

Commune | **Rougemont**

Concerne | **Ouvrages d'art, lit de ballast et
infrastructure**

Affaire | **MOB – Gare de Rougemont – km
39.100 – 39.800**

Etude géotechnique
Rapport

Version définitive 1

Numéro **11649**

Date **10 août 2020**

INFORMATIONS SUR LE DOCUMENT

Auteurs :	Behnam Cyrus, Géotechnicien Gygax Eleonora, Géologue Vuadens Simon, Géologue
Mandant :	Madame Machordom Libertad, MOB
Phase SIA :	-
Statut :	Version définitive 1
Réf. interne :	11649_Rapport_EG 10.09.2020_.docx

ANNEXES

Plans :	11649-51	Plan de situation des sondages
	11649-52	Profil géologique A-A'
	11649-53 à 59	Profils en travers des voies
Annexes :	A1	Nomenclature et description des sols et essais
	A2	Log du sondage carotté
	A3	Photographies de la carotte en caisse
	A4	Levé des fouilles à la pelle mécanique en dehors des voies
	A5	Levé des fouilles à la pelle mécanique sur les voies existantes
	A6	Calcul de la capacité d'infiltration/essais d'infiltration
	A7	Résultats des essais de laboratoire
	A8	Résultats des analyses de pollution du laboratoire Wessling AG

SUIVI DES VERSIONS

Version	Date	Modifications	Contrôle
1	10.09.2020	1 ^{ère} diffusion	CVO
2			
3			

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	5
2	DOCUMENTS DE BASE	5
3	CONTEXTE GÉOLOGIQUE	6
4	RECONNAISSANCES	7
4.1	Sondage carotté pour ouvrages d'art (PI et PS VOYAGEURS)	7
4.2	Fouilles en dehors des voies (pour infrastructure de la future voie et futurs ouvrages)	8
4.3	Fouilles à la pelle mécanique sur les voies entre traverses (étude géotechnique du lit de ballast et de l'infrastructure existants)	8
5	ETUDE POUR OUVRAGES D'ART	10
5.1	Stratigraphie	10
5.2	Resultats des essais in situ – permeabilite des sols, essais d'infiltration	11
5.2.1	Bases légales	11
5.2.2	Déroulement des essais	12
5.2.3	Interprétation des résultats	12
5.3	Resultats des essais de laboratoire	13
5.4	Paramètres de calcul	13
5.5	Hydrogéologie	14
5.5.1	Contexte	14
5.5.2	Renseignements disponibles	14
5.5.3	Conclusions	15
5.5.4	Gel	15
5.6	Seisme – Classe de sols de fondations	15
5.7	Technique de fondation	16
5.7.1	Contraintes liées à l'hydrogéologie	16
5.7.2	Contraintes liées à la géologie	16
5.7.3	Capacité portante	16
5.8	Terrassement	18
5.8.1	Excavations	18
5.8.2	Réutilisation des matériaux	18
5.8.3	Traitement des fonds d'excavation	18
5.9	Soutènement de fouille	19
5.9.1	Conditions géotechniques	19
5.9.2	Dimensions de l'excavation	19
5.9.3	Environnement construit	19
5.9.4	Synthèse et recommandations	19
5.10	Drainage	20
5.10.1	Gestion des eaux de chantier	20
5.10.2	Drainage des ouvrages en phase d'exploitation	20
5.10.3	Infiltration des eaux claires	21
6	ÉTUDE DU LIT DE BALLAST ET DE L'INFRASTRUCTURE	21
6.1	Description des conditions existantes et réflexions	21
6.1.1	Ballast	21
6.1.2	Contamination du ballast – analyses de pollution chimique	23
6.1.3	Sols d'infrastructure et drainage	24
6.1.4	Contamination du sol d'assise	27
6.2	Recommandations pour les nouvelles voies	29
6.2.1	Introduction	29

6.2.2	Mesures pour nouvelles voies – réfection totale	29
7	SYNTHÈSE	31

1 INTRODUCTION

La présente étude fait suite au mandat qui nous a été confié par la compagnie de chemin de fer Montreux Oberland Bernois (MOB) SA le 11 mai 2020, sur la base de notre offre du 6 mai 2020.

Il s'agit d'une étude géotechnique sur la ligne Montreux-Zweisimmen, autour de la gare de Rougemont entre les kms 39.100 et 39.800, dans le cadre du renouvellement complet (travaux génie civil) de la voie principale et des voies secondaires en gare de Rougemont. Ces voies existantes sont métriques. Le renouvellement des voies est accompagné par des ouvrages d'art.

Le but de cette étude géotechnique consiste à :

- Présenter les conditions stratigraphiques et hydrogéologiques du site concerné par le projet et, sur la base de l'interprétation qui peut en être faite, de proposer des solutions pour la conception des futurs ouvrages, notamment le passage inférieur (PI) voyageurs au km 39.300 et supérieur (PS) voyageurs au km 39.420 en gare de Rougemont, la route d'accès en direction de Saanen du km 39.360 au km 39.420, la voie piétonne du km 39.420 au km 39.470 et le mur de soutènement au sud des futures voies du km 39.420 au km 39.540.
- Définir les caractéristiques des infra- et superstructures ferroviaires actuelles et les mesures de renouvellement à adopter dans le cadre du projet.

Dans cette optique, nous avons entrepris les démarches suivantes :

- Pour répondre au premier point :
 - Exécution d'un sondage carotté RO-SV1 à l'extrémité est de la gare de Rougemont et à proximité du passage à niveau (PN).
 - Lors des relevés géotechniques des sondages, quatre échantillons de sols ont été prélevés pour réaliser des essais géotechniques en laboratoire.
- Pour répondre au deuxième point :
 - Exécution de sept fouilles de reconnaissance d'infrastructure RO-I1 à RO-I7 entre les traverses de la voie.
 - Lors des relevés géotechniques des fouilles d'infrastructure, quatre échantillons de sols d'assise ont été prélevés dans les fouilles RO-I1, RO-I2, RO-I4 et RO-I7 pour réaliser des essais géotechniques en laboratoire ainsi que cinq échantillons de ballast et deux échantillons de sol d'assise au droit des fouilles RO-I1, RO-I2, RO-I3, RO-I5 et RO-I7 pour effectuer des analyses de pollution chimique.
 - Relevé topographique des profils en travers de la plateforme au droit des fouilles de reconnaissance.
 - Evaluation du système de drainage existant pour le futur projet.
- Pour répondre aux deux points ci-dessus :
 - Exécution de trois fouilles de reconnaissance RO-FR1 à RO-FR3 aux abords des voies avec essais d'infiltration.

2 DOCUMENTS DE BASE

Les documents suivants ont été consultés pour rédiger le présent rapport :

- Atlas géologique de la Suisse, feuille N° 1245 Château-d'Œx, 1:25'000.
- Issus du guichet cartographique du Canton de Vaud (www.geo.vd.ch):
 - Sondages et autres reconnaissances géologiques ;

- Carte de phénomènes – glissements ;
- Inventaire des sites pollués ;
- Secteurs et zones de protection des eaux souterraines ;
- Carte des aléas sismiques.
- Directive sur l'évacuation des eaux des installations ferroviaires (OFT, août 2018)
- Dossier de plans et documents établi par la compagnie de chemin de fer MOB SA, notamment :
 - Plan de situation de la gare de Rougemont, Variante 8.4, établi le 3 février 2020 ;
 - Pont sur la Combabelle, MZ-39.547-PO, Projets de renouvellement, Rapport géologique et géotechnique, AF TOSCANO SA, octobre 2019 ;
 - Tronçon Montreux-Zweisimmen (MZ), Pont sur la Combabelle, MZ-39.547-PO, Etude hydraulique, AF TOSCANO SA, octobre 2019.

3 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Selon l'Atlas géologique, le tronçon qui fait l'objet de cette étude se trouve entièrement sur des cônes de déjection (ou d'alluvions) de plusieurs ruisseaux, dont le ruisseau de Combabelle et le ruisseau des Fenils, qui sont affluents de La Sarine.



Fig. 1 Extrait de l'atlas géologique, feuille N° 1245 Château-d'Ex, avec étendu de la zone d'étude du km 39.100 au km 39.800

Les alluvions recouvrent la moraine locale, qui à son tour coiffe la formation du Biot, une couche composée d'une alternance de grès, de calcaires et de marnes plus ou moins schisteuses. Dans le cadre de ce mandat, les profondeurs prises en compte ne sont pas suffisantes pour atteindre la moraine locale ni la formation du Biot. Toutefois, cette dernière affleure au bord de la Sarine et du ruisseau de Combabelle, grâce à l'action érosive des cours d'eau.

Selon le guichet cartographique cantonal, la voie existante se situe en secteur Au de protection des eaux souterraines, en raison de la présence d'une zone de protection des eaux (S1, S2 et S3) directement au Sud du chemin de fer, entre les kms 39.380 et 39.551. La présence de ce secteur influera sur le type d'évacuation des eaux à prévoir pour la future voie.

La voie existante n'est pas inscrite au cadastre des sites pollués cantonal ni au cadastre des sites pollués des transports publics (CASIP OFT).

Le tracé a été réalisé majoritairement sur le terrain naturel ou en déblais ; par conséquent, des remblais ne sont pas attendus, sauf au droit de la fouille RO-I1 située sur des remblais ferroviaires et réalisée sur la voie principale existante au début du tronçon d'étude.

11649 – Ouvrages d'art, lit de ballast et infrastructure – MOB – Gare de Rougemont – km 39.100 – 39.800 – Rougemont

Etude géotechnique – Rapport – Version définitive 1

10 août 2020

Le tronçon étudié n'est pas recensé comme étant affecté d'un risque de glissement de terrain. Par contre, la quasi-totalité du tronçon présente un danger résiduel à moyen (faible intensité) d'inondations par les crues. Le tronçon à l'ouest, entre le Chemin des Chalets Neufs et la gare actuelle, est recensé comme ayant un danger moyen (classe de danger 2b à 3), tandis que la partie entre la gare et le ruisseau de Combabelle, ainsi que l'extrémité est du tronçon étudié, sont recensés comme ayant un danger imprévisible ou résiduel d'inondation (classe de danger 10), avec un petit passage de danger faible (classe de danger 1). Au droit du ruisseau de Combabelle, un danger élevé d'inondations par les crues (classe de danger 9) et un danger faible de laves torrentielles (classe de danger 1) sont présents.

4 RECONNAISSANCES

La présente étude géotechnique est établie sur la base des données disponibles ainsi que sur les reconnaissances spécifiques détaillées ci-après.

Leur emplacement figure sur le plan de situation N°11649-51 annexé.

Trois types de reconnaissances ont été réalisées :

- Un sondage carotté jusqu'à 8 m de profondeur pour les futurs PI voyageurs (inférieur et supérieur)
- Trois fouilles à la pelle jusqu'à 4 m de profondeur maximum en dehors de la voie principale et des voies secondaires, mais pour donner des recommandations pour la future super- et infrastructure ferroviaire. Ces fouilles ont également été réalisées pour donner des recommandations pour les futurs voie piétonne, route d'accès et mur de soutènement décrits au chapitre 1.
- Sept fouilles à la pelle jusqu'à 1 m de profondeur entre les traverses, dans l'emprise de la voie principale et pour fournir des recommandations pour la future super- et infrastructure ferroviaire

4.1 SONDAGE CAROTTÉ POUR OUVRAGES D'ART (PI ET PS VOYAGEURS)

Un sondage a été exécuté le 10 juin 2020 par l'entreprise ISR Injectobohr SA sous notre direction. Le relevé du forage ainsi que les photos des carottes en caisses sont donnés en annexes A2 et A3.

Il a été réalisé par carottage continu à rotation à sec dans des sols meubles au moyen de carottiers simples d'un diamètre de 140 mm se télescopant jusqu'à un diamètre de 128 mm en profondeur.

Le niveau de départ, la longueur forée et le niveau atteint sont donnés ci-dessous :

Sondage N°	Niveau de départ (m/mer)	Longueur de sondage (m)	Niveau atteint (m/mer)
RO-SV1	992.50	8.00	984.50

Tab. 1 Caractéristique du sondage carotté réalisé en dehors de la voie

En cours de forage, 4 essais de battage au Standard Penetration Test (SPT) ont été réalisés par l'entreprise.

Lors du relevé du sondage, des essais in situ ont été effectués sur les carottes mises en caisses au moyen du pénétromètre SOILTEST et du scissomètre GEONOR à ailettes afin d'apprécier la consistance des sols fins et de la matrice fine des sols grossiers.

Le sondage a été équipé d'un tube piézométrique de longueur totale 8 m et crépiné de 4 m à 8 m de profondeur.

Pour examen en laboratoire 3 échantillons de sol ont été prélevés en vrac et 1 par carottage normal immédiatement paraffiné.

4.2 FOUILLES EN DEHORS DES VOIES (POUR INFRASTRUCTURE DE LA FUTURE VOIE ET FUTURS OUVRAGES)

Les fouilles ont été réalisées le 11 juin 2020 pour RO-FR1 et le 14 juin 2020 pour RO-FR2 et RO-FR3 par l'entreprise ISR Injectobohr SA sous notre supervision, avec une pelle mécanique travaillant en rétro.

Durant la creuse un relevé continu de la nature et qualité des différentes couches a été effectué. Le relevé des fouilles est donné en annexe A4.

Les niveaux de départ, les profondeurs reconnues et les niveaux atteints sont donnés dans le tableau suivant :

Sondage N°	Niveau de départ (m/mer)	Profondeur de sondage (m)	Niveau atteint (m/mer)
RO-FR1 (km 39.345)	992.30	3.80	988.50
RO-FR2 (km 39.475)	993.50	3.60	989.90
RO-FR3 (km 39.650)	997.50	4.20	993.30

Tab. 2 Caractéristiques des fouilles à la pelle mécanique en dehors de la voie

Les trois fouilles à la pelle mécanique ont été réalisées afin de caractériser le sol d'assise ainsi que les possibilités de drainage pour la future voie. En outre, la fouille RO-FR2 a été réalisée afin de déterminer les conditions du sous-sol pour la future voie piétonne et le mur de soutènement projeté au sud de la future voie, tandis que la fouille RO-FR3 a été réalisée pour déterminer les conditions du sous-sol pour la route d'accès projetée en direction de Saanen.

Les essais suivants ont été réalisés dans les fouilles :

- 3 essais de portance à la plaque légère (déflectomètre à masse tombante) dans chacune des fouilles ;
- 2 essais d'infiltration selon la méthode Porchet dans les fouilles RO-FR1 et RO-FR2.

Lors du relevé des fouilles, des essais in situ ont été effectués, sur des mottes prélevées, au moyen du pénétromètre SOILTEST et du scissomètre GEONOR à ailettes afin d'apprécier la consistance des sols fins et de la matrice fine des sols grossiers.

4.3 FOUILLES À LA PELLE MÉCANIQUE SUR LES VOIES ENTRE TRAVERSES (ÉTUDE GEOTECHNIQUE DU LIT DE BALLAST ET DE L'INFRASTRUCTURE EXISTANTS)

Les fouilles ont été réalisées les nuits entre le 10 juin 2020 et le 12 juin 2020 par l'entreprise ISR Injectobohr SA sous notre supervision avec une pelle mécanique travaillant en rétro. Le relevé des fouilles est donné en annexe A5.

Durant la creuse, un relevé continu de l'épaisseur, de la nature et de la qualité de la superstructure (ballast) et de l'infrastructure ferroviaire (sol d'assise) a été effectué.

Les profondeurs reconnues au droit des fouilles sont données ci-dessous :

Fouille N° / km	Remarques	Profondeur de fouille mesurée depuis le dessus de traverse (m)
RO-I1 / km 39.104	-	0.95
RO-I2 / km 39.268	-	1.00
RO-I3 / km 39.298	-	1.02
RO-I4 / km 39.370	-	1.01
RO-I5 / km 39.462	-	0.92
RO-I6 / km 39.569	Ouvrage-pont	0.82
RO-I7 / km 39.697	-	1.09

Tab. 3 Caractéristiques des fouilles à la pelle mécanique au milieu de la voie existante

Des essais de portance à la plaque légère (déflectomètre à masse tombante) ont été réalisés dans la couche du sol d'assise et au fond de fouille des fouilles.

Lors du relevé des fouilles, des essais in situ ont été effectués, sur des mottes prélevées, au moyen du pénétromètre SOILTEST et du scissomètre GEONOR à ailettes afin d'apprécier la consistance des sols fins et de la matrice fine des sols grossiers.

Pour examen géotechnique en laboratoire, quatre échantillons dans les sols en place constitués de graviers et d'argiles (remblais et alluvions du cône de déjection) ont été prélevés au droit des fouilles RO-I1, RO-I2, RO-I4 et RO-I7. On relève qu'aucune couche de fondation n'a été rencontrée dans les fouilles, sauf dans la fouille RO-I6, où elle recouvre la dalle du pont du ruisseau de Combabelle.

Pour analyses chimiques en laboratoire et conformément aux directives sur les déblais de voie de l'OFT, les échantillons suivants ont été prélevés et transmis au laboratoire Wessling AG :

- 5 échantillons de ballast ont été prélevés aux endroits suivants :
 - Au droit de la fouille RO-I1
 - Dans la pointe de l'AV au km 39.250 en amont de la fouille RO-I2,
 - Dans la pointe de l'AV au km 39.272 à l'aval de la fouille RO-I2
 - Dans la pointe de l'AV au km 39.482 an aval de la fouille RO-I5
 - Au droit de la fouille RO-I7.
- 2 échantillons de sol d'assise au droit des fouilles RO-I1 et RO-I7.

5 ETUDE POUR OUVRAGES D'ART

Ce chapitre présente les résultats de la campagne de reconnaissances constituée par le sondage carotté RO-SV1 ainsi que les trois fouilles RO-FR1 à FR3 réalisées en dehors des voies, puis les recommandations pour les ouvrages d'art du projet sur la base de cette campagne.

5.1 STRATIGRAPHIE

Les couches idéalisées reportées et définies par une interprétation détaillée des coupes de sondages carottés sont, en partant de la surface du terrain naturel :

Terre végétale et sous-couche

La terre végétale est présente sur une épaisseur qui varie entre 0.45 et 1.00 m d'épaisseur, et a été observée au droit du sondage carotté RO-SV1 et les trois fouilles à la pelle mécanique réalisées en dehors des voies existantes (RO-FR1, RO-FR2 et RO-FR3). Les matériaux relevés sont de type argileux à argilo-limoneux, contenant de nombreuses racines et radicelles, parfois des fragments de terre cuite, et sont peu humides à humides.

Remblais issus des alluvions du cône de déjection

Des remblais ont été observés au droit du sondage carotté RO-SV1, directement sous la terre végétale et sous-couche, entre 0.45 et 1.20 m de profondeur. Ils sont de nature argilo-limoneuse, avec de rares graviers, peu humides à humides, avec de rares fragments de terre cuite, fermes à très fermes. Ces remblais sont donc issus probablement de la phase argileuse des alluvions du cône de déjection (voir ci-dessous).

Alluvions du cône de déjection

Les alluvions issues des cônes de déjection des ruisseaux affluents de la Sarine (dont le ruisseau de Combabelle et le ruisseau des Fenils) se trouvent directement sous les couches superficielles décrites ci-dessus.

Les alluvions observées au droit du sondage carotté RO-SV1, de 1.20 m de profondeur jusqu'au fond du sondage (8.00 m) sont constituées par des argiles peu limoneuses et rarement graveleuses (phase argileuse), humides à très humides, très fermes à dures, qui transitent ensuite, à partir de 2.20 m de profondeur, dans une phase graveleuse, très argilo-limoneuse, avec sable, sèche à très humide, compacte à très compacte.

Dans les fouilles à la pelle mécanique réalisées en dehors de la voie (RO-FR1 à 3), la même transition des argiles au gravier argileux avec sable a été observée, à l'exception de la fouille RO-FR3 où les argiles ont été observées jusqu'au fond de fouille (4.20 m de profondeur). Néanmoins, la phase argileuse rencontrée dans les fouilles a moins de consistance (surtout molle à très ferme) que dans le sondage carotté (très ferme à dure).

Les alluvions observées sont généralement humides à très humides. Aucune venue d'eau ni nappe n'a été rencontrée durant la campagne de reconnaissances dans les alluvions.

5.2 RESULTATS DES ESSAIS IN SITU – PERMEABILITE DES SOLS, ESSAIS D'INFILTRATION

5.2.1 Bases légales

Conformément à l'article 7 de la LEaux, les eaux pluviales, qui sont non polluées, seront infiltrées dans la mesure où le contexte géologique le permet.

Selon la directive sur l'évacuation des eaux des installations ferroviaire, si des installations ferroviaires sont construites ou transformées dans des secteurs ou zones de protection des eaux souterraines, il faut prendre les mesures décrites à l'art. 31 OEaux.

Dans le cas du secteur Au de protection des eaux souterraines concerné par le projet, le fond de l'ouvrage d'infiltration doit être situé au-dessus du niveau moyen de la nappe souterraine.

Selon la directive, en outre, il est nécessaire de déterminer la classe de pollution des eaux à évacuer. Les eaux faiblement polluées peuvent être infiltrées de manière décentralisée à travers un fossé filtrant muni d'un filtre à sable, tandis que si elles sont moyennement ou très polluées, elles doivent être infiltrées au moyen d'une installation de sol filtrant. La classe de pollution est déterminée conformément au tableau suivant (issu de la directive) et prend en considération l'emploi de produits phytosanitaires et le volume du trafic sur la voie. Sur les remblais avec infiltration par le talus, la classe de pollution diminue d'un degré.

Tracé en pleine voie		Volume du trafic [tonnage brut/(jour*voie)]				
		< 15'000	15'000 - 30'000	30'000- 60'000	60'000- 100'000	> 100'000
Avec emploi de PPhS	Pas d'emploi de PPhS	faible	faible	faible	faible	faible
	> 1500 m. d'altitude	faible	faible	faible	faible	moyenne
	> 1000 m. d'altitude, pas de banquettes ou banquettes anti-prolifération de la végétation *	faible	faible	faible	faible	faible
	1000-1500 m. d'altitude	faible	faible	faible	moyenne	moyenne
	500-1000 m. d'altitude, pas de banquettes ou banquettes anti-prolifération de la végétation*	faible	faible	faible	faible	moyenne
	500-1000 m. d'altitude	faible	faible	moyenne	moyenne	moyenne
	< 500 m. d'altitude, pas de banquettes ou banquettes anti-prolifération de la végétation*	faible	faible	faible	faible	moyenne
	< 500 m. d'altitude	faible	moyenne	moyenne	élevée	élevée
Secteurs de gares		Volume du trafic [tonnage brut/(jour*voie)]				
		< 15'000	15'000 - 30'000	30'000- 60'000	60'000- 100'000	> 100'000
Avec emploi de PPhS	Pas d'emploi de PPhS	faible	faible	faible	faible	moyenne
	> 1500 m. d'altitude	faible	faible	faible	moyenne	moyenne
	> 1000 m. d'altitude, banquettes anti-prolifération de la végétation*	faible	faible	faible	faible	moyenne
	1000-1500 m. d'altitude	faible	faible	moyenne	moyenne	moyenne
	500-1000 m. d'altitude banquettes anti-prolifération de la végétation*	faible	faible	faible	faible	moyenne
	500-1000 m. d'altitude	faible	moyenne	moyenne	moyenne	élevée
	< 500 m. d'altitude, banquettes anti-prolifération de la végétation*	faible	faible	faible	moyenne	moyenne
	< 500 m. d'altitude	moyenne	moyenne	élevée	élevée	élevée

* voir annexe 7, (perrons considérés comme banquettes anti-prolifération de la végétation)

Tab. 4 Classe de pollution des eaux à évacuer provenant des voies pour le tracé en pleine voie et les secteurs de gares (OFT, 2018)

5.2.2 Déroulement des essais

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques géométriques des fouilles RO-FR1 et RO-FR2 dans lesquelles les essais d'infiltration ont été effectués au niveau des matériaux gravo-argileux. En raison de la présence de matériaux essentiellement argileux au droit de la fouille RO-FR3, aucun essai d'infiltration n'a été réalisé.

Les essais ont été réalisés à charge variable. Cela consiste à remplir partiellement la fouille sur quelques dizaines de centimètres jusqu'à un niveau donné. L'alimentation en eau est ensuite coupée et l'abaissement du niveau d'eau est mesuré en fonction du temps. Dans l'annexe A6, on retrouve l'ensemble des mesures et calculs.

		RO-FR1	RO-FR2
Dimensions des fonds de fouilles	Long. [m]	1.80	3.00
	Larg. [m]	1.10	0.80
	Prof. [m]	3.80	2.60
Niveau d'eau mesuré au début de l'essai [m]		1.20	1.60
Niveau d'eau mesuré à la fin de l'essai [m]		1.03	1.58
Abaissement [m]		0.17	0.02
Durée des mesures [min]		99	20

Tab. 5 Caractéristiques des essais d'infiltration

5.2.3 Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats des essais a permis de déterminer la capacité d'infiltration spécifique exprimée en litres par minutes par m². Il s'agit d'une propriété spécifique locale du sous-sol. Elle ne correspond pas à la perméabilité k selon Darcy, car elle s'applique par définition aux courants laminaires dans les aquifères homogènes saturés en eau, alors que l'infiltration se passe habituellement par percolation dans les couches de sols non saturés.

La capacité d'infiltration spécifique détermine la taille nécessaire de la surface d'infiltration dans une installation en fonction de la quantité d'eau à infiltrer. Plus la capacité d'infiltration est élevée, plus la surface nécessaire est petite pour une quantité donnée et donc l'installation est de faible dimension.

La formule de Porchet permet d'estimer une perméabilité en milieu non saturé. L'interprétation de ces essais peut être cependant délicate car les effondrements peuvent modifier la hauteur du niveau de l'eau. De plus, la baisse de charge et le dépôt des fines font que le débit d'infiltration tend à diminuer au cours de l'essai.

Comme déjà mentionné ci-dessus, les matériaux dans lesquels les essais ont été effectués étaient gravo-argileux. Ces matériaux ont, à priori, des médiocres perméabilités, qui ont été confirmées par les essais. Les valeurs de perméabilité obtenues, en effet, sont de l'ordre de **$7.2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$** en RO-FR1 et de **$8.2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$** en RO-FR2. Ces valeurs correspondent à des capacités d'infiltration spécifique du sol de **$0.94 \text{ l/min}\cdot\text{m}^2$** en RO-FR1 et **$0.06 \text{ l/min}\cdot\text{m}^2$** en RO-FR2.

L'essai d'infiltration réalisé dans RO-FR2 a montré que le niveau de l'eau n'a pratiquement pas évolué durant toute la période de mesures (22 minutes) ; ce phénomène est lié à la faible perméabilité des matériaux. La perméabilité dans cette zone peut donc être considérée comme nulle et l'infiltration n'est donc pas possible.

5.3 RESULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE

Quatre échantillons d'alluvions du cône de déjection ont été prélevés dans le sondage carotté RO-SV1, afin de déterminer leurs caractéristiques géotechniques (granulométrie, limites d'Atterberg, teneurs en eau et poids volumique). Les résultats des essais sont présentés en annexe A7.

