

PROJET MIGA

Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB)

Rustrel (84)

GALERIE SOUTERRAINE



Maîtrise d'œuvre

CAHIER B

Phase : PRO

Emetteur : GEOS

A00	1 ^{ère} émission	20/06/2016	FDA	ATI	MFE
INDICE	MODIFICATION	DATE	REDIGE	VERIFIE	APPROUVE

ARC	GX	PRD	PRO	ARC	GEO	00001	A00
			Phase	Emetteur	Spécialité	Chrono	Indice



SOMMAIRE		
1 OBJET	5	
2 REFERENCES	5	
2.1 DONNEES D'ENTREE GEOTECHNIQUES	5	
2.2 DOCUMENTS DE PRODUCTION	5	
2.3 RECOMMANDATIONS DE L'AFTES, NORMES ET AUTRES GUIDES	5	
2.4 REFERENCES TECHNIQUES	5	
2.5 ECHANGES AVEC LE MOA ET L'AMO	5	
3 TERMINOLOGIE	6	
4 DESCRIPTION GENERALE DU PROJET	6	
4.1 PRESENTATION DU LSBB	6	
4.2 DESCRIPTION DU PROJET MIGA	6	
5 FIABILITE DES DONNEES D'ENTREE GEOTECHNIQUES	7	
6 SYNTHESE GEOLOGIQUE	8	
6.1 CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL	8	
6.1.1 Description géomorphologique	8	
6.1.2 Description lithologique et stratigraphique	9	
6.1.3 Histoire géologique	10	
6.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE DU PROJET	12	
6.2.1 Cadre géologique à l'échelle du projet	12	
6.2.2 Analyse des forages GAS	14	
6.2.2.1 Lithologie et stratigraphie	14	
6.2.2.2 Analyse structurale	15	
6.2.3 Analyse des reconnaissances menées en 2014	16	
6.2.4 Analyse des conditions de creusement des galeries existantes	17	
6.2.4.1 Lithologie	17	
6.2.4.2 Analyse structurale	18	
6.2.4.2.1 Galerie A	18	
6.2.4.2.2 Galerie B1	19	
6.2.4.2.3 Galerie C	19	
6.2.4.2.4 Galerie K	22	
6.2.4.2.5 Galerie E	23	
6.3 ELABORATION DU MODELE GEOLOGIQUE	24	
6.3.1 Lithologie et stratigraphie	24	
6.3.2 Modèle structural	24	
6.3.3 Coupes géologiques	28	
7 SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE	33	
7.1 CADRE HYDROGEOLOGIQUE REGIONAL	33	
7.1.1 Présentation de l'hydrosystème karstique de Fontaine de Vaucluse	33	
7.1.1.1 Description générale	33	
7.1.1.2 Formation du karst	33	
7.1.1.3 Organisation et fonctionnement du karst	33	
7.1.2 Données climatiques	34	
7.2 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE AU DROIT DU PROJET	35	
7.2.1 Situation hydrogéologique du LSBB	35	
7.2.2 Identification des structures karstiques	35	
7.2.2.1 Analyse des forages GAS	35	
7.2.2.2 Analyse du creusement des galeries du LSBB	36	
7.2.2.3 Analyse des reconnaissances menées en 2014	37	
7.2.3 Porosité et perméabilité	37	
7.2.4 Exhaure prévisionnelle	37	
7.2.5 Qualité des eaux	39	
7.3 MODELE HYDROGEOLOGIQUE	39	
8 SYNTHESE GEOTECHNIQUE	44	
8.1 CARACTERISATION DES SOUS-ENSEMBLES GEOTECHNIQUES	44	
8.1.1 Lithologie	44	
8.1.2 Propriétés du terrain encaissant	44	
8.1.2.1 Propriétés de la matrice	44	
8.1.2.2 Discontinuités	45	
8.1.2.3 Caractérisation du massif	46	
8.1.2.3.1 Etat des contraintes naturelles au niveau du projet	46	
8.1.2.3.2 Qualité du massif	46	
8.1.3 Propagation des vibrations	47	
8.1.4 Réemploi des matériaux	47	
8.2 MODELE GEOTECHNIQUE	47	
9 REGISTRE DES INCERTITUDES	52	
9.1 METHODOLOGIE D'ANALYSE DES RISQUES	52	
9.2 REGISTRE DES INCERTITUDES	52	
9.2.1 Incertitudes géologiques	52	
9.2.1.1 Position des zones faillées	52	
9.2.1.2 Puissance des zones faillées	52	
9.2.1.3 Fracturation du massif	53	
9.2.2 Incertitudes hydrogéologiques	53	
9.2.2.1 Proportion, taille et position des structures karstiques	53	
9.2.2.2 Exhaure	53	
9.2.3 Incertitudes géotechniques	53	
9.2.4 Synthèse	54	
ANNEXE A		
ANNEXE B		



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Degré de fiabilité des données d’entrée géotechniques	8
Tableau 2 – Répartition des faciès calcaires relevés lors du creusement des galeries existantes.....	17
Tableau 3 – Localisation des relevés de la famille F3 dans la Galerie C.....	21
Tableau 4 – Orientation principale des discontinuités dans les zones Z3 et Z4 (hors S0) – Galerie C	22
Tableau 5 – Synthèse des familles de discontinuités relevées dans les forages GAS et les galeries existantes du LSBB	24
Tableau 6 – Hiérarchisation des accidents de type faille potentiellement situés sur le tracé de la galerie MIGA	26
Tableau 7 – Synthèse comparative entre les modèles à disposition dans les données d’entrée et le modèle structural établi dans le cadre du projet MIGA	27
Tableau 8 – Densité des venues d’eau par secteur dans le LSBB	36
Tableau 9 – Débits mesurés par type d’écoulement mis en évidence dans le LSBB (thèse de Barbel-Périneau, réf. [23])	38
Tableau 10 – Proportion par galerie du LSBB des structures karstiques impactant un linéaire compris entre 1 et 5m ou d’une hauteur comprise entre 1 et 5m	39
Tableau 11 - Proportion par galerie du LSBB des structures karstiques impactant un linéaire compris entre 5 et 20m ou d’une hauteur comprise entre 5 et 20m	39
Tableau 12 – Répartition des structures karstiques impactant un linéaire supérieur à 1m par zone de fracturation.....	40
Tableau 13 – Classes de résistance des roches et des sols en fonction de la résistance à la compression R_c	44
Tableau 14 – Résistance à la compression uniaxiale mesurée au droit de chaque galerie du LSBB	44
Tableau 15 – Procédés de soutènement recommandés en fonction des classes de résistance (GT7 de l’AFTES, cf. [8])	45
Tableau 16 – Orientation des familles principales de discontinuités par rapport à l’axe de creusement des galeries MIGA.....	45
Tableau 17 – Caractérisation du massif selon l’état des contraintes naturelles	46
Tableau 18 – Répartition des zones Z1 à Z4 pour l’ensemble des galeries du LSBB.....	46
Tableau 19 – Répartition des zones Z1 à Z4 pour la section courante de la galerie MIGA.....	47
Tableau 20 – Répartition des zones Z1 à Z4 pour les cavités	47

Tableau 21 – Modèle géotechnique de la Cavité C1 (2x150m et 2x200m)	51
Tableau 22 – Modèle géotechnique de la Cavité C3 (2x150m et 2x200m)	51
Tableau 23 – Modèle géotechnique de la Cavité C5 (2x150m et 2x200m)	51
Tableau 24 – Définition du niveau de risque selon les recommandations du GT32 de l’AFTES	52
Tableau 25 – Registre des incertitudes	54

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Localisation du LSBB	6
Figure 2 – Description générale du LSBB.....	6
Figure 3 – Architecture générale du projet MIGA.....	7
Figure 4 – Morphologie du site d’étude (Puig, 1987, extrait de la thèse de Garry B. réf. [1]).....	8
Figure 5 – Photo de l’aven Aubert situé sur le Plateau d’Albion (source photo : Boulangeat C., 2015)	9
Figure 6 – Carte géologique de la région des Monts de Vaucluse (Couturaud, 1993, extrait de la thèse de Garry B. réf. [1])	9
Figure 7 – Observation au microscope de lames minces de calcaires à orbitolines (photo A) et à Rudistes (photos B et C) - Extrait de l’étude de Bouaziz I. réf. [1]	9
Figure 8 – Log stratigraphique (Puig, 1987, extrait de la thèse de Garry réf. [1])	10
Figure 9 – Extension du Bassin Vocontien au début du Crétacé inférieur (source : Parc Naturel Régional des Baronnies Provençales).....	10
Figure 10 – Evolution de la plateforme provençale durant le Crétacé inférieur (Masse, 1994, extrait de l’étude de Le Men T., 2014).....	10
Figure 11 – Carte et coupes géologiques simplifiées de la région des Monts de Vaucluse (extrait de la thèse de Garry réf. [1])	11
Figure 12 – Extrait de la carte géologique 1/50000 de Sault-de-Vaucluse, source BRGM (site Infoterre)...	12
Figure 13 – Carte géologique de détail du LSBB.....	12
Figure 14 – Coupe géologique E-W au droit du LSBB.....	13
Figure 15 – Coupe géologique N-S au droit du LSBB.....	13
Figure 16 – Association des faciès urgoniens aux étages du Bédoulien et du Barrémien (extrait de la thèse de Carrière, réf. [24])	13

Figure 17 – Implantation des forages GAS	14	Figure 41 – Comparaison du modèle structural avec le modèle présenté dans la thèse de Barbel-Périneau (réf. [23])	27
Figure 18 – Mise en évidence de la stratigraphie sur les forages GAS	14	Figure 42 – Coupe géologique de la première branche de la galerie MIGA (2x150m et 2x200m).....	28
Figure 19 – Projection stéréographique de l'ensemble des discontinuités relevées sur les forages GAS (hémisphère supérieur).....	15	Figure 43 – Coupe géologique de la seconde branche de la galerie MIGA (2x150m).....	29
Figure 20 – Projection stéréographique par forage GAS (hémisphère supérieur)	15	Figure 44 – Coupe géologique de la seconde branche de la galerie MIGA (2x200m).....	29
Figure 21 – Rosace et diagramme de densité des fracturations.....	16	Figure 45 - Coupe géologique de la cavité C1 (2x150m et 2x200m)	30
Figure 22 – Vide de 1m sur le forage P5.....	16	Figure 46 - Coupe géologique de la cavité C3 (2x150m	30
Figure 23 – Nombre de discontinuités par faciès géologique observé.....	16	Figure 47 - Coupe géologique de la cavité C3 (2x200m).....	31
Figure 24 – Implantation des forages de reconnaissance de 2014	16	Figure 48 - Coupe géologique de la cavité C5 (2x150m).....	31
Figure 25 – Représentation des faciès calcaires observés au droit des galeries du LSBB.....	17	Figure 49 – Coupe géologique de la cavité C5 (2x200m)	32
Figure 26 – Faciès lithologiques rencontrés lors du creusement des galeries C et K.....	18	Figure 50 – Système karstique de Fontaine de Vaucluse – Carte et coupe géologique simplifiée (extrait de la thèse de Garry, 2007).....	33
Figure 27 – Comparaison entre les relevés de fracturation du BEG et ceux de l'entreprise – Galerie A.....	18	Figure 51 – Représentation simplifiée d'un système karstique (Mangin, 1975).....	34
Figure 28 - Comparaison entre les relevés de fracturation du BEG et de l'entreprise – Galerie C.....	20	Figure 52 – Moyennes mensuelles des pluies et des températures à Saint-Saturnin-lès-Apt (extrait du rapport d'Ollivier, réf. [1]).....	34
Figure 29 – Projection stéréographique de l'ensemble des discontinuités relevées sur la Galerie C (hémisphère supérieur).....	21	Figure 53 – Schéma conceptuel du système karstique de Fontaine de Vaucluse avec position du LSBB (extrait de la thèse de Carrière, réf. [24])	35
Figure 30 – Diagramme de la densité de fracturation du PM 900 à 1560 de la Galerie C	21	Figure 54 – Niveaux d'eau et différenciation des fractures observées sur les forages GAS d'un point de vue hydrogéologique.....	35
Figure 31 – Structure simplifiée d'une faille.....	22	Figure 55 – Mesures de la résistivité et de la densité dans le forage P5 au niveau d'une cavité karstique .	36
Figure 32 – Zone faillée dans la Galerie Anti-Souffle	22	Figure 56 – Evènements hydrogéologiques identifiés lors du creusement du LSBB.....	36
Figure 33 - Projection stéréographique de l'ensemble des discontinuités relevées sur la Galerie K (hémisphère supérieur).....	23	Figure 57 – Porosité des roches karstifiées (extrait de la thèse de Carrière, réf. [24])	37
Figure 34 - Projection stéréographique de l'ensemble des discontinuités relevées sur la Galerie E (hémisphère supérieur).....	23	Figure 58 – Localisation des points d'écoulement étudiés par Garry	37
Figure 35 – Diagramme de la densité de fracturation pour l'ensemble de la Galerie E	23	Figure 59 – Schéma conceptuel des écoulements dans la ZNS d'après Garry.....	38
Figure 36 – Comparaison des stéréogrammes et diagrammes de densité des forages GAS et des galeries K et C	24	Figure 60 – Carte de l'origine des écoulements d'après Barbel-Périneau (réf. [23])	38
Figure 37 – Modèle structural sur l'ensemble du LSBB.....	25	Figure 61 – Superposition des évènements hydrogéologiques et du modèle structural du LSBB.....	41
Figure 38 – Modèle structural centré sur la galerie MIGA	26	Figure 62 – Coupe géologique et modèle hydrogéologique de la première branche de la galerie MIGA (2x150m et 2x200m)	42
Figure 39 – Comparaison du modèle structural avec la carte de détail du LSBB	26	Figure 63 – Coupe géologique et modèle hydrogéologique de la seconde branche de la galerie MIGA (2x150m).....	42
Figure 40 – Comparaison du modèle structural avec le modèle GOCAD	27		



Figure 64 – Coupe géologique et modèle hydrogéologique de la seconde branche de la galerie MIGA (2x200m) 43

Figure 65 – Résistance à la compression uniaxiale dans les Galeries C et K à proximité du projet MIGA .. 44

Figure 66 – Indication des familles de discontinuités principales sur les stéréogrammes des forages GAS et des Galeries C et K..... 45

Figure 67 – Comparaison des stéréogrammes dans les calcaires sublithographiques et spathiques..... 46

Figure 68 – Modèle géotechnique de la première branche de la Galerie MIGA (2x150m et 2x200m) 48

Figure 69 – Modèle géotechnique de la seconde branche de la Galerie MIGA (2x150m) 49

Figure 70 – Modèle géotechnique de la seconde branche de la Galerie MIGA (2x200m) 50



1 OBJET

Le présent rapport établit la synthèse géologique, hydrogéologique et géotechnique du futur projet MIGA. Ce rapport correspond au Cahier B des études géotechniques de travaux souterrains, tel qu'il est défini dans la recommandation GT32-R3F1 de l'AFTES.

Il s'agit d'exposer le contexte géologique et géotechnique général dans lequel s'insère le projet et de réaliser la synthèse des reconnaissances et essais disponibles avec pour objectif de proposer, pour des sous-sections homogènes d'un point de vue géologique, les hypothèses et paramètres géotechniques nécessaires aux études.

Le mémoire est complété par les documents suivants :

- le recueil des données factuelles (Cahier A) : compilation des investigations et études antérieures relatives au projet et à son environnement ainsi que tout document extérieur jugé utile pour la conception du projet ;
- le mémoire de conception (Cahier C).

Le document s'appuie principalement sur le retour d'expérience du creusement des galeries du laboratoire souterrain.

2 REFERENCES

2.1 DONNEES D'ENTREE GEOTECHNIQUES

[1] L'ensemble des données d'entrée géotechniques est présenté dans le Cahier A.

2.2 DOCUMENTS DE PRODUCTION

Les documents suivants ont été produits durant la phase AVP :

- [2] Rapport AVP réf. ARC_GX_PRD_AVP_AUT_RAP_00005_B,
- [3] Plan d'ensemble réf. PROD_MED_INF_PRD_AVP_STR_PGT_00003_B00,
- [4] Plan d'implantation réf. PROD_MED_INF_PRD_AVP_STR_PGT_00010_B00,
- [5] Profils en long réf. PROD_MED_INF_PRD_AVP_STR_PGT_00011_B00,
- [6] Plans réf. PROD_MED_INF_PRD_AVP_STR_PGT_00012 à 00017 correspondant respectivement à la cavité d'accès, à la section courante, aux niches interféromètre, aux cavités C1, C3 et C5.

2.3 RECOMMANDATIONS DE L'AFTES, NORMES ET AUTRES GUIDES

Le présent document s'appuie sur les référentiels énumérés ci-dessous :

- [7] AFTES – Recommandation GT1R1F1 : Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains,
- [8] AFTES – Recommandation GT7R1F2 : Choix d'un type de soutènement en galerie,
- [9] AFTES - Recommandation GT30R1F1 : Conception et dimensionnement du boulonnage radial,

[10] AFTES – Recommandation GT32R2F1 : Caractérisation des incertitudes et des risques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques,

[11] AFTES – Recommandation GT32R3F1 : Prise en compte des risques techniques dans les projets d'ouvrages souterrains en vue de la consultation des entreprises,

[12] AFTES – Recommandation GT35R1F1 : La gestion et la valorisation des matériaux d'excavation,

[13] AFTES – Recommandation GT43R1F1 : Guide d'application au domaine des ouvrages souterrains de la norme NF P 94-500 (version 2013) relative aux missions d'ingénierie géotechnique,

[14] La norme NF 94-500 : Missions d'ingénierie géotechnique, Classification et spécifications,

[15] La norme NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2) relative au calcul des structures en béton (Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments),

[16] La norme NF EN 1993-1-1 (Eurocode 3) relative au calcul des structures en acier (Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments),

[17] La norme NF EN 1997-1 (Eurocode 7) de juin 2005 relative au calcul géotechnique et son annexe nationale française NF EN 1997-1/NA, ainsi que la norme d'application nationale NF P94-281 relative à la justification des murs de soutènement d'avril 2014,

[18] Guide CETU : Dossier pilote des tunnels,

[19] CCTG – Fascicule 69 (2012) : Travaux en souterrain,

[20] Guide d'application du fascicule 69 du CCTG – Travaux en souterrain.

2.4 REFERENCES TECHNIQUES

[21] Empirical estimation of rock mass modulus, Hoek & Diederichs, 2005,

[22] Quantification of the Geological Strength Index chart, Hoek & Carter & Diederichs, 2013,

[23] Caractérisation du fonctionnement de la zone non saturée des aquifères karstiques : Approche directe par études hydrodynamiques et hydrochimiques sur le Bassin de Recherche, d'Expérimentation et d'Observation de Fontaine de Vaucluse – LSBB de Rustrel – Pays d'Apt, Thèse de A. Barbel-Périneau, 2013.

[24] Etude hydrogéophysique de la structure et du fonctionnement de la zone non saturée du karst, Thèse de S. D. Carrière, 2015.

2.5 ECHANGES AVEC LE MOA ET L'AMO

[25] Avis de l'AMO sur l'Indice B du rapport AVP, 2017-01-04_note 12_Avis-AVP_IndB_v2, CETU, Janvier 2017,

[26] Avis de l'AMO sur la version provisoire du Cahier B du PRO, 2017-05-30_note 15_Avis_Cahier B-PRO_Provisoire, CETU, Mai 2017.

[27] Courrier de M. Emblanch concernant les débits dans le LSBB, Université d'Avignon, 12 juin 2017.

3 TERMINOLOGIE

La terminologie utilisée dans le présent rapport est rappelée ci-dessous :

- CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique,
- LSBB : Laboratoire Souterrain Bas Bruit,
- Galerie A : Servitude,
- Galerie B1 : Sortie Ouest,
- Galerie C : Galerie Principale,
- Galerie E : Galerie de secours,
- Galerie K : Galerie Anti-souffle,
- PRI : Provision pour Risques Identifiés,
- SEREB : Société d'Etude et de Réalisation d'Engins Balistiques.

4 DESCRIPTION GENERALE DU PROJET

4.1 PRESENTATION DU LSBB

Le Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) est situé dans le département du Vaucluse, au nord du village de Rustrel (cf. Figure 1). Il occupe l'ancien poste de conduite de tir N°1 de la force de dissuasion nucléaire française. Il s'agit d'une Unité Mixte de Service n° 3538 dont la tutelle principale est le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).



Figure 1 – Localisation du LSBB

Le LSBB est composé d'un ensemble d'espaces et de galeries subhorizontales creusées dans le massif rocheux de la Grande Montagne. Avec 54 ha en surface et 3,9 km de galeries entre 0 et 518 m de profondeur, il offre une superficie au sol d'environ 14 000 m². Il possède également une capsule blindée électro-magnétiquement d'un volume de 1250 m³.

L'objectif des expériences menées dans le laboratoire souterrain est de permettre l'accueil des projets liés à la métrologie, à l'étude et à la mesure de la gravitation et de la déformation de l'espace, et à la compréhension des couplages entre les processus physiques et géologiques en environnement souterrain.

Les galeries principales du laboratoire sont présentées dans la figure suivante.

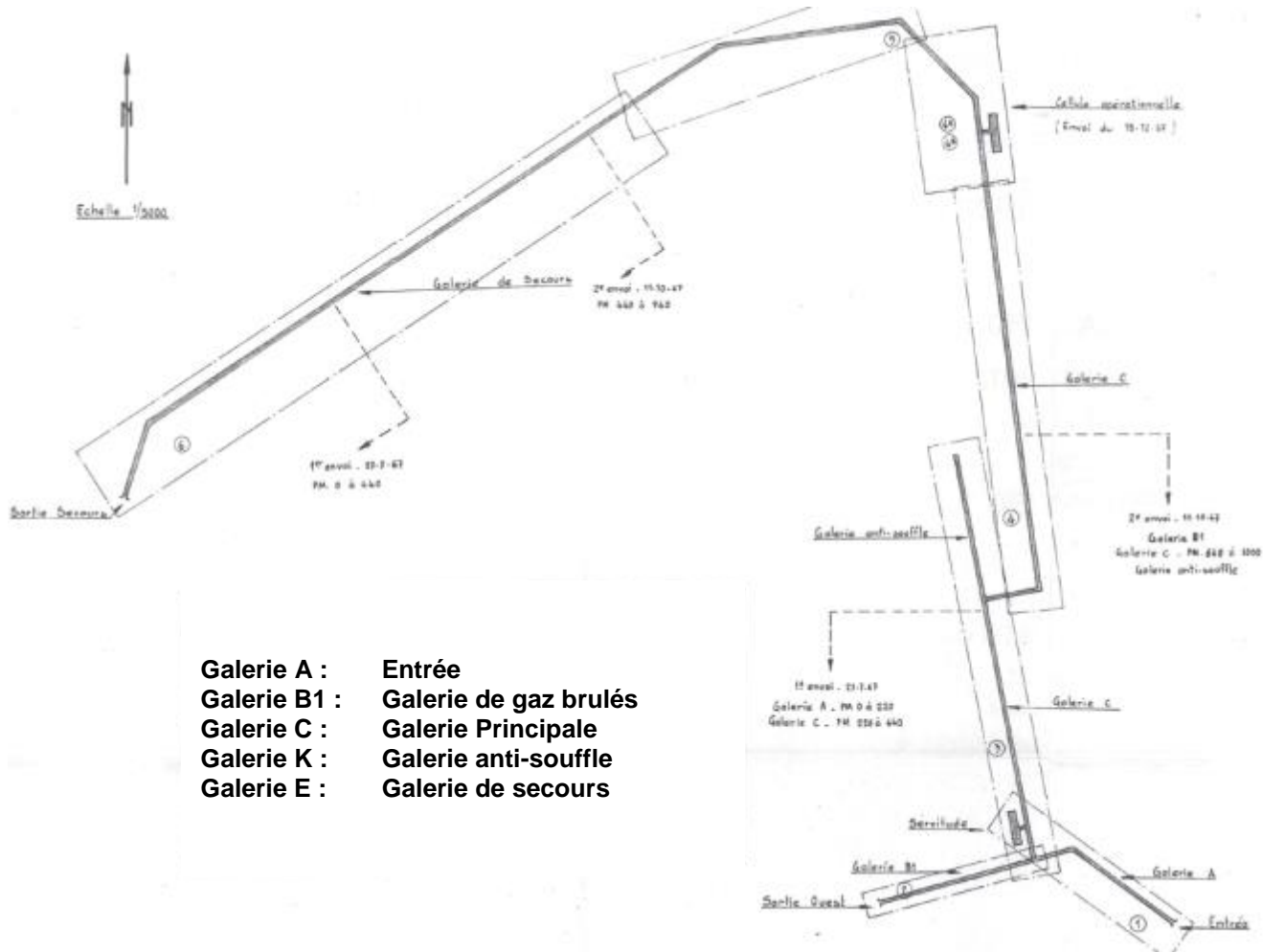


Figure 2 – Description générale du LSBB

4.2 DESCRIPTION DU PROJET MIGA

Le projet MIGA « Matter wave-lazer Interferometry Gravitation Antenna » a pour but l'amélioration des connaissances physiques et géophysiques. Il vise à réaliser une plateforme expérimentale pour la mesure fine de très petites variations spatiales du champ de pesanteur local et à mieux comprendre les processus hydromécaniques et géophysiques dans ce type de système géologique.

