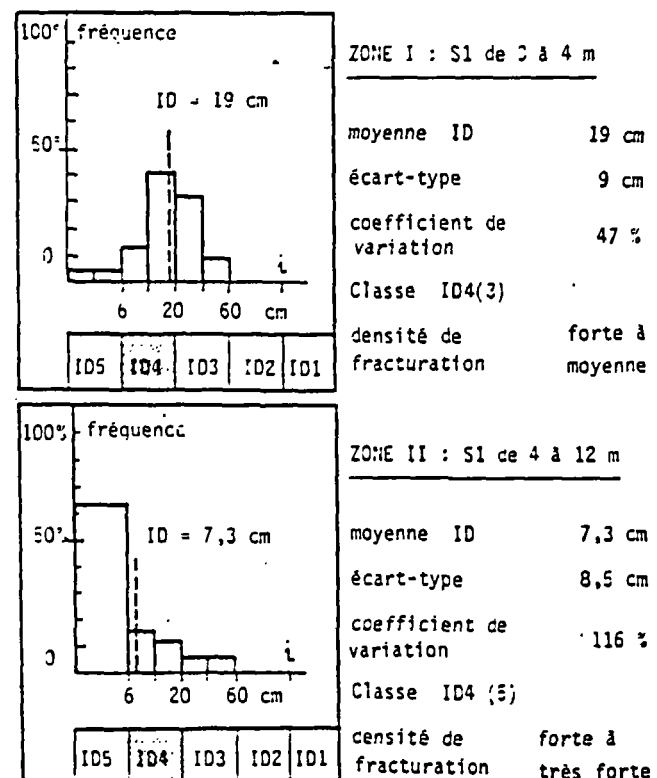
— l'indice ID varie bien sûr avec la direction de la ligne de mesure; on précisera dans tous les cas, l'orientation de chaque ligne de mesure.

Remarques :

(1) il est intéressant de comparer l'intervalle entre les discontinuités (ID) et l'ouverture de l'excavation projetée.

(2) en annexe 2, est décrit un autre indice global de la densité de discontinuités du massif souvent employé : le Rock Quality Designation (RQD).

(3) les directions des lignes de mesures seront choisies en fonction des directions caractéristiques du massif et de l'orientation de l'ouvrage.



Indice global de fracturation du massif : intervalle entre les discontinuités (ID) - Ligne de mesure : sondage carotté no S1 direction : verticale; longueur 12 m

Fig. 8 Description globale de la fracturation des diverses zones d'un massif - Histogramme de répartition de l'intervalle entre les discontinuités. Les classes sont celles du tableau n° 7.

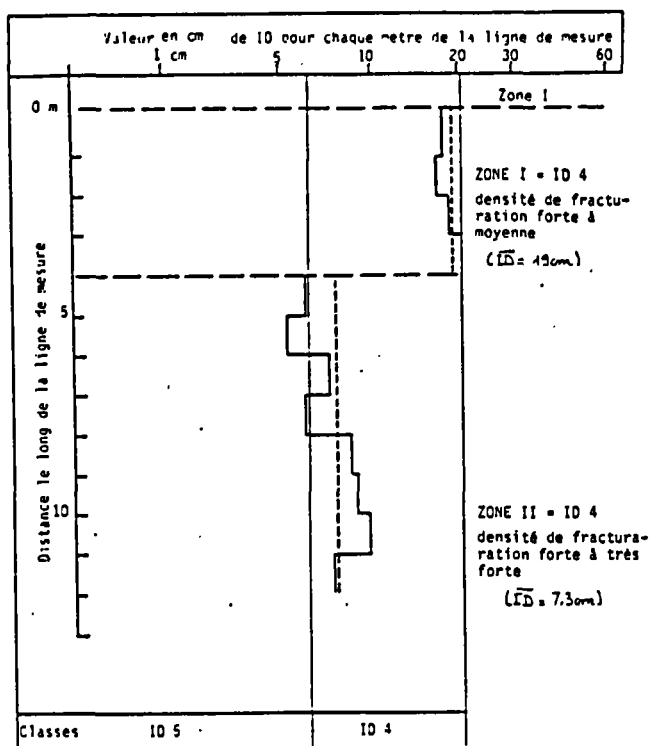


Fig. 8 bis Exemple de représentation graphique de la fracturation du massif. — Mêmes données que la figure 8 on a reporté au long de la ligne de mesure figurant en ordonnées, les valeurs moyennes de l'intervalle ID entre les discontinuités, déterminées pour chaque mètre linéaire successif de la ligne de mesure. La distinction en zones est accentuée.

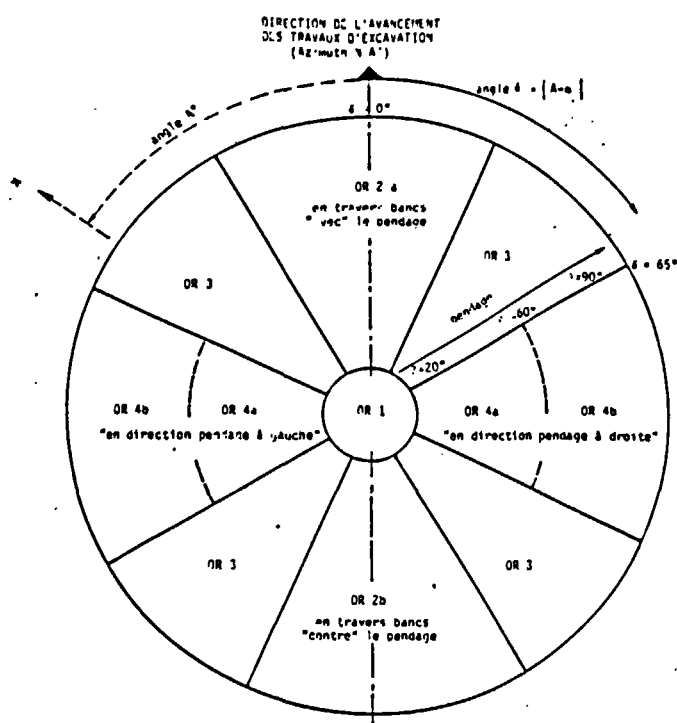


Fig. 10 Orientation des discontinuités (OR). — les différents secteurs du stéréogramme correspondent au lieu géométrique des pôles des plans de discontinuités orientés selon les données des classes (OR) du tableau n° 9. Voir également les schémas de la figure 12 (projection stéréographique de l'hémisphère supérieur à partir du pôle inférieur).

3B.- L'orientation des discontinuités.

Elle doit être considérée, particulièrement pour les familles principales, par rapport à la direction de l'avancement de l'excavation. Le pendage (β) et l'angle (δ) entre les azimuts (α_p) du pendage et (A) de l'avancement déterminent, pour chaque famille, les conditions de creusement décrites au tableau de la fig. 9. Le stéréogramme de la figure n° 10 situe graphiquement les différentes classes, ses exemples sont illustrés par la figure n° 6 de façon explicite.

CLASSES	ORIENTATION DES DISCONTINUITÉS		CONDITIONS DU CREUSEMENT
	Angle entre pendage et axe d'avancement du creusement α°	Pendage β°	
OR 1	quelconque	0 à 20°	en bancs sub-horizontaux
OR 2	a	0 à 30°	en travers-banc (a) avec le pendage (b) contre le pendage
	b		
OR 3	30 à 65°	20 à 90°	conditions intermédiaires
OR 4	a	65 à 90°	en direction. (a) pendage moyen (b) pendage fort
	b		

Fig. 9

N.B. Il peut exister une hiérarchisation des familles et c'est à la famille dominante (p.e. la stratification ou la schistosité) qu'il faut en premier lieu appliquer les appellations du tableau 9; on précisera cette hiérarchisation quand elles sont appliquées à d'autres famille moins représentées.

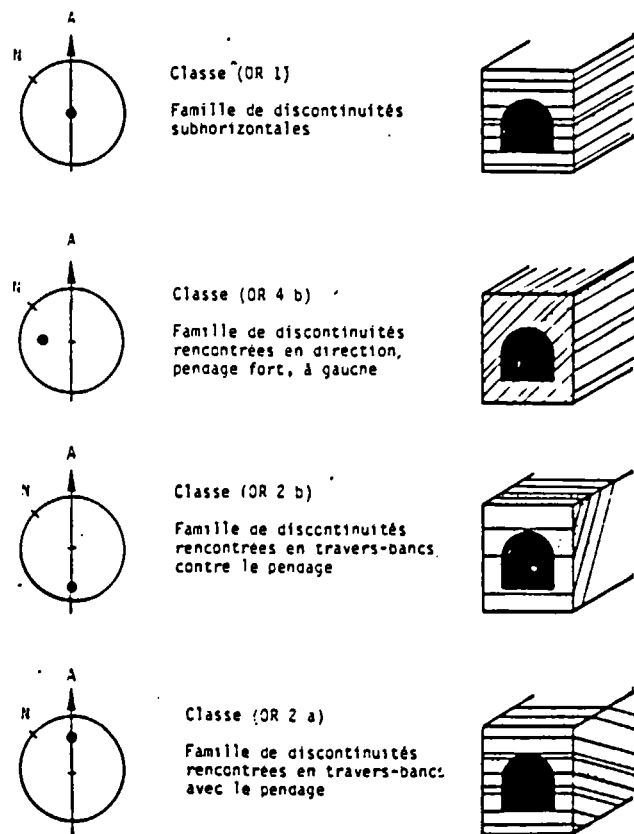


Fig. 12 Illustration schématique de quelques classes d'orientation (OR) du tableau 5 et du stéréogramme de la figure 5. à gauche : stéréogramme et représentation polaire du plan de la famille de discontinuités considérée. à droite : bloc - diagramme explicatif.

3C.- L'organisation des discontinuités.

Nombre de famille (N)

L'organisation en familles est décrite selon les termes du tableau de la figure no 11, dont quelques cas sont représentés graphiquement à la figure n° 12.

		DESCRIPTION
N 1		Pas de discontinuité ou quelques discontinuités diffuses
N 2	a	Une famille principale
	b	Une famille principale et des discontinuités diffuses
N 3	a	Deux familles principales
	b	Deux familles principales et des discontinuités diffuses
N 4	a	Trois (et plus) familles principales
	b	Trois (et plus) familles principales et des discontinuités diffuses
N 5		Nombreuses discontinuités sans hiérarchisation ni constance dans la répartition.