Teneurs en eau et poids volumique

La teneur en eau mesurée dans la phase argileuse des alluvions du cône de déjection varie de 24.9 à 29.4%, indicative d'un sol humide à très humide tel que rencontré, tandis que la teneur en eau de la phase graveleuse argilo-limoneuse des alluvions est comprise entre 3.8 et 9.9 %, indicative d'un sol sec à humide tel que rencontré.

Le poids volumique de la phase argileuse des alluvions varie de 17.6 à 18.9 kN/m³ ce qui est usuel pour des sols argileux.

Essais granulométriques

Les essais granulométriques réalisés sur les deux échantillons de la phase graveleuse argilo-limoneuse des alluvions du cône de déjection prélevés dans RO-SV1, à 3.00-3.50 m et 6.00-6.50 m de profondeur, confirment la nature des sols rencontrés et décrits au chapitre 5.1.

Sur la base des corrélations de l'annexe A1, on peut estimer un angle de frottement interne de l'ordre de **35 à 36°** pour la phase graveleuse argilo-limoneuse des alluvions.

Cet angle a été utilisé pour établir les paramètres géotechniques fournis au chapitre 5.4.

5.4 PARAMÈTRES DE CALCUL

Les paramètres correspondant aux différentes couches idéalisées à utiliser pour les calculs de poussée des terres, de stabilité générale et de tassements sont proposés dans le tableau suivant :

Couches idéalisées	γ	Cuk	ϕ'	c'	E
	kN/m ³	kN/m ²	[°]	kN/m ²	MN/m ²
Remblais issus des alluvions du cône de déjection	18	5	27	2	5-10
Alluvions du cône de déjection – phase argileuse	18	8	27	3	10-15
Alluvions du cône de déjection – phase graveleuse, argilo-limoneuse	20	8	35	3	15-20

Tab. 6 Paramètres géotechniques des sols

Avec :

γ = poids volumique apparent (kN/m³)

Calculs en contraintes totales :

Cuk = valeur caractéristique de la résistance apparente totale au cisaillement, sol non drainé et non consolidé, utilisable pour analyses à court terme.

Calculs en contraintes effectives :

ϕ'_k = valeur caractéristique de l'angle de frottement interne effectif

c'_k = valeur caractéristique de la cohésion effective

Tassement :

E = module de compressibilité (MN/m²)

Ce tableau appelle les commentaires suivants :

- Les paramètres de résistance sont des valeurs caractéristiques "k" choisies de manière prudente dans l'esprit des swisscodes et/ou de l'Eurocode EC7. Ils peuvent être utilisés tels quels pour la vérification de l'aptitude au service mais doivent être affectés des facteurs de sécurité partiels définis dans ces recommandations pour les vérifications de la sécurité structurale.
- En analyse à court terme, la résistance au cisaillement non drainé pourra être estimée à l'aide des paramètres fournis et en tenant compte de leur variation en fonction de la profondeur selon les relations empiriques existant dans la littérature (par exemple selon Skempton).
- Les modules de compressibilité sont déduits par interprétation des essais d'identification et de notre expérience, ils représentent des valeurs moyennes à utiliser pour appréhender les ordres de grandeur des tassements et déformations des ouvrages. Selon le type de calcul à effectuer, ils devront être remplacés par des valeurs spécifiques issues d'essais œdométriques triaxiaux ou d'essais in situ.

5.5 HYDROGÉOLOGIE

5.5.1 Contexte

Le site se trouve en secteur Au de protection des eaux souterraines, ce qui implique certaines restrictions figurant au chapitre 3 des instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines¹. Il est entre autres précisé que les installations et constructions doivent être placées au-dessus du niveau moyen de la nappe. Une dérogation peut être accordée par les autorités si l'écoulement n'est pas perturbé de plus de 10 %. Les grands chantiers sont soumis à autorisation cantonale.

Une zone de protection S3 des eaux souterraines se trouve directement au sud du site, et est liée à une source de propriété de la Commune, nommée « La Charrière des fontaines », qui est utilisée comme source d'eau de secours dans le réseau communal, et qui se trouve à 150 m depuis la voie actuelle. La source est vraisemblablement captée dans la Formation du Biot située bien plus en profondeur par rapport à l'infrastructure de la voie existante et future.

5.5.2 Renseignements disponibles

- Les points d'observations provoqués
- Les observations du sondeur
- L'examen visuel des carottes
- L'examen visuel des fouilles à la pelle mécanique

¹ Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines OFEFP 2004
11649 – Ouvrages d'art, lit de ballast et infrastructure – MOB – Gare de Rougemont – km 39.100 – 39.800 – Rougemont
Etude géotechnique – Rapport – Version définitive 1

5.5.2.1 Points d'observation provoqués

A ce jour, une mesure du niveau piézométrique a été effectuée dans le tube placé dans le trou de forage le 14 juin 2020. Aucune présence d'eau n'avait été détectée.

5.5.2.2 Observations du sondeur

Lors des opérations de fonçage et de retrait du carottier ou de mise en place du tubage, le sondeur n'a décelé aucune infiltration au niveau des forages. Lors de l'exécution des fouilles à la pelle mécanique pour les ouvrages d'art (RO-FR1 à 3 en dehors des voies existantes), aucune venue d'eau n'a été observée.

5.5.2.3 Examen visuel des carottes

L'examen visuel de la carotte en caisse a permis de confirmer l'absence de toute venue d'eau dans le terrain meuble. Dans les photos des carottes en caisse (annexe A3), il est possible d'observer un niveau saturé à environ 5.5 m de profondeur, mais il s'agit d'une entrée d'eau dans la caisse à cause des fortes pluies qui ont eu lieu entre la réalisation du forage et le levé des carottes.

5.5.2.4 Examen visuel des fouilles à la pelle mécanique (en dehors des voies)

L'examen visuel des fouilles à la pelle mécanique a permis de confirmer l'absence de toute venue d'eau ou nappe.

5.5.3 Conclusions

Les sols sont généralement humides à très humides, mais globalement aucune venue d'eau ni nappe phréatique n'est présente dans le sondage carotté ou les fouilles réalisées en dehors des voies. Néanmoins, la présence de circulations d'eau dans les alluvions, notamment la phase graveleuse argilo-limoneuse ne peut pas être exclue.

Les travaux envisagés n'atteindront pas la nappe phréatique ni la zone de sols saturée par celle-ci.

5.5.4 Gel

Pour le dimensionnement au gel d'éléments structurels et selon les données fournies dans l'annexe 9 de R RTE 21110, la profondeur hors-gel X peut être estimée selon la formule $X = 0.00077 \cdot FI + 0.53$ [m] = **91 cm**, avec FI : indice de gel de l'air valant la moitié de l'altitude moyenne du tronçon d'étude (995 msm) selon la carte de la Suisse en annexe de la norme VSS 70'140b, soit 498 [°C*jours].

5.6 SEISME – CLASSE DE SOLS DE FONDATIONS

D'après le guichet cartographique cantonal, la classe de sol de fondation du tronçon de la voie concerné par la présente étude est de type **E** au sens de la norme SIA 261 – Tableau 24. Il s'agit de terrains meubles reposant sur une couche dure (moraine locale/formation de Biot) entre 5 et 20 m de profondeur.

5.7 TECHNIQUE DE FONDATION

5.7.1 Contraintes liées à l'hydrogéologie

L'absence de venue d'eau et de nappe durant la campagne de reconnaissances ne permet pas d'exclure la présence de circulations d'eau dans le terrain, surtout dans la phase graveleuse argilo-limoneuse des alluvions du cône de déjection. Néanmoins, pour autant que des drainages efficaces soient réalisés pour les ouvrages, l'hydrogéologie n'imposera pas de contraintes significatives.

5.7.2 Contraintes liées à la géologie

Sans coupe spécifique des futurs ouvrages d'art, on peut formuler les hypothèses suivantes concernant le fond de fouille de ces derniers en se basant sur le profil géologique A-A' (plan N° 11649-52) et les fouilles RO-FR1 et RO-FR2 :

- En se basant sur le profil géologique, le fond de fouille du futur PI voyageurs (km 39.300) sera probablement situé au sein des alluvions du cône de déjection phase graveleuse argilo-limoneuse compacte à très compacte.
- Sur la base du même profil géologique, il est recommandé de fonder le PS voyageurs (km 39.420) plutôt au sein des alluvions du cône de déjection très fermes à dures de profondeur minimale 1.2 m, qu'au sein des remblais fermes à très fermes sus-jacents. En effet, la qualité de ces remblais peut varier considérablement d'un endroit à l'autre.
- D'après la fouille RO-FR1, l'infrastructure de la future route d'accès sera probablement située au sein des alluvions du cône de déjection phase argileuse, très ferme à dure.
- Selon la fouille RO-FR2, la semelle du futur mur de soutènement et l'infrastructure de la future voie piétonne seront probablement situées au sein des alluvions du cône de déjection, phase argileuse molle à très ferme.

5.7.3 Capacité portante

PI et PS voyageurs

Au droit du futur PI voyageurs, la présence d'alluvions compactes à très compactes au fond de fouille favorise une fondation superficielle sous forme de radier général.

En effet, compte tenu de la faible perméabilité des alluvions au fond de fouille, mise en évidence par les essais d'infiltration présentés au chapitre 5.2, et la présence possible de venues d'eau dans le terrain, une fondation superficielle sous forme de radier général posé sur un masque drainant serait judicieuse pour des raisons statiques (minimiser le risque de sous-pression sous radier) et d'épuisement des eaux.

Pour le prédimensionnement de ce radier général, il est possible d'appliquer un taux de travail :

$$q_{serv} = 220 \text{ kN/m}^2$$

Le fond de fouille du PS voyageurs étant constitué d'alluvions très fermes à dures, des fondations superficielles type semelles carrées, filantes pourront être envisagées.

Pour le prédimensionnement de ces fondations, il est possible d'appliquer un taux de travail :

$$q_{serv} = 170 \text{ kN/m}^2$$

Les taux pour ces ouvrages ont été établis :

- Sur la base de notre interprétation des conditions stratigraphiques et pour des charges de service verticales et centrées. Elles ne prennent pas en compte la vérification des critères d'aptitude au service, qui devra être effectuée en tenant compte de l'existence du radier, par exemple, par un calcul de radier sur sol élastique.
- Pour des semelles (PS voyageurs) de largeur 1 m situées au minimum 1.2 m sous le niveau du terrain naturel.
- En ayant considéré des valeurs moyennes qui ont tenu compte de la variation de la nature des différentes couches du sous-sol.
- Pour une stabilité générale assurée

Une vérification du niveau d'appui par un spécialiste et/ou l'ingénieur est nécessaire dans tous les cas. Ce dernier sera ainsi à même de confirmer les taux de travail admis et/ou d'ordonner des purges localisées dans des zones où les sols seraient plus altérés.

Au droit de charges concentrées élevées (colonnes, piliers), notamment pour le PS voyageurs, le recours à des fondations profondes type micropieux/pieux encastrés dans la moraine locale ou dans la formation rocheuse du Biot sous-jacente pourra s'avérer nécessaire.

A priori, les fondations du PS voyageurs pourront être situées à l'extérieur des voies de sorte que ces dernières peuvent être réalisées sans entraver l'exploitation ferroviaire. Néanmoins, dans le cas du PI voyageur, s'il doit être réalisé tout en maintenant l'exploitation ferroviaire, le recours à des ponts provisoires paraît indispensable. Au vu des charges concernées, ces derniers devront probablement être fondés sur des micropieux encastrés dans la moraine locale ou dans la formation du Biot sous-jacente (pas rencontrées durant la campagne de reconnaissances).

Pour le prédimensionnement de ces micropieux, il est possible de considérer une valeur caractéristique de résistance externe par frottement le long du scellement du micropieu (dans la moraine locale) $q_{sk} = 150 \text{ kN/m}^2$ pour une injection type globale unitaire (IGU). Cette valeur est une estimation, puisque la moraine locale n'a pas été rencontrée durant la campagne de reconnaissances. Elle devra être confirmée par une étude complémentaire.

Les valeurs données ci-dessus concernent des ouvrages courants de génie civil et servent de base à la conception des fondations.

Voie piétonne, route d'accès et mur de soutènement

Sur la base du résultat des fouilles réalisées en dehors des voies, on peut formuler les recommandations suivantes pour la route d'accès du km 39.360 au km 39.420, la voie piétonne du km 39.420 au km 39.470 ainsi que le mur de soutènement du km 39.420 au km 39.450 :

- Route d'accès : sur la base de la fouille RO-FR1 au km 39.345, la portance du sol d'assise sur laquelle sera posée la route est de l'ordre de **ME1 = 21 MPa (classe de portance S2, moyenne) à une profondeur d'environ 1.20 m**. Cette portance pourra être utilisée pour dimensionner la route d'accès avec une profondeur au gel de **91 cm** fournie au chapitre 5.5.4.
- Voie piétonne et mur de soutènement : sur la base de la fouille RO-FR2 au km 39.475, la portance du sol d'assise sur laquelle sera posée la voie et le mur est de l'ordre de **ME1 = 4 MPa (classe de portance S0, faible)**. Cette portance pourra être utilisée pour dimensionner la voie piétonne avec une profondeur au gel de **91 cm** fournie au chapitre 5.5.4. Sur la base de cette même fouille, on peut estimer un taux de travail en service de l'ordre de **140 kPa** pour le mur de soutènement avec fondation type semelle filante de largeur 1 m et de profondeur 91 cm (hors gel).

Les données ci-dessus pourront être utilisées pour le prédimensionnement de la super- et l'infrastructure de la voie piétonne et de la route d'accès.

5.8 TERRASSEMENT

5.8.1 Excavations

Les matériaux constituant les remblais sont de classe 2 selon la norme VSS 40 575. Les matériaux constituant les alluvions du cône de déjection sont plutôt de classe 4 selon cette même norme.

Les excavations projetées sur site concerneront des terrains meubles et ne poseront, dès lors, aucune difficulté liée à la dureté des matériaux. Néanmoins, la présence de blocs dans les alluvions pourra ralentir les travaux d'excavation.

Par ailleurs, des plus-values/taxes de décharge pour l'évacuation de matériaux saturés en eau pourront être demandées au cas où des circulations d'eau sont rencontrées.

5.8.2 Réutilisation des matériaux

La terre végétale et sous-couche (horizons pédologiques A et B) rencontrées sur les premiers 45 centimètres environ dans le sondage RO-SV1 pourront être réutilisées dans les zones de verdure ou revalorisées.

Les remblais, une fois purgés de tout déchet inerte (p.ex. terre cuite) ainsi que les alluvions du cône de déjection pourront être réutilisées pour des remblayages avec ou sans exigence de portance si elles sont tassées, essorées/séchées, mises en dépôts, protégées par un plastique contre la pluie et remblayées par temps sec. Lors de leur réutilisation, celles-ci devront être mises en place par couches de 30 cm d'épaisseur au maximum, soigneusement compactées. Compte tenu de la présence d'argiles et de limons difficilement compactables tant dans les alluvions que dans les remblais, il est recommandé de mélanger ces derniers avec des sols grossiers d'apport (sables, graviers, pierres, etc.) ou se trouvant dans les alluvions rencontrées lors des travaux d'excavation.

L'ensemble des matériaux excavés qui ne sera pas réutilisé pourra être évacué en décharge type A s'il est non pollué, B s'il est faiblement pollué ou E s'il est fortement pollué. Le degré de pollution des matériaux excavés pour les ouvrages d'art, notamment les remblais, devra être évalué afin de déterminer leurs filières d'évacuation. Sur la base du sondage RO-SV1, les remblais devront en tout cas être purgés des quelques déchets inertes rencontrés (terre cuite) avant d'être évacués en décharge type A ; les déchets inertes devront être évacués en décharge type B. Finalement, signalons que les remblais sont probablement propres du fait que les mêmes matériaux ont été rencontrés au droit de la fouille RO-I1 dans laquelle ils se sont avérés propres (voir chapitre 6.1.4).

5.8.3 Traitement des fonds d'excavation

Les sols qui constitueront les fonds de fouille ont une teneur en argiles/limons importante ce qui les rend très altérables par l'humidité et par l'eau. Ils devront être immédiatement protégés, le cas échéant il pourrait être souhaitable que les 20-30 derniers centimètres ne soient excavés qu'à la dernière minute avant la pose du masque drainant et/ou du béton de propreté au fond de fouille.

La faible perméabilité des alluvions du cône de déjection (voir chapitre 5.2) au sein de laquelle sera fondé le radier du futur PI voyageurs, favorise la pose d'un matelas de boulets et/ou d'un masque en béton caverneux afin de minimiser les risques de sous-pressions sous radier.

Compte tenu de la compacité moyenne à faible des remblais et de la phase argileuse des alluvions du cône de déjection, un renforcement du fond d'excavation pourra être nécessaire pour permettre la circulation d'engins de chantier suivant les charges de ces derniers.

5.9 SOUTÈNEMENT DE FOUILLE

5.9.1 Conditions géotechniques

En l'absence de nappe phréatique/venue d'eau au sein des terrains meuble concernés par les différents ouvrages (PI, PS, mur de soutènement, voie piétonne, route d'accès), les sols qui seront rencontrés permettront, à priori, la réalisation de travaux d'excavation sans trop de difficultés majeures. Néanmoins, la proximité des voies ferrées (principales et secondaires) constitue une contrainte pour l'enceinte de fouille. Par ailleurs, la présence de venues d'eau ne peut pas être totalement exclue.

5.9.2 Dimensions de l'excavation

Les ouvrages projetés sont d'emprise relativement modeste mais impactent assez fortement les voies de chemin de fer du fait de leur proximité.

5.9.3 Environnement construit

L'environnement construit est caractérisé par la proximité des voies du MOB (PI voyageurs, PS voyageurs, mur de soutènement, voie piétonne, route d'accès). Il s'agit de contraintes fortes qui auront un impact sur les solutions et mesures devant être mises en œuvre.

5.9.4 Synthèse et recommandations

Talus

Là où l'emprise le permet et l'exploitation ferroviaire n'est pas impactée, des talus pourront être réalisés avec une pente de 2 :3 (V :H) dans les remblais et la phase argileuse des alluvions du cône de déjection et de 1 :1 dans les alluvions phase graveleuse argilo-limoneuse pour autant qu'il n'y ait pas de surcharge en tête.

Les éventuelles venues d'eau devront être collectées et des mesures constructives, comme des confortations de pied de talus, pourront être nécessaires pour éviter des phénomènes d'érosion pouvant déstabiliser les talus.

Soutènements ancrés/étayés

S'il manque de place pour dresser des talus et/ou s'il faut maintenir l'exploitation ferroviaire par des ponts provisoires, des soutènements de fouille type parois gunitées clouées et/ou parois microberlinoises tirantées/étayées devront être prévus. Le cas échéant, il convient aussi de vérifier que ces éléments ne généreront pas de courants vagabonds en phase d'exploitation. Si tel est le cas, des mesures constructives spéciales devront être adoptées comme la pose de tirants avec gaine de protection.

Contrôle de l'exécution

Lors des travaux de terrassement, un suivi des conditions géologiques et hydrogéologiques devra être réalisé par un spécialiste pour relever la structure et la nature du terrain afin de valider les hypothèses proposées dans le présent rapport, et le cas échéant d'adapter les solutions engagées.

Les mesures de contrôles usuelles devront être mises en œuvre pour suivre le comportement des voies durant les travaux.

Constat des avoisinants

Afin de se prémunir de toutes plaintes abusives, le contrôle des ouvrages existants situés à proximité des travaux devra être envisagé. Il s'agit d'établir un constat systématique des fissures et/ou des défauts existants sur ces ouvrages, avant le démarrage des travaux de terrassement. Ce constat doit également concerner les réseaux et voiries (notamment la Rue de la Gare) et doit être réalisé par un spécialiste neutre.

5.10 DRAINAGE

5.10.1 Gestion des eaux de chantier

La gestion des eaux de chantier devra être réalisée conformément aux recommandations de la norme SIA 431, Evacuation et traitement des eaux de chantier, ainsi que la Directive cantonale DCPE 872, Gestion des eaux et des déchets de chantier. Dans le cadre des terrassements, les eaux pompées en fond de fouille devront être décantées au préalable avant leur rejet aux eaux claires. Toutes les eaux alcalines produites par le chantier ($\text{pH} > 9$) devront être décantées puis neutralisées.

Compte tenu de la faible perméabilité des alluvions du cône de déjection (voir essais d'infiltration, chapitre 5.2) au fond de fouille des ouvrages d'art, les eaux d'intempéries pourront stagner au fond de fouille provoquant un ramollissement indésirable de ce dernier ; une évacuation de ces eaux sera nécessaire.

5.10.2 Drainage des ouvrages en phase d'exploitation

Au vu de la nature grossière de la phase graveleuse argilo-limoneuse des alluvions du cône de déjection et le taux d'humidité élevé, un risque de venues d'eau ponctuelles dans le terrain subsiste au fond de fouille du futur PI voyageurs malgré l'absence de d'eau durant la campagne de reconnaissances.

Cela favorise la réalisation d'un drainage périphérique qui pourra être constitué par exemple d'un drain diamètre 200 mm enrobé d'un filtre minéral (grave 3 à 30 mm lavée). Ce système de drainage sera complété par un drain surfacique (Enkadrain, briques filtra, remblayage en matériaux granulaires). Les dispositifs usuels en permettant l'entretien (pipes de rinçage) devront être mis en œuvre de façon à en garantir le fonctionnement. En cas de grosses venues d'eau on favorisera la mise en place d'un remblayage en matériaux granulaires(boulets) plus efficace que les drains surfaciques usuels.

Sous le radier, la mise en place d'un matelas drainant systématique, connecté au drainage, est souhaitable afin que les bétons des fondations reposent sur un appui sain, exempt d'eau. Ce dispositif permettra d'éviter toute sous-pression sous radier, notamment liée à la faible perméabilité des sols de fondation (alluvions du cône de déjection) et favorisera une évacuation rapide des eaux.

Le long de la voie piétonne et de la route d'accès, la pose d'un drainage serait nécessaire à l'extérieur de ces ouvrages et avec une pente de superstructure adéquate pour acheminer les eaux d'intempéries vers ce dernier. Il conviendra également de poser un drainage derrière le mur de soutènement pour évacuer les eaux et réduire ainsi les pressions hydrostatiques derrière celui-ci. En revanche pour des semelles de dimensions importantes, la pose d'un matelas de boulets ou d'un masque en béton caverneux pourrait être judicieuse pour réduire les risques de sous-pressions sous ces fondations.

Les eaux récoltées devront être évacuées gravitairement vers un exutoire ou par un système de relevage (pompage) en fonction de l'altitude du collecteur communal.

5.10.3 Infiltration des eaux claires

Le contexte géologique et notamment la présence de sols principalement peu perméables exclut, à priori, toute infiltration des eaux claires. Les résultats des essais d'infiltration réalisés dans les fouilles RO-FR1 et RO-FR2, présentés au chapitre 5.2, confirment l'impossibilité d'infiltrer les eaux claires.

6 ÉTUDE DU LIT DE BALLAST ET DE L'INFRASTRUCTURE

6.1 DESCRIPTION DES CONDITIONS EXISTANTES ET REFLEXIONS

6.1.1 Ballast

Dans le tableau ci-dessous sont reportées les informations détaillées des relevés de fouille concernant le ballast. Y sont mentionnés le degré de pollution du ballast par des fines (voir aussi annexe A1) ainsi que son épaisseur sous traverses.

Fouille N° et km	Type de traverses existantes	Degré de contamination du ballast	Epaisseur de ballast sous traverses existantes [cm] ²		Epaisseur de ballast sous des futures traverses en béton monobloc [cm] ¹	
			min	max	min	max
RO-I1 / km 39.104	Béton monobloc	S1-S2/S3-S4	8/49 ³	8/51 ³	8/49 ³	8/51 ³
RO-I2 / km 39.268	Bois	S2-S3, S4	22	25	15	18
RO-I3 / km 39.298	Bois	S1-S2, S3-S4, S4	22	30	15	23
RO-I4 / km 39.370	Bois	S4	31	37	24	30
RO-I5 / km 39.462	Bois	S1-S2	35	37	28	30
RO-I6 / km 39.569 – PI existant sur le ruisseau de Combabelle	Béton monobloc	S1-S2	24	29	24	29
RO-I7 / km 39.697	Béton monobloc	S1-S2	30	34	30	34

Tab. 7 Caractéristiques du ballast

Commentaires sur le ballast

- L'épaisseur actuelle de ballast sous les rails est conforme à R RTE 21110 uniquement au droit des fouilles RO-I1 si on considère l'ancien ballast, I4, I5 et I7, à savoir 30 cm minimum sous traverses. Si on ne considère que le nouveau ballast situé sur le géotextile qui est posé sur l'ancien ballast dans RO-I1, l'épaisseur du ballast existant est très insuffisante (8 cm). Hormis au droit de la fouille RO-I7, elle est globalement non-conforme pour des futures traverses en béton monobloc. Signalons que l'épaisseur de ballast actuel au droit du passage inférieur existant sur le ruisseau de Combabelle est non conforme par rapport à l'épaisseur de 40 cm requise y compris couche de transition de 10 cm sur infrastructure rigide selon R RTE 21110.
- Une pollution de ballast de type S4 (ballast très pollué par la présence d'argiles/limons dans le sol d'assise) a été observée dans les fouilles RO-I1, I2, I3 et I4, aux kms 39.104, 39.268, 39.298 et 39.370. Les fines présentes dans ce ballast sont issues du sol d'assise (et de la couche de fondation dans le cas de RO-I3) contenant des argiles et des limons. Il s'agit d'une remontée de fines par l'eau mal

² Epaisseur de ballast mesurée depuis la face inférieure des traverses (admis 15cm d'épaisseur pour les traverses bois, 22 cm pour les traverses en béton monobloc et bi-blocs)

³ Si on considère l'ancien ballast comme ballast de la superstructure actuelle

évacuée qui a eu lieu vraisemblablement sur une longue période depuis le sol d'assise/couche de fondation. Cette mauvaise évacuation de l'eau pourrait être due à :

- une pente de la couche de base/plateforme insuffisante, comme dans la fouille RO-I2 dans laquelle la pente est inférieure au 5% minimum requise selon R RTE 21110 et ceci malgré la présence d'un drain à l'extérieur de la voie. De même, malgré la présence d'une tranchée drainante en gravier (évacuation par infiltration) longeant les voies au droit de la fouille RO-FR1 et donc probablement RO-I4 à proximité, la forme convexe de la couche de base dans cette dernière ne permet pas l'évacuation des eaux.
- et/ou l'absence d'un drainage couplée à une évacuation des eaux par infiltration/évaporation relativement moyenne à médiocre. Dans le cadre de cette étude, les essais d'infiltration présentés au chapitre 5.2 ont, en effet, montrés que l'infiltration sur site n'est pas possible.
- Dans la fouille RO-I5, la présence d'un géotextile qui sépare la couche de fondation gravo-limoneuse du sol d'assise argileux explique l'absence de ballast type S4. Au droit des fouilles RO-I6 et RO-I7, également dépourvu de ballast S4, aucun géotextile ne sépare les remblais argileux sur dalle (RO-I6) ou le sol d'assise argileux (RO-I7) du ballast, mais la présence de traverses en béton monobloc et pas en bois font penser à un renouvellement de la voie récent à cet endroit. Le ballast est donc probablement trop récent pour avoir pu être pollué par une remontée de fines. Par ailleurs, la pente de la couche de base dans la fouille RO-I6 est supérieure au minimum requis de 5% selon R RTE 21110 ce qui permet une évacuation latérale des eaux relativement rapide, réduisant considérablement le risque de remontée de fines dans le ballast.
- Une pollution de type S3 (ballast pollué) a été observée dans les fouilles RO-I1, I2 et I3. Cette pollution est principalement due à l'effritement du ballast sous charges ferroviaires et sur une longue période qui est favorisé par l'épaisseur insuffisante de ballast.
- Hormis dans la fouille RO-I4, caractérisée par la présence de ballast S4 uniquement, du ballast S1-S2/S2 (propre à assez pollué) a été rencontré dans la frange supérieure de ballast dans les fouilles RO-I1, I2 et I3, ainsi que dans la totalité des fouilles RO-I5, I6 et I7. Au droit de la fouille RO-I1, une couche de ballast S1-S2 de 8 cm repose, séparée par du géotextile, sur du vieux ballast qui présente une frange supérieure de type S1-S2 et une frange inférieure de type S3-S4. Le ballast type S1-S2/S2 peut être criblé dans le cadre du renouvellement de voie pour autant qu'il n'est pas chimiquement pollué (voir ci-dessous).
- En conclusion, le ballast probablement en place depuis de nombreuses années, a subi globalement des atteintes dues à son effritement (épaisseur de ballast insuffisante) ainsi que par la présence d'argiles et de limons issus des sols d'assise. La présence de ces fines serait liée à une pente de couche de base/plateforme insuffisante et/ou globalement une évacuation/infiltration des eaux pluviales plutôt médiocre qui a favorisé ce phénomène. D'un point de vue pratique, ces conditions défavorables ne permettent pas de cribler ces ballasts types S3 et S4 et de les réutiliser, et impliquent leur remplacement.