L'installation de l'équipement nécessaire pour le projet MIGA prévoit la réalisation au préalable d'une infrastructure souterraine à partir d'une galerie existante. La mise en place de l'interféromètre gravitationnel nécessite le creusement de deux galeries horizontales perpendiculaires et d'égale longueur (cf. Figure 3). L'architecture définitive n'est pas figée à ce stade. Deux tracés sont envisagés : deux branches de 150m ou deux branches de 200m (cf. Figure 3).

Le percement des deux nouvelles galeries s'accompagne de la réalisation des ouvrages suivants :

- cavité d'accès : l'accès à la galerie MIGA se fait depuis la galerie C via un sas contenu dans cette cavité,
- cavités C1, C3 et C5 : elles sont situées à l'extrémité des branches et accueillent des appareillages scientifiques spécifiques nécessitant un volume fonctionnel particulier :
 - la cavité C1 comporte une Tour, qui est l'équipement principal de l'appareillage, relié au tube sous vide, avec un Interféromètre Atomique immédiatement après la Tour, et une Table Optique,
 - la cavité C3, qui correspond à l'angle droit entre les deux branches de la galerie, comporte elle aussi une Tour, deux Tables Optiques, et sur chaque branche un Interféromètre Atomique,
 - La cavité C5 comporte, comme la cavité C1, une Tour, un Interféromètre Atomique et une Table optique. Une forte différence de niveau existe entre la cavité C5 et la galerie C existante. De ce fait, un escalier est nécessaire pour relier ces deux niveaux.
- galerie de jonction : elle relie la galerie anti-souffle (galerie K) à la galerie MIGA et permet l'évacuation éventuelle en direction de la galerie K ou à l'inverse, en direction de la galerie MIGA.
- niches interféromètre : elles sont implantées tous les 50 m environ et représentent un élargissement de la section courante pour pouvoir loger le matériel spécifique.

Le projet se situe entre 300 et 420 m de profondeur à la cote approximative +485,9 NGF. Les caractéristiques géométriques des ouvrages sont présentées dans les plans réf. [6] qui font l'objet d'une réactualisation dans le cadre de la phase PRO.

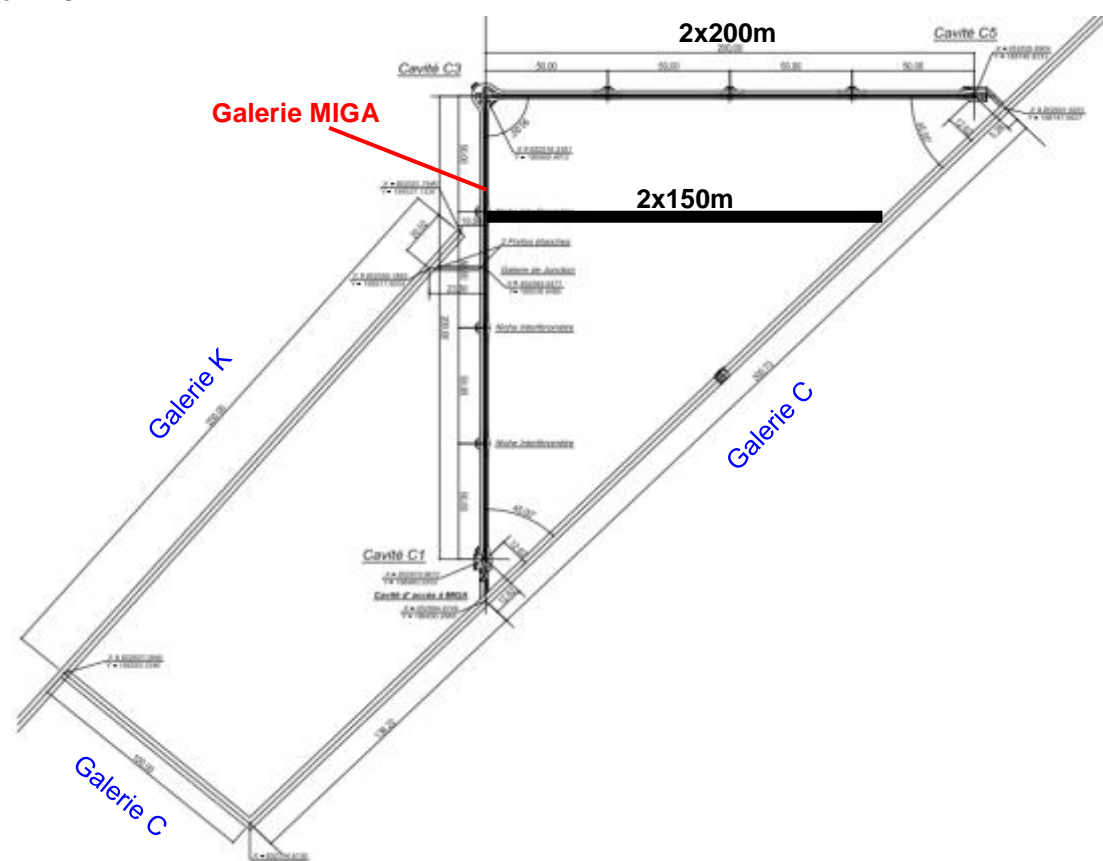


Figure 3 – Architecture générale du projet MIGA

5 FIABILITE DES DONNEES D'ENTREE GEOTECHNIQUES

Le Cahier A (réf. [1]) comporte les pièces suivantes :

- rapports de percement des galeries existantes (archives de la SEREB),
- relevés des accidents géologiques des galeries existantes (archives de la SEREB),
- coupes géotechniques des galeries existantes (archives de la SEREB),
- carte et coupes géologiques de détail du LSBB (archives de la SEREB),
- coupes des sondages de 1966 ;
- forages-GAS (imagerie de paroi, densité, teneur en eau et résistivité) ;
- publications et autres documents bibliographiques :
 - Etude des processus d'écoulements de la zone non saturée pour la modélisation des aquifères karstiques, thèse de Garry B., 2007,
 - Caractérisation et modélisation numérique de l'effet de site topographique 3D : application à la Grande Montagne de Rustrel, Vaucluse, thèse de Maufroy E., 2010,
 - Rapport modèle GOCAD Rustrel 2011, Christophe Matonti,
 - Caractérisation de l'anisotropie d'une plateforme carbonatée karstifiée : Approche méthodologique conjointe sismique et électrique ; thèse Beres J., 2013,
 - Interprétation couplée de données géologiques, hydrogéologiques et géophysiques et réalisation d'un géomodèle local de la zone non saturée du karst, Ollivier C., 2013,
 - Réalisation d'inspections vidéo et de diagraphies gamma-ray sur trois forages de reconnaissance, BERGA SUD, 2014,
 - Création d'un géomodèle préliminaire de la galerie anti-souffle, Le Men T., 2014,
 - Etude d'une carotte de la plateforme urgonienne du Vaucluse : Approches sédimentologique, pétrophysique et numérique, Bouaziz I., 2015.

Les sondages carottés réalisés en 1966 concernent majoritairement la zone d'entrée au laboratoire. Leur distance par rapport aux futures galeries ainsi que leur profondeur ne les rendent pas « pertinents » pour la présente étude.

Les forages – GAS, réalisés depuis la galerie anti-souffle, s'arrêtent à 20m de profondeur à 480NGF environ. Les résultats de cette campagne apportent des informations concernant la fracturation du massif et le potentiel de karstification.

Les observations effectuées lors du creusement des galeries du laboratoire existant sont considérées comme fiables. Elles constituent les données les plus pertinentes du projet à partir desquelles sera principalement bâtie la synthèse géologique et géotechnique. Les différentes thèses et études apportent également des informations précieuses sur la caractérisation du massif karstique traversé par le LSBB. Le Tableau 1 présente de façon qualitative la fiabilité et la pertinence des données à disposition.

Il faut signaler quelques discordances entre les relevés des accidents géologiques et les coupes géotechniques. La fiabilité des deux données est considérée très bonne. Ces discordances seront précisées et vont conditionner le modèle géologique et géotechnique du projet.

N°	Donnée d'entrée	Descriptif	Source	Fiabilité et Pertinence
1	Rapports de percement des galeries existantes	Rapports de réclamation de l'entreprise et réponse du client	Entreprise (Sainrapt & Brice) et SEREB	Très bonne
2	Relevés des accidents géologiques des galeries existantes	Relevés des passages broyés, fracturés et cintrés ainsi que des éléments karstiques	Entreprise (Sainrapt & Brice)	Très bonne
3	Coupes géotechniques des galeries existantes	Coupes géotechniques en cours de construction avec relevés de fracturation et mesures de la résistance à la compression	Bureau d'Etudes Géotechniques de Marseille (BEG)	Très bonne
4	Carte et coupes géologiques de détail du LSBB	Carte et coupes bâties à partir de l'interprétation des données n°1 à 3 ⁽¹⁾	Travaux universitaires ⁽¹⁾	Moyenne
5	Coupes des sondages de 1966	Sondages carottés à l'entrée du laboratoire	BEG	Faible
6	Forages - GAS	Forages à l'entrée de la Galerie Anti-Souffle (Galerie K) ayant fait l'objet de plusieurs types de diagraphie (imagerie de paroi, résistivité, densité, etc.)	SEMM Logging	Très bonne
7	Publications, thèses et autres documents bibliographiques	<p>Divers rapports de projets de fin d'étude et de thèses traitant des conditions géologiques et hydrogéologiques rencontrées au niveau du LSBB.</p> <p>Plusieurs thèses s'intéressent plus particulièrement à la caractérisation de la zone non saturée du système karstique.</p> <p>Un modèle GOCAD du laboratoire avec représentation des failles a été réalisé, notamment à partir de la carte de détail du LSBB (n°4).</p> <p>Le rapport de synthèse des investigations menées par BERGA SUD à proximité de la Galerie de secours est également disponible. Il présente les résultats des imageries de paroi et des diagraphies gamma-ray entreprises sur trois forages de reconnaissance.</p>	Divers auteurs	Moyenne à Bonne

Tableau 1 – Degré de fiabilité des données d'entrée géotechniques

⁽¹⁾ La méthode d'élaboration de cette carte et des coupes associées n'est pas connue. D'après l'AMO, il s'agirait de travaux universitaires qui s'appuient en partie sur les données numérotées 1 à 3.

Par ailleurs, un sondage carotté de grande longueur (240 m) est actuellement en cours à l'emplacement des futures galeries MIGA. Les résultats de ce sondage, qui ne pourront pas être intégrés dans la première version de ce Cahier B, constitueront les données les plus représentatives des conditions géologiques effectivement rencontrées au droit de la première branche de la nouvelle galerie. Les modèles géologiques et géotechniques élaborés dans le présent rapport devront être mis à jour suite à la réception des résultats du sondage carotté.

6 SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE

Il s'agit de définir le contexte géologique et tectonique général du site, puis de le confronter aux informations disponibles au niveau du LSBB afin de bâtir le modèle géologique à l'échelle du projet MIGA.

6.1 CADRE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL

6.1.1 DESCRIPTION GEOMORPHOLOGIQUE

Le site de l'étude est localisé dans la partie sud du massif des Monts de Vaucluse. Cet ensemble montagneux du Sud-Est de la France s'inscrit dans le système hydrographique du Bassin de Vaucluse dont les limites sont :

- la vallée du Toulourenc et la chaîne Ventoux-Lure (Mont Ventoux, Montagne d'Albion et Montagne de Lure) au Nord,
- le bassin de Carpentras à l'Ouest,
- le bassin d'Apt et la chaîne du Lubéron au Sud,
- le bassin de Forcalquier et la plaine de la Durance à l'Est.

Les Monts de Vaucluse sont essentiellement constitués de massifs calcaires, vestiges de la vaste plateforme carbonatée qui recouvrait la Provence durant le Crétacé inférieur. La morphologie des reliefs est très contrastée du Nord au Sud :

- la chaîne septentrionale Ventoux-Lure domine la région avec une altitude moyenne qui dépasse 1000 m. Le point culminant est le Mont Ventoux à 1912 m. Les reliefs sont accidentés avec des dénivelées qui atteignent 1600 m entre le sommet du massif et la vallée du Toulourenc,
- la topographie s'adoucit au sud des Monts de Vaucluse et à l'Est au niveau du Plateau d'Albion. Ce secteur, sur lequel est implanté le LSBB (cf. Figure 4), est caractérisé par une vaste dalle monoclinale inclinée vers le Sud-Ouest.

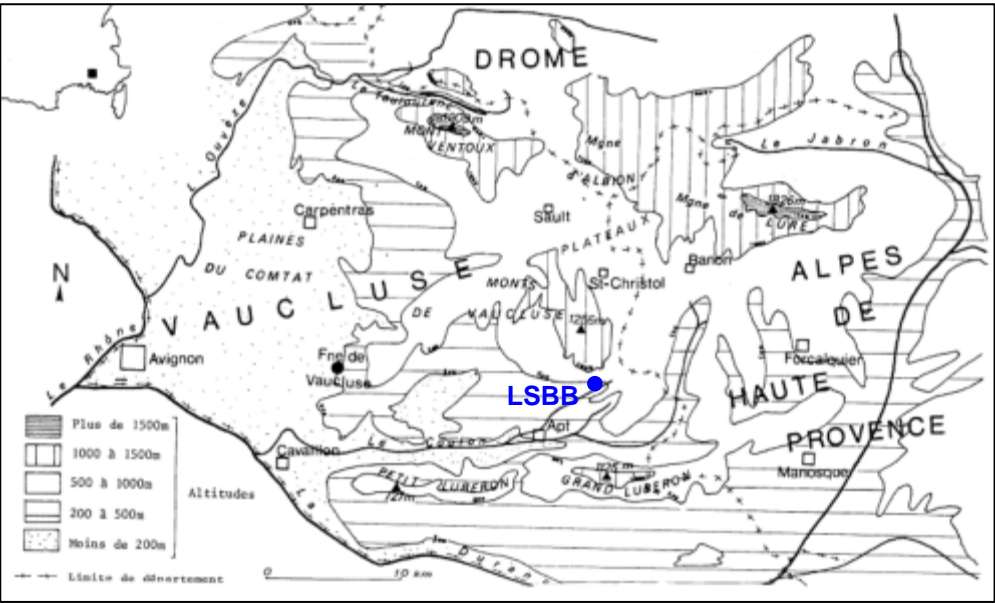


Figure 4 – Morphologie du site d'étude (Puig, 1987, extrait de la thèse de Garry B. réf. [1])

La région est également soumise à une importante karstification. Les nombreux avens, ouvalas et dolines qui façonnent le paysage des plateaux d'Albion et de Saint Christol sont les témoins de cette activité karstique intense (cf. Figure 5). L'exutoire de ce système karstique se situe à la Fontaine de Vaucluse (cf. Figure 4).



Figure 5 – Photo de l'aven Aubert situé sur le Plateau d'Albion (source photo : Boulangeat C., 2015)

6.1.2 DESCRIPTION LITHOLOGIQUE ET STRATIGRAPHIQUE

La carte géologique simplifiée des Monts de Vaucluse est fournie ci-dessous.

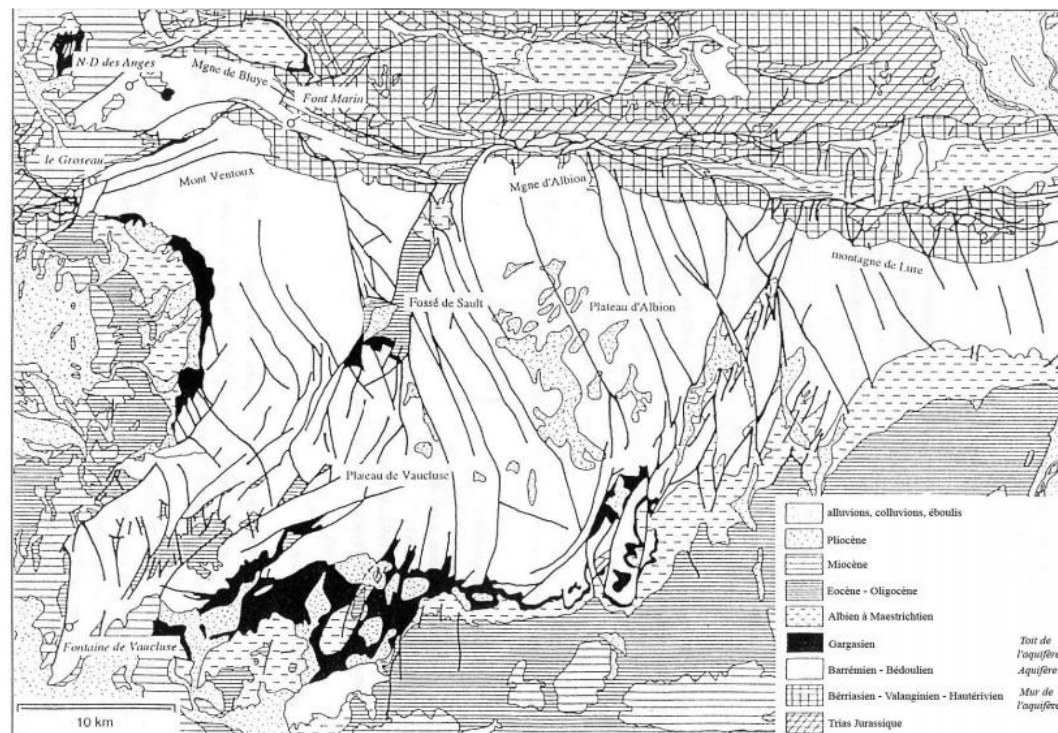


Figure 6 – Carte géologique de la région des Monts de Vaucluse (Couturaud, 1993, extrait de la thèse de Garry B. réf. [1])

Les principales unités lithologiques rencontrées sont les suivantes (de la plus ancienne à la plus récente) :

- **Valanginien – Hauterivien inférieur** : marno-calcaire à fossiles pyriteux pour le faciès valanginien (jusqu'à 200 m d'épaisseur), marno-calcaire en base puis calcaire en partie sommitale pour le faciès hauterivien (670 m au nord du Mont Ventoux). Ces formations constituent le mur étanche du système karstique de la Fontaine de Vaucluse,
- **Hauterivien supérieur – Barrémien – Bédoulien (Aptien inférieur)** : séries à forte dominante calcaire (bancs calcaires massifs), généralement de couleur claire, qui contiennent quelques passages marneux responsables de la formation de nappes perchées. Le calcaire se présente sous son faciès urgonien, caractéristique des étages bédoulien et barrémien. Ces dépôts accueillent l'aquifère de la Fontaine de Vaucluse et sont soumis à une forte karstification. L'épaisseur du système karstique atteint plusieurs centaines de mètres,
- **Gargasien (Aptien intermédiaire) – Albien – Cénomaniens (Crétacé supérieur)** : cette unité est retrouvée sur le pourtour des reliefs et constitue la couverture imperméable de l'aquifère.

Le calcaire urgonien correspond à un faciès sédimentaire sub-récifal contenant essentiellement des bioconstructeurs de type rudistes ou orbitolines (cf. Figure 7). Sa présence est synonyme d'un dépôt en milieu tropical, dans une mer peu profonde, chaude et agitée. Il n'est pas représentatif d'un étage géologique particulier mais désigne plutôt un faciès calcaire dont la période de dépôt s'étend du Barrémien à l'Aptien. Il se compose de trois sous-faciès :

- le calcaire bioclastique inférieur (U1) constitué de calcarénites (à silex en base), généralement blanches, et dont l'épaisseur peut atteindre 250 m dans la région de Fontaine de Vaucluse (du Barrémien au Bédoulien),
- le calcaire à Rudistes (U2) qui se caractérise par sa texture crayeuse en toit et la présence abondante de tests de Rudistes. Sa puissance peut atteindre 100 à 150 m vers le Sud,
- la calcaire bioclastique supérieur (U3) dont l'épaisseur varie de 15-20 m au Sud-Est à 30-45 m au Nord-Ouest du massif. Il se compose d'un horizon inférieur à silex et d'un horizon supérieur bioclastique.

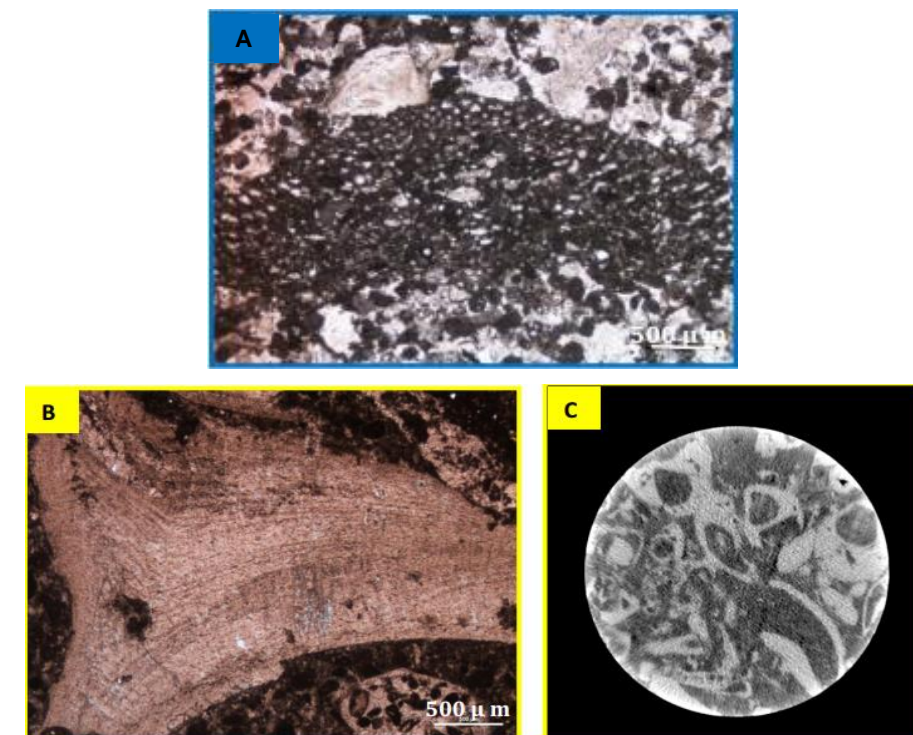


Figure 7 – Observation au microscope de lames minces de calcaires à orbitolines (photo A) et à Rudistes (photos B et C) - Extrait de l'étude de Bouaziz I. réf. [1]



La coupe stratigraphique synthétique de la géologie régionale est présentée en Figure 8.