Fig. 11

Espacement des discontinuités de chaque famille (S)

C'est la moyenne des distances mesurées entre les discontinuités successives d'une même famille, selon la normale au plan de cette famille.

Il est recommandé d'établir l'histogramme et de calculer l'écart-type de la distribution des valeurs des distances pour chaque famille principale.

Dans le cas des massifs stratifiés, on détermine particulièrement l'épaisseur des bancs (E).

Les classes sont celles du tableau de la figure n° 13

CLASSES		DESCRIPTION		
Espace-ment	Epaisseur	(S) ou (E) en cm	Espacement des discontinuités d'une famille	Epaisseur des bancs
S 1	E 1	200 cm	discontinuités très espacées	bancs très épais
	E 2	100 à 200 cm	discontinuités espacées	bancs épais
S 3	E 3	20 à 100 cm	discontinuités moyennement espacées	bancs moyennement épais
S 4	E 4	6 à 20 cm	discontinuités rapprochées	bancs minces
S 5	E 5	0 cm	discontinuités très rapprochées	bancs très minces

Fig. 13

Note : Dans tous les cas où plusieurs valeurs modales apparaissent nettement sur les histogrammes, elles sont précisées. (fig. 15)

3D.- Le comportement mécanique des discontinuités

Il est déterminé par un ensemble de paramètres intrinsèques dont les influences respectives varient très sensiblement. L'occurrence d'un remplissage dans la discontinuité est déterminante; en son absence la morphologie de la surface des épontes, puis la résistance imposent un type de comportement (possibilité de dilatance). Chaque paramètre doit donc être décrit de façon raisonnée selon le poids qu'il pourra présenter.

Fig. 15 Histogrammes de l'épaisseur des bancs (E)
 1 - Distribution unimodale $\bar{E} = 28$ cm, classe E3
 2 - Distribution bimodale : 2 modes en E 5 et E 2 ;
 Valeur moyenne $\bar{E} = 64$ cm, classe E 2

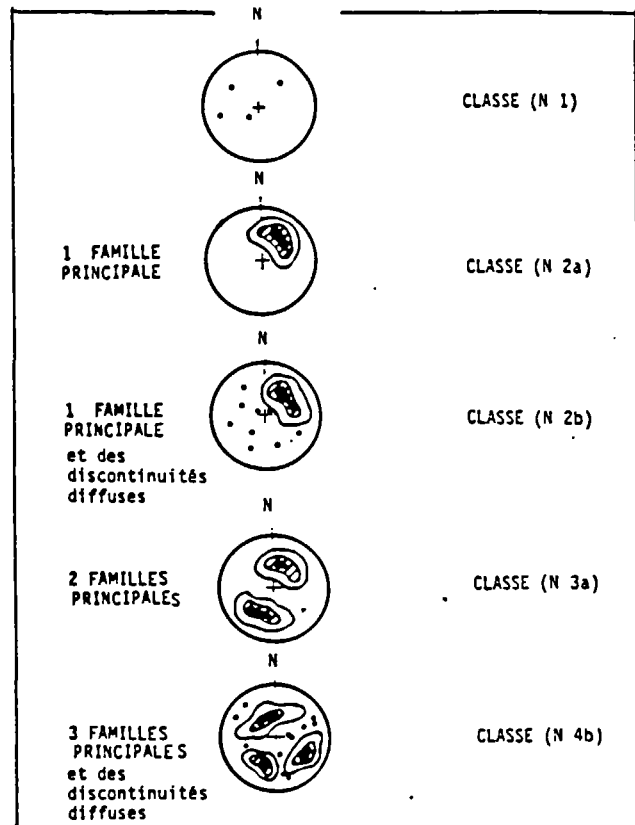
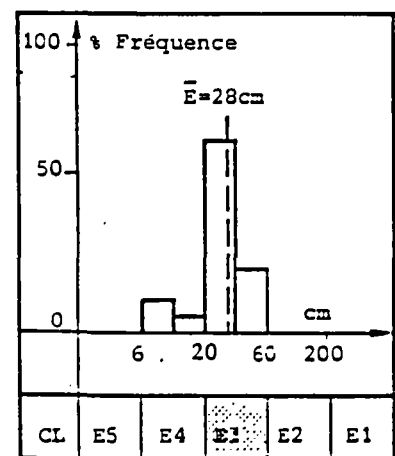
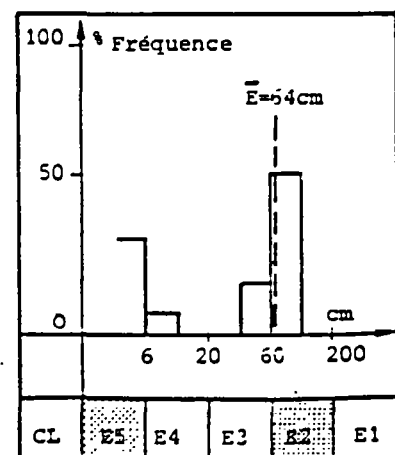


Fig. 14 Représentation graphique de quelques classes (N), nombre de familles de discontinuités du tableau fig.n° 11. Diagrammes polaires établis sur canevas de Schmidt et analysés statistiquement en courbes d'iso-densité de pôles des discontinuités : l'existence de "familles principales" est mise en évidence. (projection équiréale de l'hémisphère supérieure à partir du pôle inférieur).



①



②

Mais des facteurs extérieurs interviennent également pour moduler le comportement des discontinuités. Il en est ainsi des contraintes initiales dans le massif et de la présence d'eau (pressions interstitielles) dans les discontinuités qui déterminent le niveau de la contrainte normale sur la discontinuité, et des conditions aux limites qui conditionnent l'effet de la dilatace; ce phénomène lié à la morphologie des épontes, à leur imbrication et aux déplacements joue un rôle essentiel dans le comportement au cisaillement (figure n° 16)

N.B. :

(a) les résistances (épontes, remplissage) sont éventuellement décrites selon les classes proposées pour la roche, au paragraphe 4 ci-après.

(b) Cette description est à fournir pour chaque famille de discontinuité et particulièrement la (ou les) famille(s) dominante(s) lorsqu'il se présente une hiérarchisation des familles.

(c) dans le cas où des essais *in situ* ou en laboratoire sont réalisés, les résultats et les processus opératoires seront explicitement exposés (réf. 5).

4. - CARACTÉRISTIQUES MECANQUES DES ROCHES

La description pétrographique réalisée pour le zonage préliminaire du projet est complétée par une identification petrophysique portant sur leur qualité, leur résistance, leur potentialité de gonflement et leur altérabilité.

4 a. Identification Indice de qualité de la roche

Une roche comporte généralement des microfissures, des pores et des minéraux altérés. La célérité des ondes longitudinales dans la roche sèche est très sensible à la présence de ces défauts. On peut obtenir une indication globale et rapide sur leur existence et leur ampleur dans la roche en comparant la célérité des ondes longitudinales expérimentalement mesurée sur la roche (V_l) (réf.12) à sa valeur théorique calculée (V_l^0) à partir de la composition minéralogique (annexe 3).

L'indice de qualité de la roche
$$IQ = 100 \frac{V_l}{V_l^0}$$

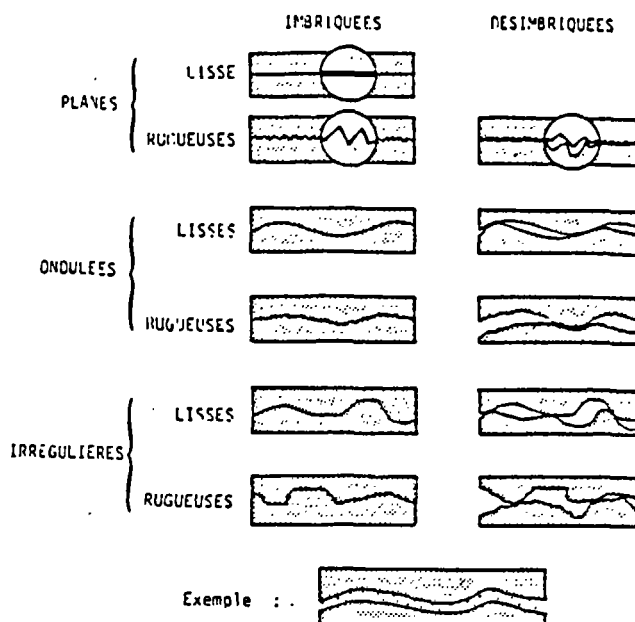
sera d'autant plus voisin de 100 % que la roche sera plus compacte et plus saine (absence de fissures, de pores et d'altération) : tableau de la figure n° 17

CLASSES	INDICE DE QUALITE DE LA ROCHE IQ %	DENSITE DE FISSURES, PORES ET MINÉRAUX ALTÉRÉS	QUALITE
IQ 1	100 à 90	nulle	très haute
IQ 2	90 à 75	faible	haute
IQ 3	75 à 50	moyenne	moyenne
IQ 4	50 à 25	élevée	basse
IQ 5	25 à 0	très élevée	très basse

Fig. 17

4 b. Résistance de la roche

La résistance en compression uniaxiale (σ_c) est l'un des paramètres les plus traditionnels en mécanique des roches. La résistance à la traction (σ_t) peut également être considérée. Il importe essentiellement de se référer aux modes opératoires normalisés (réf. 3 et 11) ou à défaut de décrire précisément la méthode et le mode opératoire utilisés pour leur détermination et de fournir des indications sur la dispersion des résultats obtenus : la dispersion est une des principales informations qui découlent des essais de résistance.



discontinuité ondulée lisse avec remplissage

Fig. 16 Morphologies des épontes des discontinuités

Il est recommandé de déterminer la valeur moyenne de la résistance (σ_c), de fournir l'histogramme des mesures et de calculer l'écart-type, et le coefficient de variation CV. Le classement est donné par le tableau de la fig.18

CLASSES	Résistance σ_c en MPa	DESCRIPTION
R 1	> 200	Résistance très élevée
R 2	200 à 60	Résistance élevée
R 3	60 à 20	Résistance moyenne
R 4	20 à 6	Résistance faible
R 5	< 6	Résistance très faible

Fig. 18

N.B. :

Une anisotropie de résistance peut apparaître de façon marquée dans la roche. On utilisera pour la classification la valeur la plus faible en précisant le rapport d'anisotropie $\frac{\sigma_c(\max.)}{\sigma_c(\min.)}$

La figure 10 donne un exemple de détermination de ce paramètre au long d'un sondage carotté traversant plusieurs zones.