6.1.2 Contamination du ballast – analyses de pollution chimique

Conformément à la norme SN 671'562 et les directives sur les déblais de voie de l'OFT (2018), cinq prélèvements de ballast ont été effectués sur le tronçon. Ces prélèvements permettent de définir les valeurs de substances polluantes en relation avec l'existence de traverses en bois. Les résultats des analyses de pollution figurent en annexe A8.

Quant aux valeurs caractéristiques des échantillons ainsi que les résultats d'analyses, ils sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Echantillon km	HAP [mg/kg]	Benzo(a)pyrène [mg/kg]	HC C ₁₀ -C ₄₀ [mg/kg]
Rougemont - RO-I1 / km 39.104 – Ech. Ballast 1	3.4	0.07	63
Rougemont – pointe AV proche de RO-I2 / km 39.250 – Ech. Ballast 2	0.14	< 0.05	27
Rougemont – pointe AV proche de RO-I2 / km 39.272 – Ech. Ballast 3	1.3	< 0.05	25
Rougemont – ponton AV proche de RO-I5 / km 39.482 – Ech. Ballast 5	1.2	< 0.05	73
Rougemont - RO-I7 / km 39.697 – Ech. Ballast 7	0.09	< 0.05	< 10
Valeur limite OLED décharge type A (non pollué)	< 3.0 mg/kg	< 0.3 mg/kg	< 50 mg/kg
Valeur limite OLED valorisation sur le site pollué ou décharge type B (faiblement pollué)	< 12.5 mg/kg	< 1.5 mg/kg	< 250 mg/kg
Valeur limite OLED valorisation sur un site contaminé ou décharge type B (pollué)	< 25 mg/kg	< 3.0 mg/kg	< 500 mg/kg
Valeur limite OLED décharge type E (pollué par des substances dangereuses)	< 250 mg/kg	< 10.0 mg/kg	< 5'000 mg/kg

Tab. 8. Niveau de pollution du ballast

Compte tenu des résultats des analyses et de la directive de l'OFEFP (1999) concernant le recyclage, le traitement et l'entreposage de déblais, de déchets et de matériaux d'excavation, le classement du tableau suivant fait foi.

Ligne du km 39.100 au km 39.177 Ligne du km 39.377 au km 39.590	Ligne du km 39.177 au km 39.377 Ligne du km 39.590 au km 39.800
Faiblement pollué Valorisation sur le site pollué ou décharge type B	Non pollué Décharge type A

Tab. 9. Pollution du ballast

Les polluants déterminants pour la filière d'évacuation du ballast entre les kms 39.100 et 39.177 sont **les hydrocarbures C10-C40 et HAP**, tandis que ceux entre les kms 39.377 et 39.590 sont **les hydrocarbures C10-C40**. Les zones ont été délimitées à la mi-distance entre les échantillons prélevés en première approximation et devront être contrôlées durant les travaux.

Selon le tableau ci-dessus et le degré de contamination du ballast présenté dans le tableau 7, le ballast type S1-S2 rencontré uniquement dans les fouilles RO-I3 et RO-I7 pourrait être criblé.

Les déblais de voies doivent être traités conformément à l'ouvrage de référence I-50072 du 7 décembre 2012. Un plan de recyclage doit être joint au projet.

6.1.3 Soils d'infrastructure et drainage

6.1.3.1 Couche de fondation et drainage

Dans le tableau ci-dessous sont reportées les informations détaillées des relevés de fouilles concernant la couche de fondation. Y sont mentionnés sa nature et classification USCS, sa qualité, ainsi que sa portance définie selon la norme VSS SN 640'324 et l'annexe A1, puis finalement la pente de la couche de base.

Fouille N° et km	Couche de fondation	Classification USCS	Classe de portance sur couche de fondation	M _{E1} (MPa) sur couche de fondation	Pente de la couche de base
RO-I3 km 39.298	Sable limoneux, avec des traces d'argile, humide à très humide, très lâche	(SM)	S0	5	En toit, 4.3% vers la gare (nord) et 3.2% vers la route (sud)
RO-I5 km 39.462	Gravier fin limoneux, très humide/saturé, très lâche	(GM)	SO	5.8	1.7% vers la gare (nord)
RO-I6 km 39.569	Limon argilo-sableux, humide, très ferme	(CL-ML)	Estimée S1	-	En toit, 9.8% vers le nord et 6.9% vers le sud

Tab. 10. Caractéristiques de la couche de fondation

Commentaires sur la couche de fondation et drainage

- Une couche de fondation a été relevée dans la fouille RO-I3 (km 39.298), constituée de sable fin limoneux, humide à très humide, très lâche, dans la fouille RO-I5 (km 39.462), constituée de gravier limoneux, très humide/saturé, très lâche et sur la dalle du pont de Combabelle dans RO-I6 (km 39.569), constitué de limons argilo-sableux, humide, très ferme.
- La portance mesurée sur la couche de base varie entre 5.0 et 5.8 MPa, sensiblement inférieure à la portance minimale requise de 60 MPa pour un groupe de charges de voies N2 selon R RTE 21110.
- Aucun système de drainage n'a été relevé dans les fouilles RO-I3, RO-I5 et RO-I6. Il semblerait donc que l'évacuation des eaux se fait donc par infiltration/évaporation au droit de ces fouilles. Compte tenu de la présence de fines dans le sol en place qui entrave l'infiltration, cette dernière est plutôt médiocre comme en témoigne les essais d'infiltration réalisés dans les fouilles RO-FR1 (km 39.345) et RO-FR2 (km 39.475). De plus la pente trop faible de la couche de base dans les fouilles RO-I3 et RO-I5 entrave également l'évacuation des eaux. Seule l'évacuation latérale dans la fouille RO-I6 est adéquate compte tenu d'une pente de couche de base supérieure à 5% ; cela pourrait expliquer en partie l'absence de ballast S4 dans cette fouille.

6.1.3.2 Sol d'assise

Dans le tableau ci-dessous sont reportées les informations détaillées des relevés de fouilles concernant le sol d'assise. Y sont mentionnés sa nature et classification USCS, sa qualité, sa portance définie selon la norme VSS SN 640'324 et la pente de sa couche de base/plateforme.

Fouille N° et km	Sol d'assise	Nature	Classification USCS	Classe de portance sur plateforme	ME1 (MPa) (sur plateforme ; au fond de fouille)	Pente de la plateforme
RO-I1 km 39.104	Gravier argileux avec sable, humide, lâche	Remblais issus des alluvions du cône de déjection	GC	S1 (couche de base = plateforme)	10.5 ; /	1.2% vers la gare (nord)
RO-I2 km 39.268	Argile maigre, très humide, ferme à très ferme	Alluvions du cône de déjection	(CM)	S0-S1 (couche de base = plateforme)	5.0 ; 9.0	0.4% vers la gare (nord)
RO-I3 km 39.298	Argile maigre, humide, ferme		(CM)	S0	/ ; 5.5	1.1% vers la gare (nord)
RO-FR1 km 39.345	Argile, humide, très ferme à dure		(CL)	S1-S2	21 ; /	/
RO-I4 km 39.370	Argile maigre, humide à très humide, ferme		(CM)	S0 (couche de base = plateforme)	5.2 ; 5.0	Convexe ; évacuation impossible
RO-I5 km 39.462	Argile maigre, humide à saturée en fond, ferme à très ferme		(CM)	S1	8.1 ; 6.7	0.12% vers la gare (nord)
RO-FR2 km 39.475	Argile, humide à très humide, molle à très ferme		(CL)	S0	4.0 ; /	/
RO-I6 km 39.569	Pas de sol-assise : dalle béton du PI du ruisseau Combabelle		/	/	/	9.8% vers le nord ; 6.9% vers le sud
RO-FR3 Km 39.650	Argile, humide, ferme à très ferme		(CL)	S1	5.8 ; /	/
RO-I7 km 39.697	Argile maigre, très humide, ferme à très ferme		(CM)	S1 (couche de base = plateforme)	9.5 ; 7.3	4% vers le sud

Tab. 11. Caractéristiques du sol d'assise

Commentaires sur le sol d'assise

- Les résultats des essais de laboratoire sur les échantillons de sol d'assise sont reportés en annexe A7. Des mesures de la teneur en eau, du poids volumique et des limites d'Atterberg ont été réalisées sur quatre échantillons (RO-I1, I2, I4 et I7). Une analyse granulométrique a également été réalisée sur l'échantillon de sol d'assise prélevé dans la fouille RO-I1.

- Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg ont été réalisées sur les quatre échantillons de sols d'assise, et indiquent la présence d'argiles (CL) en tant que fraction fine des remblais issus des alluvions du cône de déjection dans la fouille RO-I1 et d'argiles maigres (CM) en tant que composante principale des alluvions du cône de déjection dans les autres fouilles.

En comparant les limites de liquidité et de plasticité des échantillons testés avec leurs teneur en eau, on peut déterminer les consistances suivantes des sols fins ou de la matrice fine des sols grossiers :

- Pour le sol d'assise dans la fouille RO-I1, la teneur en eau de 15.6 % est légèrement supérieure à la limite de plasticité w_p de 14.1 %, ce qui indique une matrice argileuse plutôt très ferme telle que rencontrée.
 - Pour les sols d'assise dans les fouilles RO-I2, RO-I4 et RO-I7, la teneur en eau de 38.3 %, 25.4 % et respectivement 37.4 % est supérieure à la limite de plasticité w_p de 23.0 %, 19.5 % et respectivement 19.9 %, indicatif d'un sol plutôt ferme à très ferme tel que rencontré.

- Granulométrie

L'essai granulométrique effectué sur l'échantillon de remblais prélevé dans la fouille RO-I1 confirme la nature gravelo-argileuse de ces derniers.

- Selon les analyses et observations faites durant la campagne de reconnaissances, le sol d'assise est composé principalement d'alluvions du cône de déjection relevés dans les différentes fouilles, à l'exception de RO-I1 et RO-I6 (absente à cause de la présence de la dalle du pont sur le ruisseau de Combabelle). Ces alluvions sont principalement constituées d'argiles maigres avec une teneur faible de graviers fins dans RO-I7. Dans la fouille RO-I1 au km 39.104, les remblais sont probablement issus des alluvions du cône de déjection et sont constitués par des graviers argileux avec sable.
- Les sols d'assise sont globalement humides à très humides, avec des zones saturées (venue d'eau à 0.55 m de profondeur et présence d'eau stagnante au fond de la fouille RO-I3, sol d'assise saturé au fond de la fouille RO-I5). L'humidité relative élevée dans la majorité des fouilles est indicative d'une mauvaise évacuation des eaux.
- Les alluvions ont une consistance/compacité variable avec une portance mesurée sous ballast comprise entre 4 et 10.5 MPa (hormis dans RO-FR1 à 21 MPa) à savoir sensiblement inférieure au minimum requis de 60 MPa (selon R RTE 21110) sous ballast, c'est-à-dire au niveau de la plateforme lorsque celle-ci est confondue avec la couche de base due à l'absence d'une couche de fondation. Ceci est le cas au droit de toutes les fouilles hormis RO-I3, RO-I5 et RO-I6. En tout cas, la portance du sol d'assise au droit de RO-I3 et RO-I5 est également inférieure au minimum requis de 15 MPa nécessaire au niveau de la plateforme (lorsqu'il y a une couche de fondation).
- Dans le cadre du projet de renouvellement, on peut considérer que la portance du sol d'assise sous la future couche de fondation (portance au niveau de la future plateforme) correspondra plus ou moins à celle mesurée au fond des fouilles lors de l'investigation. Les valeurs de portance mesurées au fond de fouille sont de l'ordre de 5.0 à 9.0 MPa, donc inférieures au 15 MPa requise selon R RTE 21110. En conclusion, il ressort qu'une amélioration de la portance des sols d'assise (renforcement) s'impose dans ces conditions de portance insuffisante.

- Selon les renseignements qui nous ont été fournis par les services d'entretien voie ferrée du MOB SA, aucune indication sur les dommages dus au gel n'existe pour le tronçon concerné.
- Il n'existe pas non plus de graphiques d'entretien des voies, comme aussi des résultats sur la déformation des voies mesurée par la voiture de mesure.
- Un système de drainage a été observée à l'extérieur de la fouille RO-I2 au km 39.268. Ce drain, de diamètre 150 mm a été repéré par extrapolation des profondeurs des chambres de drainage qui ont été ouvertes aux kms 39.252 et 39.277. Néanmoins, la pente de la couche de base de 0.4% étant bien inférieure au minimum requis de 5%, l'évacuation des eaux vers le drain au droit de cette fouille est médiocre.
- Finalement, il semblerait qu'une tranchée drainante en gravier existe à l'extérieur de la voie autour de la fouille RO-I4 et a été détectée dans la fouille RO-FR1 à proximité. L'étendu de cette tranchée le long de la voie n'est pas connu. Toutefois, la forme convexe de la couche de base dans RO-I4 ne permet pas d'évacuer l'eau vers la tranchée, d'où la présence de ballast type S4.

6.1.3.3Gel

Le sol d'assise est constitué de matériaux allant d'argiles maigres (CM) à graviers argileux (GC), généralement humides à très humides, voire saturés.

Il s'agit donc de sols de degré de gélivité variable mais à considérer globalement dans les catégories G3-G4, donc susceptibles d'être sensibles au gel en présence d'une évacuation insuffisante des eaux et mal adaptée aux conditions existantes.

Il sera donc nécessaire de prévoir un système de drainage adéquat selon R RTE 21110 pour les nouvelles voies afin de réduire le risque au gel.

La profondeur de gel est de 91 cm.

6.1.4 Contamination du sol d'assise

Conformément à la norme SN 671'562 et les directives sur les déblais de voie de l'OFT (2018), deux prélèvements de sols d'assise ont été effectués pour le tronçon de l'étude. Ces prélèvements permettent de définir les valeurs de substances polluantes en relation avec l'existence de traverses en bois. Les résultats des analyses de pollution figurent en annexe A8.

Quant aux valeurs caractéristiques des échantillons ainsi que les résultats d'analyses, ils sont résumés dans le tableau suivant.

Echantillon km	HAP [mg/kg]	Benzo(a)pyrène [mg/kg]	HC C ₁₀ -C ₄₀ [mg/kg]
Rougemont - RO-I1 / km 39.104 – Ech. Assise 1	-/-	< 0.05	< 10
Rougemont - RO-I7 / km 39.697 – Ech. Assise 7	-/-	< 0.05	< 10
Valeur limite OLED décharge type A (non pollué)	< 3.0 mg/kg	< 0.3 mg/kg	< 50 mg/kg
Valeur limite OLED valorisation sur le site pollué ou décharge type B (faiblement pollué)	< 12.5 mg/kg	< 1.5 mg/kg	< 250 mg/kg
Valeur limite OLED valorisation sur un site contaminé ou décharge type B (pollué)	< 25 mg/kg	< 3.0 mg/kg	< 500 mg/kg
Valeur limite OLED décharge type E (pollué par des substances dangereuses)	< 250 mg/kg	< 10.0 mg/kg	< 5'000 mg/kg

Tab. 12. Niveau de pollution du sol d'assise

Compte tenu des résultats des analyses et de la directive de l'OFEFP (1999) concernant le recyclage, le traitement et l'entreposage de déblais, de déchets et de matériaux d'excavation, le classement ci-dessous fait foi :

Ligne du km 39.100 au km 39.800
Non pollué Décharge type A

Tab. 13. Pollution du sol d'assise

Les polluants déterminants pour la filière d'évacuation du sol d'assise existant entre les kms 39.100 et 39.800 sont les **HAP et les hydrocarbures C₁₀-C₄₀**, inférieurs à la valeur limite OLED pour la décharge de type A au droit des fouilles exécutées.

Les déblais de voies doivent être traités conformément à l'ouvrage de référence I-50072 du 7 décembre 2012. Un plan de recyclage doit être joint au projet.

6.2 RECOMMANDATIONS POUR LES NOUVELLES VOIES

Les conclusions et recommandations ci-dessous tiennent compte du tronçon étudié du km 39.100 au km 39.800, et sont basées sur les reconnaissances effectuées par des fouilles en dehors et au droit des voies actuelles.

Selon les indications qui nous ont été fournies et conformément à R RTE 21110, les prescriptions suivantes s'appliquent aux nouvelles voies ballastées dont l'infrastructure peut être établie à la manière **des chantiers routiers**, sans restriction importante d'exploitation.

6.2.1 Introduction

Dans ce cadre et pour le projet de nouvelles voies, le projet de l'ingénieur civil consiste à remplacer les traverses existantes en bois par des traverses en béton monobloc. Les mesures pour nouvelles voies sont proposées selon R RTE 21110, à savoir il s'agit d'envisager une **réfection totale** des voies avec un engagement prévu au moyen de travaux de génie civil classiques.

Les mesures adoptées doivent tenir compte de la charge actuelle et future sur le tronçon de voies.

La solution proposée ci-dessous consiste à effectuer une réfection complète des voies sans relevage et en garantissant une portance minimale de 15 MPa au niveau des futures plateformes (sol d'assise).

6.2.2 Mesures pour nouvelles voies – réfection totale

Sur la base des sols en présence, il a été tenu compte de la portance la plus défavorable ainsi que des épaisseurs de ballast/couche de transition et de couche de fondation manquantes pour satisfaire aux exigences de R RTE 21110 avec pose de traverses en béton monobloc.

Dans tous les cas, la portance devra être contrôlée durant les travaux par l'ingénieur géotechnicien.

Ligne kilométrage	Mesure de réfection totale – traverses en béton monobloc
MOB, Ligne Montreux – Zweisimmen, km 39.100 au km 39.800	<ol style="list-style-type: none"> 1. Extraction complète du ballast existant et remplacement par 30 cm de ballast de classe 1 sous traverses. Eventuellement criblage de la tranche supérieure de ballast existant type S1-S2 chimiquement non-pollué du km 39.177 au km 39.377 et du km 39.590 au km 39.800 (épaisseur actuelle environ 22 à 30 cm sous traverses actuelles). 2. Sous ballast, excavation et pose d'une couche de fondation d'une épaisseur totale de 30 cm constituée d'une part en surface d'une couche d'étanchéité minérale de 5 cm d'épaisseur suivie d'une couche de grave 1 de 25 cm d'épaisseur. 3. Aménagement de la couche de base (sur couche d'étanchéité) avec une pente de 5% vers un drainage de type 4b (selon Annexe 8 de R RTE 21110) à aménager à l'extérieur de la voie. 4. Au droit du futur PI voyageurs, pose du ballast sur une couche de transition de 10 cm. Cette couche peut être constituée de ballast, ce qui revient à 40 cm de ballast sous traverses. Au droit du PI existant du ruisseau de Combabelle, purge complète de la couche de fondation et remplacement par du ballast de classe 1 sous traverses et posé sur la dalle en béton du PI. 5. Excavation supplémentaire et remplacement de min. 15 cm de sol d'assise sous la couche de fondation par de la grave 1 avec mise en place d'une géogrille + géotextiles posés sur le sol d'assise pour créer la future plateforme avec portance minimale 15 MPa tout en minimisant le risque de remontée de fines depuis le sol d'assise.

Tab. 14. Recommandations pour le renouvellement de voie

Remarques sur l'infrastructure

- De manière générale, comme la réfection complète de la voie nécessite la pose d'une couche de fondation (absente sur une bonne partie du tronçon étudié), l'extraction et le remplacement de ballast seront nécessaires, surtout aux endroits où les futures voies seront réalisées à côté de voies existantes. Néanmoins, la tranche supérieure de ballast de type S1-S2 pourra être criblée et réutilisée pour autant qu'elle soit chimiquement non-polluée. Tout ballast chimiquement pollué, entre les kms 39.100 et 39.177 ainsi qu'entre les kms 39.377 et 39.590, doit être évacué.
- Sous le ballast et préalablement, on procède à la pose d'une couche de fondation constituée de 5 cm d'étanchéité suivie de la pose de 25 cm de grave 1.
- Sous cette couche de fondation, un renforcement du sol d'assise sera nécessaire afin d'améliorer la portance au niveau de la future plateforme (sol d'assise), ceci par l'extraction supplémentaire de 15 cm de sol d'assise substitué par de la grave 1 renforcée encore au niveau de la plateforme par la pose d'un géogrille et d'un géotextile. La pose du géotextile sur le sol d'assise globalement argileux permet de minimiser le risque de remontée de fines depuis ce dernier.
- Le renforcement nécessaire au niveau du sol d'assise est déterminé en considérant que 1 cm de grave compactée permet une amélioration de la portance du sol d'environ 1 MPa. Pour une portance minimale de 5.00 MPa dans la fouille RO-I4 au fond de la fouille, il faut ajouter 10 cm de grave 1, à arrondir à 15 cm pour avoir une marge de sécurité. Signalons que la portance mesurée durant l'étude au fond de fouille correspondra plus ou moins à la portance sur la future plateforme située dans le sol d'assise.
- L'infrastructure (couche de fondation dans les fouilles RO-I3, I5 et I6 ainsi que sol d'assise) excavée pour la pose de la nouvelle infrastructure et du lit de ballast doit être évacuée selon les recommandations fournies au chapitre 6.1.4.

Remarques sur le drainage

- Conformément à l'article 7 de la LEaux, les eaux pluviales, qui sont non polluées, seront infiltrées dans la mesure où le contexte géologique le permet. Le système d'évacuation des eaux doit être choisi suivant la directive de l'OFT (Evacuation des eaux des installations ferroviaires, 2018).
- Le système d'évacuation des eaux de la future voie devra être conçu selon les directives de l'annexe 8 de la R RTE 21110 en garantissant une distance minimale de 1 m entre le fond de la tranchée d'évacuation et la nappe. Sur la base du sondage RO-SV1, il semblerait que la profondeur de la nappe est supérieure à 8 m, donc ces directives sont satisfaites.
- Les valeurs de perméabilité obtenues lors des deux essais d'infiltration dans les fouilles RO-FR1 (km 39.425) et RO-FR3 (km 39.475) sont de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-7} m/s, tandis qu'un essai d'infiltration n'a pas été réalisé à cause de la nature trop argileuse du terrain dans la fouille RO-FR3 (km 39.650). Compte tenu des résultats des essais et de la nature argileuse du sol d'assise, une évacuation des eaux de **type 4b** selon l'annexe 8 de la R RTE 21110 sera à réaliser le long de la future voie ; il s'agit d'une évacuation avec tranchée étanche et tuyau multifonctionnel (diamètre $DN_{min} = 200$ mm). En effet, le secteur de protection des eaux Au dans lequel se trouve le projet, la proximité des zones de protection des eaux S1 et S3 ainsi que les risques d'inondation sur le tronçon d'étude militent en faveur d'une évacuation des eaux **type 4b** qui est isolée du terrain autour.
- La couche de base, en outre, devra être aménagée avec une pente de 5% inclinée vers l'extérieur de la voie et vers le drainage de type 4b décrit en précédence.

7 SYNTHÈSE

Le projet consiste à construire un passage inférieur et supérieur voyageurs (PI et PS) en gare de Rougemont, une voie piétonne, une route d'accès et un mur de soutènement. Ces travaux sont accompagnés par le renouvellement complet de la voie principale du km 39.100 au km 39.800 et des voies secondaires en gare de Rougemont.

Afin de fournir des recommandations pour ces futures constructions, trois fouilles à la pelle mécanique ainsi qu'un sondage carotté ont été réalisés à côté de la voie. Ces fouilles et sondages ont permis de reconnaître les caractéristiques géotechniques, géologiques et hydrogéologiques des sols. Pour déterminer les caractéristiques de la super- et infrastructure ferroviaire dans le cadre du renouvellement complet des voies, sept fouilles à la pelle mécanique ont été exécutées sur les voies existantes entre les traverses. Les trois fouilles réalisées à côté de la voie ont également servi à définir des recommandations pour le renouvellement des voies.

Le sous-sol du site rencontré dans le sondage carotté est constitué de terre végétale et de sous-couche en surface, suivies de remblais et d'alluvions du cône de déjection en profondeur. Les remblais, probablement issus des alluvions, sont de qualité moyenne tandis que les alluvions sont de qualité plutôt moyenne dans la phase supérieure argileuse et bonne dans la phase graveleuse argilo-limoneuse sous-jacente. Bien qu'aucune nappe phréatique ni venue d'eau n'a été rencontrée durant la campagne de reconnaissances, la présence de circulations d'eau dans le terrain ne peut pas être exclue, notamment au sein des alluvions graveleuses.

Le fond de fouille du futur PI voyageurs sera situé au sein des alluvions phase graveleuse compacte à très compacte. Il est recommandé de recourir à un radier général pour cet ouvrage pour maîtriser les eaux en cas de présence de venues d'eau et pour minimiser le risque de sous-pressions sous radier. Par ailleurs, le PS voyageurs et le mur de soutènement pourront être posés sur des semelles appuyées sur les alluvions du cône de déjection phase argileuse molle à très ferme. Si les charges au droit du PI voyageurs, PS voyageurs et/ou mur de soutènement sont trop importantes, il faudra recourir à des fondations profondes type micropieux/pieux encastrés dans des couches compétentes en profondeur. L'infrastructure de la voie piétonne et de la route d'accès sera également posée sur les alluvions, phase argileuse. La portance faible des sols de fondation de ces ouvrages devra être considérée pour le dimensionnement de l'infrastructure de ces derniers avec une profondeur de gel de 91 cm.