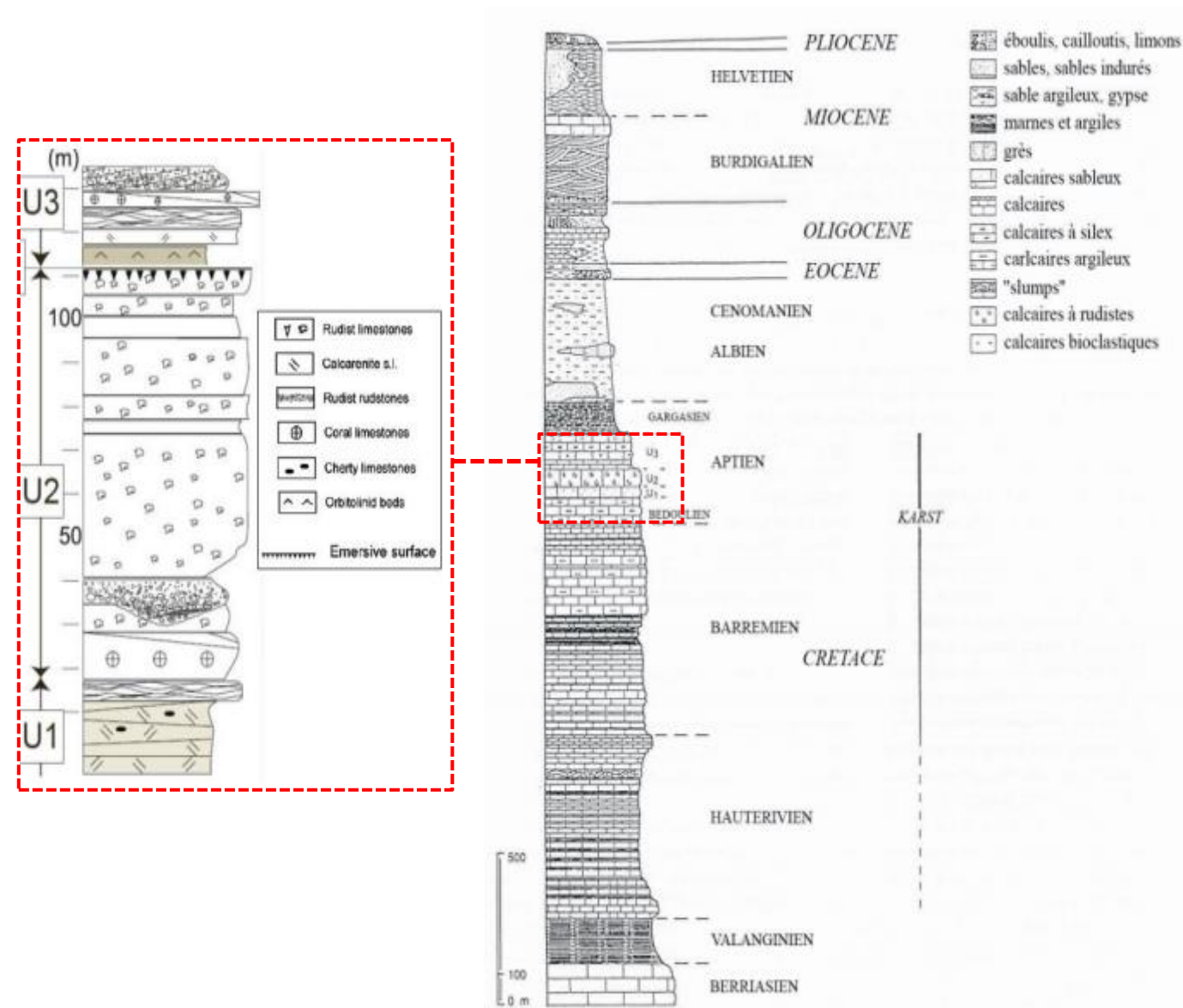


Figure 8 – Log stratigraphique (Puig, 1987, extrait de la thèse de Garry réf. [1])

6.1.3 HISTOIRE GEOLOGIQUE

Au début du Crétacé inférieur, le Bassin Vocontien (extrémité de la Téthys) s'étend sur une grande partie du Sud-Est de la France et descend jusqu'à l'actuelle vallée du Toulourenc (cf. Figure 9). Les dépôts hémipélagiques de l'Hauterivien retrouvés au Nord de la chaîne Ventoux-Lure sont les témoins de cet environnement océanique profond.

Le climat tropical qui règne à cette époque favorise la formation des calcaires urgoniens en bordure de la Téthys. Au Bédoulien, la plateforme urgonienne recouvre toute la région.

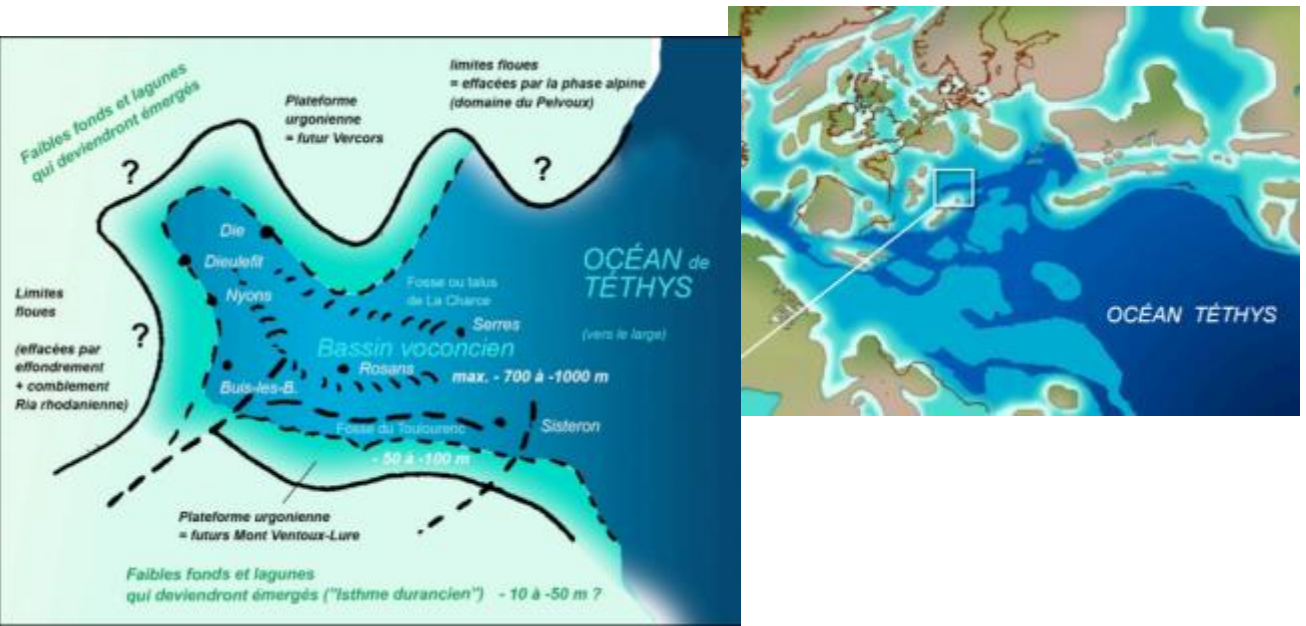


Figure 9 – Extension du Bassin Vocontien au début du Crétacé inférieur (source : Parc Naturel Régional des Baronnies Provençales)

A partir de l'Aptien supérieur, les dépôts marins sont remplacés par des dépôts terrigènes qui annoncent une émergence prochaine. Le pivotement de la plaque ibérique et la collision qui s'en suit avec la plaque européenne amorce la formation des Pyrénées et provoque l'émergence de la plateforme Nord-Provençale (« bombement durancien » ; cf. Figure 10). Cet épisode tectonique s'accompagne du plissement des séries calcaires selon une direction E-W et de l'apparition de failles normales. L'évolution de la plateforme Nord-Provençale est toutefois entrecoupée de plusieurs périodes d'ennoiement.

Les dépôts dans le Bassin Vocontien se poursuivent plus au Nord.

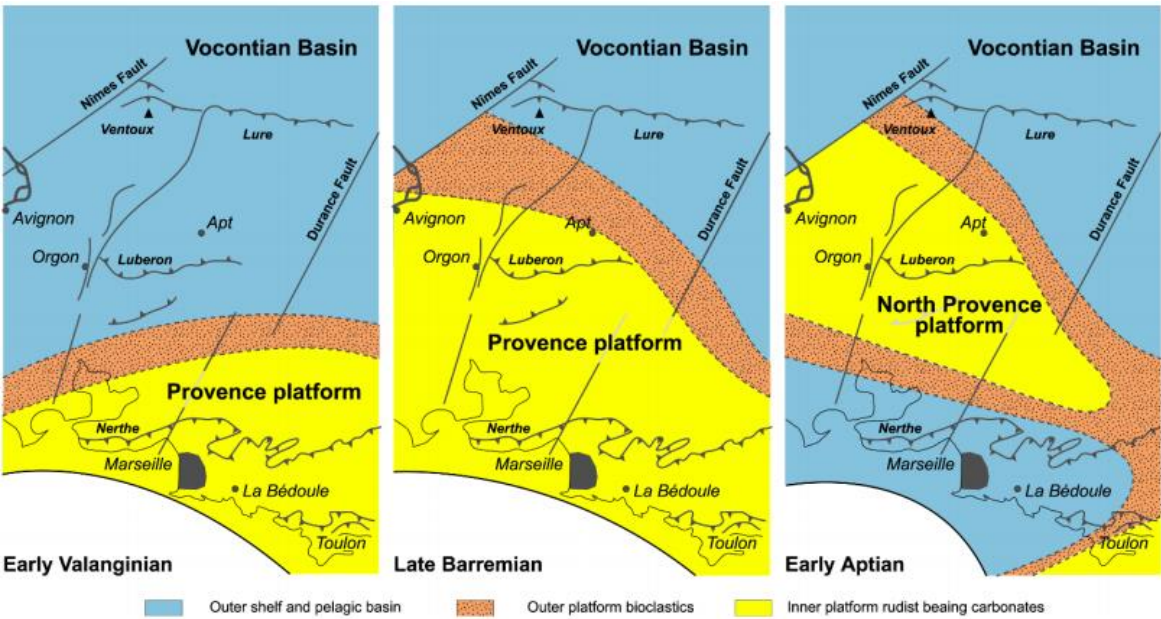


Figure 10 – Evolution de la plateforme provençale durant le Crétacé inférieur (Masse, 1994, extrait de l'étude de Le Men T., 2014)



L'érosion des couches sédimentaires superficielles de l'Albien et du Gargasien durant cette phase d'orogénèse initie la karstification des calcaires urgoniens sous-jacents.

Au cours de l'Eocène, un nouvel épisode de l'orogénèse pyrénéo-provençale provoque l'exhaussement des Monts de Vaucluse (compression N-S). Cette phase est suivie de mouvements d'étirement qui créent plusieurs fossés d'effondrement dans la région, notamment autour du Mont Ventoux (fossés d'Aurel-Sault et de Simiane-Montsalier-Banon-Saumane de direction NNE-SSW).

Par la suite, plusieurs mouvements de compression liés à la surrection alpine (convergence des plaques apulienne et européenne) durant l'Oligocène et le Miocène vont façonner le paysage tel que nous le connaissons aujourd'hui. De grands accidents d'extension hectométrique à kilométrique apparaissent, essentiellement d'orientation NE-SW et NW-SE, et certaines anciennes failles sont réactivées. La karstification du massif est accentuée sous l'effet du découpage provoqué par l'apparition des failles. Au Miocène, la phase de compression s'accompagne d'un déplacement de l'ensemble du bloc provençal vers le Nord (chevauchement du Mont Ventoux et du Lubéron).

Aujourd'hui, la région est marquée par de grandes structures d'allongement E-W dont les principales sont :

- la chaîne septentrionale de Mont Ventoux-Montagne d'Albion-Lure : chevauchement vers le nord d'un anticlinal sur une structure synclinale, les plis étant tous les deux déversés vers le Nord,
- le flanc sud de la chaîne Mont Ventoux-Lure qui correspond à une structure monoclinale qui chevauche les écaïlles du flanc nord,
- le synclinal d'Apt dans la continuité de la structure monoclinale et dont le remplissage est constitué de terrains de l'Albien-Cénomanien et du Tertiaire,
- le Lubéron : structure anticlinale déversée vers le Sud et qui chevauche les terrains tertiaires.

Les coupes géologiques simplifiées à l'échelle régionale sont fournies ci-après.

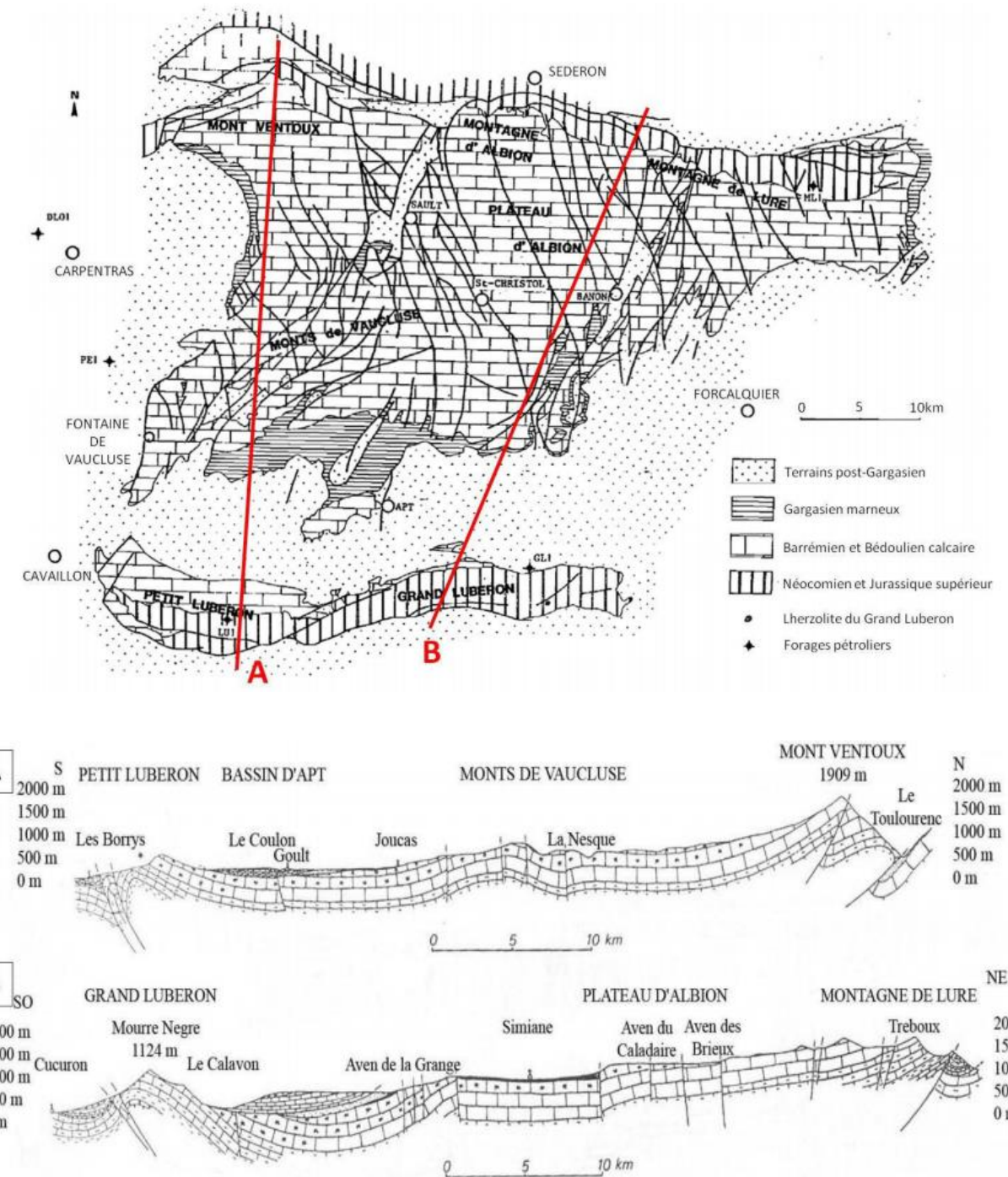


Figure 11 – Carte et coupes géologiques simplifiées de la région des Monts de Vaucluse (extrait de la thèse de Garry réf. [1])

6.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE DU PROJET

Les données géologiques disponibles à l'échelle du projet MIGA sont présentées et analysées ci-dessous.

6.2.1 CADRE GEOLOGIQUE A L'ECHELLE DU PROJET

La zone d'étude appartient à l'ensemble structural formé par la plateforme carbonatée mise en place durant le Crétacé Inférieur (cf. §6.1.3). D'après la carte géologique de Sault-de-Vaucluse (voir l'extrait en Figure 12), le LSBB recoupe les formations calcaires datant du Bédoulien et du Barrémien :

- le calcaire d'âge bédoulien est présent sous la forme de ses faciès urgoniens :
 - n_5U_3 : faciès bioclastique supérieur,
 - n_5U_2 : faciès à Rudistes,
 - n_5U_1 : faciès bioclastique inférieur.

La lithologie détaillée de ces différents faciès est décrite dans le §6.1.2. L'épaisseur de la série urgonienne est de l'ordre de 200 à 300 m dans ce secteur. A noter que ces informations sont essentiellement issues de la notice de la carte géologique qui utilise la nomenclature de Leenhardt (1882) pour subdiviser l'Urgonien. Leenhardt associe les faciès urgoniens uniquement à l'étage bédoulien,

Ces séries sont surmontées par les Marnes gargasiennes (Aptien supérieur).

- le calcaire barrémien correspond à un calcaire argileux divisé en deux termes : un terme supérieur à intercalations de silex et un terme inférieur gris à intercalations marneuses. Il contient différents types de fossiles d'Ammonites. Son épaisseur ne dépasse pas 200 à 250 m. Il repose sur le calcaire de l'Hauterivien qui affleure plus au Nord sous un faciès argileux à passées marneuses.

La carte géologique indique un pendage global des couches vers le Sud.

Plusieurs failles d'orientation NE-SW et E-W affectent le site et recoupent les galeries existantes du LSBB.

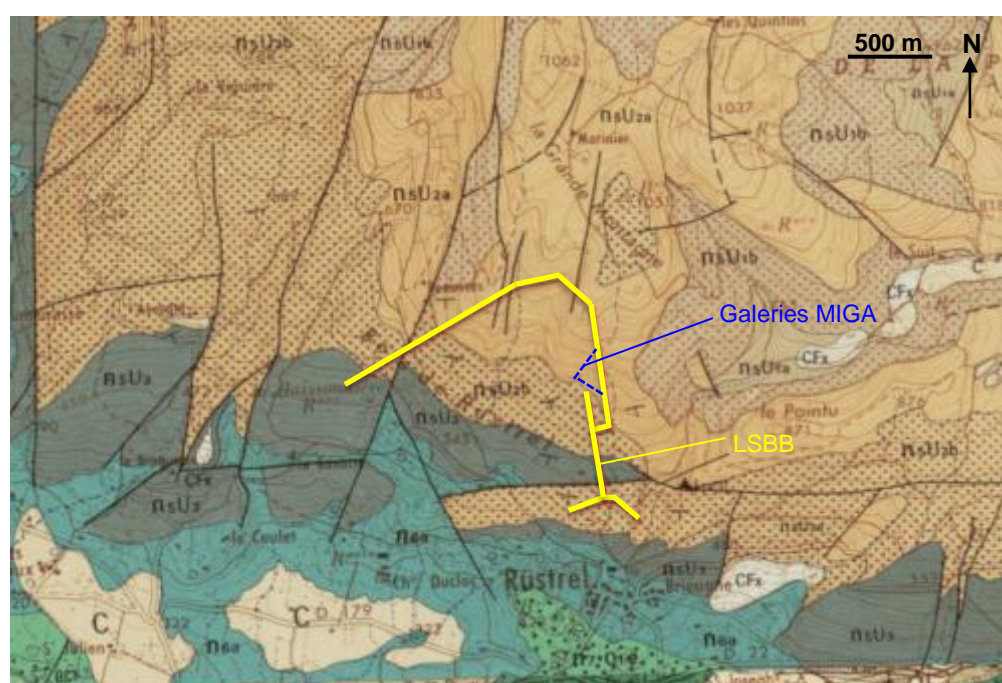


Figure 12 – Extrait de la carte géologique 1/50000 de Sault-de-Vaucluse, source BRGM (site Infoterre)

Par ailleurs, une carte géologique et plusieurs coupes simplifiées au droit du LSBB ont été fournies. Ces éléments sont présentés dans les figures suivantes.