4 c. Potentialité de gonflement de la roche

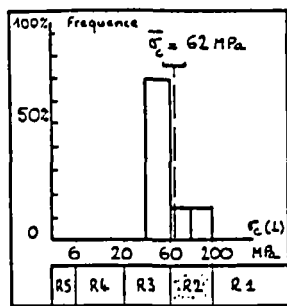
Le gonflement correspond à une augmentation, au cours du temps, du volume de la roche, concomitante avec une augmentation de la teneur en eau, une modification des contraintes, ou une combinaison interactive de ces deux facteurs.

Lorsque cette expansion est empêchée, des contraintes qui peuvent être importantes, se développent.

La cause principale du gonflement est la fixation d'eau par les minéraux hydrophiles, qui sont principalement des argiles, des hydroxydes, des sulfates.

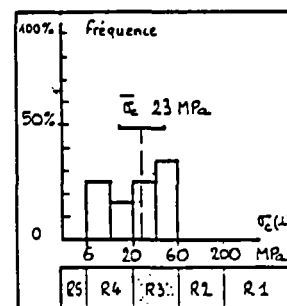
RESISTANCE DE LA ROCHE

Résistance en compression uniaxiale σ_c



ZONE I : sondage S1, 0 à 4 m
 Roche : Micaschiste
 qualité moyenne
 Anisotropie :
 σ_c max \perp à la schistosité
 σ_c min // à la schistosité.
 rapport $\frac{\sigma_c \text{ max}}{\sigma_c \text{ min}} = 2$
 10 essais \perp à la schistosité :
 moyenne $\bar{\sigma}_c = 62$ MPa
 écart-type = 14 MPa
 coefficient de variation : 25 %

Valeur à prendre en compte $\sigma_c = 62 \times \frac{1}{2} = 31$ MPa
 CLASSE R3 RESISTANCE MOYENNE



ZONE II : sondage S1, 4 à 12 m
 Roche : Micaschiste
 qualité basse
 Anisotropie :
 σ_c max \perp à la schistosité
 σ_c min // à la schistosité
 rapport d'anisotropie : 1,5
 20 essais \perp à la schistosité :
 moyenne $\bar{\sigma}_c = 23$ MPa
 écart-type = 14 MPa
 coefficient de variation : 56 %

Valeur à prendre en compte $\sigma_c = 23 \times \frac{1}{1,5} = 15$ MPa
 CLASSE R4 RESISTANCE FAIBLE

Fig. 19 Description de la résistance de la roche dans les diverses zones d'un massif - Histogrammes de répartition, paramètres de dispersion et d'anisotropie permettant d'arriver à la valeur à prendre en compte pour les classes du tableau n° 9.

Il est recommandé de déterminer :

- (a) la présence de ces minéraux dans la roche,
 - (b) les courbes de gonflement (en expansion libre) et de contraintes développées (en expansion empêchée) en fonction du temps et la forme de la relation entre contrainte et déformation (fig. 20).
- Les méthodes d'essai utilisées seront décrites avec précision (réf.4.).

N.B.

une anisotropie du gonflement est fréquente et doit être précisée, en direction et en intensité.

4 e. Altérabilité de la roche

Il importe également de reconnaître si la roche traversée est susceptible de voir diminuer ses caractéristiques mécaniques par suite de sensibilité aux modifications du milieu environnant provoquées par les travaux eux-mêmes. Cette capacité d'évoluer constitue l'altérabilité de la roche. Elle correspond aux sensibilités de la roche aux modifications suivantes :

- (a) modifications concernant les fluides en contact avec la roche (composition, conditions de saturation, pressions, circulation...):

- sensibilité de la roche aux attaques et dissolutions de zones sensibles déjà altérées (feldspaths, micas, minéraux solubles, p.e.),

- (b) modifications de l'état des contraintes :

- elles peuvent provoquer le délitage de la roche le long de discontinuités planaires existantes ou potentielles (perpendiculaires à la direction d'annulation d'une des contraintes principales, p.e. par l'ouverture d'une surface libre dans le rocher.).

- (c) modifications thermiques :

- sensibilité au gel de l'eau contenue dans ses discontinuités (gélivité),

- sensibilité aux déformations respectives des diverses espèces minérales dont les coefficients de dilatation peuvent être fort différents.

On décrira les méthodes des essais mis en œuvre, qui auront été choisies en fonction des conditions du projet.

Valeur à prendre en compte $\sigma_c = 23 \times \frac{1}{1,5} = 15$ MPa
 CLASSE R4 RESISTANCE FAIBLE

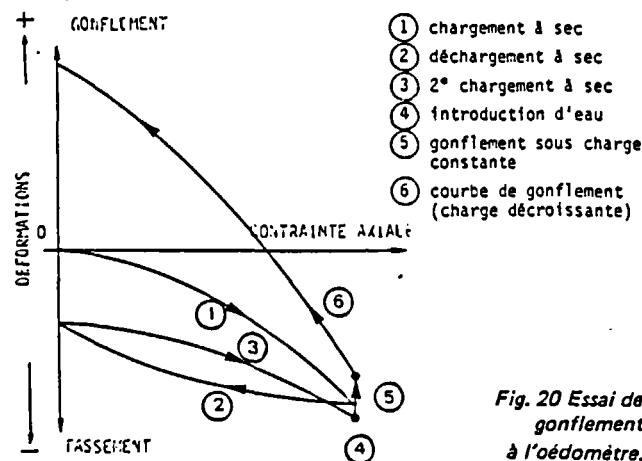


Fig. 20 Essai de gonflement à l'oedomètre.

5. - LES CONTRAINTES NATURELLES

L'analyse quantitative des conditions de stabilité d'un ouvrage souterrain suppose la connaissance de l'état d'équilibre initial donc des contraintes naturelles. Les méthodes de mesures sont difficiles à mettre en œuvre dans la plupart des massifs; leur interprétation en terme de contraintes naturelles est délicate compte tenu des caractéristiques de discontinuité et d'anisotropie des massifs rocheux. Il faut néanmoins s'efforcer d'apprécier l'état des contraintes naturelles à la lumière des mesures qui ont pu être faites et des données topographiques et tectoniques du massif.

Note :

il est intéressant pour apprécier les conditions de stabilité d'un ouvrage souterrain non soutenu de comparer la valeur des contraintes initiales à la résistance en compression uniaxiale de la roche. Pour cela, on considère le rapport σ_c / σ^0 (σ_c étant la résistance en compression uniaxiale de la roche (cf. § 4) et (σ^0) (1) la contrainte principale majeure dans le plan de l'ouvrage considéré.

CLASSES	RAPPORT σ_c / σ^0	DESCRIPTION DE L'ETAT DES CONTRAINTES NATURELLES
CN 1	> 4	Faible (a)
CN 2	4 à 2	Moyen (b)
CN 3	< 2	Fort (c)

Commentaires :

Fig. 21

(a) classe CN 1 : la résistance de la roche est suffisante pour assurer la stabilité; un soutènement peut être cependant rendu nécessaire par la présence de discontinuités.

(b) classe CN 2 : des ruptures peuvent se produire sur les parois.

(c) classe CN 3 : la résistance de la roche est nettement insuffisante.

(1) une première approximation consiste à supposer que l'une des contraintes principale est verticale et égale au poids des terrains susjacent, soit σ^0_v si γ est le poids volumique en KN/m^3 des roches susjacentes et h la profondeur de la galerie en m, on a :

$$\sigma^0_v \dots \gamma h \cdot 10^{-3} \text{ en MPa.}$$

(notons que le tenseur des contraintes initiales peut présenter une composante verticale qui s'écarte parfois localement de $\gamma h \cdot 10^{-3}$ MPa les composantes horizontales pouvant s'en écarter considérablement tant au dessus qu'au dessous).

6. -- LA DEFORMABILITÉ DU MASSIF (DM)

Du fait de la présence des discontinuités, la déformabilité du massif rocheux est souvent beaucoup plus forte que celle de la roche qui est déterminée au laboratoire sur des échantillons. L'interprétation des déformations du massif (convergence-expansions-tassements au dessus de l'ouvrage) nécessite cependant la connaissance des caractéristiques de déformabilité à l'échelle du massif. Celles-ci peuvent être appréhendées par des essais in situ intéressant des volumes représentatifs du massif.

Les essais au vérin à plaque rigide sont les plus courants; pour les galeries en charge on exécute également des essais à l'échelle de l'ouvrage par mise en charge d'un tronçon de galerie.

On caractérise la déformabilité du massif (DM) par la valeur du module de déformation $E(t)$ déterminée à partir de la tangente à la courbe enveloppe des courbes (effort-déplacement) établies au cours de cycles de chargements successifs croissants, pour une valeur de la contrainte appliquée égale à la valeur de la contrainte naturelle (figure 22 et tableau de la figure 23).

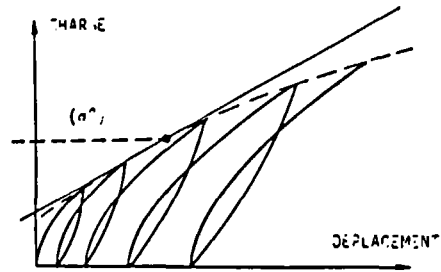


Fig. 22 Essai au vérin à plaque rigide

CLASSES	Module $E(t)$ en MPa	DESCRIPTION
DM 1	> 30 000	très faible déformabilité
DM 2	30 000 à 10 000	faible déformabilité
DM 3	10 000 à 3 000	moyenne déformabilité
DM 4	3 000 à 1 000	forte déformabilité
DM 5	< 1 000	très forte déformabilité

Fig. 23

ANNEXE 1

Dénominations recommandées des roches et des principales familles pétrographiques (d'après réf. 8 et 9).

ROCHES ERUPTIVES	Famille des Granites	Granite, granulite, granodiorite, syénite, microgranite, rhyolite, rhyodacite, trachyte, tuf...
	Famille des Diorites	Diorite, diorite quartzique, microdiorite, andésite, dacite, trachyandésite, lamprophyre...
	Famille des Basaltes et Gabbros	Gabbro, dolérite, diabase, ophite basaltique, trapp, serpentinite, peridotite
ROCHES METAMORPHIQUES	Roches métamorphiques massives	Gneiss, amphibolites, corneennes, quartzites, marbres, calcaires cristallins, leptynite
	Roches métamorphiques schisteuses	Schistes, micaschistes, phyllades ardoises, calcschistes, schistes cristallins
ROCHES SEDIMENTAIRES	Roches sédimentaires carbonatées	Calcaires, craies, dolomites, cergneues, travertins
	Roches sédimentaires siliceuses	Grès, grès quartzitiques, molasses meulière, silex, arkoses,
	Roches sédimentaires carbonato-silicatées	Marnes, argiles, grauwack
	Roches salines	Sel gemme, roches sulfatées (gypse, anhydrite), potasse

ANNEXE 2

Le "ROCK QUALITY DESIGNATION" (R.Q.D.) :

Proposé par D. Deere en 1963, il ne retient que les longueurs (L_i) découpées par les discontinuités successives, supérieures à 10 cm. Leur somme cumulée expri-

mée en pourcentage de la longueur totale de forage fournit un indice variant de 0 à 100.