Pour autant que la place le permette et que l'exploitation ferroviaire puisse être arrêtée durant les travaux (renouvellement complet des voies), l'enceinte de fouille au droit des ouvrages pourra être dressée à l'abri de talus. Dans le cas contraire il y aura lieu de prévoir un pont provisoire fondé sur des micropieux pour la réalisation du futur PI voyageurs ainsi que des travaux spéciaux comme soutènement d'excavation. A priori, le PS voyageurs, mur de soutènement, voie piétonne et route d'accès semblent pouvoir être réalisés sans risque d'interruption du trafic ferroviaire.

Les eaux de chantier devront être récoltées, traitées et évacuées par pompage ou gravitairement vers le réseau communal pour éviter le ramollissement du fond d'excavation constitué de limons et d'argiles sensibles à l'eau. Le recours à un drainage périphérique couplé à un matelas de boulets/masque de béton caverneux sous le radier du PI voyageurs sera nécessaire en phase d'exploitation. Un drainage devra également être prévu derrière le mur de soutènement.

L'infiltration des eaux claires n'est pas envisageable sur site sur la base des essais d'infiltration effectués ainsi que la nature argilo-limoneuse des sols. L'évacuation des eaux est actuellement médiocre et serait donc à l'origine de la contamination type S4 du ballast.

La superstructure et l'infrastructure ferroviaires ont été reconnues par 7 fouilles à la pelle. Le ballast observé présente une épaisseur variable, parfois non conforme à R RTE 21110. Par endroits, il est faiblement pollué (chimiquement) selon l'OLED et devra être évacué en décharge de type B.

La couche de fondation, parfois observée, est constituée par des sables limoneux, graviers limoneux et des limons argilo-sableux. Elle n'a pas fait l'objet d'analyses de pollution spécifiques. Le sol d'assise observé au droit de tous les sondages est de nature argileuse dans sa globalité, et présente une portance de classe S0-S1. Il n'est pas pollué (chimiquement) selon l'OLED, et pourra donc être évacué en décharge de type A. L'évacuation des eaux est actuellement médiocre.

Les recommandations pour la nouvelle voie sont les suivantes sont formulée dans le présent rapport.

Au droit du futur PI voyageurs ainsi que le PI existant du ruisseau de Combabelle, il y a lieu de poser le ballast sur une couche de transition (pourra être du ballast) de 10 cm.

* * *

Les solutions données dans ce rapport sont basées sur une interprétation des sondages et essais en laboratoire ainsi que notre expérience de cas similaires. Elles reflètent les connaissances dont nous disposons actuellement, illustrées par les documents mis à notre disposition et consultés qui figurent au paragraphe II.

Néanmoins, les sols sont par nature hétérogènes et des variations peuvent échapper à toutes investigations qui restent très ponctuelles. C'est pourquoi les terrassements devront être suivis de près par l'ingénieur afin de vérifier la concordance avec les hypothèses formulées et qu'il soit à même de déceler à temps toute anomalie dans la nature, la qualité et le comportement des sols rencontrés. S'il le juge nécessaire, il pourra se faire assister d'un géotechnicien en tant que spécialiste des sols.

KARAKAS & FRANÇAIS SA



Commune | **Rougemont**

Concerne | **Ouvrages d'art, lit de ballast et
infrastructure**

Affaire | **MOB – Gare de Rougemont – km
39.100 – 39.800**

Etude géotechnique Annexes

Version définitive 1

Numéro **11649**

Date **10 août 2020**

MOB - Gare de Rougemont
km 39.100 - 39.800
Situation des sondages

N° 11649-51
Ech 1:1'000

DATE	DESS	VISA
17.08.2020	TIL	EGY

KARAKAS
FRANÇAIS

geotechnique@kfsa.ch
www.kfsa.ch

LAUSANNE

Av. des Boveresses 44
1010 Lausanne
Tél 021 654 44 68

PETIT-LANCY

Ch. des Poteaux 10
1213 Petit-Lancy
Tél 022 301 52 61




MARTIGNY

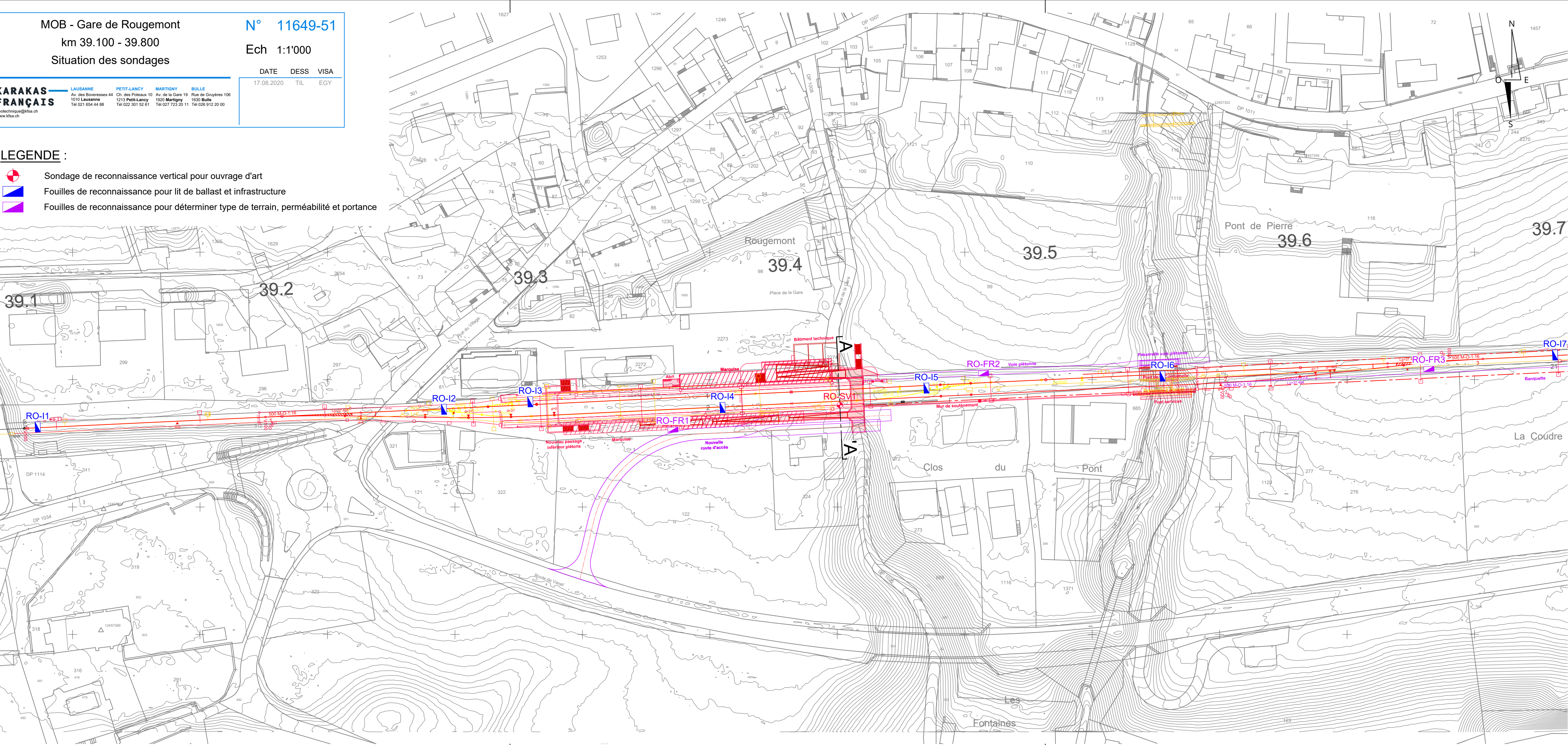
Av. de la Gare 19
1620 Martigny
Tél 027 723 20 11

BIJLE

Rue de Gruyères 106
1630 Bulle
Tél 026 912 20 00

LEGENDE :

-  Sondage de reconnaissance vertical pour ouvrage d'art
-  Fouilles de reconnaissance pour lit de ballast et infrastructure
-  Fouilles de reconnaissance pour déterminer type de terrain, perméabilité et portance



MOB - Gare de Rougemont

km 39.100 - 39.800 / PI et PS voyageurs

Profil géologique A - A'

N° 11649-52

Ech 1:200

DATE DESS VISA

17.08.2020 TIL EGY

KARAKAS
FRANÇAIS

geotechnique@kfsa.ch
www.kfsa.ch

LAUSANNE

Av. des Boveresses 44
1010 Lausanne
Tél 021 654 44 88

PETIT-LANCY

Ch. des Poteaux 10
1213 Petit-Lancy
Tél 022 301 52 61

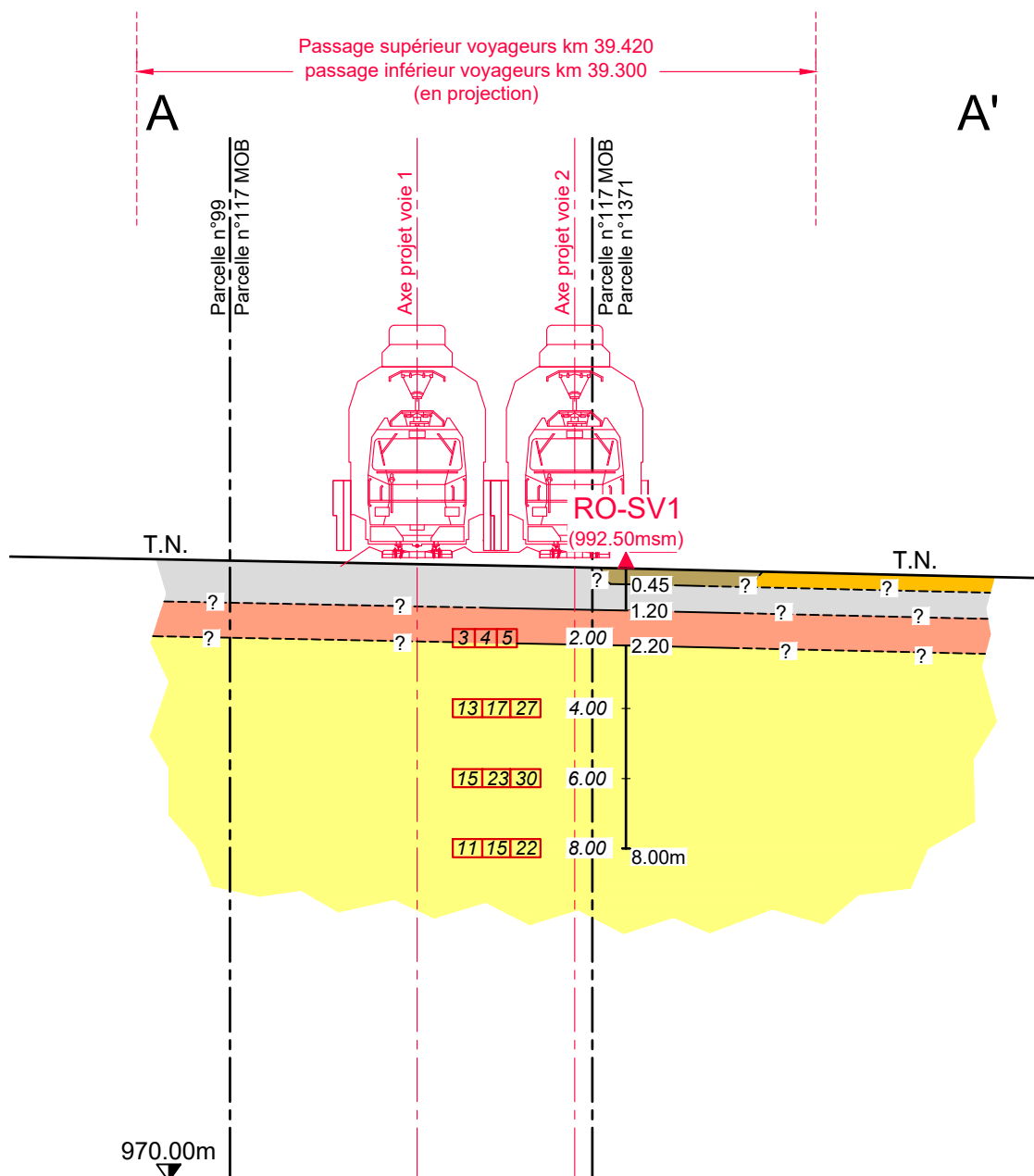
MARTIGNY

Av. de la Gare 19
1920 Martigny
Tél 027 723 20 11

BULLE

Rue de Gruyères 106
1630 Bulle
Tél 026 912 20 00

Profil géologique A - A' 1:200



LEGENDE :



Tout-venant



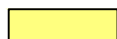
Remblais



Terre végétale



Alluvions du cône de déjection - phase argileuse



Alluvions du cône de déjection - phase graveleuse argilo-limoneuse

5 17 34

Nombre de coups au SPT

<div> <div> <div>MOB</div> <div>COMPAGNIE DU CHEMIN DE FER MONTREUX-LEZ-LANDELIERS</div> </div> <div> <div>KARAKAS FRANÇAIS</div> <div>geotechnique@kfsa.ch www.kfsa.ch</div> </div> </div>	Fouille au Km 39.104	Plan n° 11649-53
		Rapport N° : 11649-Rapport EG
Dessinateur :	HME	Tronçon : Montreux - Zweisimmen / Gare de Rougemont
Date :	19.08.2020	Fouille sur la voie existante (voie métrique)
		Km : KM 39.100 AU KM 39.800

MOB

COMPAGNIE DU CHEMIN DE FER
MONTREUX-LEZ-LANDELIERS

KARAKAS
FRANÇAIS

geotechnique@kfsa.ch
www.kfsa.ch

Fouille au Km 39.104

Plan n° 11649-53

Rapport N° : 11649-Rapport EG

Dessinateur : HME

Date : 19.08.2020

Tronçon : Montreux - Zweisimmen / Gare de Rougemont

Fouille sur la voie existante (voie métrique)

Km : KM 39.100 AU KM 39.800

MOB : Gare de Rougemont

(km 39.104)

MOB

COMPAGNIE DU CHEMIN DE FER
MONTREUX-LEZ-LANDELIERS

KARAKAS
FRANÇAIS

geotechnique@kfsa.ch
www.kfsa.ch

Fouille au Km 39.104

Plan n° 11649-53

Rapport N° : 11649-Rapport EG

Dessinateur : HME

Date : 19.08.2020

Tronçon : Montreux - Zweisimmen / Gare de Rougemont

Fouille sur la voie existante (voie métrique)

Km : KM 39.100 AU KM 39.800

MOB : Gare de Rougemont

(km 39.104)

FOUILLE RO-I1 AU KM 39.104

Remarque : Mesures effectuées depuis l'arête supérieure de la traverse

Altitudes en m.s.m, longueurs et profondeurs en cm

S1-S2 Ballast partie sup. Propre à assez pollué

Géotextile de séparation ballast partie sup. - ballast partie inter.

S1-S2 Ballast partie inter. Ancien ballast Propre à assez pollué

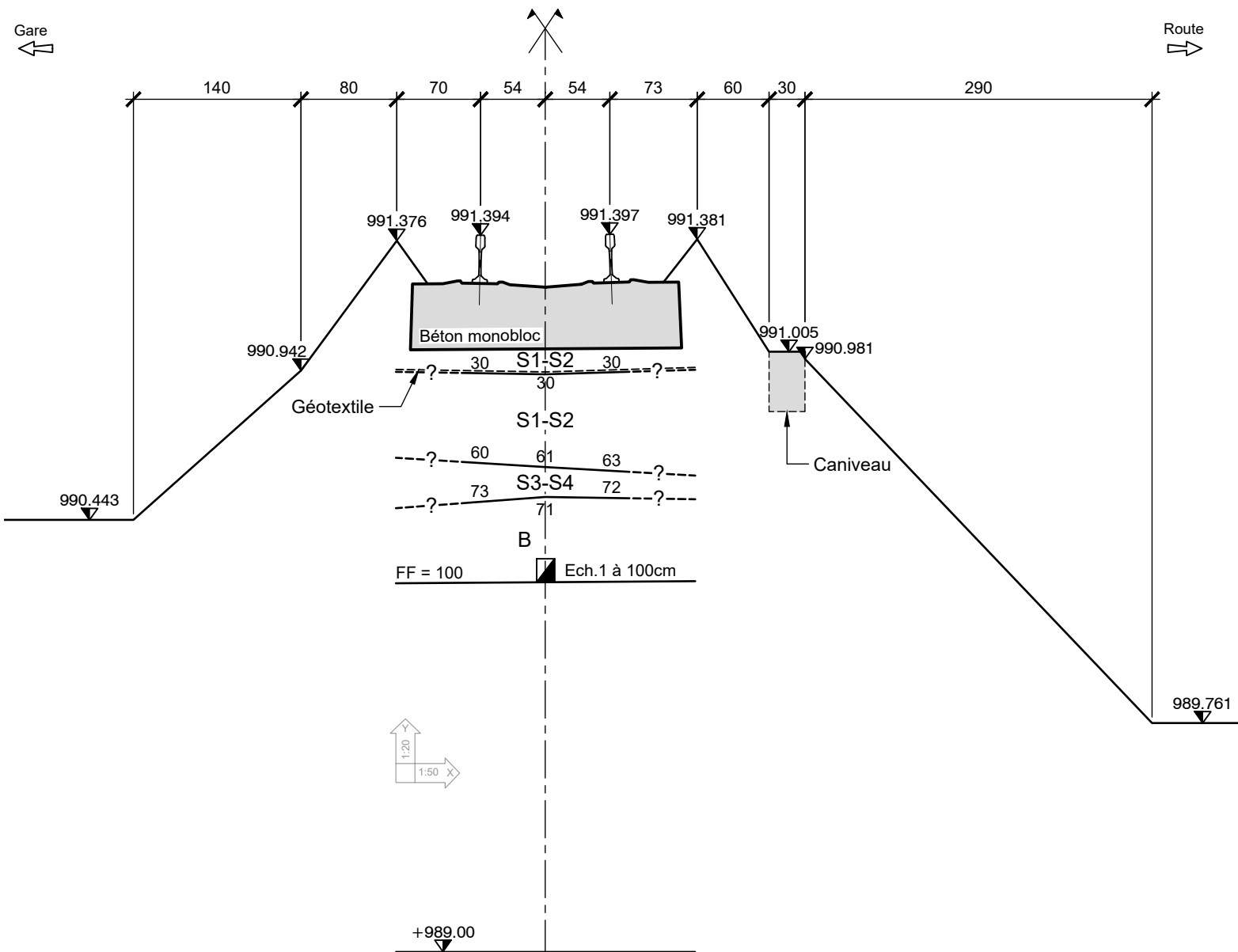
S3-S4 Ballast partie inf. Ancien ballast Pollué à très pollué

ME1 sur couche de base/platforme : 10.5MPa

B Sol d'assise Remblais issus du cône d'alluvions (cône de déjection) : Gravier argileux avec sable, brun, humide, lâche

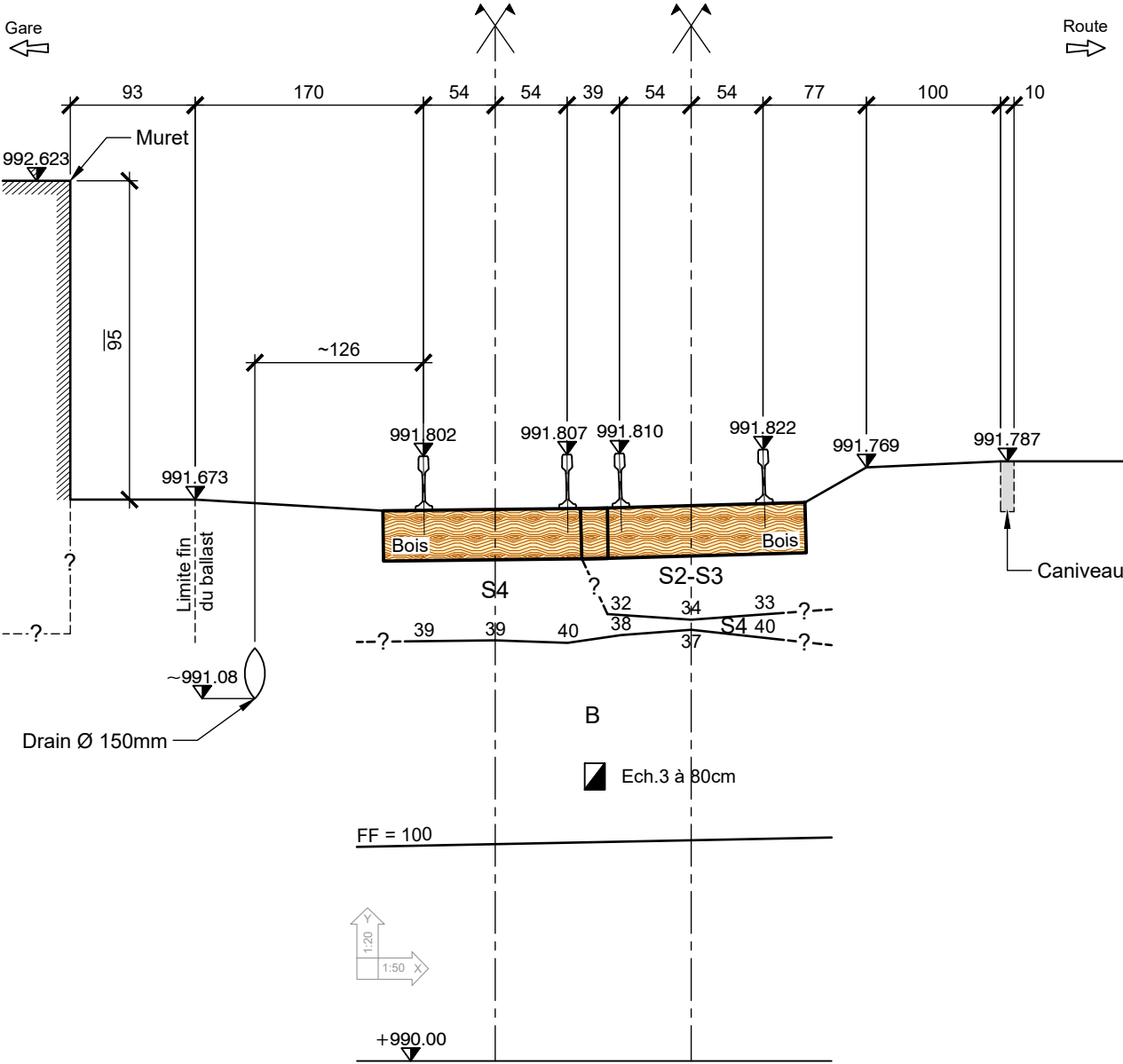
Ech.1 : w = 15.6% ; USCS ≡ GC

HYDROLOGIE Remblais humides



<div><div>MOB</div><div>COMPAGNIE DU CHEMIN DE FER MONTREUX FLUX ORBRI AND BERNON</div></div>	<div><div>KARAKAS FRANÇAIS</div><div>geotechnique@kfsa.ch www.kfsa.ch</div></div>	Fouille au Km 39.268	Plan n° 11649-54
			Rapport N° : 11649-Rapport EG
Dessinateur :	HME	Tronçon : Montreux - Zweisimmen / Gare de Rougemont	Ech : 1:50 / 1:20
Date :	19.08.2020	Fouille sur la voie existante (voie métrique)	Km : KM 39.100 AU KM 39.800



MOB : Gare de Rougemont
(km 39.268)



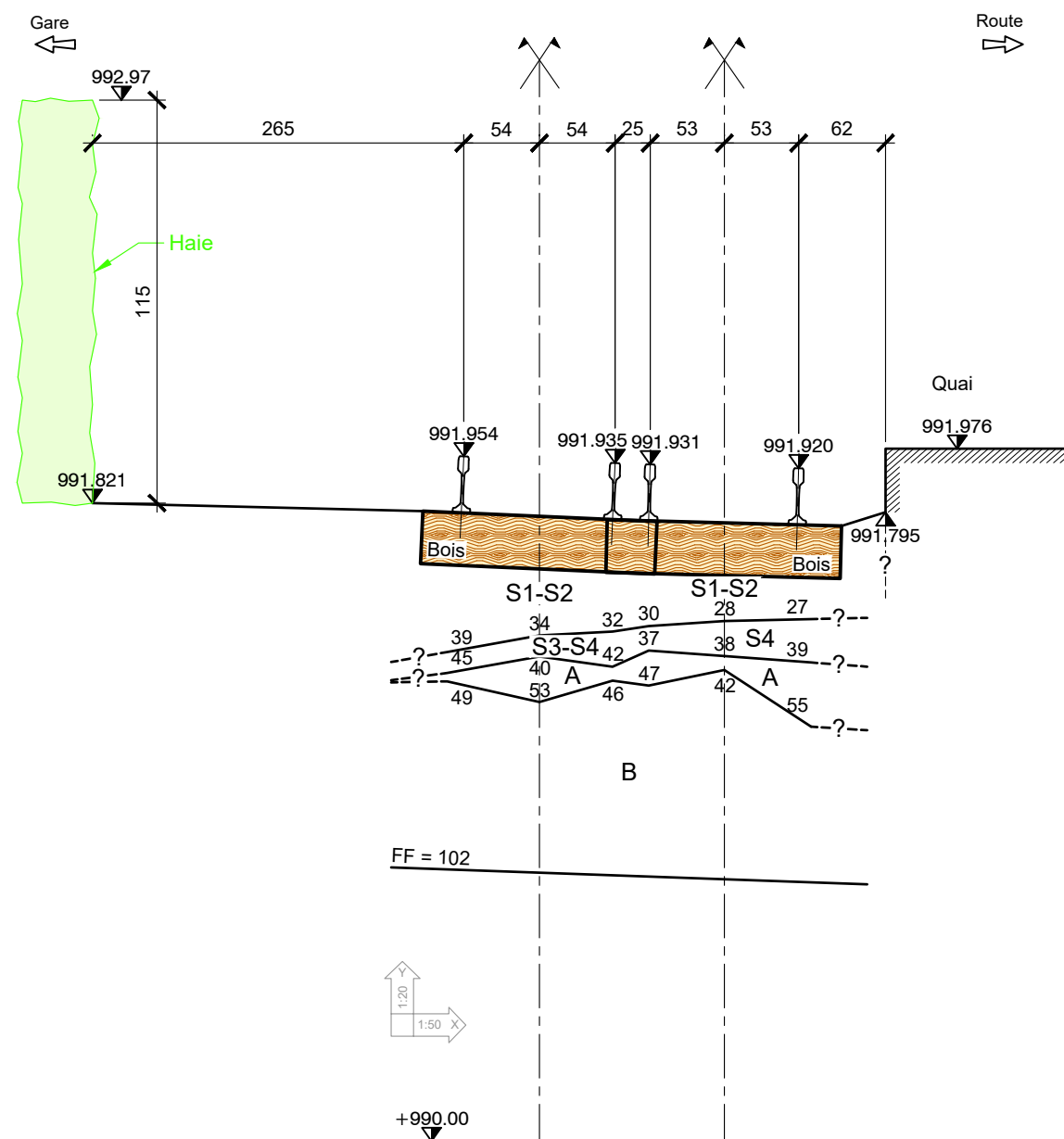
FOUILLE RO-I2 AU KM 39.268 - COEUR

Remarque : Mesures effectuées depuis l'arête supérieure de la traverse
Altitudes en m.s.m, longueurs et profondeurs en cm