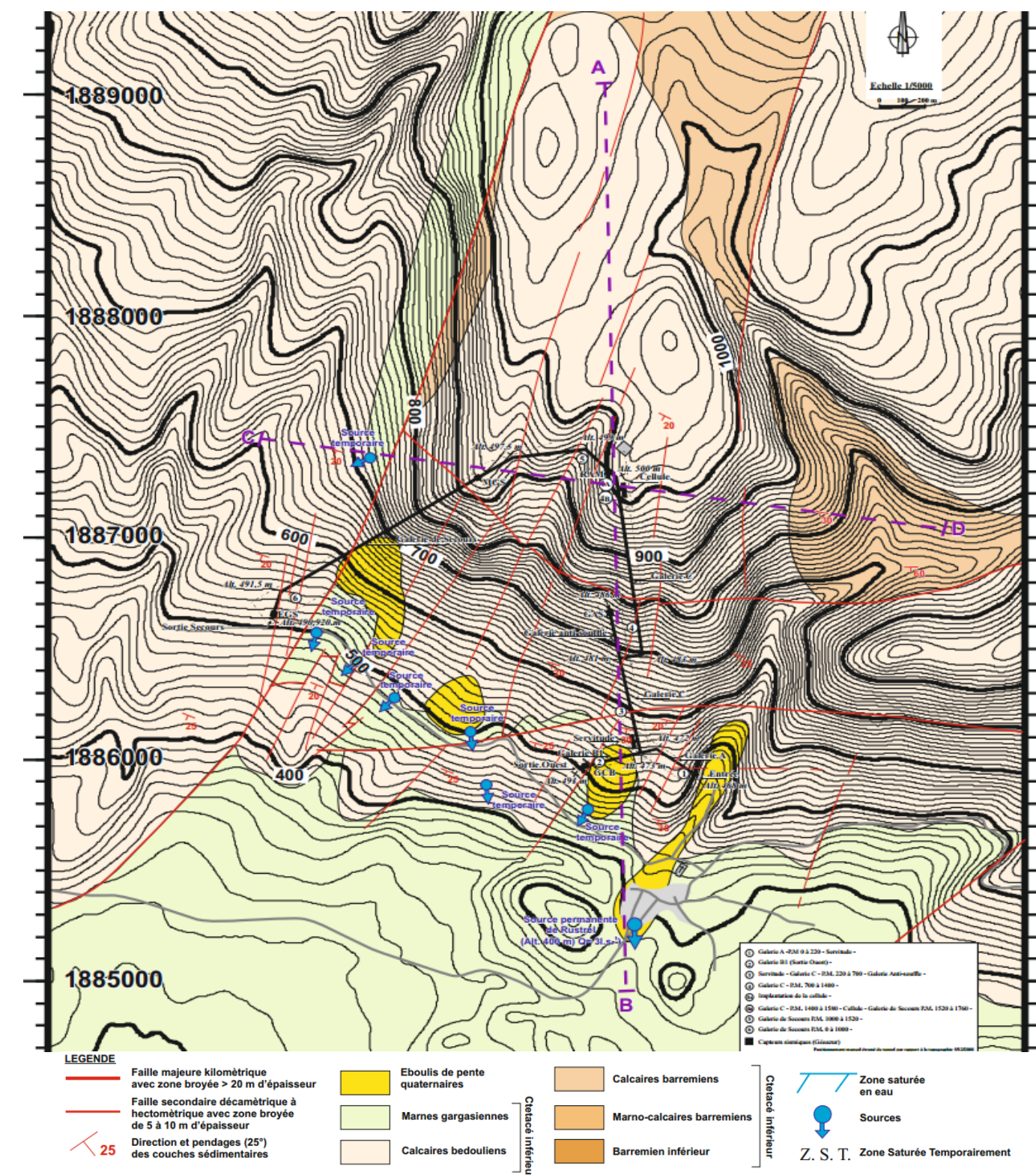


Figure 13 – Carte géologique de détail du LSBB

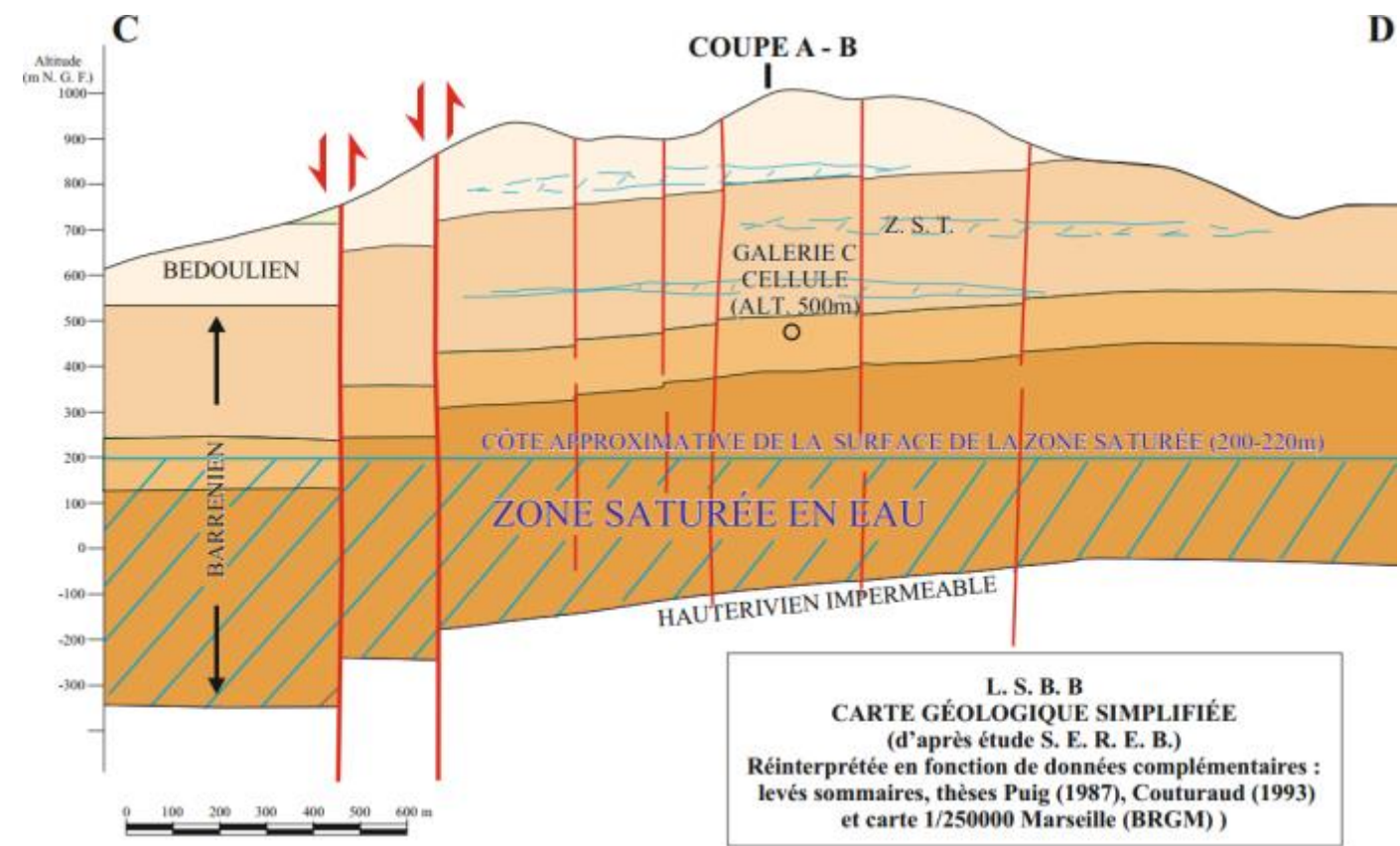


Figure 14 – Coupe géologique E-W au droit du LSBB

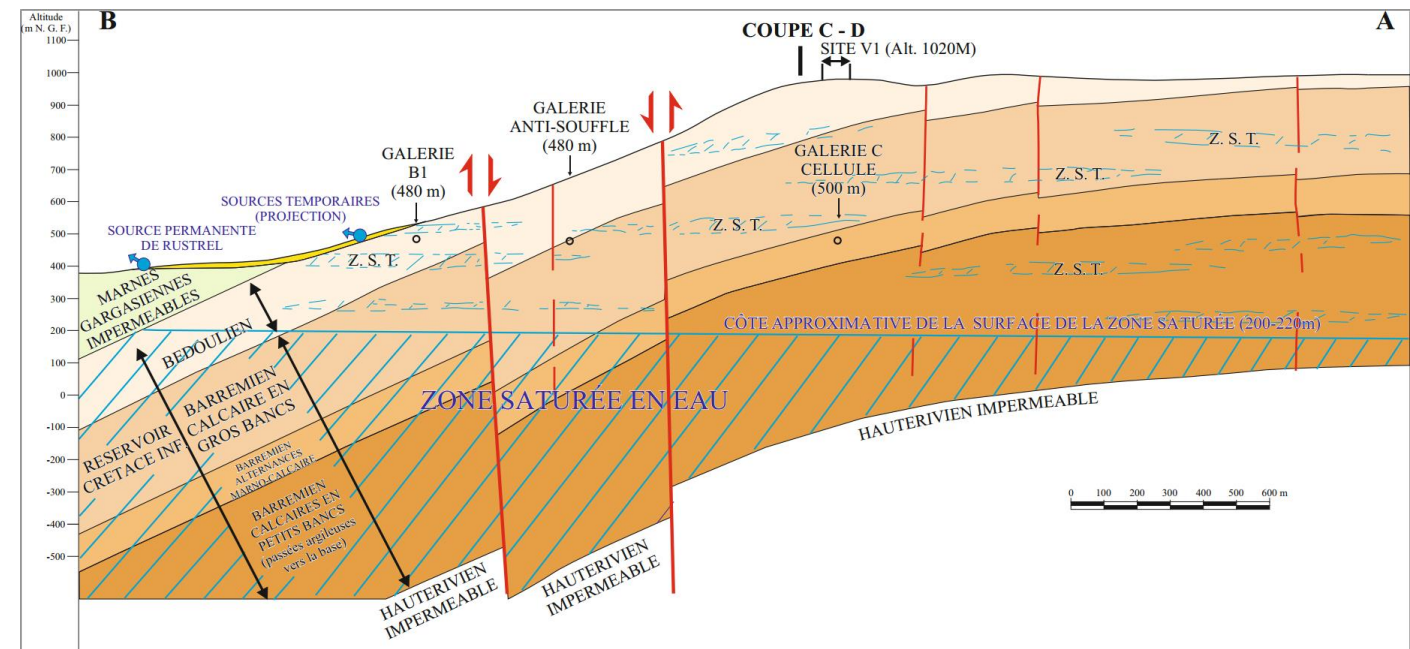


Figure 15 – Coupe géologique N-S au droit du LSBB

La carte et les coupes interprétatives de détail sont globalement cohérentes avec les informations fournies dans la carte et la notice du BRGM (notamment le pendage d'environ 20° des terrains vers le Sud). Quelques différences sont toutefois à relever :

- le réseau de failles est plus dense sur la carte de détail avec une multitude d'accidents NE-SW qui traversent le LSBB. Ce niveau de précision est certainement lié à une analyse plus fine du contexte tectonique local, notamment suite au retour d'expérience du creusement des galeries du laboratoire et de la réalisation de nouveaux levés de fracturation en surface. Sont notamment distingués deux accidents majeurs de type faille, orientés E-W, qui apparaissent sur la coupe A-B (cf. Figure 15), deux autres accidents majeurs NE-SW repérés sur la coupe C-D, et des failles secondaires, généralement d'orientation NE-SW,
- la carte de détail fait affleurer les calcaires du Barrémien sur le versant nord-est de la Grande-Montagne alors que la carte du BRGM indique la présence du faciès urgonien U₁ de l'étage bédoulien. L'association du faciès U₁ au Bédoulien ou au Barrémien n'est cependant pas fixée et diffère selon les auteurs comme l'illustre la figure suivante :

URGONIAN		
Leenhardt, 1883		
Goguel, 1932	BAR.	BEDOULIAN
Rivier, 1960	BEDOULIAN	
Maillard, 1965	BARREMIAN	BED.
Fahy, 1965	BARREMIAN	
Masse, 1976	BAR.	BEDOULIAN

Figure 16 – Association des faciès urgoniens aux étages du Bédoulien et du Barrémien (extrait de la thèse de Carrière, réf. [24])

- sur les coupes géologiques, l'épaisseur des séries du Bédoulien et du Barrémien ne concorde pas avec les ordres de grandeur indiqués dans la notice de la carte géologique de Sault-de-Vauchuse (cf. §6.1.2). L'épaisseur du Barrémien est supérieure à 500 m alors qu'elle est limitée à 250 m dans la notice du BRGM.



6.2.2 ANALYSE DES FORAGES GAS

Cinq sondages carottés verticaux d'environ 20 m de profondeur ont été réalisés depuis la galerie anti-souffle (GAS) et ont fait l'objet d'une diagraphie par imagerie de paroi. Leur implantation en plan est fournie dans la Figure 17.

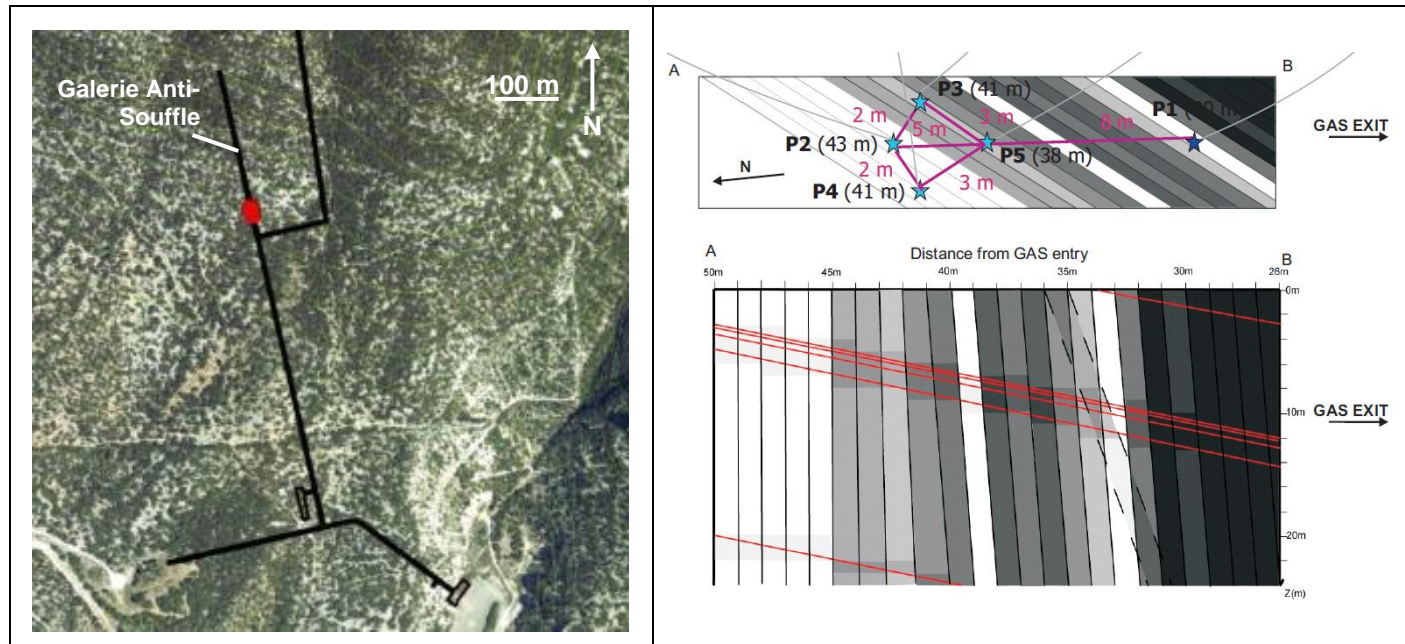


Figure 17 – Implantation des forages GAS

Les sondages ont renseigné sur la nature et l'état du massif à proximité de la GAS, notamment concernant :

- la lithologie et la stratigraphie (cf. §6.2.2.1),
- l'état de fracturation : un relevé des discontinuités a été effectué tout au long des sondages (cf. §6.2.2.2),
- le degré de karstification : présence de fissures/vides d'origine karstique (cf. §7 relatif à la synthèse hydrogéologique).

Les futures galeries MIGA, localisées à plusieurs centaines de mètres au Nord, se situent sous une couverture plus importante, comprise entre 300 et 400 m d'épaisseur contre environ 200 m au droit de la GAS. Compte tenu du pendage global des couches vers le Sud, la géologie du projet MIGA peut différer de celle rencontrée dans la GAS. Néanmoins, les informations apportées par les forages GAS doivent être intégrées dans l'analyse comparative des données aux différentes échelles (locale et régionale) de façon à établir un modèle géologique cohérent pour les galeries MIGA.

6.2.2.1 Lithologie et stratigraphie

Les imageries de paroi font apparaître un terrain rocheux dont la richesse en débris d'organismes fossiles varie selon la profondeur. Une alternance de niveaux clairs et plus sombres est également observée. Cette description paraît en cohérence avec celle des calcaires caractéristiques de la région, notamment avec les faciès bioclastiques de l'Urgonien. La profondeur de la GAS laisserait penser au faciès U₁ mais le niveau de détail des informations disponibles n'est pas suffisant pour l'affirmer.

La différenciation de niveaux selon leur couleur et/ou leur richesse en résidus fossiles met en évidence un pendage de la stratigraphie vers le Sud, ce qui concorde avec les observations régionales. (cf. §6.2.1). La valeur du pendage est de l'ordre de 10 à 15°.

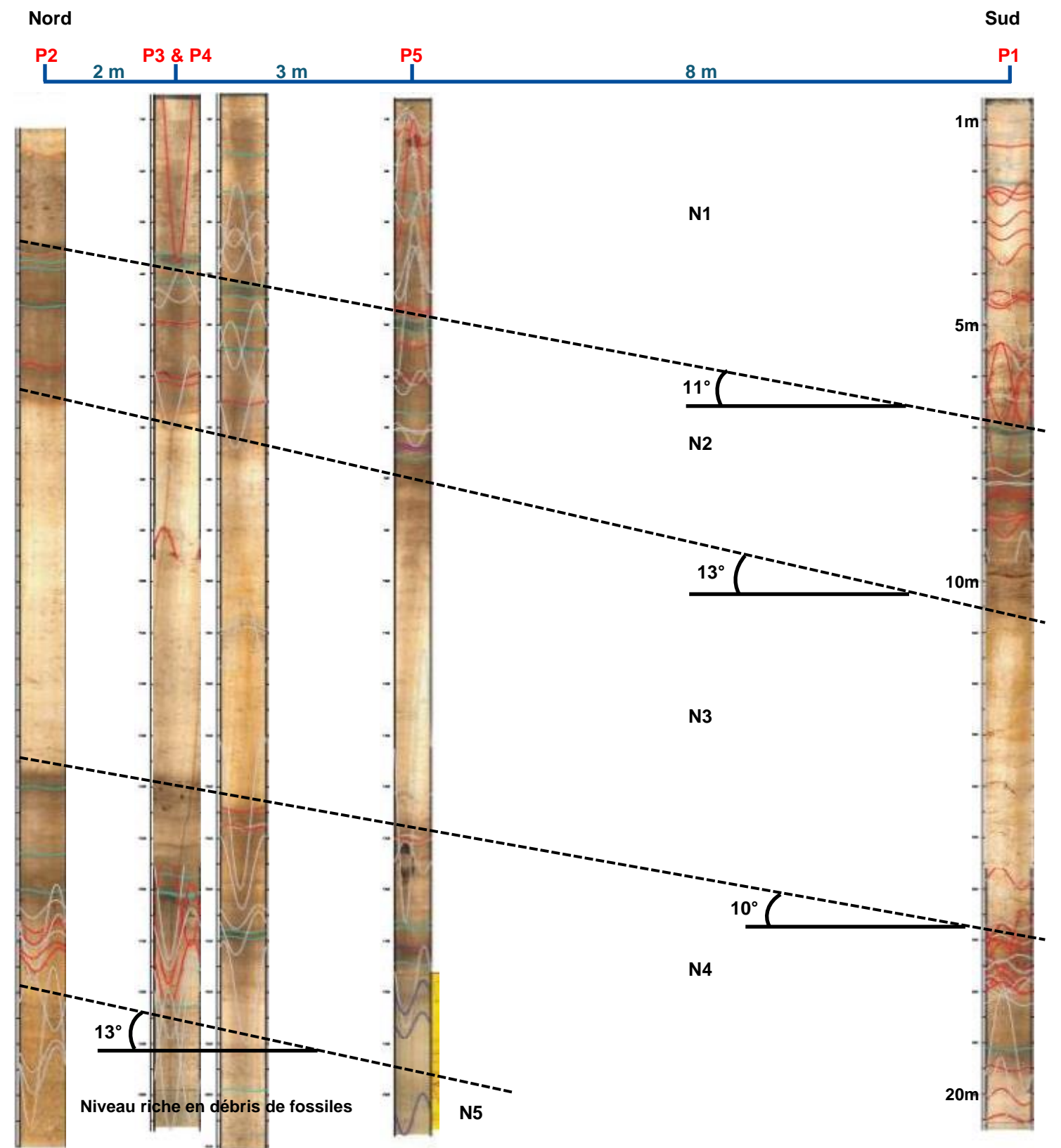


Figure 18 – Mise en évidence de la stratigraphie sur les forages GAS

6.2.2.2 Analyse structurale

La figure suivante présente la projection de l'ensemble des discontinuités sur le canevas de Wulff (projection sur l'hémisphère supérieur). Seuls les pôles des plans de discontinuité sont représentés. Le détail des relevés par sondage est fourni dans l'Annexe A. Les données brutes de l'imagerie de paroi sont intégrées dans le Cahier A (réf. [1]).

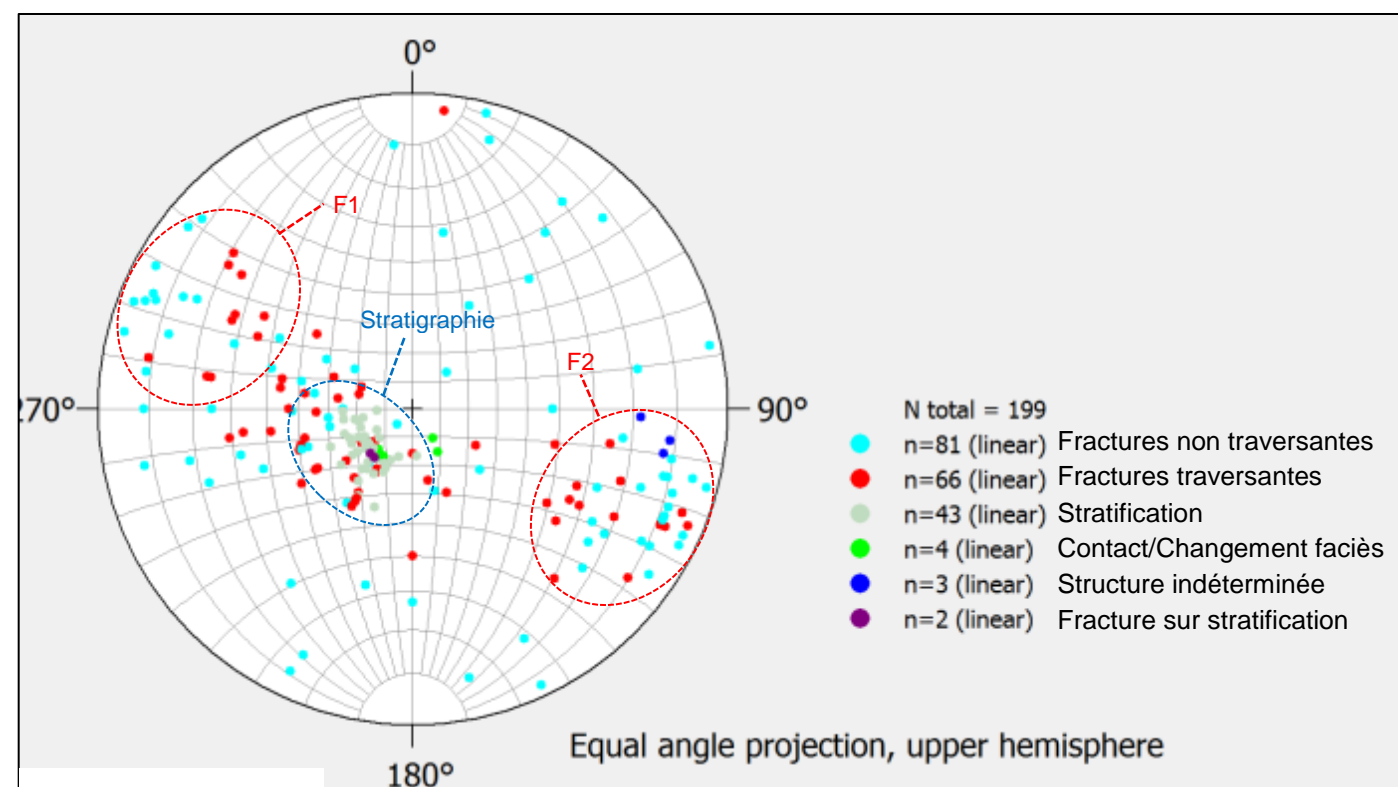


Figure 19 – Projection stéréographique de l'ensemble des discontinuités relevées sur les forages GAS (hémisphère supérieur)

Les relevés mettent en évidence la présence des discontinuités principales suivantes :

- les plans de stratification,
- les fractures non traversantes caractérisées généralement par une ouverture limitée,
- les fractures traversantes avec une ouverture plus prononcée.