Il importe de rappeler les conditions dans lesquelles cet indice doit être établi : à partir d'un sondage carotté, convenablement exécuté, c'est-à-dire présentant un taux de récupération $\approx 100\%$, d'un diamètre de l'ordre de 50 mm, le R.Q.D. est calculé sur la longueur de la passe de sondage qui peut varier de 1 à 3 m, voire 5 m.

$$R.Q.D = 100 \times \frac{\sum \text{des longueurs de carottes de long. } > 10 \text{ cm}}{\text{longueur de la passe de sondage}}$$

La partition proposée par l'auteur porte un jugement de valeur discutable; on lui préfère les termes descriptifs du tableau

CLASSES	R.Q.D. %	DESCRIPTION DE LA FRACTURATION
RQD 1	> 90	densité de fracturation très faible
RQD 2	90 à 75	densité de fracturation faible
RQD 3	75 à 50	densité de fracturation moyenne
RQD 4	50 à 25	densité de fracturation forte
RQD 5	< 25	densité de fracturation très forte

N.B.

- (a) la direction du sondage est indiquée avec précision
- (b) comme toutes les mesures réalisées selon une direction du massif, le R.Q.D. peut présenter une anisotropie plus ou moins accentuée. Dans ce cas, on détermine les directions principales de cette anisotropie et on fournit les valeurs correspondantes.

ANNEXE 3.

CALCUL DE LA CELERITÉ THÉORIQUE : V_L

Expression de l'indice de qualité

La composition minéralogique d'une roche déterminée en lame mince permet de calculer la valeur théorique V_L de la célérité des ondes longitudinales du matériau par un simple calcul de pondération à partir des valeurs de la célérité dans chaque minéral présent.

$$\frac{1}{V_L} = \sum_i \frac{C_i}{V_{L_i}} \text{ avec } (V_{L_i} \text{ célérité dans ième minéral})$$

$$(C_i \text{ proportion du ième minéral})$$

Minéraux	V_{L_i} m/s
Quartz	6 030
Olivine	8 400
Augite	7 200
Amphibole	7 210
Muscovite	5 810
Biotite	5 130
Orthose	5 690
Oligoclase	6 260
Magnétite	7 410
Calcite	6 660
Dolomite	7 900
Verre bastique	6 500

Tableau 1

Roches	V_L^* m/s
Granites	6 000
Diorites	6 500
Gabbros	7 000
Roches métamorphiques	6 000
amphibolites	6 500
Roches carbonatées	6 500
Roches siliceuses	6 000

Tableau 2

La célérité dans cette roche est égale à la moyenne harmonique des célérités dans chaque minéral pondérée par la teneur en chacun des minéraux présents :

(V_{L_i} célérité dans ième minéral)

(C_i proportion du ième minéral)

Une simplification, souvent possible, consiste à identifier le type pétrographique auquel appartient la roche et à estimer la célérité théorique V_L^* à partir du tableau 2 qui donne les célérités maximales observables dans les roches selon leur type pétrographique.

La différence entre la valeur mesurée expérimentalement et la valeur théorique calculée ou estimée est essentiellement due aux discontinuités et à l'altération de la roche, ce qu'exprime IQ % :

$$IQ \% = \frac{V_L}{V_L^*} \times 100$$

V_L^* étant une valeur maximale, on a $IQ \leq 100$ % : plus IQ est faible, plus la roche est affectée de discontinuités et altérée.

REFERENCES

SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DE MÉCANIQUE DES ROCHES (S.I.M.R. - I.S.R.M.)

— Commission on classification of rock masses :

(1) Basic Geotechnical Description of rock masses (BGD), revised : Septembre 1977 (document provisoire)

— Commission on terminology, symbols and graphic representation :

(2) Terminology (English-French-German), final draft : July 1975

— Commission on standardization of laboratory and field test :

— Committee on laboratory tests

(3) Document n° 1, "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength of rock materials and the point load strength index", final draft October 1972.

(4) Document n° 2, "Suggested methods for determining water content, density, porosity, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties", final draft November 1972.

(13) Document n° 4, "Suggested methods for determining sound velocity", proposed March 1977.

• Committee on field tests

(5) Document n° 1, "Suggested methods for determining shear strength", final draft : February 1974

(6) Document n° 2, "Suggested methods for the quantitative description of rocks masses and discontinuities", March 1977, revised September 1977 (document provisoire).

GEOLOGICAL SOCIETY (LONDON)

Engineering Working Group :

Working party first and second reports on :

(7) "The logging of rocks cores for engineering purposes" Quat. Journal of Engng. Geol., 3, 1970 and 10, 1977

BRITISH STANDARD INSTITUTION

(8) B.S. 812 (1967), "Specifications for methods for sampling and testing of minerals aggregates, sands and fillers. Part 1, section 2, Petrographical description and classification

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT

(9) Éléments pour l'identification des granulats; Avant Projet de Mode Opérateur du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, novembre 1976

(10) Essais sur les granulats; Avant Projet de Mode Opérateur du L.C.P.C., novembre 1976.

(12) Essai de gel des granulats; Mode Opérateur G.22 du L.C.P.C. - Dunod Ed. (1973)

ASSOCIATION FRANÇAISE DES TRAVAUX EN SOUTERRAIN (A.F.T.E.S.)

Groupe de travail mécanisation de l'excavation :

(11) Propositions relatives aux mesures et essais à effectuer dans le cadre d'un chantier de creusement mécanique. 1ère partie : Caractérisation des roches sur échantillons; Tunnels et Ouvrages Souterrains, 5, 1974.

ANNEXE 7
Photographies des carottes logs stratigraphiques localisation des
échantillons indications géomécaniques et AFTES

B.R.G.M.

DOE/EGDA

Tunnel RN9
Pénétrante est
Fort de France

SONDAGE CAROTTE

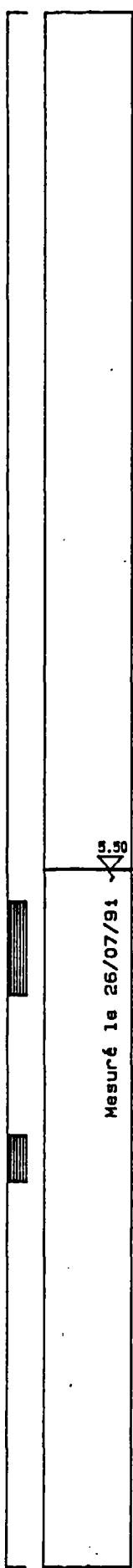
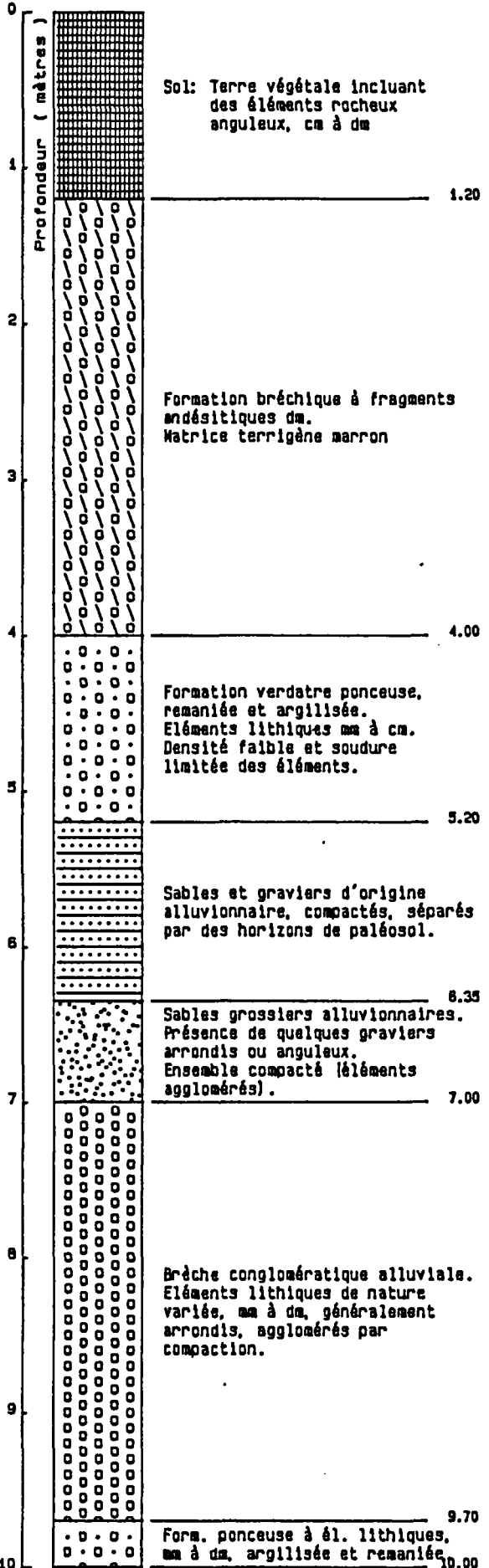
éch - 1/40

SC1

DESCRIPTION DES TERRAINS

ECH. PIEZO

Logiciel BRGM



Blocs d'andésite 5/6 cm, sains.

RQD= 0%
IDS (4)

Niveaux piézométriques par rapport au sol

21/02/91: -
07/05/91: 8.66m
26/07/91: 5.50m
27/11/91: H.S.
31/12/91: H.S.