S2-S3/S4	Ballast partie sup.	Assez pollué / pollué à très pollué
S4	Ballast partie inf.	Très pollué
B	Sol d'assise	ME1 sur couche de base/plateforme : 5MPa Alluvions du cône de déjection : Argile maigre, brun-olive, très humide, ferme à très ferme ME1 au fond de fouille : 9MPa ; PP : $q_{up} = 100-150kPa$; SS : $c_{up} = 100kPa$ Ech.3 : $w = 38.3\%$ HYDROLOGIE Alluvions du cône de déjection très humides ; présence de drains existants

 COMPAGNIE DU CHEMIN DE FER MONTREUX OBERLAND BERNOIS	 geotechnique@kfsa.ch www.kfsa.ch	Fouille au Km 39.298	Plan n° 11649-55
			Rapport N° : 11649-Rapport EG
Dessinateur :	HME	Tronçon : Montreux - Zweisimmen / Gare de Rougemont	Ech : 1:50 / 1:20
Date :	19.08.2020	Fouille sur la voie existante (voie métrique)	Km : KM 39.100 AU KM 39.800

MOB : Gare de Rougemont
(km 39.298)



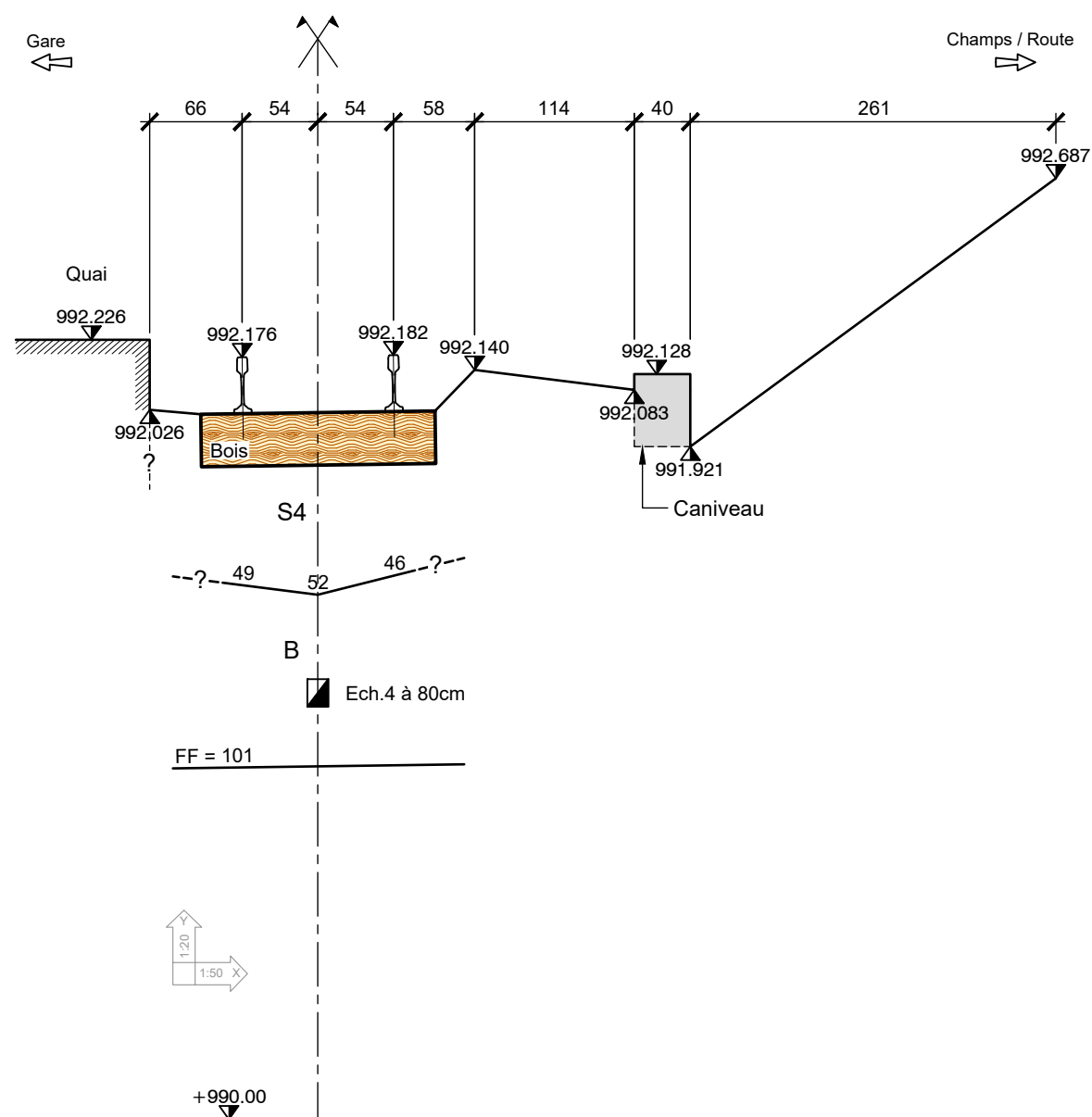
FOUILLE RO-I3 AU KM 39.298 - COEUR



Remarque : Mesures effectuées depuis l'arête supérieure de la traverse
Altitudes en m.s.m, longueurs et profondeurs en cm

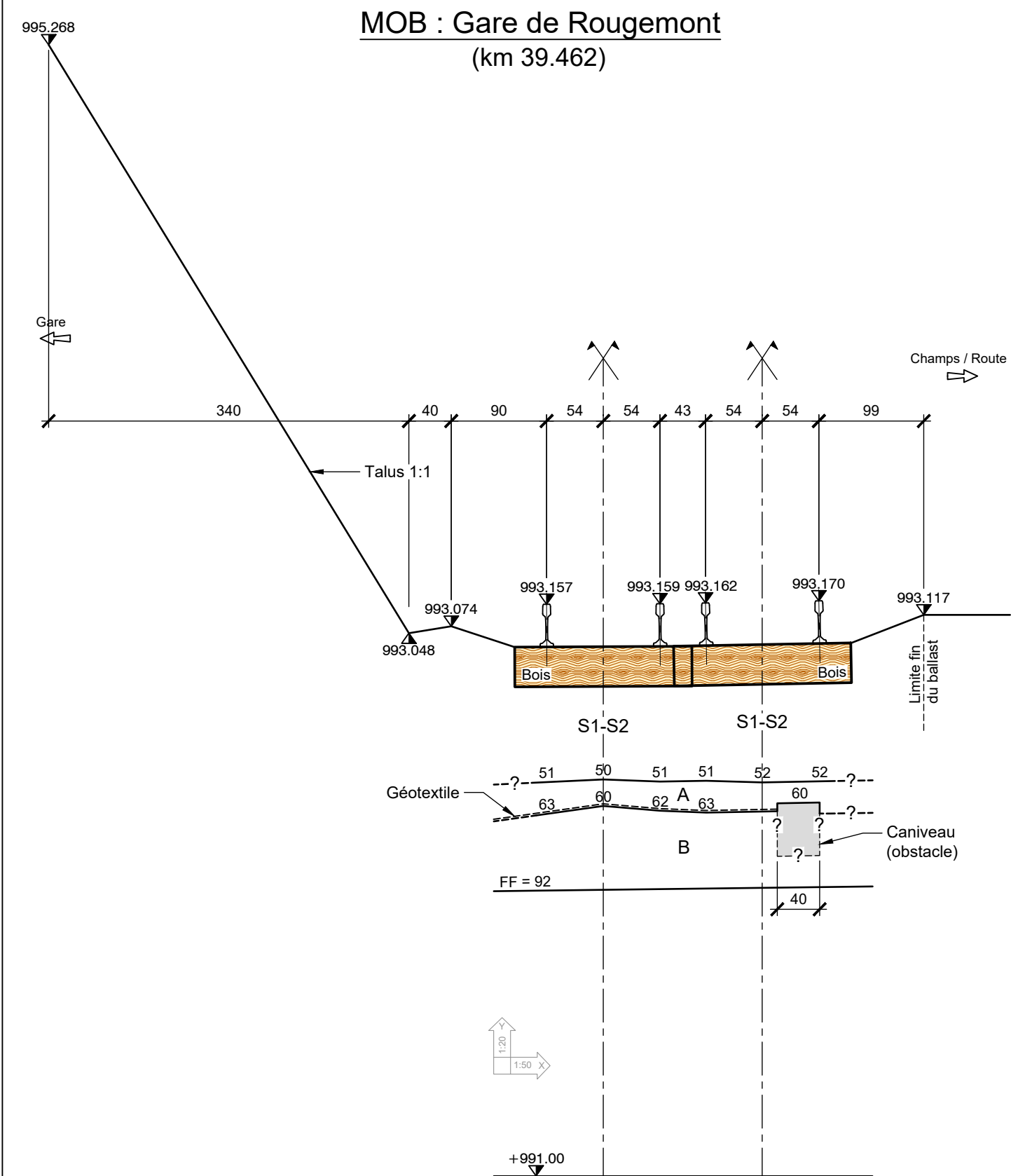
S1-S2	Ballast partie sup.	Propre à assez pollué
S3-S4/S4	Ballast partie inf.	Pollué à très pollué
		ME1 sur couche de base : 5MPa
A	Couche de fondation	Sable limoneux, gris, humide à très humide, trace d'argile, très lâche
B	Sol d'assise	Alluvions du cône de déjection : Argile maigre, olive-brun, humide, ferme
		ME1 au fond de fouille : 5.5MPa ; PP : q_{up} = 90-100kPa

HYDROLOGIE

Couche de fondation humide à très humide. Sol d'assise humide
Eau stagnante au fond de fouille.
Venue d'eau à 0.55m.





 <small>COMPAGNIE DU CHEMIN DE FER MONTREUX, ORFÈVRE ET BERNARD</small>	 <small>geotechnique@kfsa.ch www.kfsa.ch</small>	Fouille au Km 39.462	Plan n° 11649-57
			Rapport N° : 11649-Rapport EG
Dessinateur :	HME	Tronçon : Montreux - Zweisimmen / Gare de Rougemont	Ech : 1:50 / 1:20
Date :	19.08.2020	Fouille sur la voie existante (voie métrique)	Km : KM 39.100 AU KM 39.800



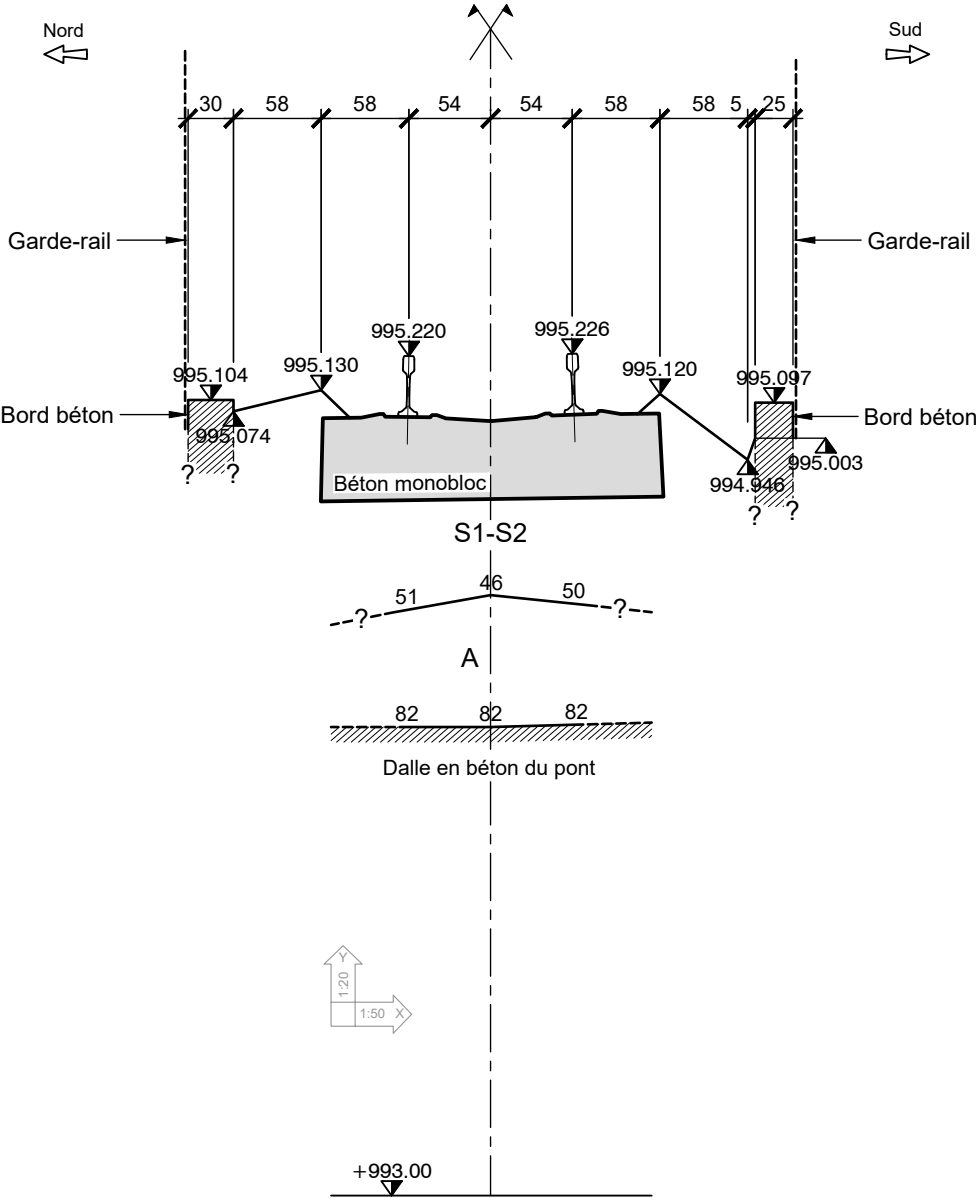
FOUILLE RO-I5 AU KM 39.462 - COEUR

Remarque : Mesures effectuées depuis l'arête supérieure de la traverse
Altitudes en m.s.m, longueurs et profondeurs en cm

S1-S2	Ballast	Propre à assez pollué
		ME1 sur couche de base : 5.8MPa
A	Couche de fondation	Gravier fin limoneux, gris clair, très humide/saturé, très lâche
		Géotextile de séparation couche de fondation - sol d'assise ME1 sur plateforme (sol d'assise) : 8.1MPa
B	Sol d'assise	<u>Alluvions du cône de déjection :</u> Argile maigre, olive-brun, humide, saturé au fond de fouille, ferme à très ferme
		ME1 au fond de fouille : 6.7MPa ; PP : q_{up} = 50-150kPa ; SS : c_{up} = 50-90kPa
HYDROLOGIE		Couche de fondation très humide/saturée. Sol d'assise humide/saturé au fond de fouille

 <small>COMPAGNIE DU CHEMIN DE FER MONTREUX, ORFÈRE ET BERNARD</small>	 <small>geotechnique@kfsa.ch www.kfsa.ch</small>	Fouille au Km 39.569	Plan n° 11649-58
			Rapport N° : 11649-Rapport EG
Dessinateur :	HME	Tronçon : Montreux - Zweisimmen / Gare de Rougemont	Ech : 1:50 / 1:20
Date :	19.08.2020	Fouille sur la voie existante (voie métrique)	Km : KM 39.100 AU KM 39.800



MOB : Gare de Rougemont
(km 39.569)

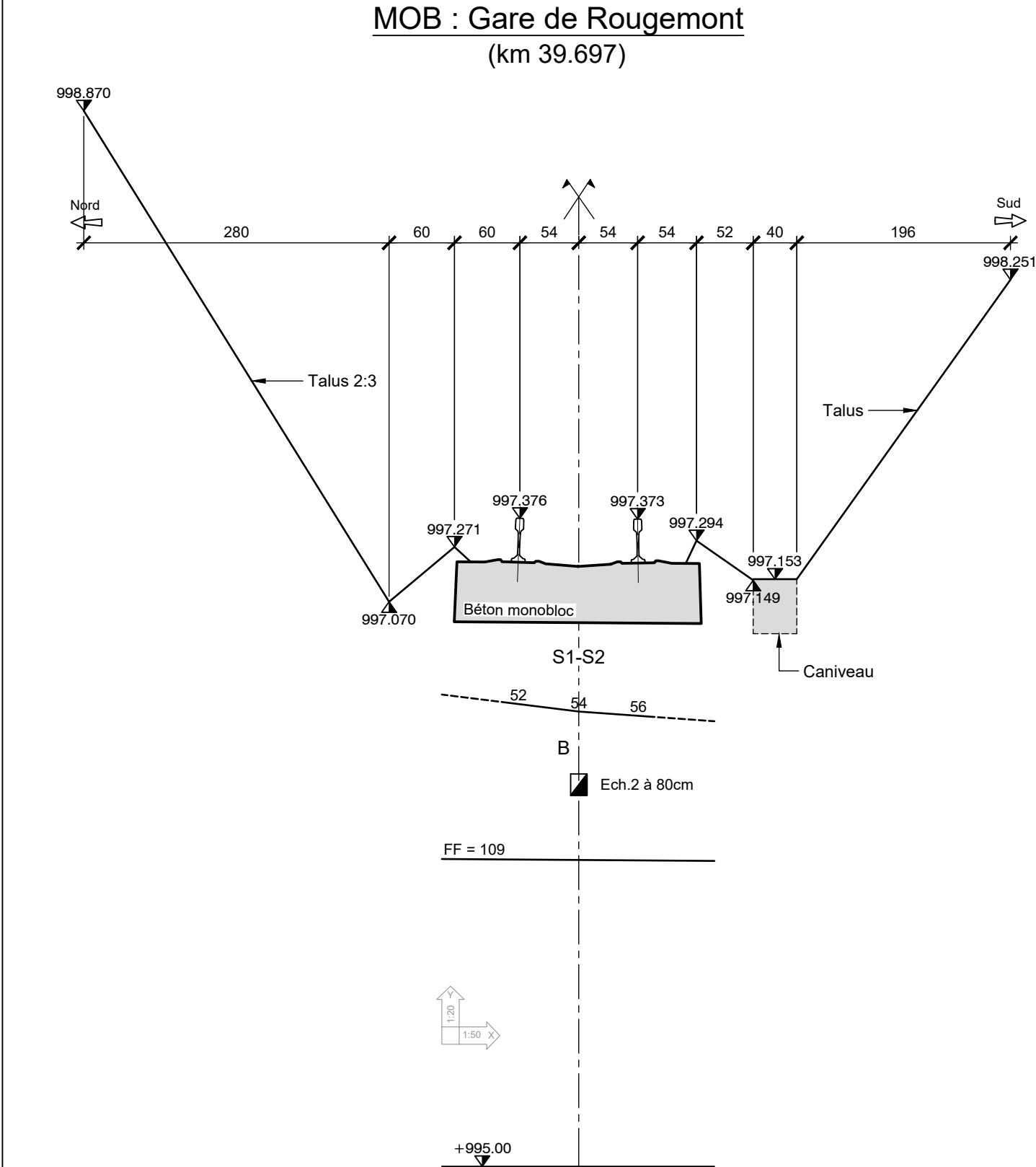


FOUILLE RO-16 AU KM 39.569 (P.I.)

Remarque : Mesures effectuées depuis l'arête supérieure de la traverse
Altitudes en m.s.m, longueurs et profondeurs en cm

S1-S2	Ballast	Propre à assez pollué
A	Couche de fondation	Limons argilo-sableux, brun, humide, très ferme PP : $q_{up} = 120-150\text{kPa}$; SS : $c_{up} = 90\text{kPa}$
B	Sol d'assise	Dalle en béton du P.I.
HYDROLOGIE		Couche de fondation humide

		Fouille au Km 39.697	Plan n° 11649-59
			Rapport N° : 11649-Rapport EG
Dessinateur :	HME	Tronçon : Montreux - Zweisimmen / Gare de Rougemont	Ech : 1:50 / 1:20
Date :	19.08.2020	Fouille sur la voie existante (voie métrique)	Km : KM 39.100 AU KM 39.800



FOUILLE RO-17 AU KM 39.697

Remarque : Mesures effectuées depuis l'arête supérieure de la traverse
Altitudes en m.s.m, longueurs et profondeurs en cm

S1-S2	Ballast	Propre à assez pollué
		ME1 sur couche de base/plateforme : 9.5MPa
B	Sol d'assise	Alluvions du cône de déjection : Argile maigre, avec graviers fins, olive-brun, très humide, ferme à très ferme
		ME1 au fond de fouille : 7.3MPa ; SS : $c_{up} = 50-60kPa$
		Ech.2 : $w = 37.4\%$
HYDROLOGIE		Alluvions du cône de déjection humides à très humides

Nomenclature et description du sol et des essais

1 SONDAGES/FOUILLES DE RECONNAISSANCE

Nomenclature des coupes de sondage

Annexées au présent rapport, les feuilles récapitulatives (log) indiquent pour chaque sondage carotté:

- Les cotes avec l'altitude, la profondeur et l'épaisseur des couches traversées.
- Les observations hydrogéologiques signalées par le sondeur en cours de forage et celles relevées dans le forage non revêtu et/ou dans le tube piézométrique ultérieurement.
- Le profil géotechnique avec la position des échantillons prélevés.
- La classification USCS de l'échantillon de sol, pour la roche, la valeur RQD (Rock Quality Designation) est indiquée dans cette colonne.
- les résultats des essais de battage SPT (Standard Penetration Test) – nbre de coups par 15 cm de pénétration.
- la résistance à la compression uniaxiale mesurée sur carotte à l'aide du pénétromètre de chantier SOILTEST q_{up} (kN/m²)
- la résistance globale au cisaillement mesurée sur carotte à l'aide du scissomètre GEONOR à ailettes C_{us} (kN/m²)
- Les caractéristiques naturelles des sols, teneur en eau w (%), et poids volumique apparent humide γ (kN/m³)
- La description géotechnique des sols
- Le résumé géologique des couches traversées

Nomenclature des relevés de fouilles en dehors des voies

Annexées au présent rapport, les relevés de fouilles indiquent pour chaque fouille:

- La profondeur des couches traversées
- Les observations hydrogéologiques
- La description géotechnique des sols y compris le résultat des mesures in situ suivant :
 - la résistance à la compression uniaxiale mesurée à l'aide du pénétromètre de chantier SOILTEST q_{up} (kN/m²)
 - la résistance globale au cisaillement mesurée à l'aide du scissomètre GEONOR à ailettes C_{us} (kN/m²)
- Le résumé géologique des couches traversées
- Les remarques éventuelles concernant la tenue des parois de fouilles et/ou des venues d'eau

Résultats des essais

Les essais en laboratoire sont récapitulés dans le tableau en annexe donnant :

- Les caractéristiques naturelles des échantillons prélevés :

La teneur en eaux naturelle	w	(%)
Le poids volumique apparent humide	γ	(kN/m ³)
Le poids volumique apparent sec	γ_d	(kN/ m ³)
- La classification USCS de l'échantillon de sol
- Les caractéristiques de la composition granulométrique :

Tamisat pour le gravier	G	(% du poids)
Tamisat pour le sable	S	(% du poids)
Tamisat pour le limon + argile	L+A	(% du poids)
Diamètre max. des grains	\varnothing	max. (mm)
- Les limites d'Atterberg :

Limite de liquidité	w _L	(%)
Limite de plasticité	w _p	(%)
Indice de plasticité	I _p	(%)
- La résistance à la compression uniaxiale mesurée sur carotte à l'aide du pénétromètre de chantier SOILTEST

	q _{up}	(kN/ m ²)
--	-----------------	-----------------------
- La résistance globale au cisaillement mesurée sur carotte à l'aide du scissomètre GEONOR à ailettes

	C _{up}	(kN/m ²)
--	-----------------	----------------------

Désignation de la compacité et consistance des sols selon sn 670 004-28-na

La compacité des sols grossiers est déterminée par les mesures au pénétromètre dynamique SPT ou estimée sur la base de la résistance à la pénétration des tubes carottiers. La corrélation entre les termes utilisés dans les descriptions géotechniques et les mesures figurent dans le tableau suivant :

Sols grossiers - Désignation de la compacité et relations			
Compacité	Indice de densité I _D (%)	Compacité D (-)	Essai de pénétration standard N _{SPT} (-)
Très lâche	< 15	< 0.15	< 4
Lâche	15....35	0.15....0.30	4....10
Moyennement compact	35....65	0.30....0.50	10....30
Compact	65....85	0.50....0.80	30....50
Très compact	85....100	> 0.80	> 50

Note :

Le nombre de coups pour les premiers 15 cm de pénétration est en général ignoré. Le nombre de coups NSPT présenté dans le tableau est pour un enfoncement des derniers 30 cm.

La consistance des sols fins peut être déterminée sur carotte avec des valeurs de la résistance à la compression simple q_u (kN/m²) et/ou la résistance globale au cisaillement S_u (kN/m²). Les résultats des essais de battage SPT peuvent également être utilisés.

La corrélation entre les termes utilisés pour décrire la consistance des sols fins et le résultat des essais in situ est donnée ci-après :

Sols fins - Désignation de la consistance et relations							
Etats du sol	Consistance	Essai manuel 1 selon l'EN ISO 14688-1 (2)	Essai manuel 2 (usuel en Suisse)	Indice de consistance IC (-)	Résistance à la compression uniaxiale q_u (kN /m ²)	Résistance globale au cisaillement S_u (kN /m ²)	Standard Penetration Test N_{SPT} (-)
Liquide W_L	Très molle	Le sol suinte entre les doigts lorsqu'il est compressé dans la main	Le sol se déforme sous son propre poids	< 0.05	< 25	< 10	0....2
Plastique W_P	Molle	Le sol peut être façonné par une légère pression des doigts	Le sol peut être séparé entre le pouce et l'index	0.05....0.25	25....50	10 – 25	2....4
	Ferme (moyenne)	Le sol se désagrège et se brise lorsqu'il est roulé en rouleaux de 3 mm de diamètre sans se briser ni se désagréger	Le pouce s'enfonce sans forcer dans le sol	0.25....0.75	50....100	25 – 50	4....8
	Très ferme (raide)	Le sol se désagrège et se brise lorsqu'il est roulé en rouleaux de 3 mm de diamètre mais est encore suffisamment humide pour être de nouveau façonné	Le pouce s'enfonce dans le sol en forçant	0.75....1.0	100....200	50 – 100	8....15
Semi-solide	Dure	Le sol a séché et est essentiellement de couleur claire. Il ne peut plus être façonné mais se désagrège sous la pression. Il peut être rayé par l'ongle du pouce	Le pouce ne laisse qu'une marque faible sur la surface du sol	> 1.0 w > w_s	200....400	> 100	15....30
W_s	Très dure		Le pouce ne laisse aucune marque en surface du sol.	> 1.0 w > w_s	> 400	---	> 30

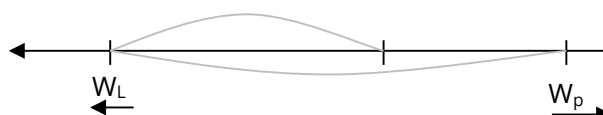
$$I_c = \frac{W_L - W}{I_p}$$

$$I_p = W_L - W_P$$

$$C_U = \frac{q_u}{2}$$

$$q_{up} = 2 \cdot C_{us}$$

W Teneur en eau
 W_L Limite de liquidité
 W_P Limite de plasticité
 W_s Limite de retrait



C_u Résistance au cisaillement non drainé
 C_{us} Résistance au cisaillement non drainé mesurée au scissomètre de poche ou de laboratoire
 q_u Résistance à la compression uniaxiale
 q_{up} Résistance à la compression uniaxiale mesurée au pénétromètre de poche
 S_u Résistance globale au cisaillement

Note :

Le nombre de coups pour les premiers 15 cm de pénétration est en général ignoré. Le nombre de coups N_{SPT} présenté dans le tableau est pour un enfoncement des derniers 30 cm.