Ces trois types de discontinuité sont les plus abondants (95% des mesures). D'autres fractures, plus anecdotiques, sont repérées sur certains forages : des changements de faciès relevés sur les forages P2 et P3 mais qui sont en réalité observés sur l'ensemble des sondages et que l'on peut rapprocher de la stratigraphie (azimut et pendage semblables) ainsi que des structures qui n'ont pas pu être identifiées sur le forage P5 à cause de la présence d'eau trouble qui a conduit à changer la méthode d'imagerie (passage à une diagraphe sonique à partir de 17,65 m de profondeur).

Les relevés indiquent que l'azimut des plans de stratification varie de N200 à N270 (azimut du vecteur pendage, convention AFTES) pour un pendage vers le Sud généralement compris entre 10 et 30°, en cohérence avec les observations de la Figure 18. En revanche, l'orientation des autres types de fractures (traversantes et non traversantes) est moins évidente. Elle varie significativement avec la profondeur et entre les différents sondages (cf. Figure 20).

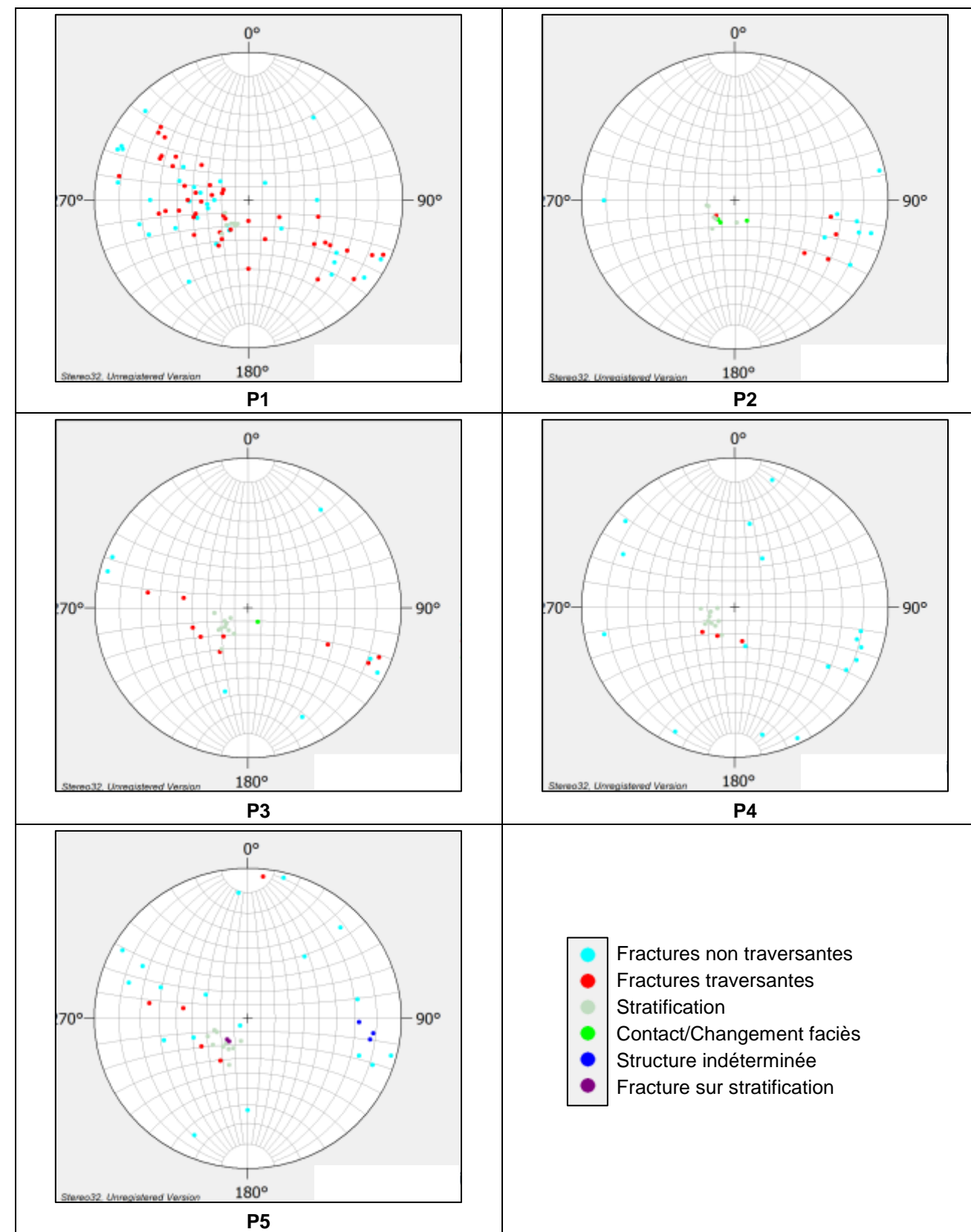


Figure 20 – Projection stéréographique par forage GAS (hémisphère supérieur)

La rosace et le diagramme de densité des fracturations renseignent sur les directions préférentielles des discontinuités (cf. Figure 21). Trois orientations se distinguent :

- la densité maximale est observée pour des vecteurs pendages dont l'azimut est compris entre N220 et N270 avec un pendage inférieur à 30° (convention AFTES). Il s'agit essentiellement de la stratification et d'une partie des fractures traversantes et non traversantes,
- une autre zone moins dense est observée pour des vecteurs pendages d'azimut N270 à N315 et de pendage supérieur à 50°. Cette famille, notée F1, est repérée sur le stéréogramme de la Figure 19. Il s'agit exclusivement de fractures traversantes et non traversantes,
- enfin une dernière famille, notée F2 sur la Figure 19 et caractérisée par des vecteurs pendages d'azimut N90 à N135 et un fort pendage (> 50°). Là encore, il s'agit uniquement de fractures traversantes et non traversantes. Ces discontinuités ont la même direction que celles du point précédent mais possèdent un pendage de sens opposé.

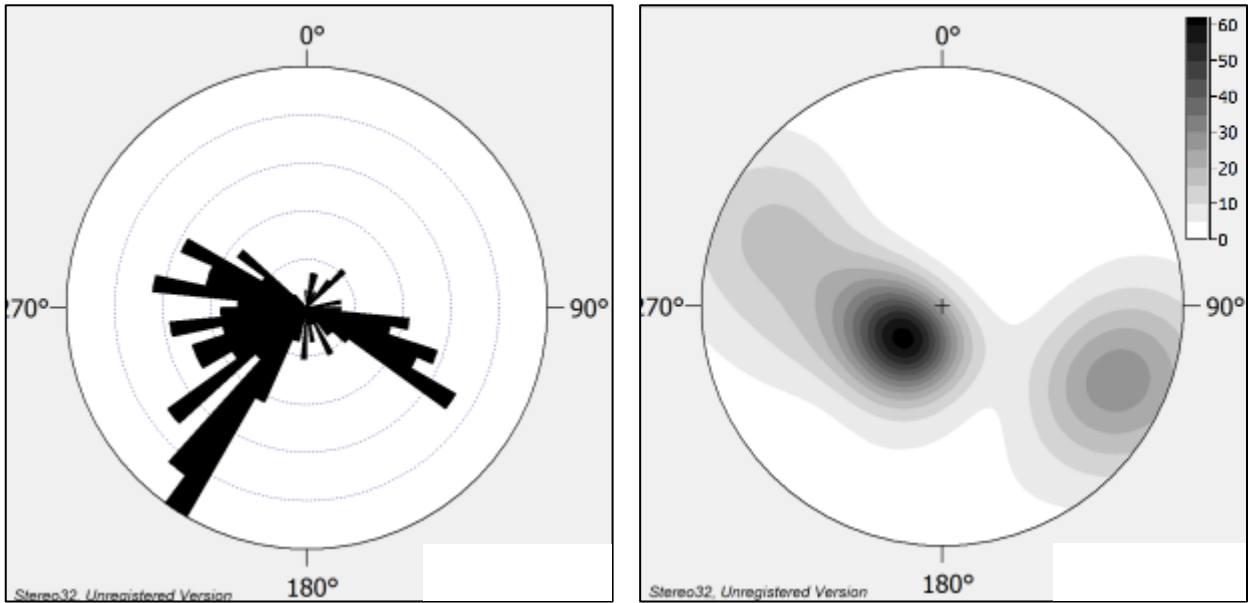


Figure 21 – Rosace et diagramme de densité des fracturations

L'ouverture des fractures est d'ordre millimétrique à centimétrique. Un vide important d'une hauteur de 1m est toutefois observé sur le forage P5.

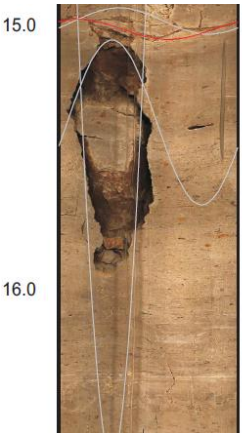


Figure 22 – Vide de 1m sur le forage P5

Par ailleurs, la densité de fracturation n'est pas répartie de la même façon selon la profondeur et les faciès géologiques observés (cf. niveaux N1 à N5 sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Certains niveaux, notamment ceux de couleur sombre comme N2 et N4, apparaissent plus fracturés (cf. Figure 23).

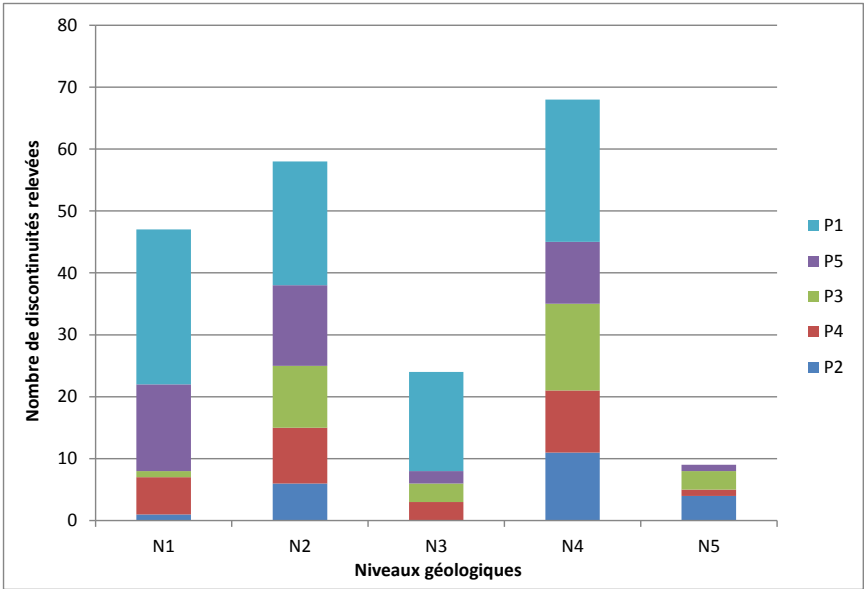


Figure 23 – Nombre de discontinuités par faciès géologique observé

6.2.3 ANALYSE DES RECONNAISSANCES MENEES EN 2014

Trois forages de reconnaissance ont été réalisés en 2014 par Idées eaux à proximité de la sortie de la galerie de secours du LSBB (cf. Figure 24). Ils ont fait l'objet d'inspections vidéo et de diagraphies gamma-ray. Leur cote Z est de 457 NGF, leur profondeur est de 400 m pour le forage F1 et 100m pour les forages F2 et F3. Les trois sondages sont espacés de 20m.



Figure 24 – Implantation des forages de reconnaissance de 2014

Les trois forages traversent les calcaires blancs massifs de l'Urgonien. Du fait de leur implantation, ils ne renseignent pas directement sur la géologie au niveau du projet MIGA. Cependant, le forage F1 rencontre la transition Barrémien/Bédoulien à environ 200m de profondeur. Celle-ci est marquée par un horizon riche en Rudistes caractéristique du faciès U₂ de l'Urgonien.

6.2.4 ANALYSE DES CONDITIONS DE CREUSEMENT DES GALERIES EXISTANTES

Les relevés géologiques effectués lors du percement des galeries du LSBB constituent les données les plus fiables et pertinentes pour l'établissement du modèle géotechnique du projet MIGA. Ces données sont exploitées de façon à mieux représenter la structure du massif encaissant et relever les points critiques suivants :

- direction et pendage des failles,
- présence de fissures et de diaclases,
- présence de vides karstiques,
- présence de zones broyées.

L'analyse est conduite pour chaque galerie en privilégiant toutefois les informations issues des galeries C et K (Anti-Souffle) qui sont les plus proches des galeries MIGA.

Par ailleurs, deux séries de relevés sont disponibles et sont confrontés dans l'analyse : ceux réalisés par l'entreprise lors des travaux (Sainrapt & Brice) et ceux réalisés par le Bureau d'Etudes Géotechniques de Marseille. Bien que les deux soient jugés fiables, les relevés du BEG Marseille sont considérés plus objectifs.

Les PM utilisés sont conformes aux relevés et coupes géotechniques à disposition.

L'ensemble des relevés, coupes et rapports de percement est fourni dans le Cahier A (réf. [1]).

6.2.4.1 Lithologie

Les coupes géotechniques font apparaitre sept faciès calcaires différents rencontrés lors du creusement :

- calcaire sublithographique : ce faciès se caractérise par un grain fin à très fin et une faible proportion d'argile. Il est généralement de couleur blanche à beige avec quelques passages plus foncés. Certains passages contiennent également des tests de Rudistes,
- calcaire spathique organogène : calcaire formé à partir de débris de coquilles cristallisés qui se rompent selon des facettes nettes,
- calcaire oolithique : calcaire formé d'oolithes (grains sphériques constitués de fines couches concentriques superposées),
- calcaire cristallin : calcaire à cristaux de calcite visibles à la loupe ou à l'œil nu,
- calcaire marneux : calcaire dont la proportion d'argile est comprise entre 5% et 35%,
- calcaire noir compact,
- calcaire crayeux.

La Galerie A, d'un linéaire de 230 m, est entièrement creusée dans les calcaires sublithographiques.

La Galerie B1, d'un linéaire de 250 m, est majoritairement excavée dans les calcaires cristallins. A proximité de la jonction avec la galerie A, des calcaires oolithiques ont été rencontrés, relativement plus fracturés que les calcaires cristallins. Des calcaires marneux sont retrouvés au niveau de l'entrée de l'ouvrage.

La Galerie C, d'une longueur de 1320 m, est essentiellement creusée dans les faciès suivants :

- PM 240 à 560 : alternance de calcaires sublithographiques et de calcaires cristallins,
- PM 560 à 640 : calcaires blancs crayeux,
- PM 640 à 900 : calcaires spathiques (peu fracturés à fracturés),
- PM 900 à 1560 : calcaires sublithographiques (fracturés à très fracturés, avec quelques passages broyés)
- un passage de calcaire noir compact a été rencontré à l'extrémité nord (PM 1425 à 1480).

La galerie E, d'un linéaire de 1830m, est principalement réalisée dans les faciès suivants :

- PM 0 à 510 : alternance des calcaires crayeux et des calcaires spathiques ;
- PM 510 à 1830 : dominance des calcaires sublithographiques.

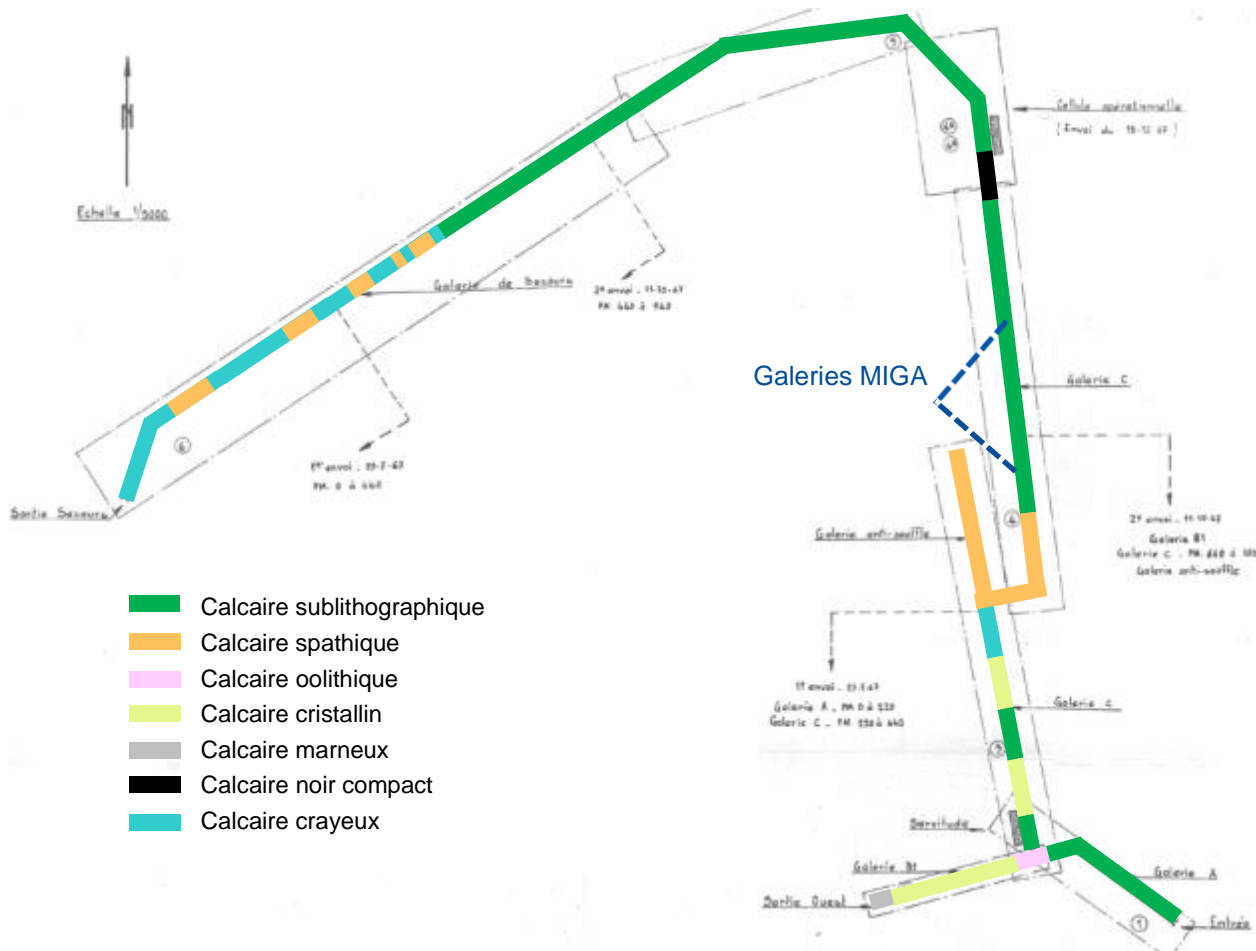
La galerie K, d'une longueur de 250 m, est creusée entièrement dans les calcaires spathiques organogènes.

La répartition des faciès au droit des galeries est récapitulée dans le tableau ci-dessous.

	Longueur galerie	Calcaire sublithogra-phique	Calcaire spathique	Calcaire oolithique	Calcaire cristallin	Calcaire marneux	Calcaire noir compact	Calcaire crayeux
Galerie A	230 m	100%	-	-	-	-	-	-
Galerie B1	250 m	-	-	12%	78%	10%	-	-
Galerie C	1320 m	55%	20%	-	15%	-	5%	5%
Galerie K	250 m	-	100%	-	-	-	-	-
Galerie E	1830 m	72%	6%	-	-	-	-	22%

Tableau 2 – Répartition des faciès calcaires relevés lors du creusement des galeries existantes

La figure suivante représente sur la vue en plan du LSBB les différentes unités lithologiques observées.



Les galeries MIGA semblent se situer à la transition entre les calcaires spathiques et sublithographiques qui est relevée aux alentours du PM 900 de la Galerie C. Une description plus détaillée de la géologie le long des galeries C et K (Anti-Souffle) est donnée ci-dessous. Le découpage lithologique des autres ouvrages est également fourni dans l'Annexe B.

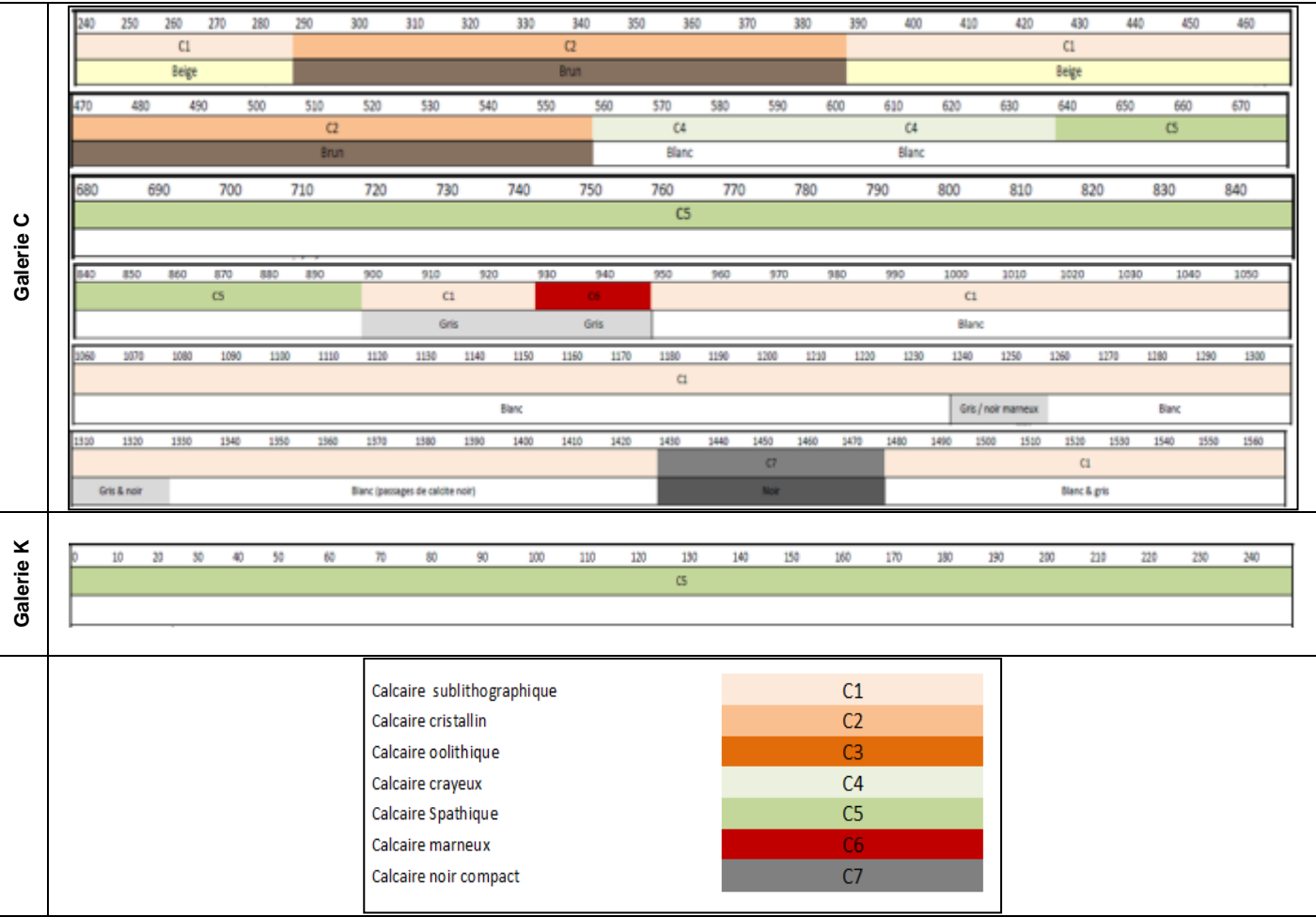


Figure 26 – Faciès lithologiques rencontrés lors du creusement des galeries C et K

Il est difficile d'associer avec certitude chaque faciès à un étage géologique particulier. Néanmoins, leur caractère bioclastique, la présence de Rudistes et leur couleur semblent correspondre aux calcaires urgoniens, notamment aux faciès U₂ (faciès à Rudistes) et U₁ (faciès bioclastique inférieur).