Type de prélèvement: CP

AMS (4)
RQD= 0%
IDS

AM4
RQD= 30%
ID4

Type de prélèvement: APM

Zones altérées

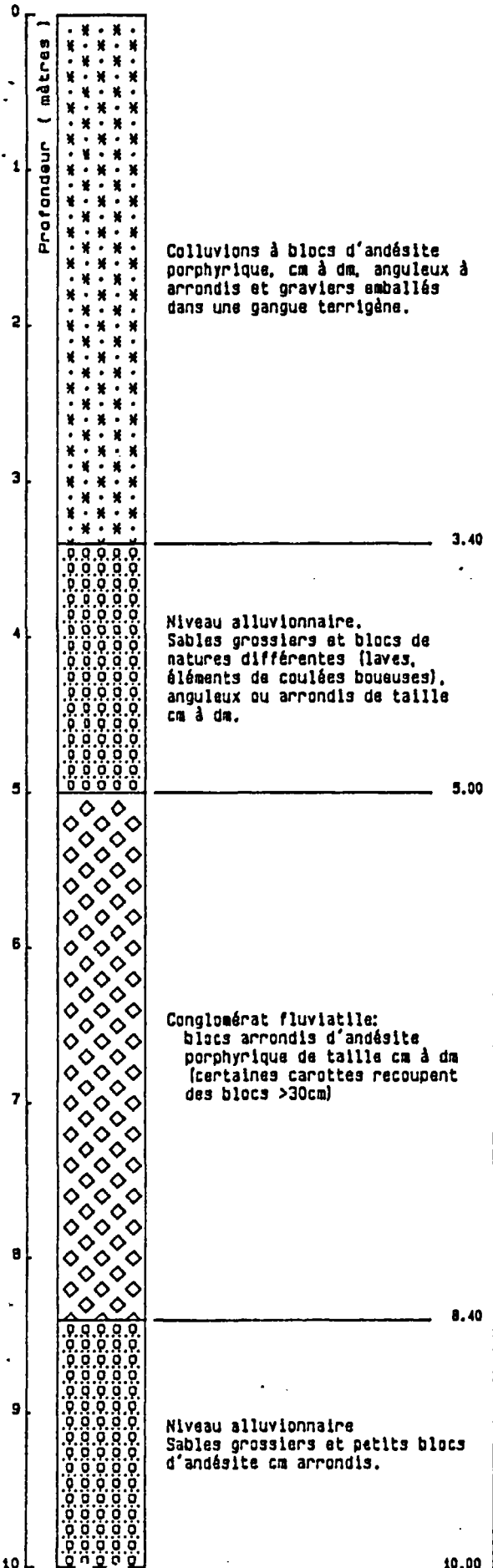
ID4
AMS
RQD= 0%

IDS
AM4
RQD= 0%

DESCRIPTION DES TERRAINS

ECH. PIEZO

L'UNITE UNOM



Colluvions à blocs d'andésite porphyrique, cm à dm, anguleux à arrondis et graviers emballés dans une gangue terrigène.

Niveau alluvionnaire. Sables grossiers et blocs de natures différentes (laves, éléments de coulées boueuses), anguleux ou arrondis de taille cm à dm.

Conglomérat fluvialile: blocs arrondis d'andésite porphyrique de taille cm à dm (certaines carottes recoupent des blocs >30cm)

Niveau alluvionnaire Sables grossiers et petits blocs d'andésite cm arrondis.

Piezomètre SC5 sec lors des mesures:
- soit la nappe se situe à une altitude inférieure à celle du fond du piézomètre;
- soit l'ouvrage est colmaté.

Type de prélèvement: CP

B.R.G.M.

DDE/EGOA

Tunnel RN9
pénétrante est
Fort de France

SONDAGE CAROTTE

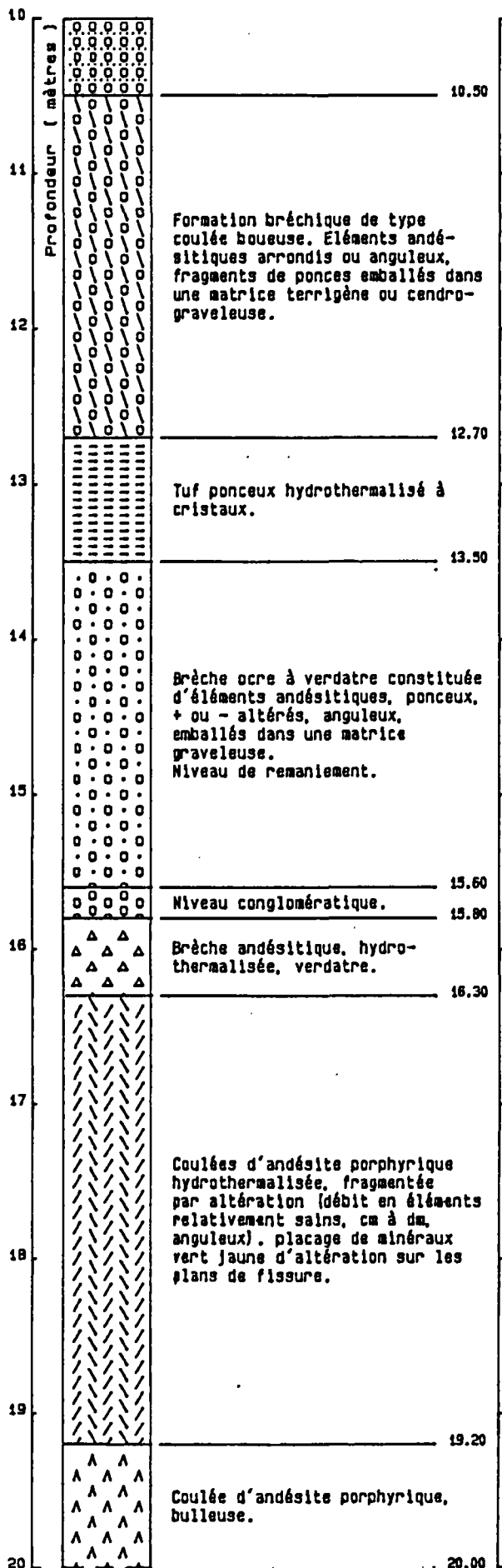
éch = 1/40

SC5

DESCRIPTION DES TERRAINS

ECH.

Logiciel BRGM



Type de prélèvement: CP

AM4
ID5
RQD= 0%

Type de prélèvement: CP

AM5
ID5
RQD= 0%

Type de prélèvement: CP

AM4
ID4 (5)
RQD= 10%

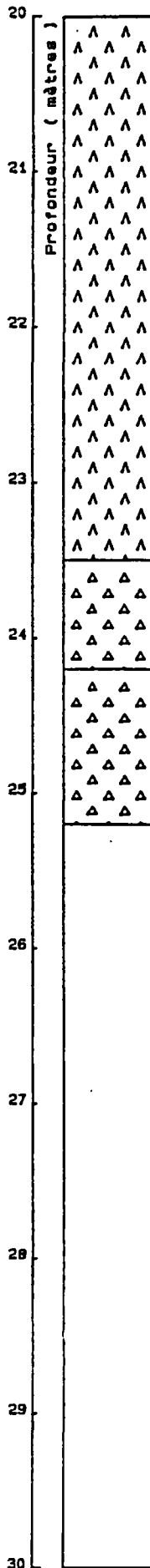
AM2
AM5
ID5
RQD= 0%

AM3 (4)
ID5 (4)
RQD= 0%

DESCRIPTION DES TERRAINS

ECH.

Logiciel BRGM



Profondeur (mètres)

Coulée d'andésite porphyrique bulleuse (toit ou base de coulée, hydrothermalisée se débitant en éléments cm à dm).

23.50
Andésite vacuolaire très altérée (argiles + minéraux hydrothermaux verdâtre) et très fragmentée + composante graveleuse = niveau alluvionnaire grossier à graviers
24.20

Andésite vacuolaire altérée dans la masse (argiles + minéraux hydrothermaux verdâtre et se fragmentant facilement).
25.20

Roche très fracturée en éléments < cm de type sableux ou altérés.
Dépot de minéraux hydrothermaux.

AM4 (5)
R00- 0%
I05

B.R.G.M.

Tunnel RN9
Pénétrante est
Fort de France

SONDAGE CAROTTE

SC2

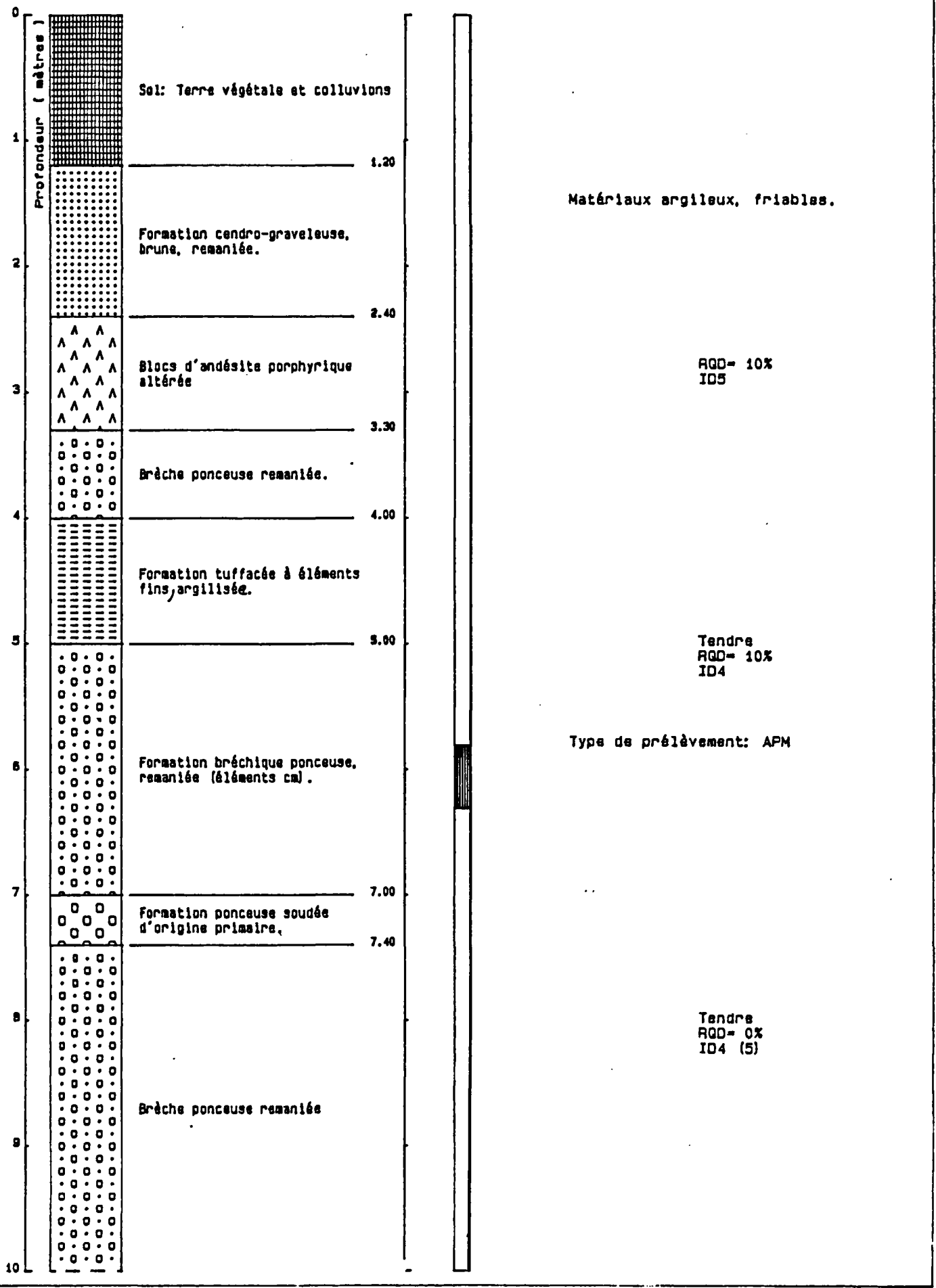
DDE/EGOA

éch = 1/40

DESCRIPTION DES TERRAINS

ECH.