Corrélations pour déterminer l'angle de frottement interne des sols à partir des essais de laboratoire

Les corrélations suivantes issues du livre, « Corrélations en mécanique des sols » de Michel Dysli et Walter Steiner, 2011, permettent de déterminer l'angle de frottement interne des sols fins à partir des limites d'Atterberg :

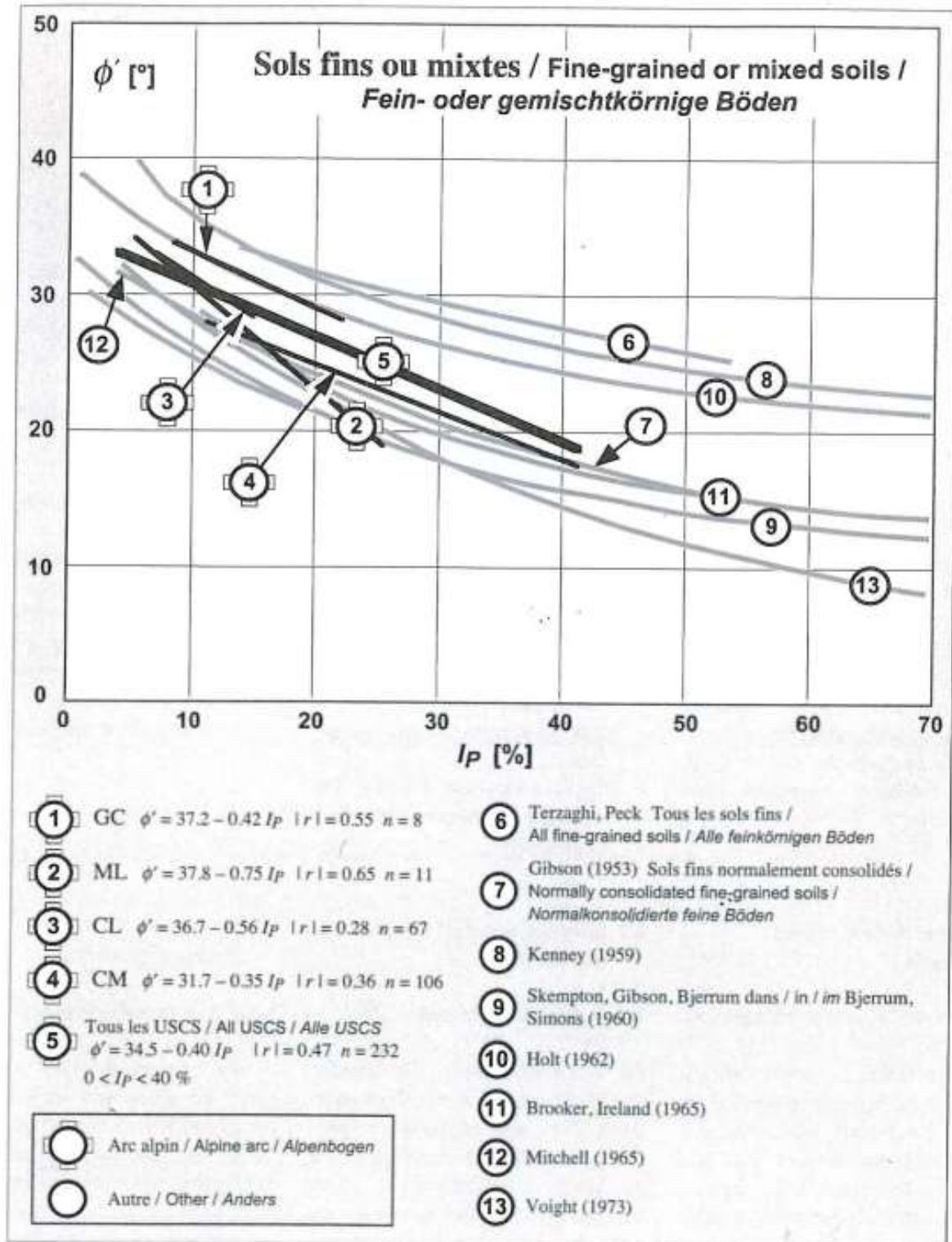
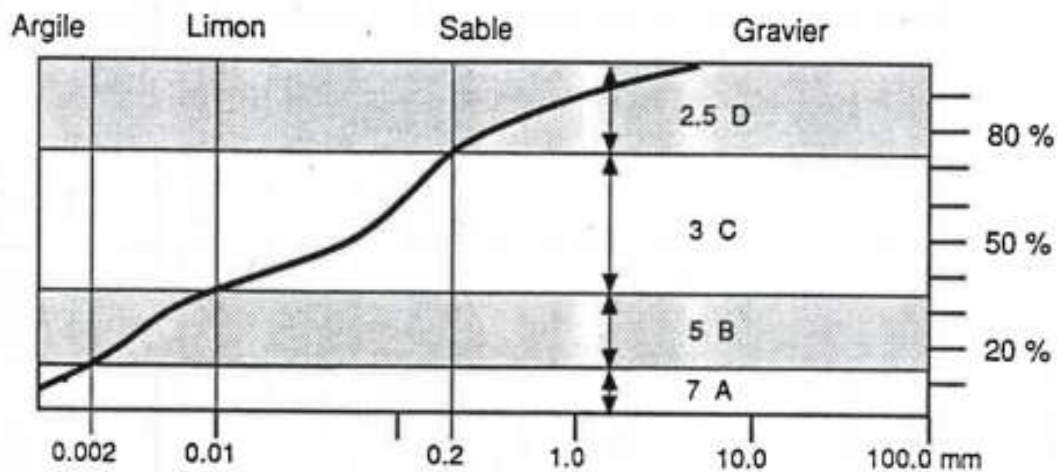


Fig. 3.1
 $\phi' = f(I_p)$

La formule empirique suivante de Dhawan/Brinch-Hansen permet de déterminer l'angle de frottement interne des sols à partir de leurs courbes granulométriques, leurs compacités et la forme/rugosité de leurs grains :

$$\varphi'_{eff} = \varphi'_0 + \varphi'_1 + \varphi'_2 + \varphi'_3$$



Avec :

$$\varphi'_0 = A \text{ (zone d'argiles)} + B \text{ (zone de limons)} + C \text{ (zone de sables)} + D \text{ (zone de graviers)}$$

$$A = 1/7 * \{ \text{fraction granulométrique : \% des grains} < 0.002 \text{ mm} \}$$

$$B = 1/5 * \{ \text{fraction granulométrique : \% des grains compris entre 0.002 et 0.01 mm} \}$$

$$C = 1/3 * \{ \text{fraction granulométrique : \% des grains compris entre 0.01 et 0.2 mm} \}$$

$$D = 1/2.5 * \{ \text{fraction granulométrique : \% des grains compris} > 0.2 \text{ mm} \}$$

φ'_1 : correction pour la compacité :

$$\text{Lâche : } \varphi'_1 = -6 \text{ (} 0 < Dr < 50\% \text{)}$$

$$\text{Moyenne : } \varphi'_1 = 0 \text{ (} 50 \% < Dr < 75\% \text{)}$$

$$\text{Dense : } \varphi'_1 = +6 \text{ (} 75 \% < Dr < 100 \% \text{)}$$

$$\text{Selon } N_{SPT} : \varphi'_1 = 0.24 N_{SPT} - 6 < 6$$

ϕ'_2 : correction pour la forme et la rugosité des grains :

Très anguleux : $\phi'_2 = +1$ (faible sphéricité et forme anguleuse)

Moyen : $\phi'_2 = 0$ (faible sphéricité et forme anguleuse)

Arrondi : $\phi'_2 = -3$ (haute sphéricité et forme arrondie)

Très rond : $\phi'_2 = -5$ (haute sphéricité et forme arrondie)

ϕ'_3 : correction pour la granulométrie :

Uniforme : $\phi'_3 = -3$ ($U < 2$ avec $U = Cud = d_{60}/d_{10}$)

Moyenne : $\phi'_3 = 0$ ($U = 2$)

Étalée : $\phi'_3 = +3$ ($U > 2$)

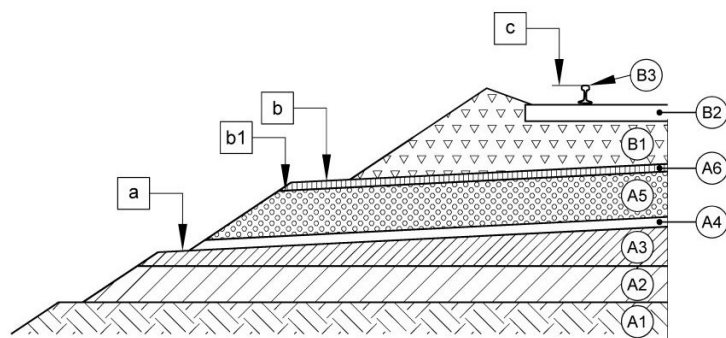
2 FOUILLES DE RECONNAISSANCES POUR ETUDE DU LIT DE BALLAST ET DE L'INFRASTRUCTURE

Dénomination du profil type -super- et infrastructure ferroviaire

Ce paragraphe est issu du document R RTE 21110 et a pour but de rappeler la dénomination des divers couches et éléments qui composent l'infrastructure ferroviaire.

Les définitions des couches et surfaces dans le domaine de la construction ferroviaire figurent dans la norme SN 640 302.

Nous attirons votre attention sur le fait que, par souci du respect de la norme SN 640 302, le terme «forme» de l'ancienne norme est dorénavant désigné par «plate-forme» et le terme «plate-forme» de l'ancienne norme par «couche de base».



	Couches	Surfaces	Exemples de matériaux usuels	
B Superstructure		Plan de roulement (PdR) c		
	B3 Rail		- Acier à rails	
	B2 Traverse		- Béton - Acier - Bois	
	B1 Ballast	b Couche de base	- Roche dure concassée	
A Infrastructure et terrain naturel	A6 Couche d'étanchéité	Couche de base de la couche de fondation b1	- Couche d'étanchéité bitumeuse (+ granulats éventuellement) - Couche d'étanchéité minérale	- Gravier PSS
	A5 Couche de fondation		- Mélange graveleux (GW ou GP)	
	A4 Couche de transition Couche de drainage ¹⁾	a Plate-forme	- Ballast - Gravier - Ballast concassé - Sable - Géosynthétique	
	A3 Terrain naturel amélioré		- Terrain naturel compacté - Stabilisation - Matériaux de substitution	
	A2 Remblai		- Matériaux compactés	
	A1 Terrain naturel		- Sol de fondation	

Tableau 1: Nomenclature et exemples

¹⁾ sur roche fissurée et altérée

Terminologie adoptée pour la description des sols relevés dans les fouilles de reconnaissance*Superstructure (ballast)*

- S1 = Faible pollution due à l'exploitation, criblage possible
- S2 = Pollution moyenne due à l'exploitation, criblage possible
- S3 = Pollution élevée due à l'exploitation, criblage pas possible
- S4 = Pollution par montée argileuse, criblage pas possible

Infrastructure

- A = Couche de fondation
- B = Sols d'assise (terrain naturel)

Ballast

- S1 = Ballast pas ou peu pollué

Cette appellation correspond au ballast propre tel qu'il peut être observé à la surface de la voie. Cette couche ne contient pratiquement pas d'éléments fins ayant pu pénétrer dans la masse par le ruissellement des eaux de surface. Les éléments fins proviennent essentiellement de l'effritement du ballast ou arrivent depuis la partie supérieure de la superstructure ferroviaire (poussière, déchets divers, terre, etc.).

Dans ce cas, le criblage du ballast ne pose aucun problème.

- S2 = Ballast assez pollué

Il s'agit d'un ballast qui contient des sols fins limono-sableux peu à moyennement abondants, mais qui n'enrobent pas complètement les grains du ballast. Cette matrice qui est en partie issue de l'effritement du ballast dû à l'exploitation et de sols rapportés par ruissellement, donne généralement un aspect gris foncé à brunâtre.

Dans ce cas, le criblage du ballast est encore possible.

- S3 = Ballast pollué

Il s'agit d'un ballast dont les causes de la pollution sont identiques à celles du ballast de type S2, mais dont la matrice de limon sableux généralement durcie est abondante et enrobe complètement les grains du ballast.

Dans ce cas, le criblage du ballast n'est plus possible.

- S4 = Ballast très pollué

Dans ce cas, les éléments de ballast sont complètement enrobés par une matrice limoneuse plus ou moins argileuse, souvent gorgée d'eau et/ou saturée. Cette pollution du ballast est due à une remontée des grains les plus fins depuis les couches sous-jacentes. Ce "pompage" est causé par les contraintes dynamiques du trafic ferroviaire et les sols ramollis par l'eau au niveau de la plate-forme (mauvaise évacuation de l'eau).

Là aussi, le criblage n'est bien entendu plus possible.

Couche de fondation

C'est la couche de transition entre le ballast et le sol d'assise. De granulométrie recomposée, elle doit remplir les fonctions suivantes :

- Améliorer la portance de l'infrastructure
- Eviter la contamination du ballast par une remontée des particules fines
- Drainer la superstructure
- Réduire les effets du gel
- Amortir les vibrations (fonction secondaire)

Sols d'assise (sous la forme)

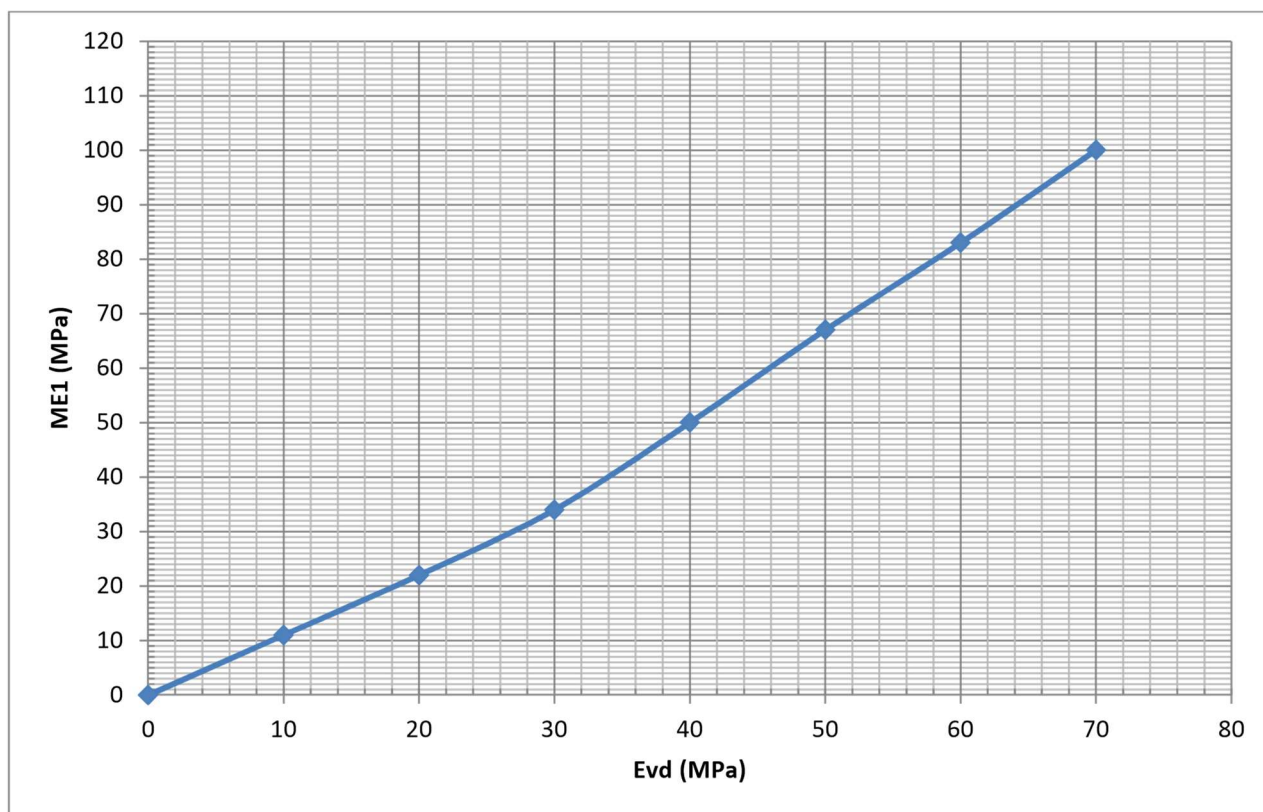
Situés en principe sous la couche de fondation ou alors directement sous le ballast dans certains cas, ils sont constitués du terrain en place ou de sols rapportés en cas de remblais.

Essais à la plaque dynamique légère (déflectomètre à masse tombante)

La plaque dynamique légère est un essai de portance dynamique par masse tombante qui permet de déterminer le module de déformation dynamique E_{vd} du sol et de là le module de compressibilité ME1 ainsi que la classe de portance du sol.

L'essai consiste à relever une masse de 10 kg d'une hauteur constante, puis de la lâcher sur une plaque de 30 cm de diamètre. Cette opération est répétée trois fois dans la phase de préassement (mise en place de la plaque et du sol). S'en suivent trois impacts permettant de mesurer les déformations sous plaque, puis le module élastique E_{vd} du sol.

En utilisant le graphe ci-dessous avec E_{vd} et ME1, puis le tableau ci-dessous corrélant le module ME1 avec la classe de portance du sol, il devient possible d'estimer la compacité/consistance du sol.



Essais à la plaque dynamique légère : corrélation compacité – module M_{E1}			
Consistance	Essai de pénétration standard N_{SPT} (-)	Module M_{E1} (MPa)	Classe de portance
Très molle	0....2	0 à 6	S0 portance très faible
Molle	2....4		
Ferme	4....8	6 à 15	S1 portance faible
Très ferme	8....15		
Dure	15....30	15 à 30	S2 portance moyenne
Très dure	> 30	30 à 60	S3 portance élevée

Essais à la plaque dynamique légère : corrélation compacité – module M_{E1}			
Compacité	Essai de pénétration standard N_{SPT} (-)	Module M_{E1} (MPa)	Classe de portance
Très lâche	< 4	0 à 6	S0 portance très faible
Lâche	4....10	6 à 15	S1 portance faible
Moyennement compact	10....30	15 à 30	S2 portance moyenne
Compact	30....50	30 à 60	S3 portance élevée
Très compact	> 50	60 à 120	S4 portance très élevée

MOB - Réfection de voies

Annexe A2

Gare de Rougemont - km 39.420

Date d'exécution : 10.06.2020

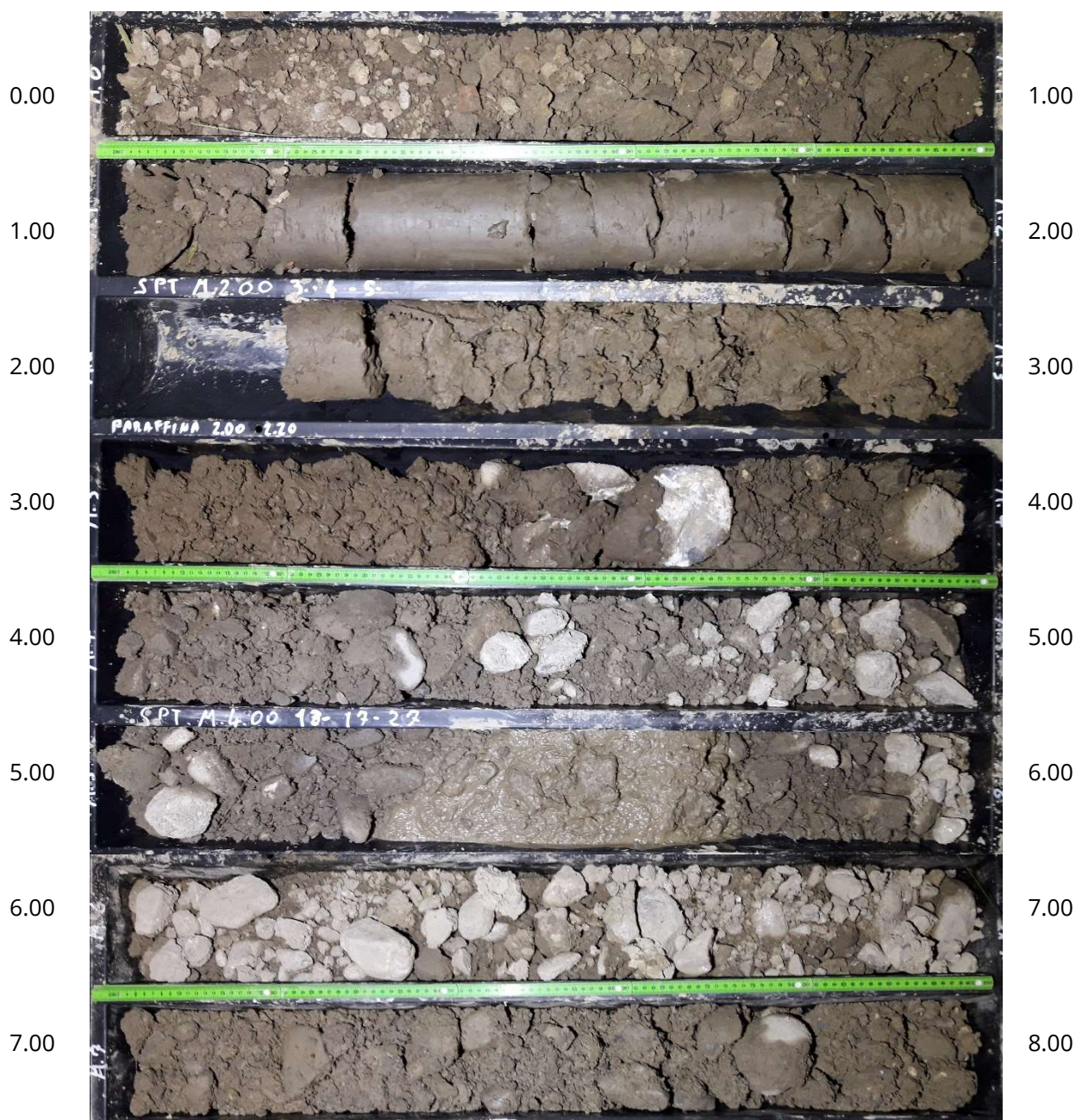
Altitude : 992.50 m/mer

Coordonnées : 2'582'451 / 1'148'590

ECHELLE 1/50

Levé par : EGY

Altitude Epais.	Prof.	Hydro.	PROFIL	USCS ou RQD	SPT	Qu (kpa)	Su (kpa)	w (%)	γ (kN/m3)	DESCRIPTION LITHOLOGIQUE	GEOLOGIE
992.50	0.00									Argile peu limoneuse, rarement sableuse, rares graviers, brun, peu humide, avec racines et radicelles et fragments de terre cuite, ferme	*
992.05 0.75	0.45									Argile peu limoneuse à limoneuse, très rares graviers (subarrondis à subangulaires, fins), brun, peu humide à humide, ferme à très ferme, cohésive, avec rares petits fragments de terre cuite et quelque racine et radicelle	Remblais
991.30	1.20					225 240 240 200	>100 88	29.4	17.6	Argile peu limoneuse, très rares graviers, brune, très humide, très ferme à dure, très cohésive, nombreuses traces d'oxydation (couleur rouge-brun) et de charbon, devient plus limoneuse avec la profondeur	Alluvions du cône de déjection
	2.20				3 4 5	200	24.9	18.9		Argile peu limoneuse à limoneuse, peu sableuse, très graveleuse (subarrondi à subanguleux), et caillouteuse, brune, humide à très humide, très cohésive, très ferme	
	2.80									Gravier subarrondi à subanguleux, argilo-limoneux avec sable, beaucoup de cailloux et quelque bloc, brun, humide, cohésif mais lâche à moyennement compact dans la caisse	
	3.50									Idem mais moins argilo-limoneux et donc peu cohésif à pas cohésif	
	4.70				13 17 27					A 4m, devient compact	
										Gravier subarrondi à subanguleux, argilo-limoneux avec sable, beaucoup de cailloux et quelque bloc, brun, humide à très humide, cohésif, compact	
						15 23 30		3.8		A 6m, devient très compact, peu humide/sec	
										A 8m, devient compact	
984.50	8.00				11 15 22					Hydrogéologie: - Aucune venue d'eau observée Géologie: * Terre végétale et sous-couche	

SONDAGE RO-SV1 – 0.00-8.00 m


RO-FR1 – km 39.345

Date	Météo	Coordonnées	Altitude [msm]
11.06.2020	Pluvieux	X : ~2'582'400 Y : ~1'148'587	~992.30

Profondeur (m)	Profondeur (m)	Description des sols	Résumé géologique
0.00	0.25	Argile, brun foncé, humide, cohésive à très cohésive, avec quelque débris de terre cuite, nombreuses racines et radicelles, ferme	Horizon A
0.25	0.70	Argile, brun foncé, humide, cohésive à très cohésive, avec quelque débris de terre cuite et traces de charbon, moins de racines et radicelles, très ferme à dure	Horizon B
0.70	2.50	<p>Côté talus : Argile, gris-brun foncé avec nuances n'oxydation rougeâtres, humide, très cohésive, très ferme à dure. A partir de 1.70 m couleur gris-gris foncé bleuté. Qu 0.90 m = 150 ; Qu 1.00 m = 150 ; Qu 1.10 m = 150 Su 0.80 m = 84 ; Su 0.95 m = 96 ; Su 1.10 m = 87</p> <p>EVD à 1.20 m = 19.45 MN/m² ; ME1 = 21.0</p> <p>Côté rails : Gravier (drainage) présent de 0.20 à 1.50 m de profondeur.</p>	Alluvions du cône de déjection
2.50	3.80	Couche de 5 cm d'oxydation rouge et noire, encroûtée, ensuite gravier subanguleux, très argilo-limoneux, peu sableux, brun foncé, très humide, cohésif, avec aussi des pierres et des blocs, compact	

Remarques : Bonne tenue des parois. Aucune venue d'eau.



RO-FR1 – km 39.345 – suite



RO-FR2 – km 39.475

Date	Météo	Coordonnées	Altitude [msm]
14.06.2020	Pluvieux	X : ~2'582'507 Y : ~1'148'603	~ 993.50

Profondeur* (m)	(m)	Description des sols	Résumé géologique
0.00	0.25	Limon peu finement sableux, brun foncé, peu humide, avec racines et radicelles, peu cohésif et pulvérulent, ferme	Horizon A
0.25	1.00	Limon peu finement sableux, brun, peu humide, moins de racines et radicelles, parfois avec gravier, pierres et blocs, dur Qu 0.70 m = 225 / 250 / 275 ; Su 0.70 m = 166	Horizon B
1.00	2.80	Argile, brun, humide à très humide, très cohésive, avec une passe plus ou moins sableuse de 1.60 à 1.80 m, molle à très ferme Qu 1.20 m = 100 / 100 / 125 ; Su 1.20 m = 100 Qu 1.70 m = 25 / 25 / 25 ; Su 1.70 m = 48 / 66 Qu 1.90 m = 100 / 100 / 125 ; Su 1.90 m = 68 / 96 EVD à 2.20 m = 4.00 MN/m² ; ME1 = 4 MN/m²	Alluvions du cône de déjection
2.80	3.60	Gravier subanguleux dans matrice très argileuse, limono-sableuse, brun avec nuances ocre et brun foncé, humide, moyennement compact	

*Depuis le talus, depuis le rail calculer -1.00 m

Remarques : Bonne tenue des parois. Aucune venue d'eau.