6.2.4.2 Analyse structurale

La terminologie utilisée dans les relevés des accidents géologiques est employée. Quatre zones reflétant l'état du massif rocheux ont été repérées :

- Zone de rocher moyen (Z1),
- Zone légèrement fracturée (Z2),
- Zone fracturée ou broyée avec argile (Z3),
- Zone cintrée (Z4).

Les résultats par galerie sont fournis ci-après en comparant les observations faites par l'entreprise et le BEG de Marseille. Une synthèse détaillée est également disponible en Annexe B.

6.2.4.2.1 Galerie A

La Galerie A est orientée N305. Selon les observations de l'entreprise au cours du creusement :

- 97.5% du linéaire de la galerie est inscrit dans la zone Z1,
- 2.5% est inscrit dans la zone Z3. La zone broyée est rencontrée du PM 50 au PM 55.

Les relevés de fracturation sont globalement cohérents entre ceux de l'entreprise et ceux du bureau d'étude (cf. Figure 27). Les zones principales de fracturation, notamment la zone broyée Z3, ont été représentées sur la carte géologique de détail du LSBB (voir la trace des failles secondaires notées F1 à F3 sur la Figure 27).

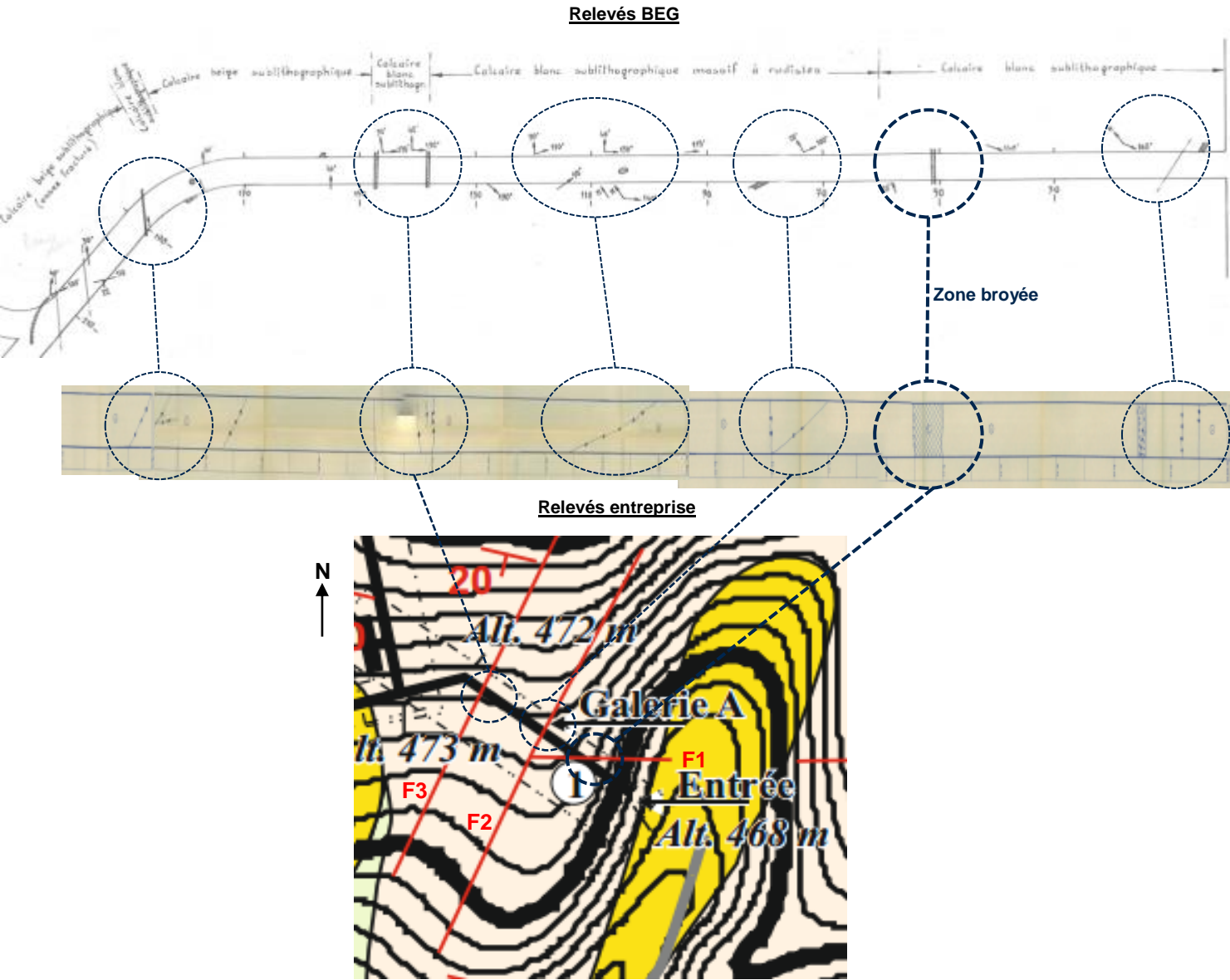


Figure 27 – Comparaison entre les relevés de fracturation du BEG et ceux de l'entreprise – Galerie A



Sur la carte de détail du LSBB, les failles F1, F2 et F3 sont respectivement orientées N90, N25 et N25 (direction du plan). Des relevés N20 à N40 inscrits sur les documents du BEG confirment les directions des failles F2 et F3. En revanche, aucune mesure proche de N90 n'est mentionnée à proximité de F1.

Aucun pendage n'est indiqué à proximité des failles. La seule valeur disponible concerne la jonction entre les Galeries A et C et correspond certainement à la stratigraphie (N200 22°, orientation du vecteur pendage, convention AFTES).

La puissance des failles est limitée. L'épaisseur de la zone broyée de la faille F1 relevée en galerie est de l'ordre de 5m.

6.2.4.2.2 Galerie B1

La Galerie B est orientée N75. Selon les observations de l'entreprise au cours du creusement :

- 52% du linéaire est inscrit dans la zone Z1,
- 28% dans la zone Z2,
- 20% dans la zone Z3. La zone broyée apparaît du PM 150 au PM 210.

Quelques différences sont relevées entre les coupes du BEG et les observations de l'entreprise :

- de l'entrée de la galerie au PM 100, l'encaissant calcaire est plus fracturé sur les coupes du BEG alors que l'entreprise classe ce linéaire en zones Z2 (légèrement fracturé) et Z1 (rocher moyen),
- à l'inverse, l'entreprise décrit le linéaire du PM 150 au PM 210 comme une zone fracturée ou broyée, avec indication de nombreux hors-profils entre les PM 195 et 210 alors que le BEG ne décèle pas d'événements significatifs dans cette zone, hormis au PM 150 où des cheminées de quelques mètres sont répertoriées.

Selon la carte géologique détaillée du laboratoire (cf. Figure 13), supposée issue de l'interprétation des données du creusement, la galerie B1 serait affectée à proximité de l'entrée par une faille secondaire orientée N30. Par ailleurs, le BEG classe le linéaire autour du PM 150 comme une zone karstique, ce qui pourrait expliquer la mauvaise qualité du massif dans ce secteur.

La majorité des relevés de fracturation (c'est-à-dire hors stratigraphie) sont orientés N30 à N70 (direction des plans). Les quelques indications de pendage concernent la stratification.

6.2.4.2.3 Galerie C

Le front d'attaque des galeries MIGA est situé dans la Galerie C, approximativement entre les PM 880 et 1200. La galerie est orientée N350 à 355. La branche comprise entre les PM 660 et 760 est orientée N80.

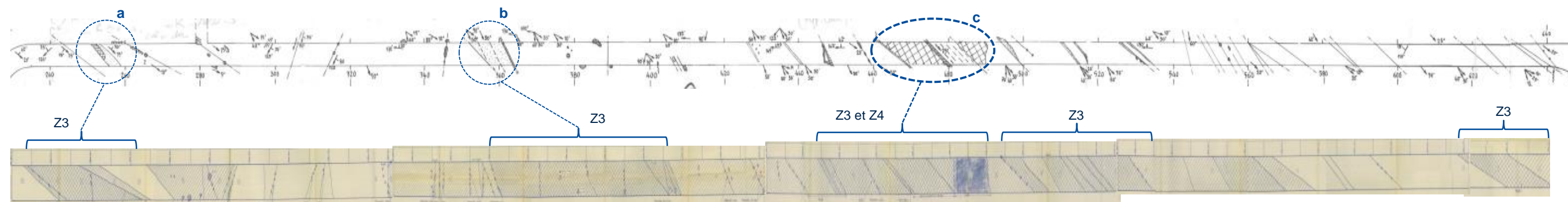
Selon les observations de l'entreprise au cours du creusement :

- 28% du linéaire est en zone Z1,
- 31% dans la zone Z2,
- 36% dans la zone Z3 : PM 245 à 270, PM 360 à 410, PM 445 à 480, PM 490 à 535, PM 675 à 730, PM 770 à 780, PM 850 à 895, PM 970 à 1001, PM 1025 à 1040, PM 1080 à 1100, PM 1140 à 1205, PM 1215 à 1256 et PM 1353 à 1374,
- 5% du linéaire est en zone Z4 (profil cintré) : PM 480 à 490, PM 1001 à 1025, PM 1205 à 1215, PM 1256 à 1261

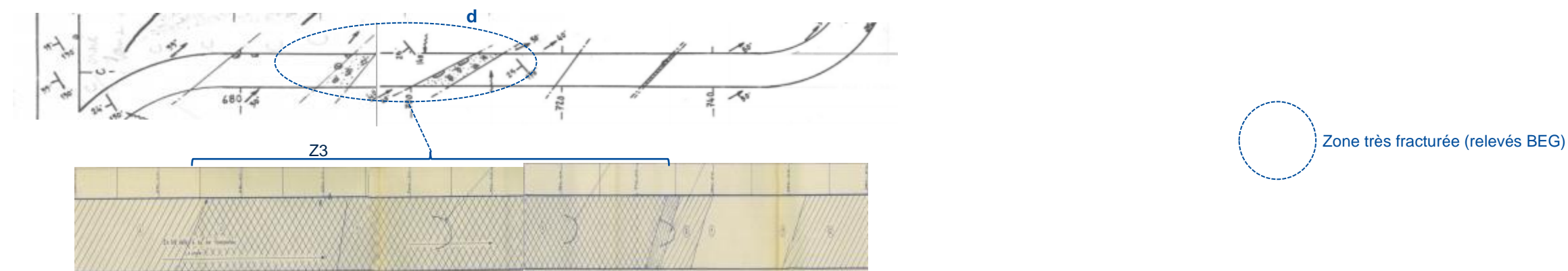
Les relevés du BEG et de l'entreprise concordent : les positions des zones très fracturées sont similaires même si les zones Z3 sont plus étendues sur les coupes de l'entreprise (cf. Figure 28).



Première branche PM 240 à PM 660 :



Deuxième branche PM 660 à 760 :



Troisième branche PM 760 à 1400 :

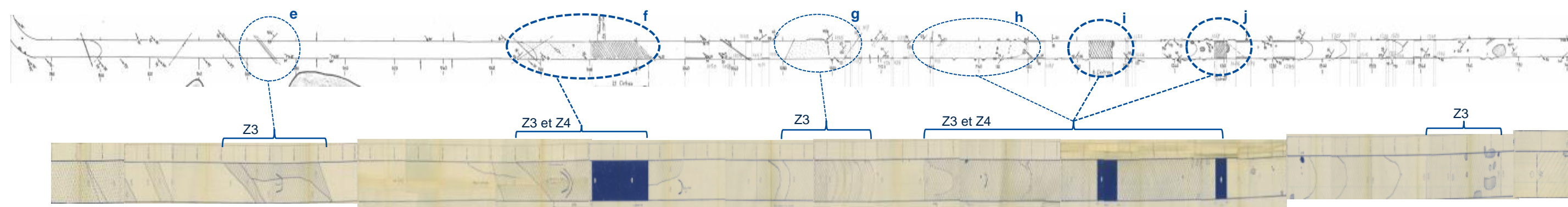


Figure 28 - Comparaison entre les relevés de fracturation du BEG et de l'entreprise – Galerie C

La projection stéréographique de l'ensemble des discontinuités relevées est présentée en Figure 29 sur le canevas de Wulff (représentation des pôles par projection sur l'hémisphère supérieur). La densité de fracturation pour les PM 900 à 1560 est fournie en Figure 30.

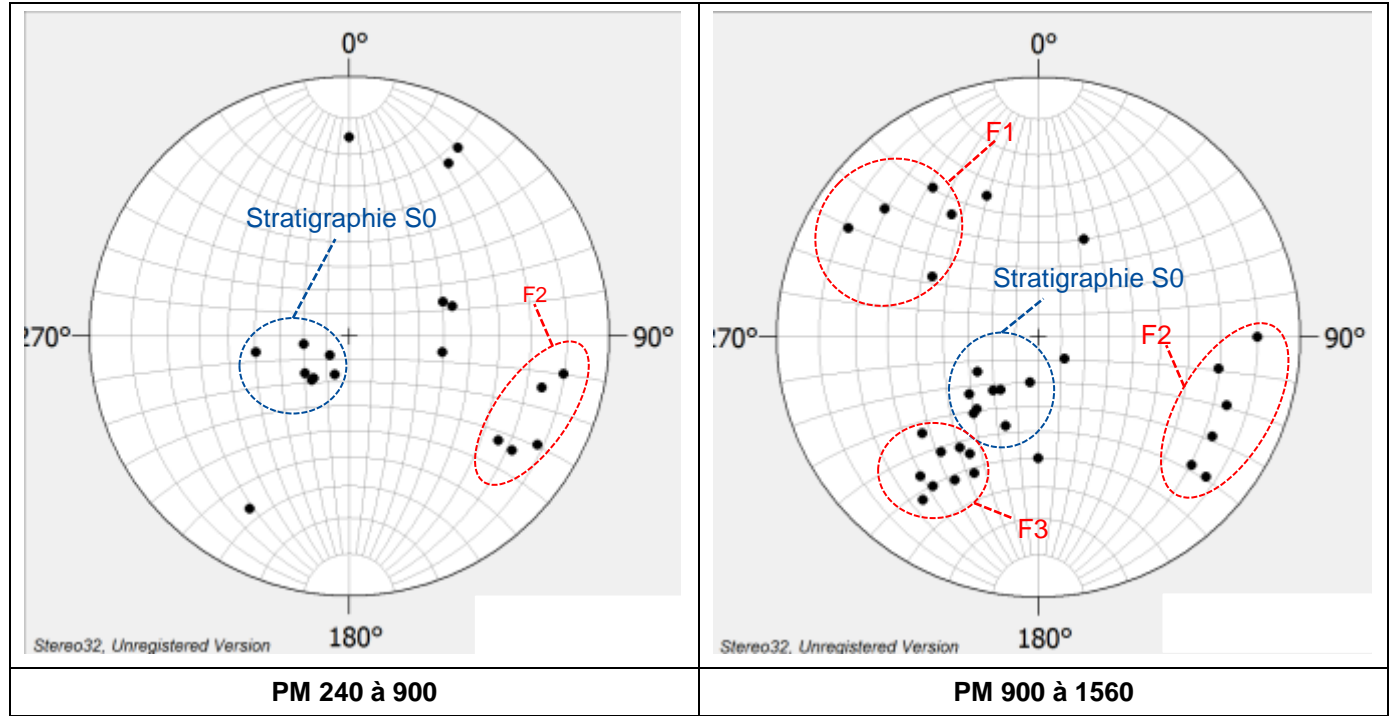


Figure 29 – Projection stéréographique de l'ensemble des discontinuités relevées sur la Galerie C (hémisphère supérieur)

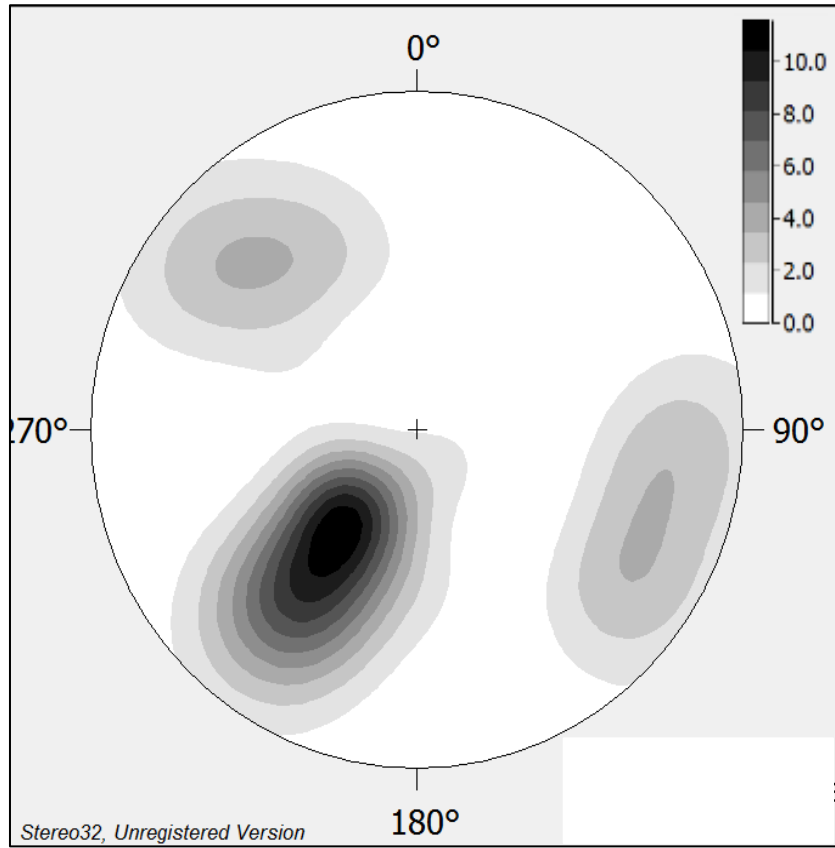


Figure 30 – Diagramme de la densité de fracturation du PM 900 à 1560 de la Galerie C

Les orientations principales des discontinuités sont les suivantes :

- stratigraphie S0 : N200-270 10-30° (convention AFTES),
- familles F1 et F2, également relevées à plus petite échelle dans les forages GAS : N290-320 40-80° pour F1 et N90-140 60-80° pour F2 (convention AFTES). F2 est retrouvée sur l'ensemble de la Galerie C tandis que F1 n'est présente que sur la portion comprise entre les PM900 et 1560,
- une nouvelle famille, notée F3, apparaît entre les PM900 et 1560. Cette famille présente la même direction que S0 mais possède un pendage plus fort (50-80°). Les relevés de F3 se concentrent dans deux zones (cf. Tableau 3) : entre les PM 1075 et 1170 (points 1, 2, 3, 4, 6, 7 et 8) et entre les PM 1300 et 1410 (points 5 et 9). Ces deux zones contiennent des passages classés Z3 pouvant signifier la présence d'un accident géologique à proximité. En accord avec ces observations, une interprétation possible est que la famille F3 correspond en réalité à la stratigraphie S0 formant un crochon à proximité d'une faille (verticalisation des plans de stratification aux abords de l'accident sous l'effet du déplacement relatif des deux blocs séparés par la faille). Ces structures en crochons sont également observées en surface (information donnée par l'AMO). Ainsi, F3 serait un marqueur de la position et de l'orientation de certaines failles qui recoupent la Galerie C.

Zoom stéréogramme (PM 900 à 1560)	Point	Orientation (AFTES)	PM
	1	N215 75°	1140
	2	N215 70°	1120
	3	N220 70°	1100
	4	N210 65°	1105
	5	N205 60°	1300
	6	N210 55°	1170
	7	N215 55°	1130
	8	N220 60°	1075
	9	N230 60°	1410

Tableau 3 – Localisation des relevés de la famille F3 dans la Galerie C

Une synthèse détaillée de l'orientation des discontinuités dans les zones Z3 et Z4 est fournie ci-dessous (la convention de l'AFTES est utilisée lorsque la mesure du pendage est disponible). Les mesures liées à S0 ne sont pas indiquées.

Secteur (cf. Figure 28)	PM	Zone	Orientation
a	PM 250 à 260	Z3	N285 75° (AFTES)
b	PM 350 à 365	Z3	N30 à N50 (direction plan) et aussi relevés N170
c	PM 460 à 490	Z3 et Z4 (profil cintré)	N20 à N25 (direction plan)
d	PM 700 à 720	Z3	N40 à N50 (direction plan)
e	PM 860 à 880	Z3	N100-125 60°-70° (AFTES)
f	PM 970 à 1020	Z3 et Z4 (profil cintré)	N110 70° (AFTES)
g	PM 1080 à 1110	Z3	N210-220 50-80° (AFTES)
h	PM 1140 à 1180	Z3	N210 55° (AFTES)
i	PM 1205 à 1215	Z4 (profil cintré)	Deux mesures (AFTES) : N25 45° et N300 50°
j	PM 1255 à 1260	Z4 (profil cintré)	N10 à N30 (direction plan)

Tableau 4 – Orientation principale des discontinuités dans les zones Z3 et Z4 (hors S0) – Galerie C

Selon la carte géologique détaillée du laboratoire (cf. Figure 13), la galerie C est recoupée :

- par un accident majeur de direction générale E-W. Les plans N210-220 50-80° (convention AFTES) retrouvés dans les secteurs g et h sont les témoins de la présence de cette faille à la profondeur de la Galerie C. Ils correspondent vraisemblablement à la virgation de la stratification (F3),
- par un accident NE-SW et plusieurs failles secondaires de même direction. Ils peuvent être associés aux nombreuses discontinuités d'orientation N100-140 60-70° (famille F2) qui ont été relevées en galerie.

D'après le Tableau 4, les profils cintrés semblent correspondre à l'un ou l'autre de ces accidents : failles NE-SW pour les secteurs c, f et j ; faille E-W pour le secteur i. La genèse de ces failles est à rapprocher de l'histoire tectonique du site qui a été marquée par de nombreux épisodes de compression et d'extension ayant provoqué le découpage de la région par de grands accidents NE-SW et E-W (cf. §6.1.3).

Une faille est une structure complexe qui présente généralement une zone centrale fortement broyée bordée de part et d'autre par des structures secondaires de type plis, fractures (d'extension ou de cisaillement), crochons, etc. L'ensemble forme le couloir de déformation de la faille (cf. Figure 31).