Logiciel BRGM



B.R.G.M.

ODE/EGOA

Tunnel RN9
pénétrante est
Fort de France

SONDAGE CAROTTE

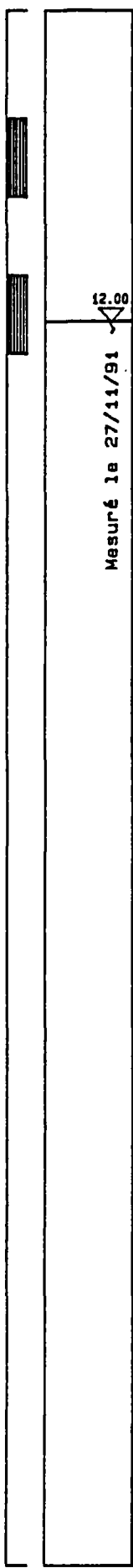
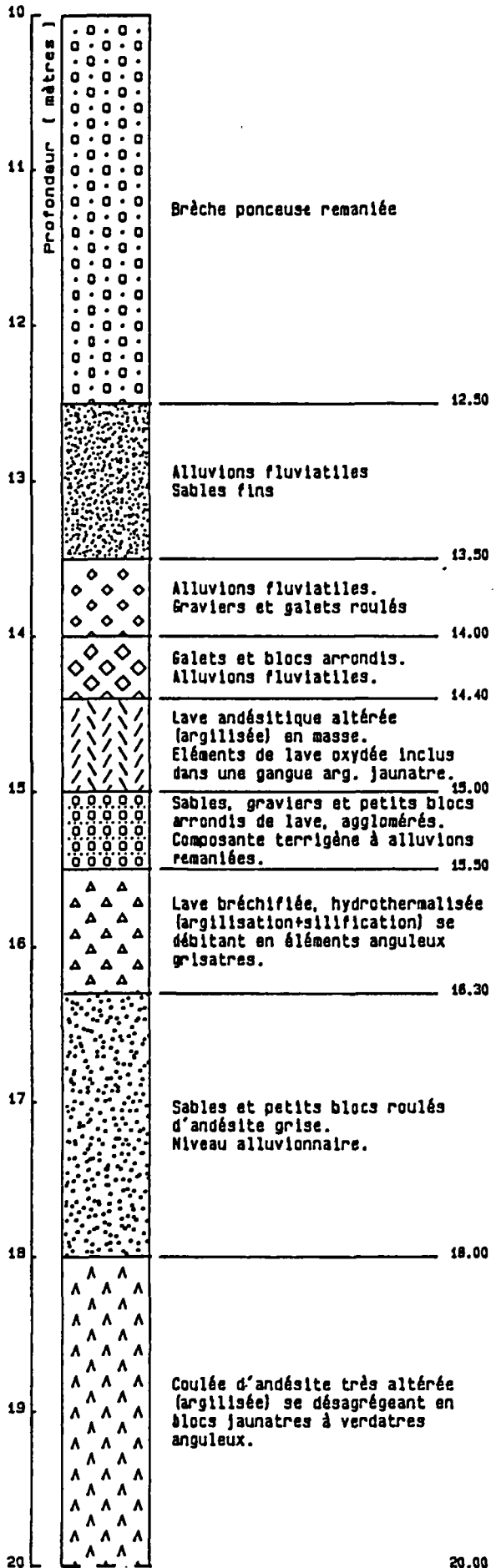
éch = 1/40

SC2

DESCRIPTION DES TERRAINS

ECH. PIEZO

Logiciel BRGM



Type de prélèvement: APM
 Dépôt de minéraux d'origine
 hydrothermale, jaunâtres.
 AM4
 IO5
 RQD= 0%

Type de prélèvement: APM

Niveaux piézométriques
 par rapport au sol

21/02/91: 13.49m
 07/05/91: 13.43m
 26/07/91: 13.43m
 27/11/91: 12.00m
 31/12/91: 14.00m

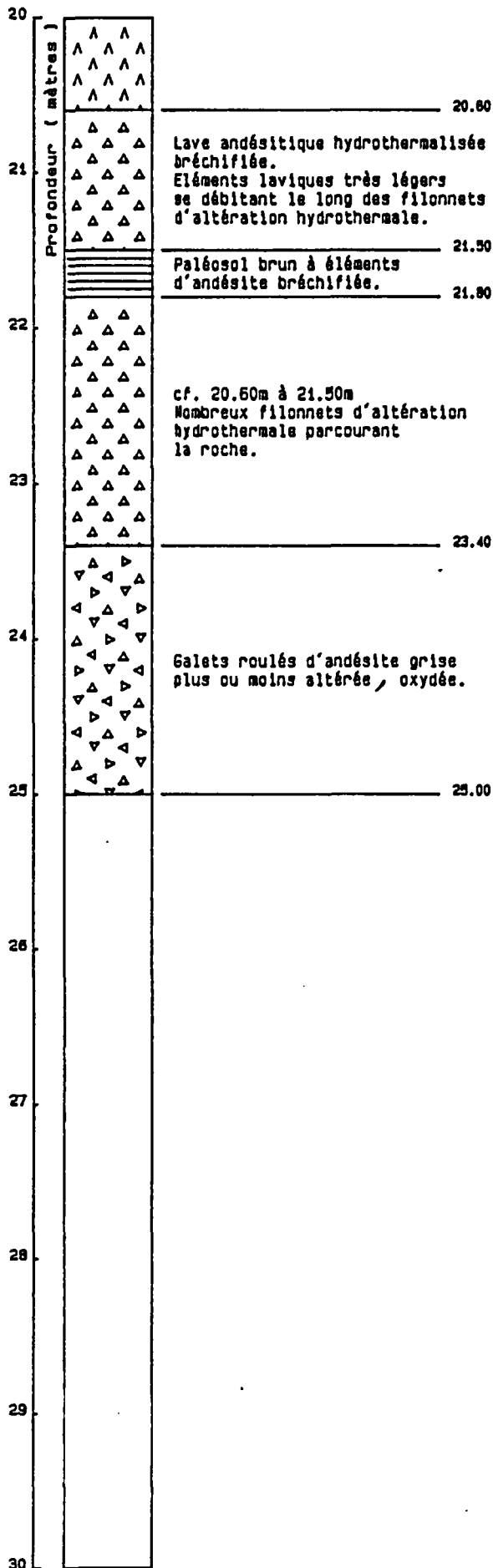
AM5, très altéré.
 Débit en éléments cm à 3/4cm.
 RQD= 0% IO5

RQD= 0%
 IO5
 AM5

DESCRIPTION DES TERRAINS

ECH.

Logiciel BRGM



Type de prélèvement: APM

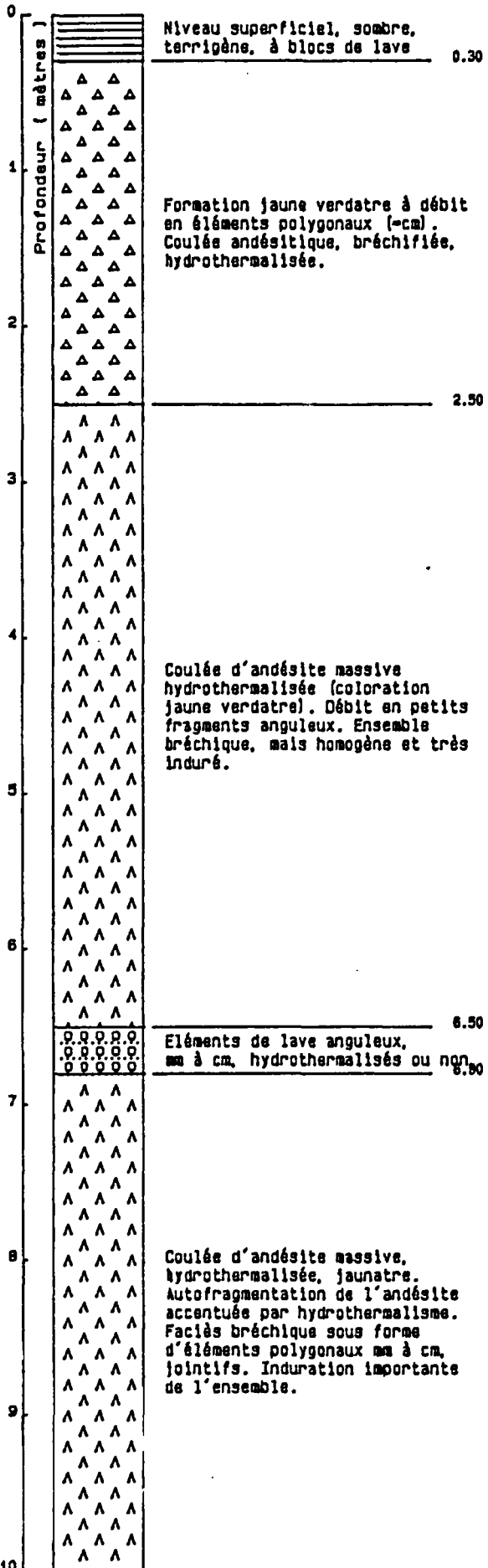
Dépôts de minéraux d'altération.

AM4 (5)
RQD = 0%
I05

DESCRIPTION DES TERRAINS

ECH.