RO-FR3 – km 39.650

Date	Météo	Coordonnées	Altitude [msm]
14.06.2020	Pluvieux	X : ~2'582'685 Y : ~1'148'604	~ 997.50

Profondeur* (m)	(m)	Description des sols	Résumé géologique
0.00	0.30	Argile plus ou moins limoneuse, rarement graveleuse (fin), brun foncé, humide, cohésive, nombreuses racines et radicelles, ferme	Horizon A
0.30	0.80	Argile plus ou moins limoneuse, avec gravier subanguleux (ballast ?), brun – brun foncé, humide, cohésive, moins de racines et radicelles, très ferme Qu 0.40 m = 125/175/225	Horizon B
0.80	1.40	Argile, quelque gravier, très peu sableuse, brun, humide, cohésive, avec rares traces d'oxydation, ferme à très ferme Qu 1.00 m = 75 / 100 / 100 / 125 ; Su 1.00 m = 94 / 106	Alluvions du cône de déjection
1.40	2.00	Argile sableuse, avec graviers et pierres, brun, humide, avec traces d'oxydation couleur ocre et aussi des pierres oxydées, molle à très ferme Qu 1.50 m = 25 / 50 / 75 / 175 ; Su 1.50 m = 66 / 112 EVD à 1.80 m = 5.88 MN/m² ; ME1 = 5.8	
2.00	4.20	Argile, brun-brun foncé, humide, très cohésive, avec rares graviers (surtout fins), très ferme	

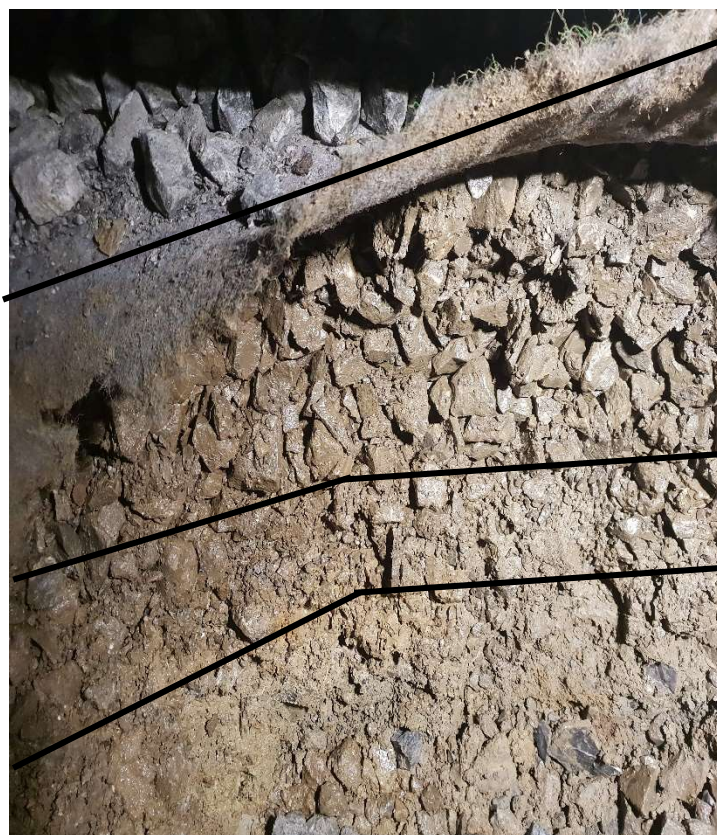
*Depuis le talus, depuis le rail calculer -0.80 m

Remarques : Bonne tenue des parois. Aucune venue d'eau.



MOB, GARE DE ROUGEMONT

FOUILLE RO-I1 AU KM 39.104 – VUE DIRECTION ZWEISIMMEN



Ballast S1-S2; épaisseur 8 cm

Géotextile

Ancien ballast S1-S2; épaisseur 30 à 33 cm

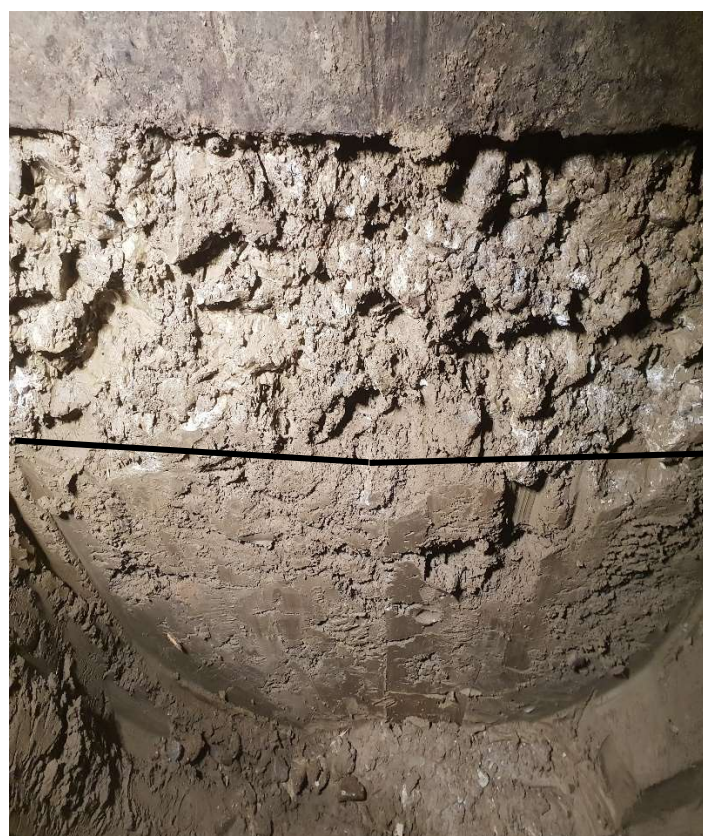
Ancien ballast S3-S4; épaisseur 9 à 13 cm

ME1 sur sol d'assise : 11 MPa

B. Sol d'assise : remblais issus du cône d'alluvions (cône de déjection)

Gravier argileux avec sable, brun, humide, lâche

FOUILLE RO-I2 AU KM 39.268 – VUE DIRECTION ZWEISIMMEN



Ballast S4/S2-S3; épaisseur 22 à 25 cm

ME1 sur sol d'assise : 5 MPa

B. Sol d'assise : cône d'alluvions (cône de déjection)Argile maigre, brun-olive, très humide, ferme à très ferme, PP : $q_{up} = 100-150$ kPa, SS : $c_{up} = 100$ kPa

ME1 sur FF à 100 cm : 9 MPa

FOUILLE RO-I3 AU KM 39.298, VUE DIRECTION ZWEISIMMEN



Ballast S1-S2 ; épaisseur 12 à 24 cm

Ballast S3-S4/S4 ; épaisseur 6 à 12 cm

ME1 sur couche de fondation : 5 MPa

A. Couche de fondation

Sable limoneux, gris, humide à très humide, trace d'argile, très lâche

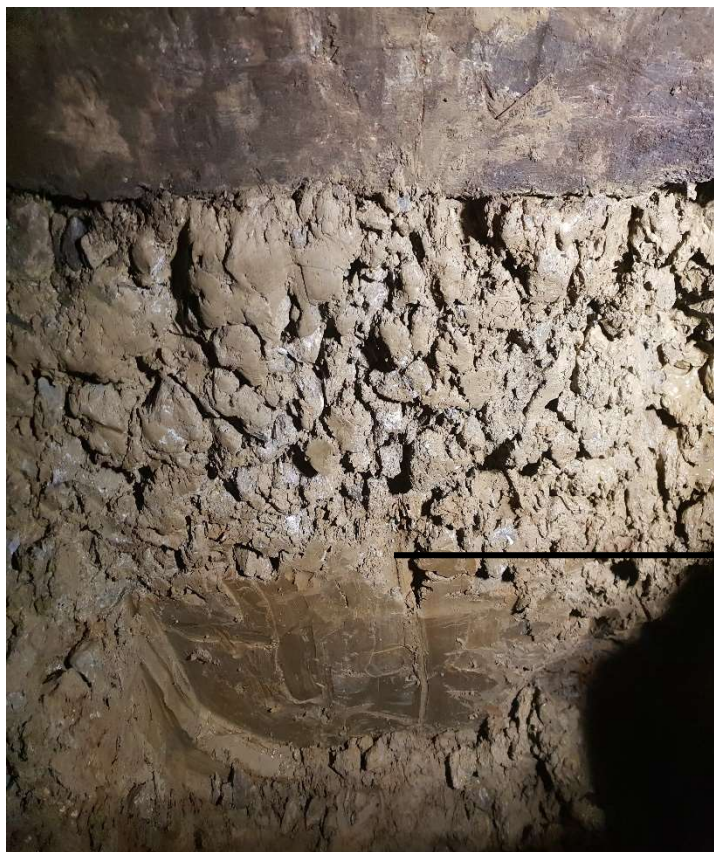
B. Sol d'assise : cône d'alluvions (cône de déjection)

Argile maigre, olive-brun, humide, ferme. PP : $q_{up} = 90-100$ kPa

Eau stagnant au FF ; venue d'eau à 0.55 m

ME1 sur FF à 102 cm : 5.5 MPa

FOUILLE RO-I4 AU KM 39.370, VUE DIRECTION MONTREUX



Ballast S4 ; épaisseur 31 à 37 cm

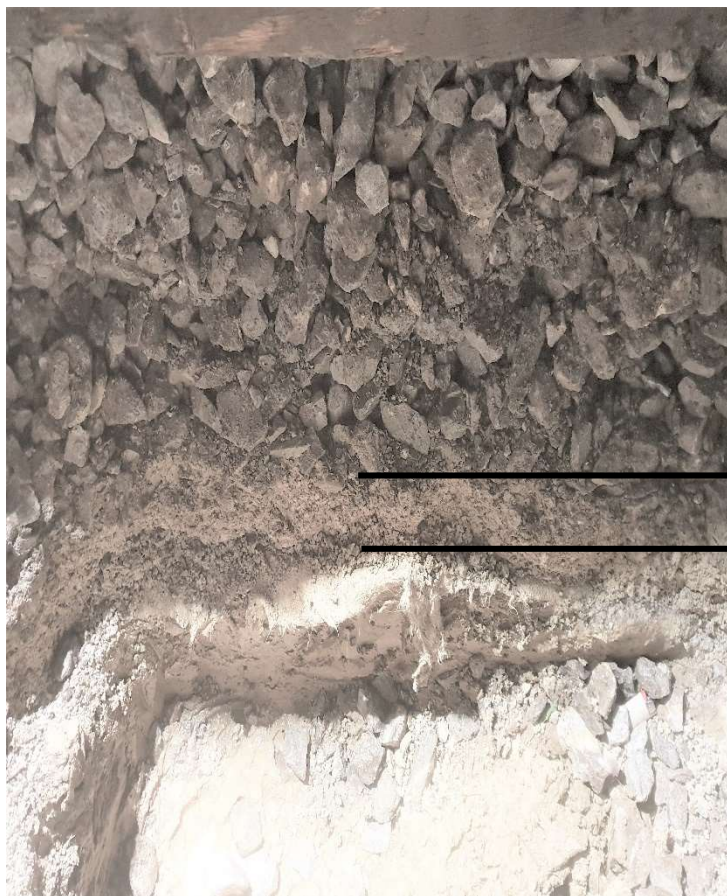
ME1 sur sol d'assise : 5.2 MPa

B. Sol d'assise : cône d'alluvions (cône de déjection)

Argile maigre, humide à très humide (frange entre ballast et sol d'assise), olive-brun, ferme

ME1 sur FF à 101 cm : 5 MPa

FOUILLE RO-I5 AU KM 39.462, VUE DIRECTION ZWEISIMMEN



Ballast S1-S2 ; épaisseur 35 à 37 cm

ME1 sur couche de fondation : 5.8 MPa

A. Couche de fondation

Gravier fin limoneux, gris clair, très humide/saturé, très lâche

Géotextile ME1 sur sol d'assise : 8.1 MPa

B. Sol d'assise : cône d'alluvions (cône de déjection)

Argile maigre, olive-brun, humide, saturé au fond de fouille, ferme à très ferme. PP : $q_{up} = 50-150$ kPa, SS : $c_{up} = 50-90$ kPa

ME1 sur FF à 92 cm: 6.7 MPa

FOUILLE RO-I6 AU KM 39.569 (PI), VUE DIRECTION MONTREUX



Ballast S1-S2 ; épaisseur 24 à 38 cm

A. Couche de fondation

Limon argilo-sableux, brun, humide, très ferme. PP : $q_{up} = 125-150$ kPa, SS : $c_{up} = 90$ kPa

B. Béton PI

FOUILLE RO-I7 AU KM 39.697, VUE DIRECTION MONTREUX



Ballast S1-S2 ; épaisseur 30 à 34 cm

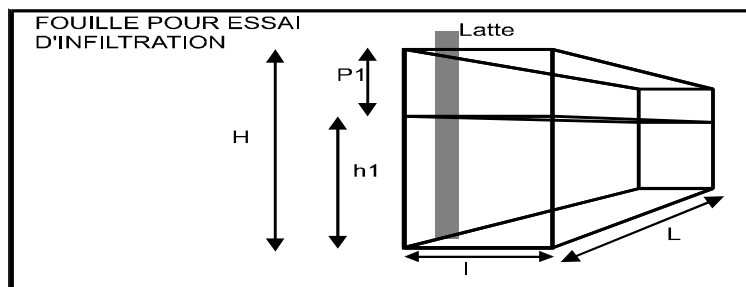
ME1 sur sol d'assise : 9.5 MPa

B1. Sol d'assise : cône d'alluvions (cône de déjection)

Argile maigre, avec graviers fins, olive-brun, très humide, ferme à très ferme. SS : cup = 50-60 kPa

ME1 sur FF à 100 cm: 7.3 MPa

PROJET : MOB - Réfection de voies - Gare de Rougemont
LIEU : Commune de Rougemont
N° AFFAIRE : 11649
FOUILLE n° : RO-FR1
TYPE D'ESSAI REALISE : Essai à charge variable
COLLABORATEUR : EGY
DATE : 11.06.2020
METEO : Pluvieux



$$k = \frac{-C}{60 * (t_2 - t_1)} x \ln \frac{H - P_2 + C}{H - P_1 + C}$$

$$\text{avec } C = \frac{L * I}{2 * (L + I)}$$

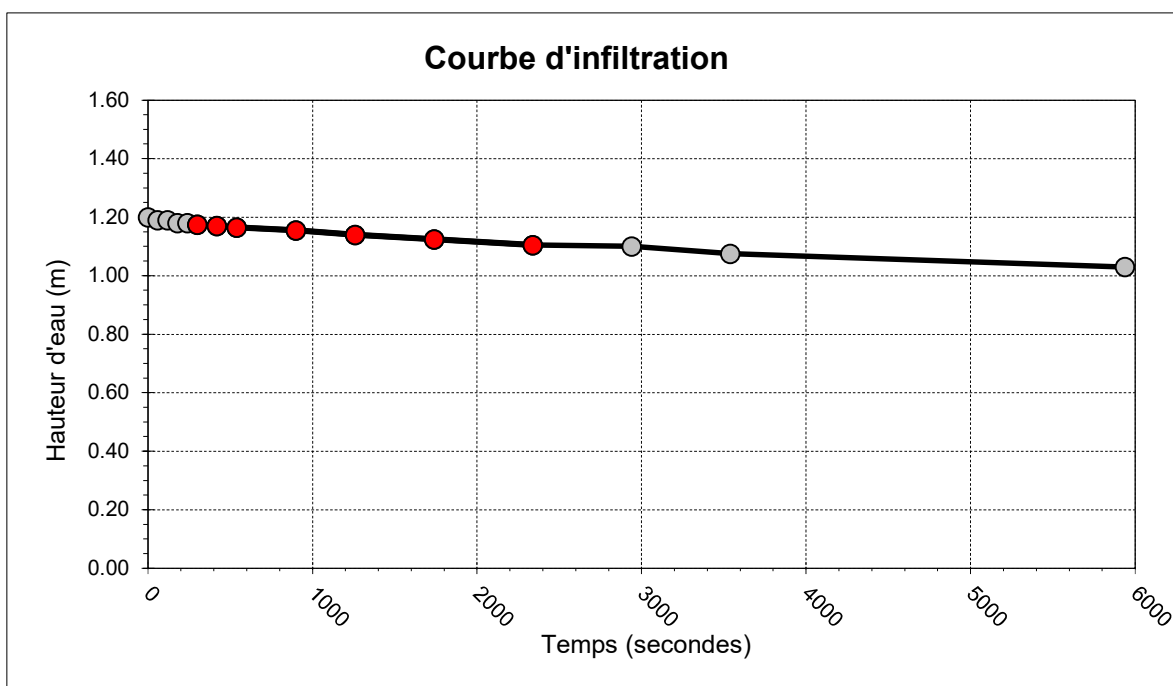
Dimension moyenne de la fouille dans la tranche mouillée				
Hauteur fouille	Longueur fouille	Largeur fouille	Hauteur piquet de référence	Constante
H [m]	L [m]	I [m]	[m]	C
3.80	1.80	1.10	0.65	0.3414

Mesures et perméabilité selon la formule de Porchet						
Mesures	Heure	Temps [s]	P brut [m]	P1 [m]	h1 [m]	k [m/s]
1	22:30:00	0	3.250	2.600	1.20	
2	22:31:00	60	3.260	2.610	1.19	3.7E-05
3	22:32:00	120	3.260	2.610	1.19	0.0E+00
4	22:33:00	180	3.270	2.620	1.18	3.7E-05
5	22:34:00	240	3.270	2.620	1.18	0.0E+00
6	22:35:00	300	3.275	2.625	1.18	1.9E-05
7	22:37:00	420	3.280	2.630	1.17	9.4E-06
8	22:39:00	540	3.285	2.635	1.17	9.4E-06
9	22:45:00	900	3.295	2.645	1.16	6.3E-06
10	22:51:00	1260	3.310	2.660	1.14	9.6E-06
11	22:59:00	1740	3.325	2.675	1.13	7.2E-06
12	23:09:00	2340	3.345	2.695	1.11	7.8E-06
13	23:19:00	2940	3.350	2.700	1.10	2.0E-06
14	23:29:00	3540	3.375	2.725	1.08	1.0E-05
15	00:09:00	5940	3.420	2.770	1.03	4.6E-06

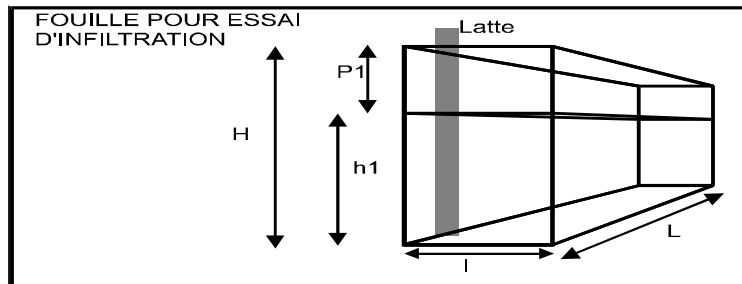
Moyenne						k [m/s]
6		60		2.61	1.19	7.2E-06
12		2940		2.70	1.10	

Infiltration spécifique					
Surface mouillée : varie en fonction du temps = fond + moitié hauteur d'eau max					
Mesures	Temps [s]	h [m]	Surf mouillée totale [m ²]	Infiltration spécifique [l/s/m ²]	Infiltration [l/min/m ²]
1	0	1.200	5.43		
2	60	1.190	5.43	0.06	3.6
3	120	1.190	5.43	0.00	0.0
4	180	1.180	5.43	0.06	3.6
5	240	1.180	5.43	0.00	0.0
6	300	1.175	5.43	0.03	1.8
7	420	1.170	5.43	0.02	0.9
8	540	1.165	5.43	0.02	0.9
9	900	1.155	5.43	0.01	0.6
10	1260	1.140	5.43	0.02	0.9
11	1740	1.125	5.43	0.01	0.7
12	2340	1.105	5.43	0.01	0.7
13	2940	1.100	5.43	0.00	0.2
14	3540	1.075	5.43	0.02	0.9
15	5940	1.030	5.43	0.01	0.4

Moyenne	[l/s/m ²]	[l/min/m ²]
6 à 12	1.6E-02	0.94



PROJET : MOB - Réfection de voies - Gare de Rougemont
LIEU : Commune de Rougemont
N° AFFAIRE : 11649
FOUILLE n° : RO-FR2
TYPE D'ESSAI REALISE : Essai à charge variable
COLLABORATEUR : EGY/SVU
DATE : 14.06.2020
METEO : Pluvieux



$$k = \frac{-C}{60 * (t_2 - t_1)} x Ln \frac{H - P_2 + C}{H - P_1 + C}$$

$$\text{avec } C = \frac{L * I}{2 * (L + I)}$$

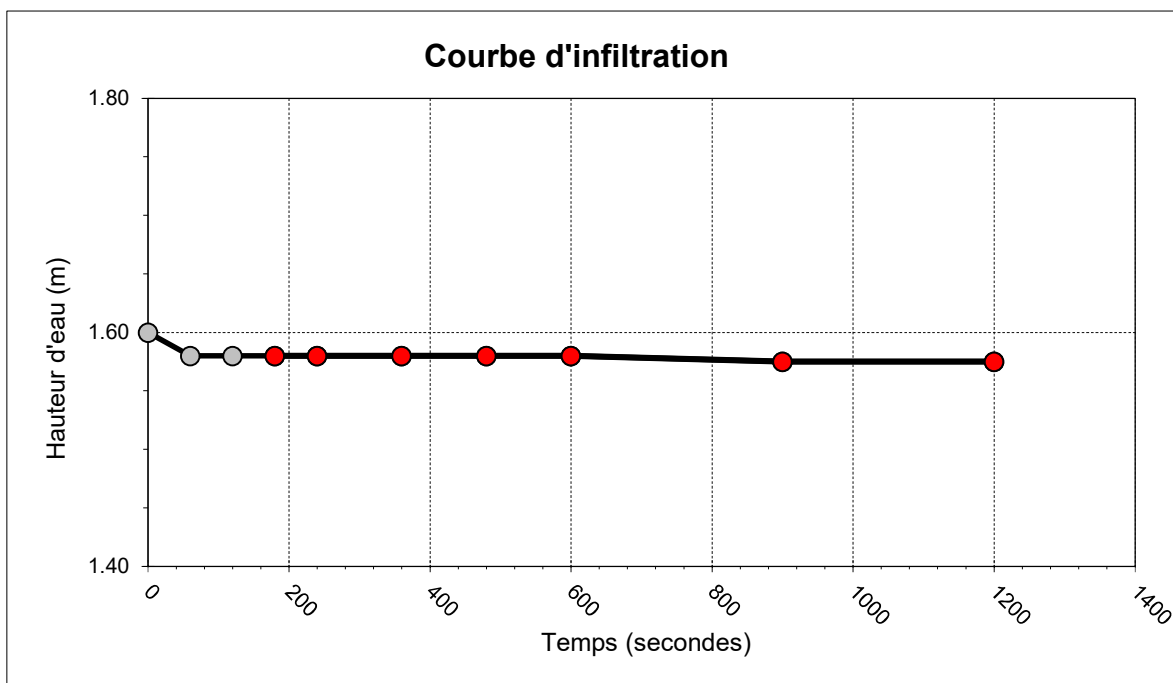
Dimension moyenne de la fouille dans la tranche mouillée				
Hauteur fouille H [m]	Longueur fouille L [m]	Largeur fouille I [m]	Hauteur piquet de référence [m]	Constante C
2.60	3.00	0.80	0.63	0.3158

Mesures et perméabilité selon la formule de Porchet						
Mesures	Heure	Temps [s]	P brut [m]	P1 [m]	h1 [m]	k [m/s]
1	00:00:00	0	1.630	1.000	1.60	
2	00:01:00	60	1.650	1.020	1.58	5.5E-05
3	00:02:00	120	1.650	1.020	1.58	0.0E+00
4	00:03:00	180	1.650	1.020	1.58	0.0E+00
5	00:04:00	240	1.650	1.020	1.58	0.0E+00
6	00:06:00	360	1.650	1.020	1.58	0.0E+00
7	00:08:00	480	1.650	1.020	1.58	0.0E+00
8	00:10:00	600	1.650	1.020	1.58	0.0E+00
9	00:15:00	900	1.655	1.025	1.58	2.8E-06
10	00:20:00	1200	1.655	1.025	1.58	0.0E+00

Moyenne						k [m/s]
4		180		1.02	1.58	8.2E-07
10		1200		1.03	1.58	

Infiltration spécifique					
Surface mouillée : varie en fonction du temps = fond + moitié hauteur d'eau max					
Mesures	Temps [s]	h [m]	Surf mouillée totale [m ²]	Infiltration spécifique [l/s/m ²]	Infiltration [l/min/m ²]
1	0	1.600	8.40		
2	60	1.580	8.40	0.10	5.7
3	120	1.580	8.40	0.00	0.0
4	180	1.580	8.40	0.00	0.0
5	240	1.580	8.40	0.00	0.0
6	360	1.580	8.40	0.00	0.0
7	480	1.580	8.40	0.00	0.0
8	600	1.580	8.40	0.00	0.0
9	900	1.575	8.40	0.00	0.3
10	1200	1.575	8.40	0.00	0.0

Moyenne	[l/s/m ²]	[l/min/m ²]
6 à 12	9.5E-04	0.06



Récapitulatif des essais laboratoire

 N° Affaire
11649

 Etude
Rougemont - Renouvellement complet de la voie - km 39.100 à 39.800

 Date de rapport
30.06.2020

	Echantillon	Echantillon n°		1	2	3	4	5	6	7	8
		Sondage n°		RO-I1, km 39.104	RO-I7, km 39.697	RO-I2, km 39.268	RO-I4, km 39.370	R0-SV1	R0-SV1	R0-SV1	R0-SV1
		prof.: de	[m]	1	0.8	0.8	0.8	1.50 - 1.80	2.00 - 2.20	3.00 - 3.50	6.00- 6.50
		Conditionnement échantillon (I: intact; R: remanié)		R	R	R	R	R	I	R	R
		Classification USCS		GC							
EL00	Ouverture	Pénétromètre de poche q_{up}	[kPa]			150	275	175	175		
		Scissomètre pic c_{up}	[kPa]				86	14	80		
		rés. c_{ur}	[kPa]				24		16		
EL01	Caractéris- tiques de l'état du sol	w	[%]	15.6	37.4	38.3	25.4	29.4	24.9	9.9	3.8
γ		[kN/m³]	19.5	17.7	16.9	19.5	17.6	18.9			
γ_d		[kN/m³]	16.8	12.9	12.2	15.5	13.6	15.1			
EL03		γ_s	[kN/m³]								
		e	[-]								
		Sr	[-]								
EL04	Limites Atterberg	w _L	[%]	26.7	37.9	44.5	36.5				
		w _P	[%]	14.1	19.9	23.0	19.5				
		I _P	[%]	12.6	18.0	21.5	17.0				
		I _C	[-]	0.9	0.0	0.3	0.7				
EL05	Granulométrie	C _{ud}	[-]								
		C _{cd}	[-]								
		Ø max	[mm]	75						65	61
		Gravier 2 à 63 [mm]	[%]	64.6						71.4	57.7
		Sable 0.063 à 2 [mm]	[%]	15.7						14.9	24.3
		Limon+Argile < 0.063 [mm]	[%]	19.7						13.7	18.1
		EL06	Limon 0.002 à 0.063 [mm]	[%]							
	Argile < 0.002 [mm]	[%]									