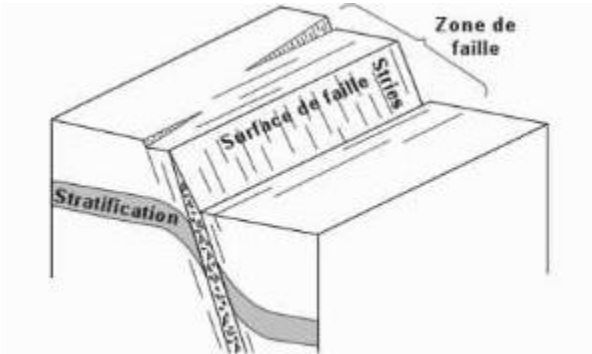


Figure 31 – Structure simplifiée d'une faille

Les zones Z4 nous renseigne sur l'épaisseur de la zone centrale des failles. Elle est comprise entre 5 et 20m selon la longueur des sections cintrées (épaisseurs réelles en tenant compte du croisement biais entre la Galerie C et les plans de faille). Les sections Z4 sont généralement encadrées par des passages Z3, très fracturés, qui concentrent les structures secondaires qui se sont développées de façon contemporaine avec la faille.

Il est fait l'hypothèse que les passages cintrés concernent les accidents majeurs (de grande extension) comme ceux décrits précédemment. D'autres failles, de moindre importance et classée uniquement en zone Z3, peuvent cependant être rencontrées (voir le modèle structural présenté au §6.3.2).

6.2.4.2.4 Galerie K

La Galerie K est orientée N350. Selon les observations de l'entreprise au cours du creusement :

- 4% du linéaire est inscrit dans la zone Z1,
- 40% dans la zone Z2,
- 56% dans la zone Z3 : PM10 à 15, PM20 à 35, PM65 à 95, PM110 à 160, PM165 à 195 et PM200 à 220.

Les principales discontinuités qui recoupent la Galerie K sont :

- la stratification S0 : N210 à 220 15 à 30° (convention AFTES),
- la famille F2 : N120 à 130 80° (convention AFTES). Cette orientation concorde avec les failles secondaires représentées sur la carte géologique de détail du LSBB. La trace d'une faille est d'ailleurs apparente sur la galerie et a pu être visualisée lors d'une visite du laboratoire (cf. Figure 32).



Figure 32 – Zone faillée dans la Galerie Anti-Souffle

La synthèse des relevés est présentée dans le stéréogramme ci-dessous (hémisphère supérieur).

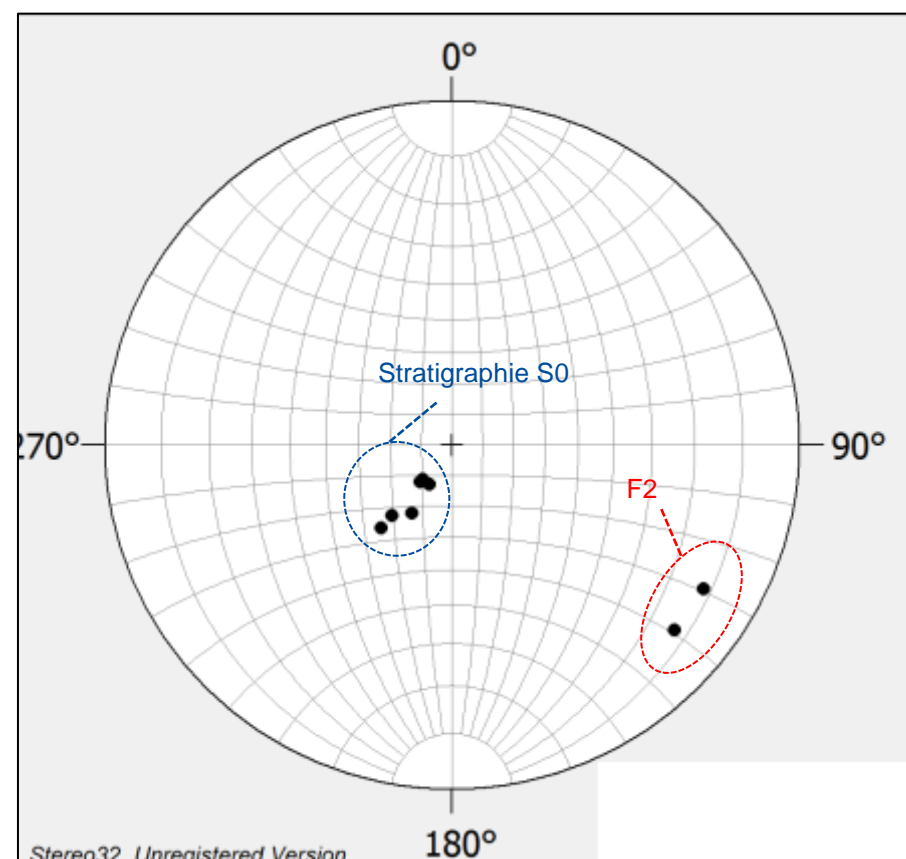


Figure 33 - Projection stéréographique de l'ensemble des discontinuités relevées sur la Galerie K (hémisphère supérieur)

6.2.4.2.5 Galerie E

La Galerie E est orientée N20 à N80. Selon les observations de l'entreprise au cours du creusement :

- 25% du linéaire est inscrit dans la zone Z1,
- 34.5% dans la zone Z2,
- 34.5% dans la zone Z3 : PM 15 à 52, PM265 à 310, PM354 à 360, PM377 à 415, PM545 à 575, PM625 à 652, PM686 à 688, PM697 à 715, PM720 à 900, PM915 à 920, PM934 à 942, PM946 à 950, PM985 à 1016, PM1110 à 1150, PM1160 à 1188, PM1195 à 1200, PM1205 à 1240, PM1248 à 1273, PM1333 à 1347, PM1377 à 1395, PM1403 à 1418, PM1423 à 1434, PM1487 à 1497 et PM1503 à 1517,
- 6% dans la zone Z4 (profil cintré) : PM652 à 656, PM920 à 928, PM942 à 946, PM1395 à 1403, PM1418 à 1423, PM1434 à 1438, PM1558 à 1575 et PM1616 à 1621.

D'une manière générale, la portion située entre l'entrée de l'ouvrage et le PM510 apparaît moins fracturée que le reste de la galerie.

La projection stéréographique de l'ensemble des discontinuités relevées est présentée en Figure 34 sur le canevas de Wulff (hémisphère supérieur). Le diagramme de la densité de fracturation pour l'ensemble de la Galerie E est fourni en Figure 35.

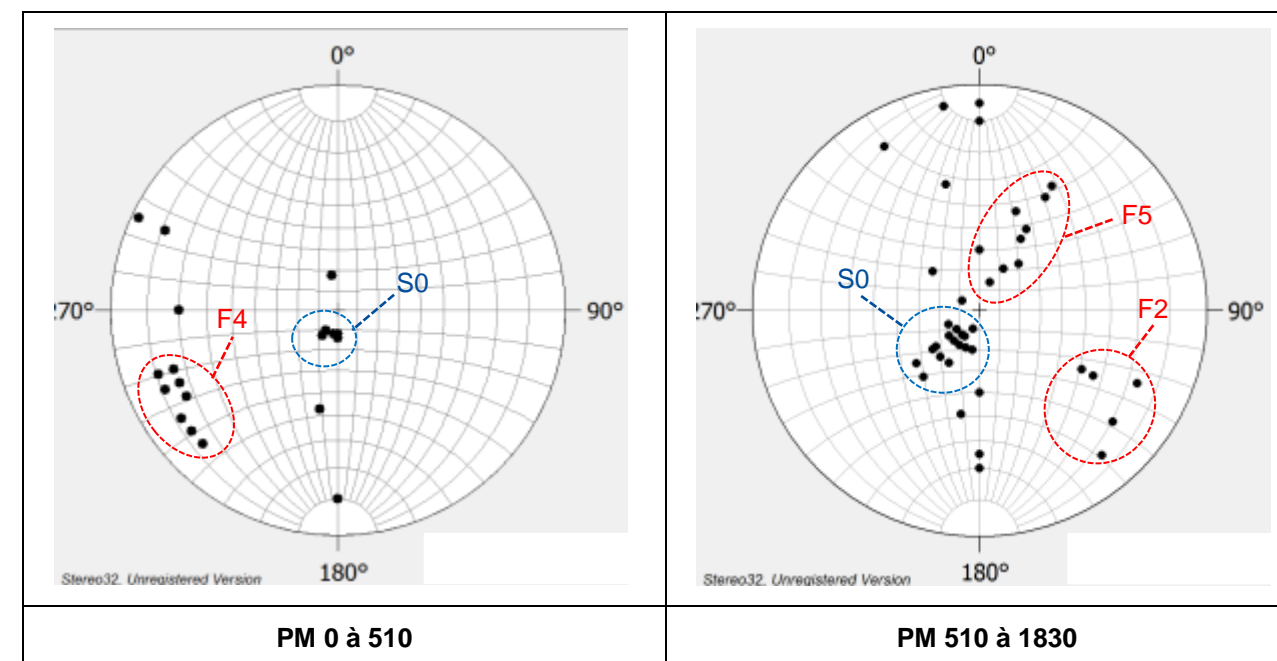


Figure 34 - Projection stéréographique de l'ensemble des discontinuités relevées sur la Galerie E (hémisphère supérieur)

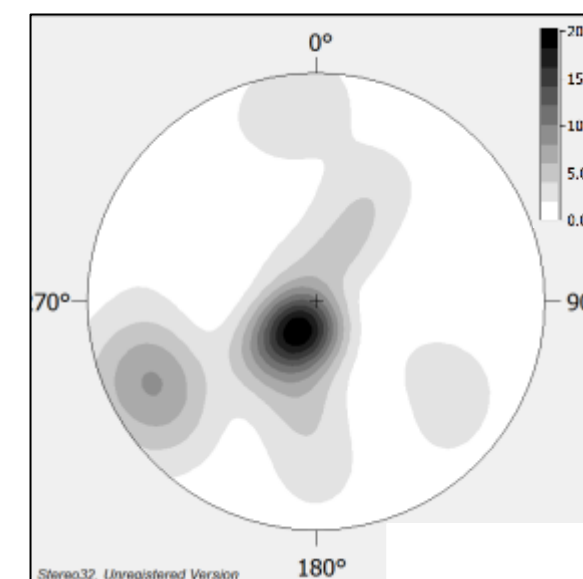


Figure 35 – Diagramme de la densité de fracturation pour l'ensemble de la Galerie E

Les principales discontinuités qui recoupent la Galerie E sont :

- la stratification S0 : N200-270 10-30° (orientation similaire à celle observée dans les autres galeries et sur les forages GAS),
- la famille F2 : N110-140 70-80° (convention AFTES). Cette famille est seulement retrouvée à partir du PM 510,
- deux autres familles, notées F4 et F5, sont repérées : N220-250 70-80° pour F4 et N0-50 10-60° pour F5. F4 est présente uniquement sur la première partie de la Galerie de secours. F5 apparaît après le PM 510. Contrairement à F2, ces deux familles ne sont pas observées dans les autres galeries du laboratoire,
- d'autres discontinuités plus diffuses sont également relevées entre les PM 510 et 1830.

Selon la carte géologique détaillée du LSBB, la galerie E est recoupée par deux accidents majeurs de direction NS et NE-SW et par des failles secondaires. La correspondance entre la trace indiquée des failles et la position des zones cintrées est moins nette que pour les autres galeries, notamment entre les PM 1400 et 1500.

A noter que des cavités et des cheminées de plusieurs mètres ont été rencontrées en voûte et en radier sur environ 30% du linéaire. Leur profondeur ne semble pas dépasser 1m en voûte. Sur certaines zones, leur longueur est supérieure à 5m. Il s'agit vraisemblablement de cavités karstiques. Leurs caractéristiques et leur répartition sont étudiées plus en détail dans le §7.

La plupart des fissures/fractures est remplie d'argile.

6.3 ELABORATION DU MODELE GEOLOGIQUE

Le modèle géologique du projet est bâti à partir de l'analyse couplée des informations disponibles à l'échelle régionale (cartes et coupes géologiques de principe) et à l'échelle locale (forages de la GAS, relevés des parois d'excavation lors du creusement des galeries existantes, sondages de 2014).

6.3.1 LITHOLOGIE ET STRATIGRAPHIE

Les galeries souterraines du LSBB traversent les formations calcaires qui constituent l'ensemble structural des Monts de Vaucluse et du Plateau d'Albion. D'après la carte géologique de Sault-de-Vaucluse et la carte détaillée du laboratoire, les principales unités lithologiques retrouvées au droit du site sont les suivantes (de la plus récente à la plus ancienne) :

- en surface, les Marnes Gargasiennes affleurent au sud du laboratoire. L'érosion les a fait disparaître des reliefs,
- les calcaires du Bédoulien et du Barrémien, généralement présents sous forme de bancs massifs et pouvant contenir des passages plus marneux. Ils affleurent au droit du site et leur épaisseur peut dépasser 1000m,
- les marno-calcaires de l'Hauterivien qui constituent la base étanche du système karstique de Fontaine de Vaucluse.

Le calcaire du Bédoulien et la frange supérieure du Barrémien (selon certains auteurs) sont présents sous leur forme urgonienne. Le faciès urgonien est essentiellement défini par son caractère bioclastique hérité de son environnement de dépôt en mer tropicale peu profonde.

Les forages GAS ainsi que les levés géologiques lors du creusement du LSBB font état de la présence de calcaires plus ou moins riches en résidus fossiles, notamment en tests de Rudistes. Ces observations, associées à la profondeur du projet MIGA (300 à 400m), conduisent à considérer que les galeries seront creusées exclusivement dans le calcaire urgonien, plus précisément dans le faciès U₁ (base Bédoulien ou toit Barrémien).

Les coupes géotechniques dessinées par le BEG de Marseille (réf. [1]) décrivent plus précisément les faciès calcaires rencontrés. Le front d'attaque des galeries MIGA est situé à proximité de la transition entre les calcaires spathiques et les calcaires sublithographiques. Compte tenu de l'orientation de la stratigraphie (N200-270 10-30°, convention AFTES), la première branche traversera probablement les deux faciès, alors que la deuxième branche serait essentiellement dans les calcaires sublithographiques (sous-jacents aux calcaires spathiques car retrouvés à plus forte profondeur).

Les résultats du sondage carotté permettront de valider cette hypothèse sur la première branche.

L'attribution des calcaires sublithographiques et spathiques aux différents niveaux urgoniens n'est pas évidente puisque ces deux faciès contiennent des débris de coquilles fossiles.

6.3.2 MODELE STRUCTURAL

Les analyses structurales réalisées à partir des forages GAS et des relevés des galeries du LSBB ont permis de mettre en évidence plusieurs familles de discontinuités (cf. Tableau 5, orientations en convention AFTES). Les familles F1 à F4 sont essentiellement subverticales.

	Stratification		F1	F2	F4	F5
	S0	F3 ⁽²⁾				
Forages GAS	N220-270 0-30°	-	N270-315 50-90°	N90-135 50-90°	-	-
Galerie A ⁽¹⁾	N200 22°					
Galerie B1 ⁽¹⁾	N200-210 15-30°					
Galerie C	N200-270 10-30°	N210-240 40-70°	N290-320 40-80°	N90-140 60-80°	-	-
Galerie K	N210-220 15-30°	-	-	N120-130 80°	-	-
Galerie E	N200-270 10-30°	-	-	N110-140 70-80°	N220-250 70-80°	N0-50 10-60°

Tableau 5 – Synthèse des familles de discontinuités relevées dans les forages GAS et les galeries existantes du LSBB

⁽¹⁾ Pour les galeries A et B1, de nombreux relevés sans indication de pendage ne permettent pas de définir d'autres familles.

⁽²⁾ F3 correspond à la stratification qui forme un crochon à proximité d'une faille.

Pour comparaison, les stéréogrammes et les diagrammes de densité de fracturation sont rappelés ci-dessous pour les forages GAS et les Galeries K et C (PM 900 à 1560) qui sont les plus proches de l'ouvrage MIGA.

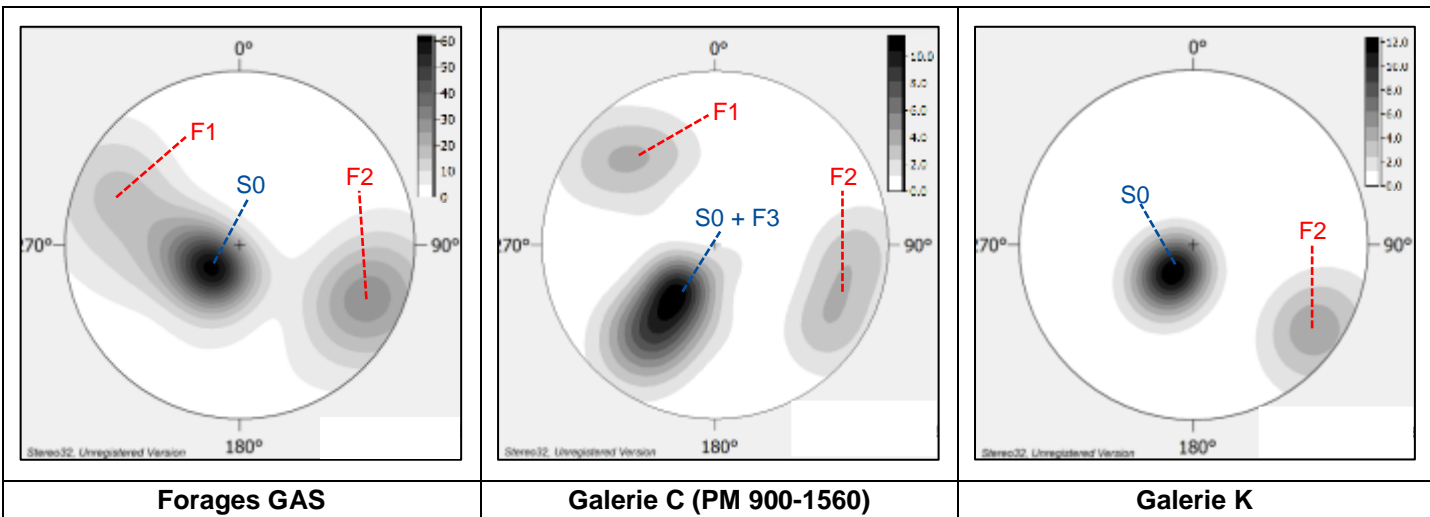


Figure 36 – Comparaison des stéréogrammes et diagrammes de densité des forages GAS et des galeries K et C

Le modèle structural est bâti sur la base des observations effectuées lors de la réalisation des ouvrages existants. Il tient compte des relevés des discontinuités et du découpage du massif en zones Z1 (rocher moyen), Z2 (rocher légèrement fracturé), Z3 (rocher fracturé ou broyé avec argile) et Z4 (zone cintrée).



La figure suivante replace les deux architectures envisagées (2x150m et 2x200m) dans le modèle structural dessiné à l'échelle du LSBB. Les principales incertitudes visibles sur le modèle structural sont signalées par des panneaux d'alerte. Ces derniers font le lien avec le registre des incertitudes établi dans le §9.

Les relevés pris en compte dans le modèle structural se situent dans les zones Z3 et Z4 et ne concernent pas la stratification.

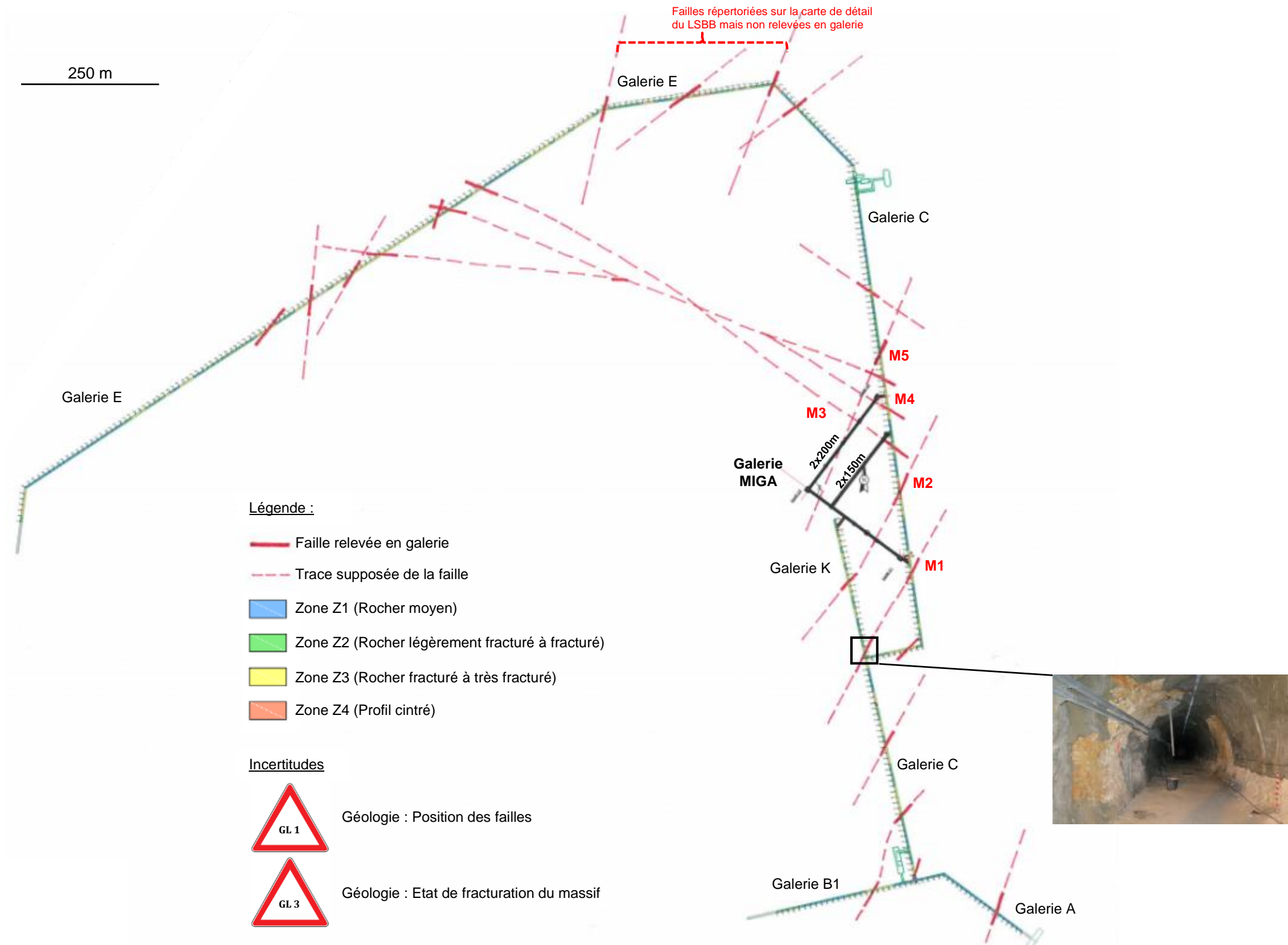


Figure 37 – Modèle structural sur l'ensemble du LSBB

Un zoom du modèle structural sur le projet MIGA est proposé dans la figure ci-dessous.