Logiciel BRGM



AMS
RQD= 0%
ID5

L'altération hydrothermale qui décolore la roche accentue la fragmentation originelle de la formation. Les éléments constitutifs sont indurés par silification et la formation bien que bréchique est compacte. Dans cet intervalle, présence d'éléments très peu altérés.

Type de prélèvement: APM

RQD= 0%
ID5
AM4 (5)

B.R.G.M.

DDE/EGOA

Tunnel RN9
Pénétrante est
Fort de France

SONDAGE CAROTTE

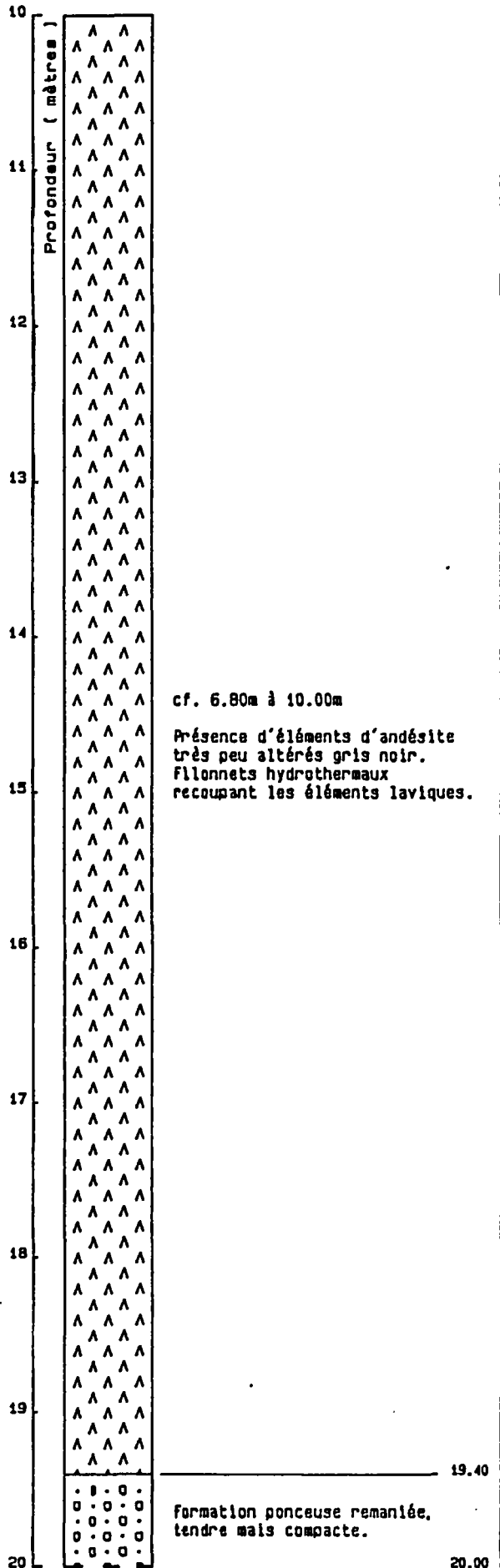
éch - 1/40

SC3

Logiciel BRGM

DESCRIPTION DES TERRAINS

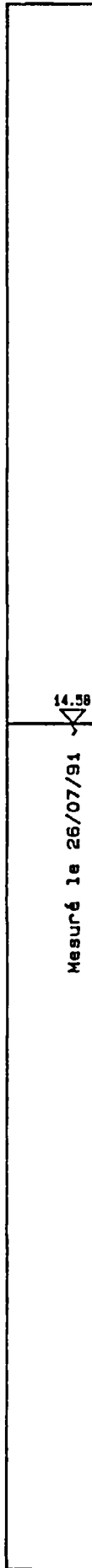
PIEZO



cf. 6.80m à 10.00m

Présence d'éléments d'andésite très peu altérés gris noir. Filonnets hydrothermaux recoupant les éléments laviques.

formation ponceuse remaniée, tendre mais compacte.



Niveaux piézométriques par rapport au sol

21/02/91: 15.34m
 07/05/91: 17.97m
 26/07/91: 14.58m
 27/11/91: 14.64m
 31/12/91: 17.00m

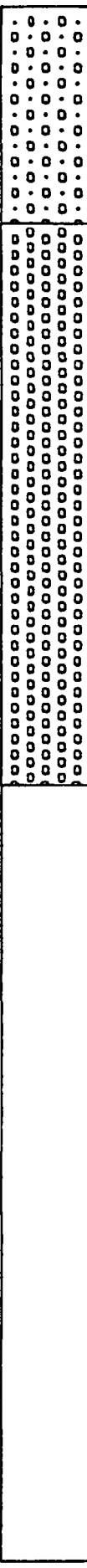
Aspect jaunâtre dans sa totalité. La roche se fragmente en éléments centimétriques.

DESCRIPTION DES TERRAINS

Logiciel BRGM

20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30

Profondeur (mètres)



cf. 19.40m à 20.00m
Éléments lithiques andésitiques,
mm à cm, arrondis.

21.40

Formation conglomératique, plus
grossière que la précédente
(éléments lithiques arrondis,
mm à cm, d'andésite plus ou moins
altérée et oxydée) à matrice
constituée de petits éléments
agglomérés de ponces et
d'andésite hydrothermalisée.

25.00

RQD = 0%
ID5

B.R.G.M.

DDa/EGDA

Tunnel RN9
Pénétrante est
Fort de France

SONDAGE CAROTTE

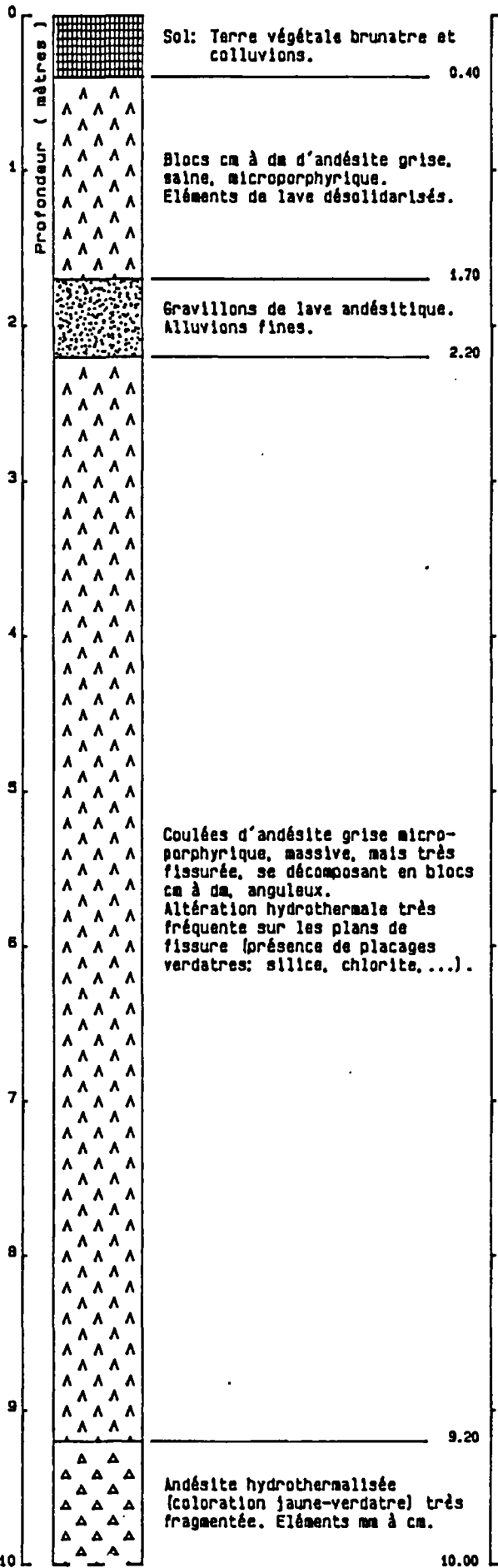
éch = 1/40

SC4

DESCRIPTION DES TERRAINS

ECH.

Logiciel BRGM



AM3
ID4
RQD= 10%

AM2 (3)
ID4 (5)
RQD= 10 à 20%

Type de prélèvement: tronçon de carotte

AM5
ID5
RQD= 0%

B.R.G.M.

DDE/EGOA

Tunnel RN9
Pénétrante est
Fort de France

SONDAGE CAROTTE

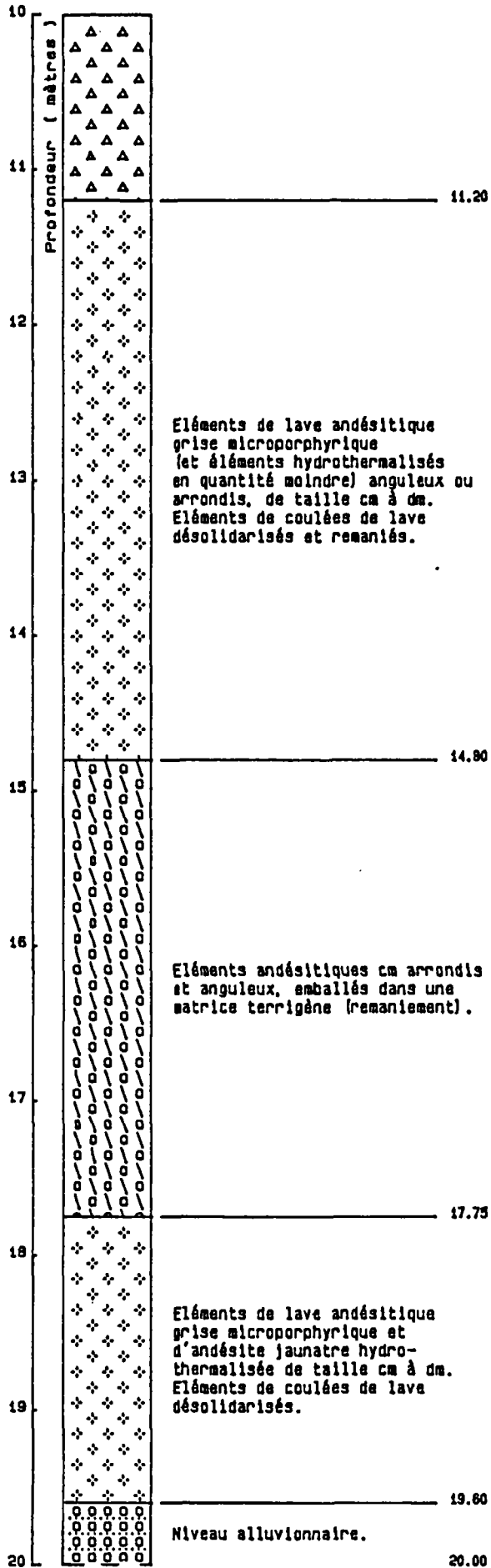
éch = 1/40

SC4

DESCRIPTION DES TERRAINS

ECH. PIEZO

Logiciel BRGM

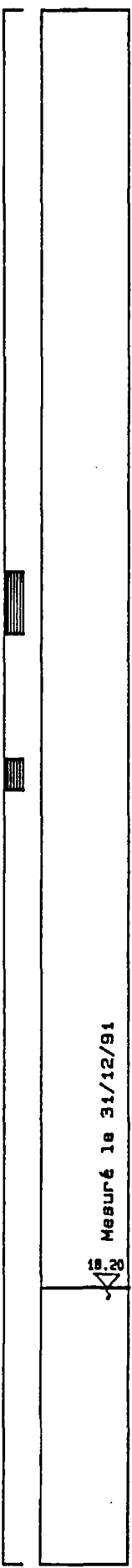


Eléments de lave andésitique grise microporphyrrique (et éléments hydrothermalisés en quantité moindre) anguleux ou arrondis, de taille cm à dm. Eléments de coulées de lave désolidarisés et remaniés.