N° Affaire
11649

Etude
**Rougemont - Renouvellement complet de la voie
Km 39.100 à 39.800**

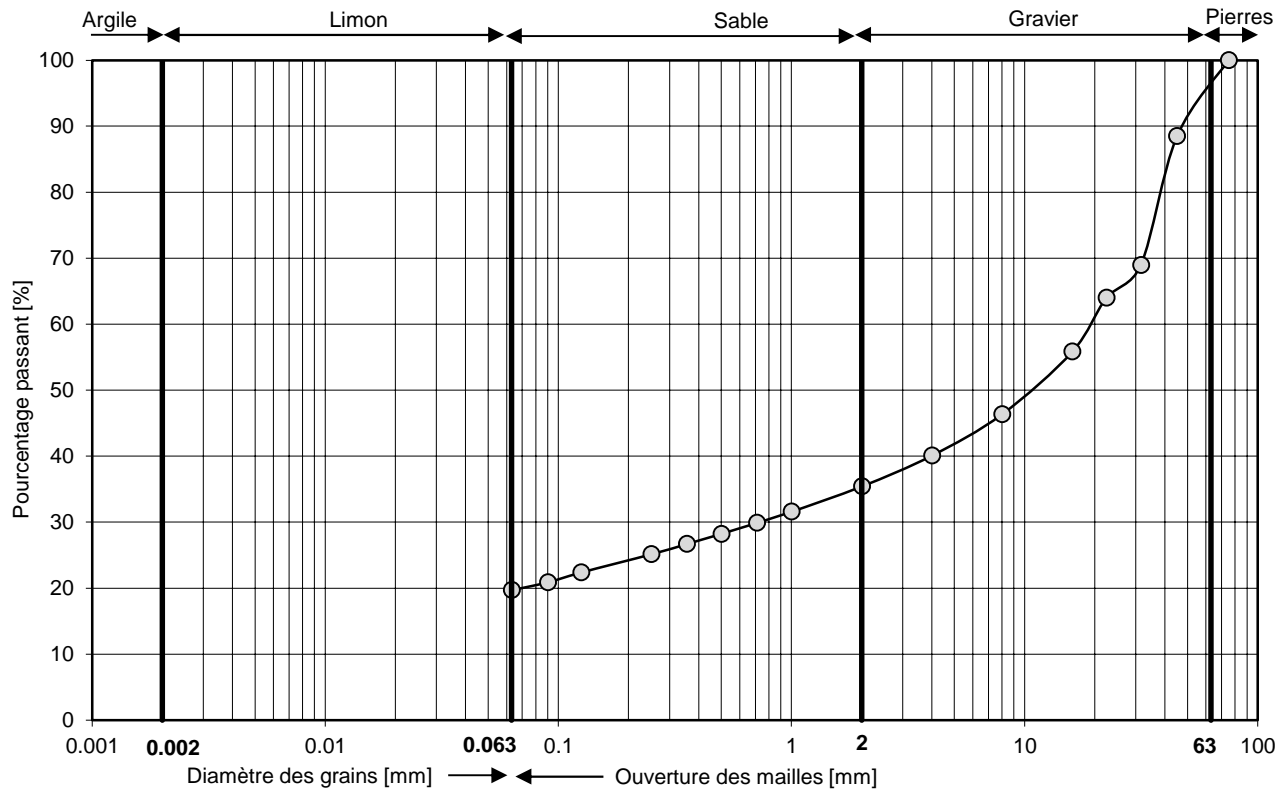
Profondeur
1.00 m

N° Sondage
R0-I1-Km 39.104

Date essai
16.06.2020

N° Echantillon
1

Poids spécifique (estimé) $\gamma_s =$ **kN/m³**
 Limite de liquidité $w_L =$ **26.7 %**
 Limite de plasticité $w_P =$ **14.1 %**
 Indice de plasticité $I_p =$ **12.6 %**



Gravier 2mm < Ø < 63 mm [%]	Sable 0.063 < Ø < 2 mm [%]	Limon + Argile Ø < 0.063mm [%]	Limon 0.002 < Ø < 0.063mm [%]	Argile Ø < 0.002mm [%]	Degré d'uniformité C_{ud} [-]	Courbure C_{cd} [-]
64.6	15.7	19.7	-	-	-	-

Classification USCS

GC

Paramètres d'essai

Ømax: 75mm

Ing. / Resp.

CBE

Opérateur

SUI

Remarques

N° Affaire
11649

Etude
**Rougemont - Renouvellement complet de la voie
Km 39.100 à 39.800**

Profondeur
3.00 - 3.50 m

N° Sondage
R0-SV1

Date essai
16.06.2020

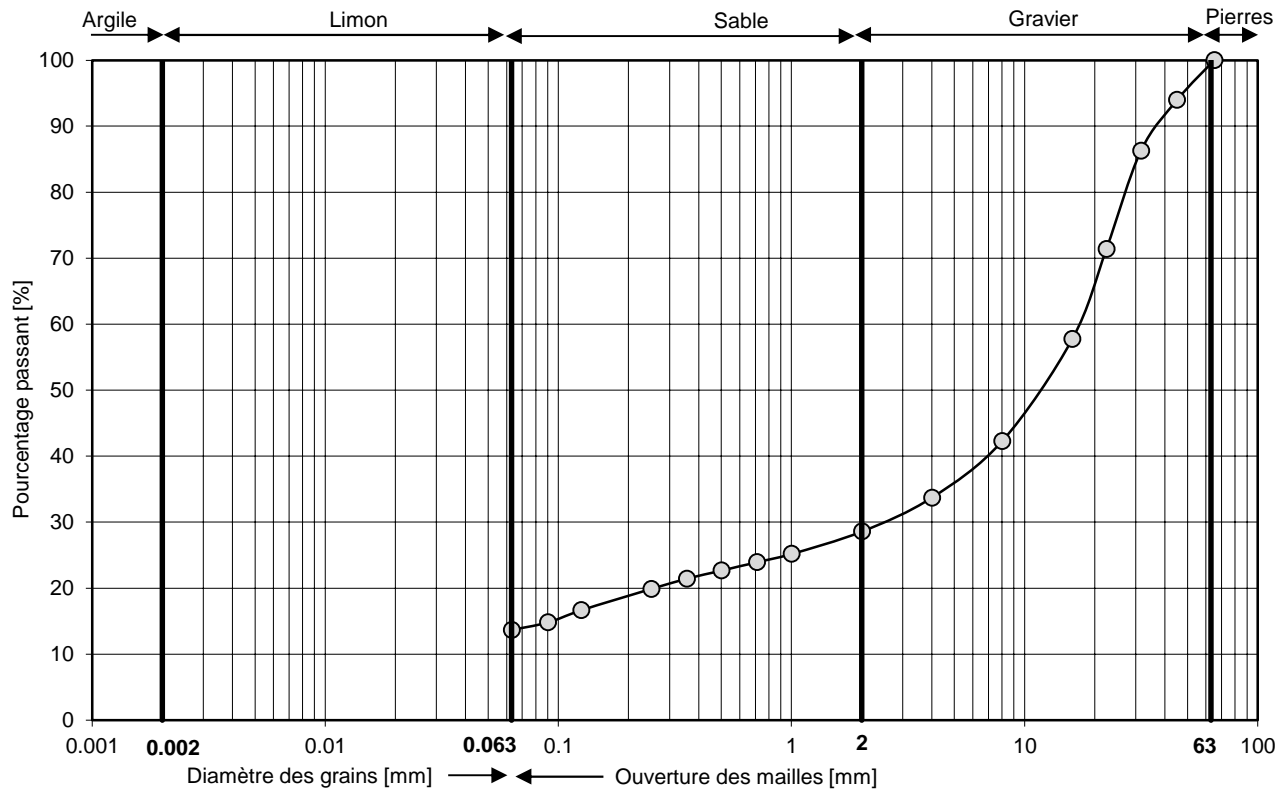
N° Echantillon
7

Poids spécifique (estimé)
 $\gamma_s =$ kN/m³

Limite de liquidité
 $w_L =$

Limite de plasticité
 $w_P =$

Indice de plasticité
 $I_p =$ -



Gravier 2mm < Ø < 63 mm [%]	Sable 0.063 < Ø < 2 mm [%]	Limon + Argile Ø < 0.063mm [%]	Limon 0.002 < Ø < 0.063mm [%]	Argile Ø < 0.002mm [%]	Degré d'uniformité C_{ud} [-]	Courbure C_{cd} [-]
71.4	14.9	13.7	-	-	-	-

Classification USCS

Paramètres d'essai

Ømax: 65mm

Ing. / Resp.

CBE

Opérateur

SUI

Remarques

N° Affaire

11649

Etude

Rougemont - Renouvellement complet de la voie

Profondeur

6.00 - 6.50 m

N° Sondage

RO-SV1

Date essai

16.06.2020

Km 39.100 à 39.800

N° Echantillon

8

Poids spécifique (estimé)

 $\gamma_s =$ kN/m³

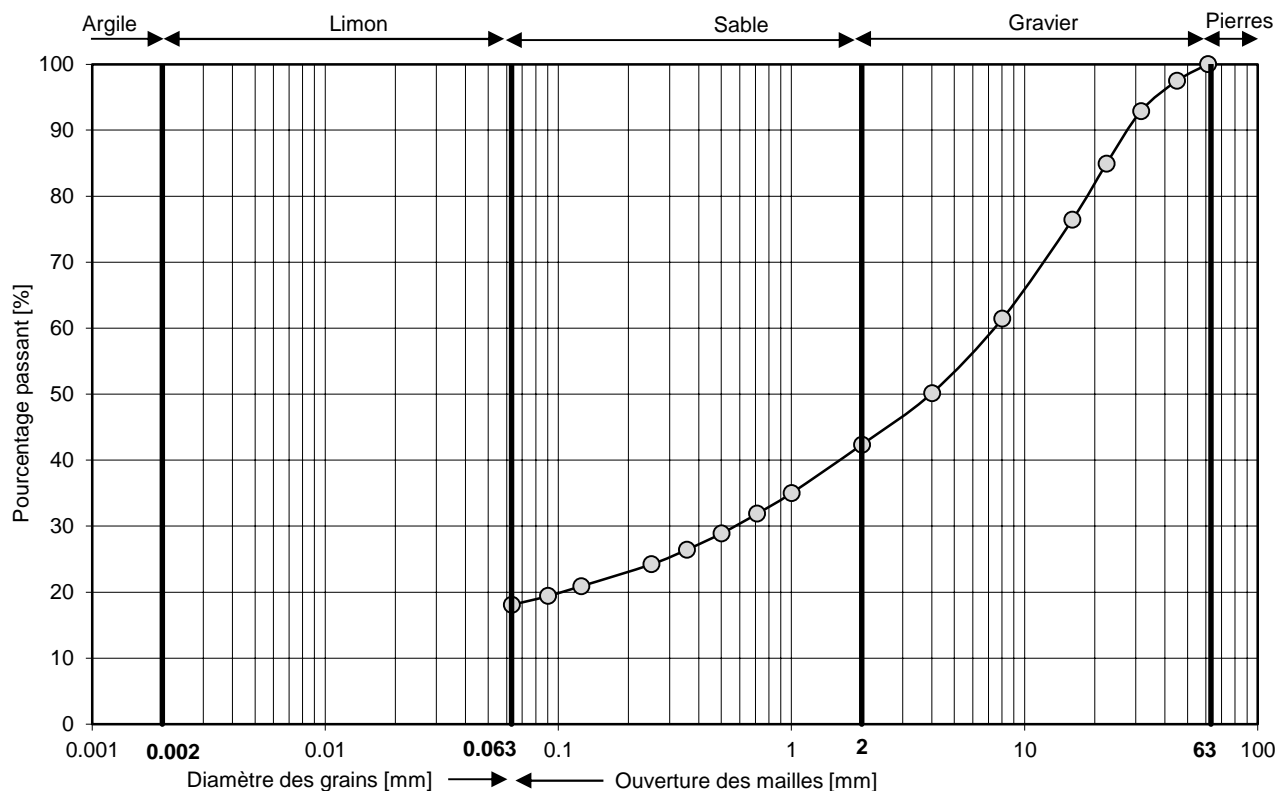
Limite de liquidité

 $w_L =$

Limite de plasticité

 $w_P =$

Indice de plasticité

 $I_P =$ -

Gravier 2mm < Ø < 63 mm [%]	Sable 0.063 < Ø < 2 mm [%]	Limon + Argile Ø < 0.063mm [%]	Limon 0.002 < Ø < 0.063mm [%]	Argile Ø < 0.002mm [%]	Degré d'uniformité C_{ud} [-]	Courbure C_{cd} [-]
57.7	24.3	18.1	-	-	-	-

Classification USCS

Paramètres d'essai

Ømax: 61mm

Ing. / Resp.

CBE

Opérateur

SUI

Remarques

N° Affaire
11649

Etude
**Rougemont - Renouvellement complet de la voie
Km 39.100 à 39.800**

Profondeur
1.00 m

N° Sondage
R0-I1-Km 39.104

Date essai
17.06.2020

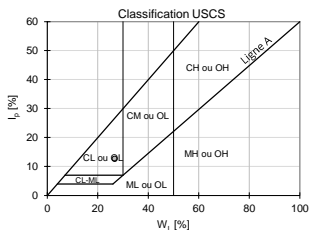
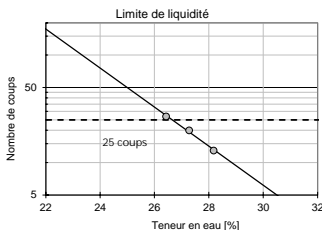
N° Echantillon
1

Détermination de la **limite de plasticité w_p**

Masse brute humide	[g]	29.8	33.0	35.7
Masse brute sèche	[g]	28.6	31.4	34.0
Masse tare	[g]	19.8	20.3	22.3
Teneur en eau	[%]	13.9	14.2	14.2

Détermination de la **limite de liquidité w_L**

Nombre de coups		27	20	13
Masse brute humide	[g]	61.3	67.8	65.9
Masse brute sèche	[g]	54.4	60.4	59.0
Masse tare	[g]	28.3	33.5	34.3
Teneur en eau	[%]	26.4	27.3	28.2



Limite de plasticité

$w_p = 14.1\%$

Limite de liquidité

$w_L = 26.7\%$

Indice de plasticité

$I_p = 12.6\%$

Classification USCS

CL

Paramètres d'essai: Tamisat de l'échantillon analysé < 0.5mm

Ing. / Resp.
CBE

Opérateur
SUI

Remarques

N° Affaire
11649

Etude
**Rougemont - Renouvellement complet de la voie
Km 39.100 à 39.800**

Profondeur
0.80 m

N° Sondage
R0-I2-Km 39.268

Date essai
17.06.2020

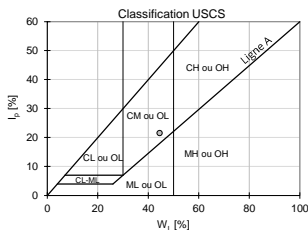
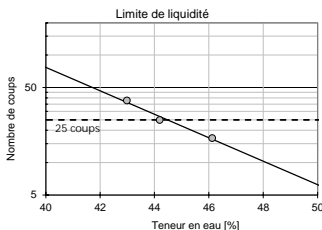
N° Echantillon
3

Détermination de la **limite de plasticité w_p**

Masse brute humide	[g]	31.2	31.7	32.0
Masse brute sèche	[g]	29.4	29.6	30.1
Masse tare	[g]	21.6	20.8	22.0
Teneur en eau	[%]	22.9	23.1	22.9

Détermination de la **limite de liquidité w_L**

Nombre de coups		38	25	17
Masse brute humide	[g]	56.5	62.4	63.2
Masse brute sèche	[g]	46.7	52.1	52.2
Masse tare	[g]	23.9	28.7	28.2
Teneur en eau	[%]	43.0	44.2	46.1



Limite de plasticité

$w_p = 23.0\%$

Limite de liquidité

$w_L = 44.5\%$

Indice de plasticité

$I_p = 21.5\%$

Classification USCS

CM

Paramètres d'essai: Tamisat de l'échantillon analysé < 0.5mm

Ing. / Resp.
CBE

Opérateur
SUI

Remarques

N° Affaire
11649

Etude
**Rougemont - Renouvellement complet de la voie
Km 39.100 à 39.800**

Profondeur
0.80 m

N° Sondage
R0-I4-Km 39.370

Date essai
17.06.2020

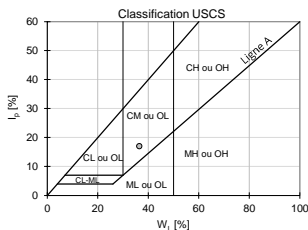
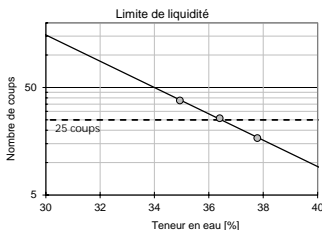
N° Echantillon
4

Détermination de la limite de plasticité w_p

Masse brute humide	[g]	33.5	37.6	31.7
Masse brute sèche	[g]	31.4	35.4	30.2
Masse tare	[g]	20.6	24.6	22.3
Teneur en eau	[%]	19.6	19.8	19.1

Détermination de la limite de liquidité w_L

Nombre de coups		38	26	17
Masse brute humide	[g]	63.4	61.2	64.0
Masse brute sèche	[g]	54.3	52.3	54.2
Masse tare	[g]	28.2	27.7	28.3
Teneur en eau	[%]	34.9	36.4	37.8



Limite de plasticité

$w_p = 19.5\%$

Limite de liquidité

$w_L = 36.5\%$

Indice de plasticité

$I_p = 17.0\%$

Classification USCS

CM

Paramètres d'essai: Tamisat de l'échantillon analysé < 0.5mm

Ing. / Resp.
CBE

Opérateur
SUI

Remarques

N° Affaire

11649

Date essai

17.06.2020

Etude

**Rougemont - Renouvellement complet de la voie
Km 39.100 à 39.800**

Profondeur

0.8 m

N° Sondage

R0-I7-Km 39.697

N° Echantillon

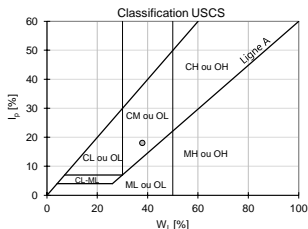
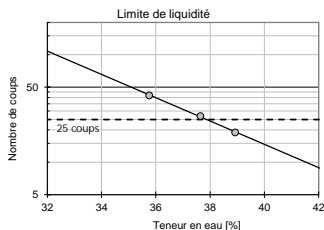
2

Détermination de la limite de plasticité w_p

Masse brute humide	[g]	32.2	32.7	32.2
Masse brute sèche	[g]	30.6	30.9	30.4
Masse tare	[g]	22.8	22.2	21.5
Teneur en eau	[%]	20.1	19.9	19.6

Détermination de la limite de liquidité w_L

Nombre de coups		42	27	19
Masse brute humide	[g]	59.6	61.9	59.2
Masse brute sèche	[g]	51.5	52.6	50.3
Masse tare	[g]	28.9	28.1	27.7
Teneur en eau	[%]	35.8	37.6	38.9



Limite de plasticité

$w_p = 19.9\%$

Limite de liquidité

$w_L = 37.9\%$

Indice de plasticité

$I_p = 18.0\%$

Classification USCS

CM

Paramètres d'essai: Tamisat de l'échantillon analysé < 0.5mm

Ing. / Resp.

CBE

Opérateur

SUI

Remarques



WESSLING AG
Werkstrasse 27 · 3250 Lyss BE
Tel. +41 (0)32 387 6747 · Fax +41 (0)32 387 6746
info@wessling.ch · www.wessling.ch

WESSLING AG, Werkstrasse 27, 3250 Lyss BE
Karakas & Français SA
Monsieur Simon Vuadens
Avenue des Boveresse 44
1010 Lausanne

Commande n°.: ULS-03280-20
Interlocuteur: N. Amstutz
Ligne directe: +41 32 387 67 41
E-Mail: Nicolas.Amstutz@wessling.ch

Lyss, le 22.06.2020

Rapport no. ULS20-004474-1

MOB - Gare de Rougemont - EG 11649 Rougemont



ISO/IEC 17025

Les résultats d'analyses se fondent uniquement sur les échantillons à notre disposition. Ce rapport ne peut être reproduit partiellement qu'avec l'autorisation préalable de WESSLING AG (DIN EN ISO/IEC 17025).

Rapport no. ULS20-004474-1
Lyss, le 22.06.2020

Pointe AV
proche de
RO-I2

Pointe AV
proche de
RO-I2

Désignation d'échantillon			11649 - Rougemont - RO-I1 - 39.104 - Ech. Ballast 1	11649 - Rougemont - RO-I1 - 39.104 - Assise 1	11649 - Rougemont - RO-I2 - 39.250 - Ech. Ballast 2 (pointe avant) 20-090092-03	11649 - Rougemont - RO-I2 - 39.272 - Ech. Ballast 3 (pointe) 20-090092-04	11649 - Rougemont - RO-I7 - 39.697 - Ech. Ballast 7
N° d'échantillon	Unité	LQ	20-090092-01	20-090092-02			20-090092-05

Propriétés générales

Matière sèche	Gew% MB	0.1	95	87	100	100	99
---------------	---------	-----	----	----	-----	-----	----

Paramètres organiques globaux

HC C10-C40 selon OFEV S-9

Hydrocarbures C10-C40	mg/kg MS	10	63	<10	27	25	<10
-----------------------	----------	----	----	-----	----	----	-----

Substances organiques moyennement et peu volatiles

HAP selon OFEV S-13

Naphtalène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Acénaphthylène	mg/kg MS	0.05	0.22	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Acénaphthène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Fluorène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Phénanthrène	mg/kg MS	0.05	0.26	<0.05	<0.05	0.27	<0.05
Anthracène	mg/kg MS	0.05	0.57	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Fluoranthène	mg/kg MS	0.05	0.98	<0.05	0.08	0.78	0.09
Pyrène	mg/kg MS	0.05	0.54	<0.05	0.06	0.29	<0.05
Benzo(a)anthracène	mg/kg MS	0.05	0.16	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Chrysène	mg/kg MS	0.05	0.3	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg MS	0.05	0.14	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Benzo(k)fluoranthène	mg/kg MS	0.05	0.13	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Benzo(a)pyrène	mg/kg MS	0.05	0.07	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Dibenzo(ah)anthracène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Indéno(123-cd)pyrène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Somme des HAP	mg/kg MS		3.4	-/-	0.14	1.3	0.09

Rapport no. ULS20-004474-1
Lyss, le 22.06.2020

Pointe AV
proche de RO-I5

Désignation d'échantillon			11649 - Rougemont - RO-I7 - 39.697 - Assise 7	11649 - Rougemont - RO-I5 - 39.482 - Ech. Ballast 5
N° d'échantillon	Unité	LQ	20-090092-06	20-090092-07

Propriétés générales

Matière sèche	Gew% MB	0.1	75	100
---------------	---------	-----	----	-----

Paramètres organiques globaux

HC C10-C40 selon OFEV S-9

Hydrocarbures C10-C40	mg/kg MS	10	<10	73
-----------------------	----------	----	-----	----

Substances organiques moyennement et peu volatil

HAP selon OFEV S-13

Naphtalène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05
Acénaphthylène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05
Acénaphthène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05
Fluorène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05
Phénanthrène	mg/kg MS	0.05	<0.05	0.29
Anthracène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05
Fluoranthène	mg/kg MS	0.05	<0.05	0.64
Pyrène	mg/kg MS	0.05	<0.05	0.29
Benzo(a)anthracène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05
Chrysène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05
Benzo(k)fluoranthène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05
Benzo(a)pyrène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05
Dibenzo(ah)anthracène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05
Indéno(123-cd)pyrène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05
Benzo(ghi)pérylène	mg/kg MS	0.05	<0.05	<0.05
Somme des HAP	mg/kg MS		-/-	1.2

Rapport no. ULS20-004474-1
Lyss, le 22.06.2020

Informations sur les échantillons

Echantillon-n°	20-090092-01	20-090092-02	20-090092-03	20-090092-04	20-090092-05
Date de réception:	15.06.2020	15.06.2020	15.06.2020	15.06.2020	15.06.2020
Désignation	11649 - Rougemont - RO- I1 - 39.104 - Ech. Ballast 1	11649 - Rougemont - RO- I1 - 39.104 - Assise 1	11649 - Rougemont - RO- I2 - 39.250 - Ech. Ballast 2 (pointe avant)	11649 - Rougemont - RO- I2 - 39.272 - Ech. Ballast 3 (pointe)	11649 - Rougemont - RO- I7 - 39.697 - Ech. Ballast 7
Type d'échantillons:	Pierraille	Sol	Pierraille	Pierraille	Pierraille
Prélèvement:	10.06.2020	10.06.2020	10.06.2020	10.06.2020	10.06.2020
Prélèvement par:	K+F Lausanne	K+F Lausanne	K+F Lausanne	K+F Lausanne	K+F Lausanne
Début des analyses:	16.06.2020	16.06.2020	16.06.2020	16.06.2020	16.06.2020
Fin des analyses:	22.06.2020	22.06.2020	22.06.2020	22.06.2020	22.06.2020
Echantillon-n°	20-090092-06	20-090092-07			
Date de réception:	15.06.2020	15.06.2020			
Désignation	11649 - Rougemont - RO- I7 - 39.697 - Assise 7	11649 - Rougemont - RO- I5 - 39.482 - Ech. Ballast 5			
Type d'échantillons:	Sol	Pierraille			
Prélèvement:	10.06.2020	10.06.2020			
Prélèvement par:	K+F Lausanne	K+F Lausanne			
Début des analyses:	16.06.2020	16.06.2020			
Fin des analyses:	22.06.2020	22.06.2020			

Méthodes

Paramètres	Norme	Laboratoire
Matières sèches	DIN ISO 11465 (1996-12) ^A	Laboratori Lyss CH (CH)
Hydrocarbures C10-C40	DIN EN ISO 16703 ^A	Laboratori Lyss CH (CH)
HAP (16)	ISO 18287 mod. ^A	Laboratori Lyss CH (CH)

A = procédé de mesure accrédité (ISO 17025)
MB = matière brute
MS = matière sèche
LQ = limite de quantification
E/L = eau / lixiviat
G = gaz
nd = non détecté

Des compléments d'information sur les principes d'analyses, par exemple les incertitudes de mesure, sont disponibles sur demande.

Ce document a été créé électroniquement et est également valable sans signature.
Heinrich Kalt
Directeur, Dr. rer. nat