Eléments andésitiques cm arrondis et anguleux, emballés dans une matrice terrigène (remaniement).

Eléments de lave andésitique grise microporphyrrique et d'andésite jaunâtre hydrothermalisée de taille cm à dm. Eléments de coulées de lave désolidarisés.

Niveau alluvionnaire.



Mesuré le 31/12/91

AM3
IO5
RGD= 0%

Type de prélèvement: APM

Type de prélèvement: APM

Niveau piézométrique
(par rapport au sol)
mesuré le 31/12/91:
18.20m

IO5
RGD= 0%

B.R.G.M.

ODE/EGOA

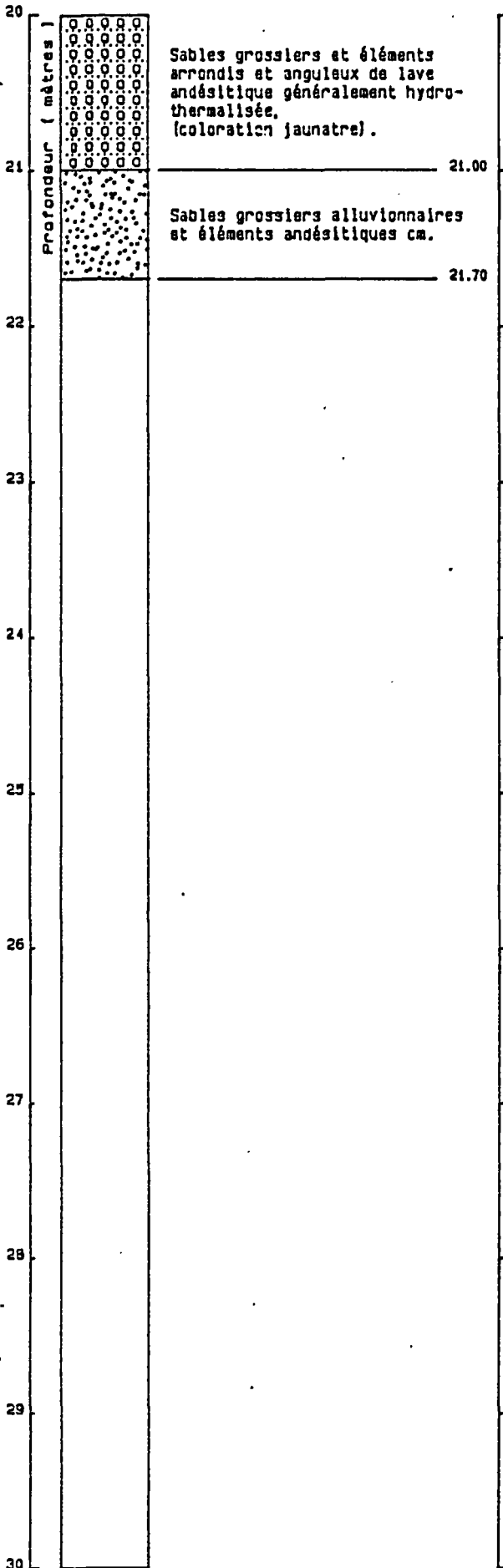
Tunnel RN9
Pénétrante est
Fort de France

SONDAGE CAROTTE

éch = 1/40

SC4

DESCRIPTION DES TERRAINS



SC1

0 a 2.0 m



2.0 a 3.5 m



3.5 a 6.35 m



6.35 a 9.5 m



9.5 a 10.10 m



SC 5

0 a 3m



3 a 6



6 a 9.40



9.40 a 13.20



13.20 a 16.0



16.0 a 19.50



19.50 a 23.50



SC 2

0 a 2 m

2 a 5

5 a 8

8 a 10.70

10.70 a 14.40

14.40 a 17.30

17.30 a 20.30

20.30 a 23.40

23.40 a 25.0



0 à 3 m



3 à 6.40



6.40 à 9.30



9.30 à 12.30



12.30 à 14.80



14.80 à 17.80



17.80 à 21.50



21.50 à 25.0 m



SC 3

0 a 3 m



3 a 6



6 a 9.20



9.20 a 12.70



12.70 a 15.55



15.55 a 18.50



18.50 a 22.00



SC 4

ANNEXE 8

**Coupe synthétique simplifiée du tracé nord du tunnel
échelle des X : 1/1000 - échelle des Y : 1/500**

DIRECTION DEPARTEMENTALE DE L'EQUIPEMENT
DE MARTINIQUE



BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES

BRGM MARTINIQUE

Km 9,9, Route de Diifer - BP 394 97204 FORT DE FRANCE CEDEX

RN9

PENETRANTE EST DE FORT DE FRANCE

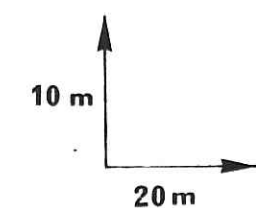
TUNNEL SOUS LE MORNE TSF

COUPE SYNTHETIQUE SIMPLIFIEE

DU TRACÉ NORD DU TUNNEL

INDICE	DESCRIPTION	DESSIN	VERIF.	APPROB.	DATE
A	PREMIERE EMISSION				
REVISIONS					
DATE	PLAN N°				
30-07-92	4S ANT 7085				

échelle : pour la coupe



cote NGM

30 m

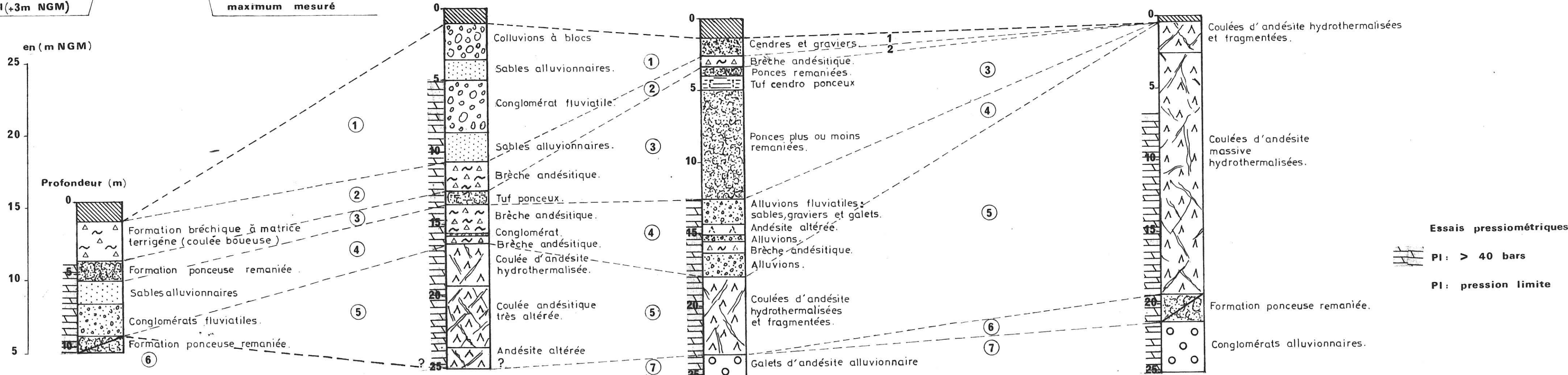
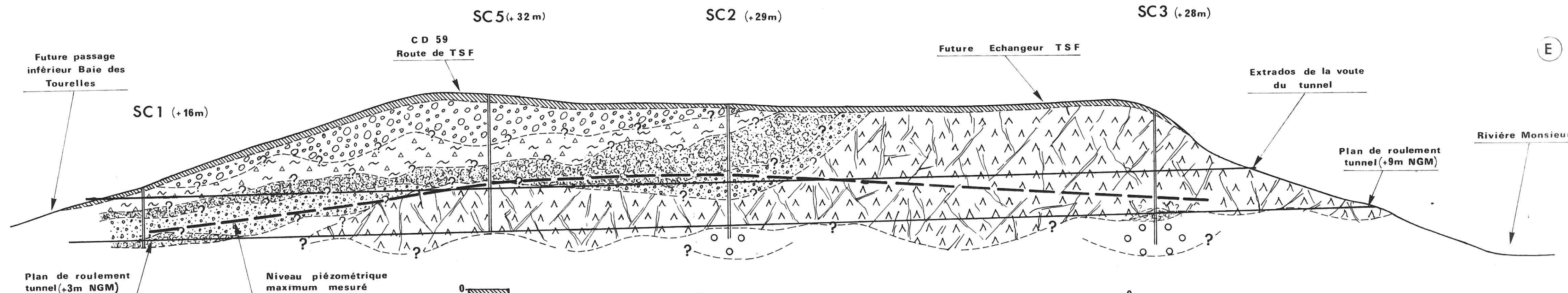
20 m

10 m

0 m

LEGENDE

- Terre végétale.
- Colluvions et alluvions fluviales.
- Brèches à éléments andésitiques
- Formations ponceuses plus ou moins remaniées
- Alluvions fluviales (sables, graviers, conglomérats) micro brèches andésitiques
- Coulées d'andésite
- Formation ponceuse remaniée
- Alluvions fluviales



Annexe 8 : Coupe synthétique simplifiée du tracé nord du tunnel

R 4S ANT 35456