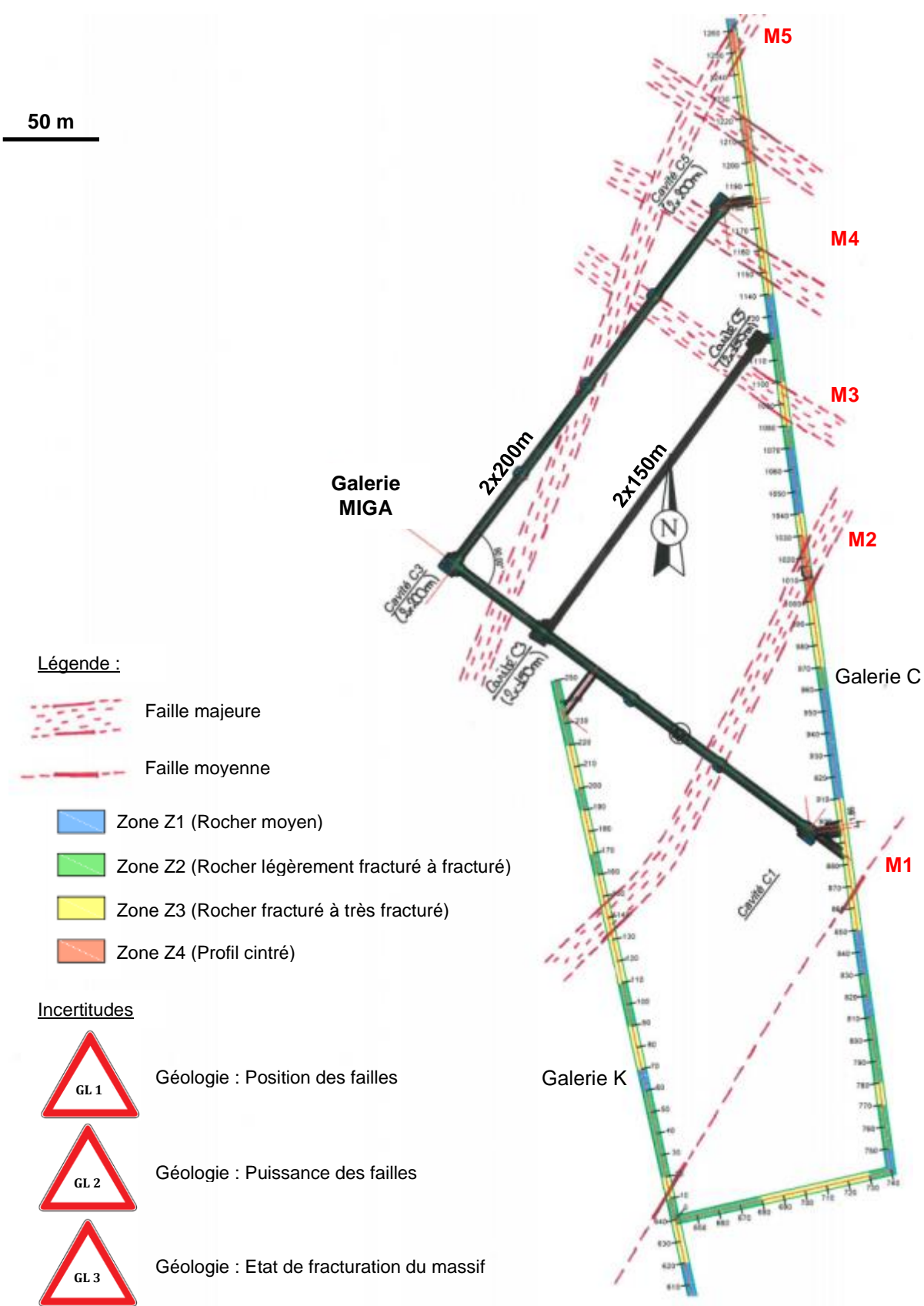


Figure 38 – Modèle structural centré sur la galerie MIGA

Selon l'architecture retenue, trois à cinq accidents de grande ampleur pourraient être rencontrés lors du creusement de l'ouvrage MIGA. Ces accidents, de type faille, sont notés M1 à M5 sur les Figure 37 et 38. Le tableau suivant en propose la hiérarchisation en fonction de leur extension et des profils de soutènement mis en œuvre pour les traverser. A noter que l'orientation des failles M1, M2 et M5 se rapproche de celle de la famille F2 ; celle des failles M3 et M4 des familles F1 et F3.

Accident	Orientation	Localisation galerie MIGA	Observations	Ampleur
M3 et M4	NW-SE	2 nd e branche, 2x150m et 2x200m	Ces accidents peuvent être reliés à d'autres structures relevées dans la Galerie E et d'orientation similaire. Ils ont fait l'objet de la pose de cintres dans les deux galeries (C et E).	Majeure
M2	NE-SW	1 ^{ère} branche, 2x150m et 2x200m	Accident traversant les Galeries K et C. Dans la Galerie C, la pose de cintres a été nécessaire sur 25m (plus grande section cintrée du laboratoire). En revanche, dans la Galerie K, la zone faillée est classée en zone Z3 et n'a donc pas été cintrée.	Majeure
M5	NE-SW	1 ^{ère} et 2 nd e branche, 2x200m	Accident seulement retrouvé dans la Galerie C. La pose de cintres a été nécessaire pour le traverser mais sur une courte distance (5m).	Moyenne à majeure
M1	NE-SW	Front d'attaque	Accident traversant les Galeries K et C mais n'ayant pas nécessité la pose de cintres. Il est situé uniquement en zone Z3.	Moyenne

Tableau 6 – Hiérarchisation des accidents de type faille potentiellement situés sur le tracé de la galerie MIGA

Les figures suivantes proposent une comparaison du modèle structural avec les différents modèles disponibles dans les données d'entrée :

- Figure 39 : comparaison avec la carte de détail du LSBB,
- Figure 40 : comparaison avec le modèle GOCAD du secteur. Cette modélisation s'appuie en partie sur la carte de détail du LSBB,
- Figure 41 : comparaison avec le modèle structural présenté dans la thèse de Barbel-Périneau (réf. [23]). La source de ce modèle ainsi que les données utilisées pour le dessiner ne sont pas connues.

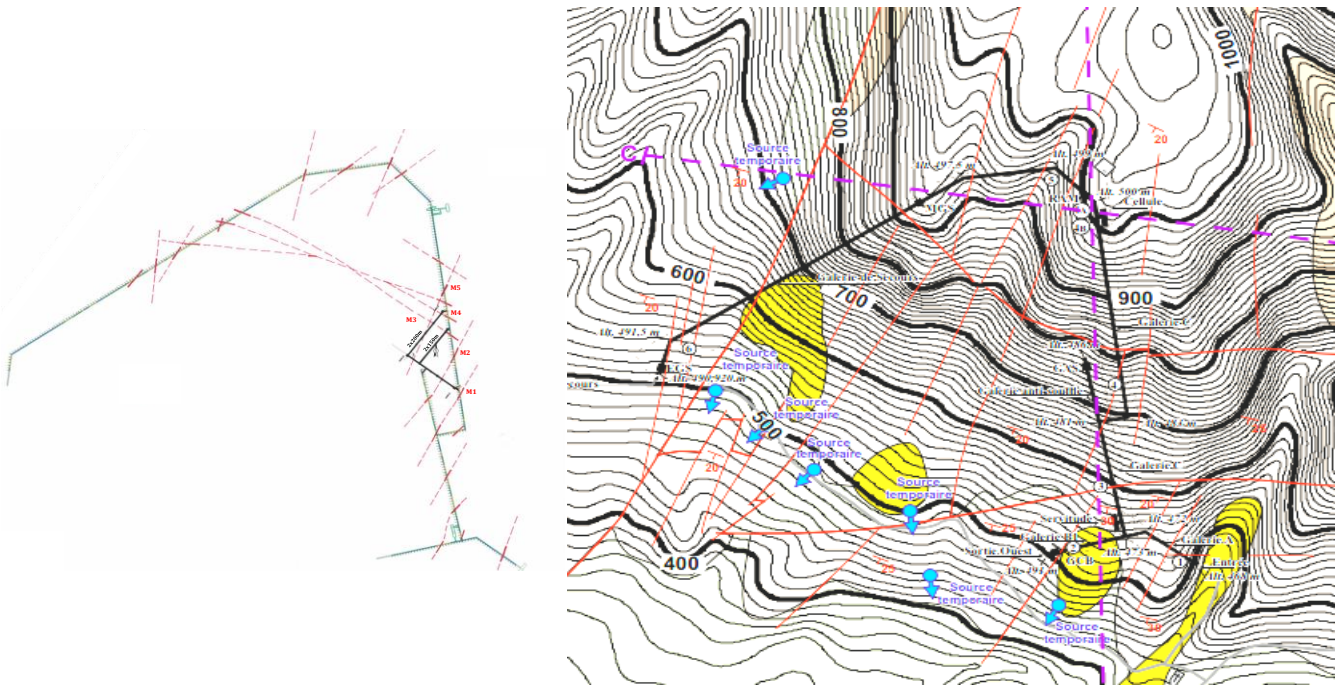


Figure 39 – Comparaison du modèle structural avec la carte de détail du LSBB

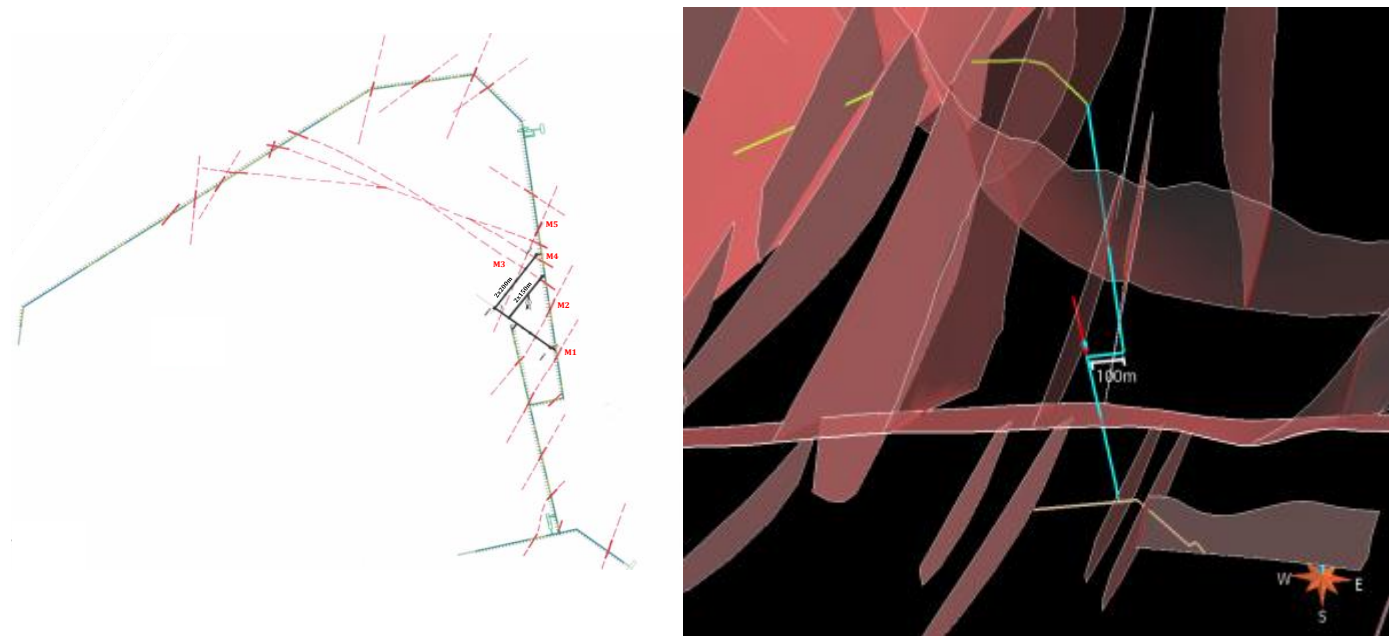


Figure 40 – Comparaison du modèle structural avec le modèle GOCAD

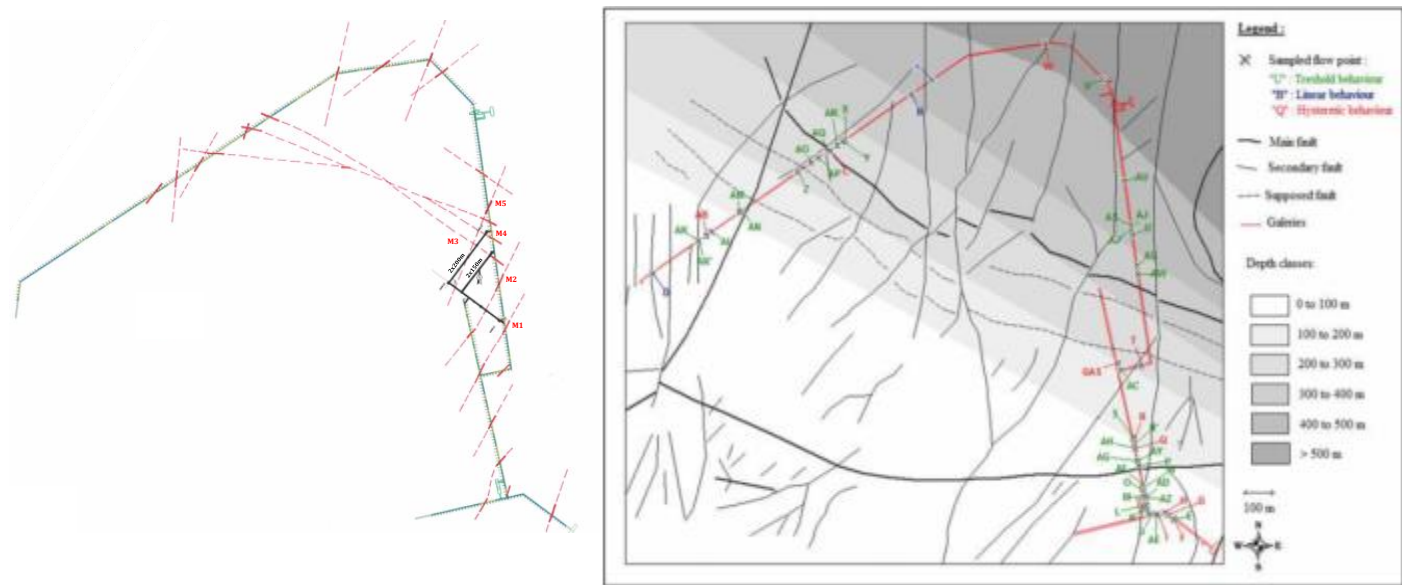


Figure 41 – Comparaison du modèle structural avec le modèle présenté dans la thèse de Barbel-Périneau (réf. [23])

Les principales différences entre ces modèles et le modèle structural établi dans le présent document sont explicitées dans le tableau suivant.

Il semble que la carte de détail du LSBB ainsi que le modèle GOCAD ont également été élaborés à partir des données de creusement du laboratoire. Les différences qui peuvent être relevées proviennent donc d'une divergence d'interprétation de ces données et non de l'utilisation d'autres sources.

Modèle comparé	Similitudes	Différences d'interprétation	Choix retenus pour le modèle MIGA
Carte de détail du LSBB	Les principaux accidents NE-SW et E-W sont retrouvés à l'échelle du laboratoire.	- Faille E-W qui traverse le début de la Galerie C non représentée dans le modèle MIGA, - Au niveau des galeries MIGA, le réseau de faille est moins dense sur la carte de détail (M2 et M5 non représentées).	La principale différence concerne le réseau de failles qui est plus dense sur le modèle établi dans le présent document. Cette discrétisation, plus sécuritaire et fidèle aux linéaires cintrés observés dans la Galerie C, est retenue pour le projet MIGA.
Modèle GOCAD	Les deux modèles sont concordants au niveau du projet MIGA sur le schéma structural général.	- Pas de dissociation des failles M2 et M5, - Accident majeur E-W (failles M3 et M4) modélisé plus en profondeur dans la Galerie C.	- Dissociation des failles M2 et M5 plus sécuritaire et cohérente avec les relevés dans la galerie, - Accident E-W retrouvé à proximité de la 2 ^{nde} branche de la galerie MIGA d'après les relevés dans la Galerie C.
Modèle de la thèse de Barbel-Périneau	Accident majeur E-W représenté.	- Les failles NE-SW ne semblent pas intercepter la galerie MIGA sur le modèle de la thèse, - Contrairement à tous les autres modèles, il semble que les accidents NE-SW sont postérieurs à l'accident majeur E-W, - L'accident E-W semble traverser la 1 ^{ère} branche.	- Les relevés dans la galerie indiquent clairement la présence d'accidents NE-SW à proximité du projet MIGA, - Sans connaissance de la source de ce modèle, la représentation de la chronologie des failles reste fidèle à celle de la carte de détail, - Accident E-W retrouvé à proximité de la 2 ^{nde} branche de la galerie MIGA d'après les relevés dans la Galerie C.

Tableau 7 – Synthèse comparative entre les modèles à disposition dans les données d'entrée et le modèle structural établi dans le cadre du projet MIGA

Le modèle structural présenté dans les Figure 37 et 38 est globalement conforme aux modèles précédemment réalisés, moyennant quelques ajustements au niveau du projet MIGA. Par ailleurs, les relevés au niveau des forages GAS et des galeries semblent coïncider avec les cartes établies en surface. La thèse de Garry (réf. [1]) évoque également cette correspondance, de même pour Matonti. Cependant, la position des failles en profondeur reste incertaine (signalisation de l'incertitude dans le modèle géologique via la représentation de panneaux d'alerte conformément aux recommandations de l'AFTES).

Plusieurs points restent à préciser :

- la puissance des failles est généralement de 5 à 10m mais la longueur de certaines zones cintrées, notamment dans les Galeries C et E, dépasse 15m,
- le front d'attaque de la galerie MIGA se situe à proximité d'une zone classée Z3 par l'entreprise de travaux, soit zone fracturée ou broyée avec argile. Elle est représentée par la faille M1 sur les Figure 37 et 38,
- les trois cavités C1, C3 et C5 des galeries MIGA sont susceptibles de rencontrer une faille (cf. §6.3.3),
- des discordances ont été observées entre les données provenant des relevés des accidents et les coupes géotechniques. Il est difficile de se prononcer sur la meilleure applicabilité pour le projet. A ce stade, les deux éléments ont été également exploités,
- les forages GAS indiquent des variations à petite échelle de l'état de fracturation en fonction de la lithologie. Le sondage carotté de grande longueur apportera des informations complémentaires à ce sujet,
- l'analyse présentée dans cette partie ne fait pas mention des anomalies karstiques. Celles-ci sont traitées plus en détail dans le §7.

6.3.3 COUPES GEOLOGIQUES

Pour chaque architecture envisagée (2x150m et 2x200m), une coupe géologique a été établie pour chaque branche des galeries MIGA :

- la première branche est orientée N310,
- la seconde branche est orientée N40.

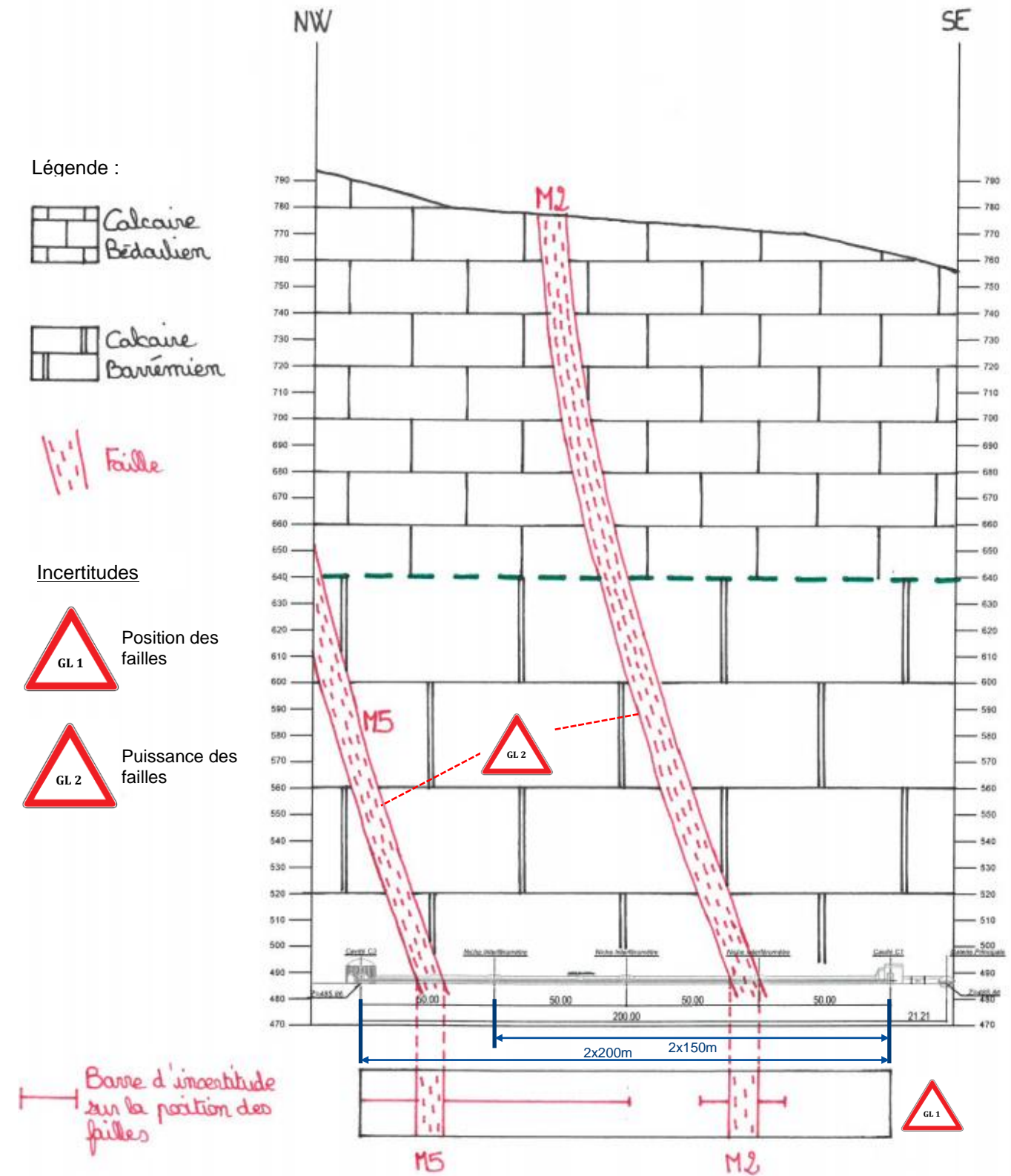
Des coupes géologiques sont également proposées pour les trois cavités C1, C3 et C5.

Les calcaires du Barrémien et du Bédoulien ont été distingués comme sur les coupes simplifiées des Figure 14 et 15. Les faciès U_2 et U_3 sont attribués au Bédoulien et le faciès U_1 au Barrémien. Les épaisseurs retenues sont conformes aux indications des notices des cartes géologiques et aux résultats des forages de reconnaissance menés en 2014. Il apparait que les galeries MIGA sont entièrement creusées dans le Barrémien. Les calcaires sublithographiques et spathiques n'ont pas été différenciés mais il est fortement probable que la première branche traverse la transition entre les deux faciès.

Les barres d'incertitude relatives à la position des failles sont indiquées. Elles sont déterminées suivant les intervalles d'orientation relevés dans les galeries. La direction de la faille M5 étant proche de celle de la deuxième branche, une faible variation de son azimuth entraine un changement conséquent de sa position.

Le jeu des failles est indiqué pour les événements majeurs E-W (failles M3 et M4) pour lesquels une indication est fournie dans les coupes simplifiées des Figure 14 et 15. Le rejet représenté sur les coupes est fictif, le rejet réel n'étant pas connu.

A contrario, le jeu des failles NE-SW (M1, M2 et M5) n'est pas indiqué car non connu.



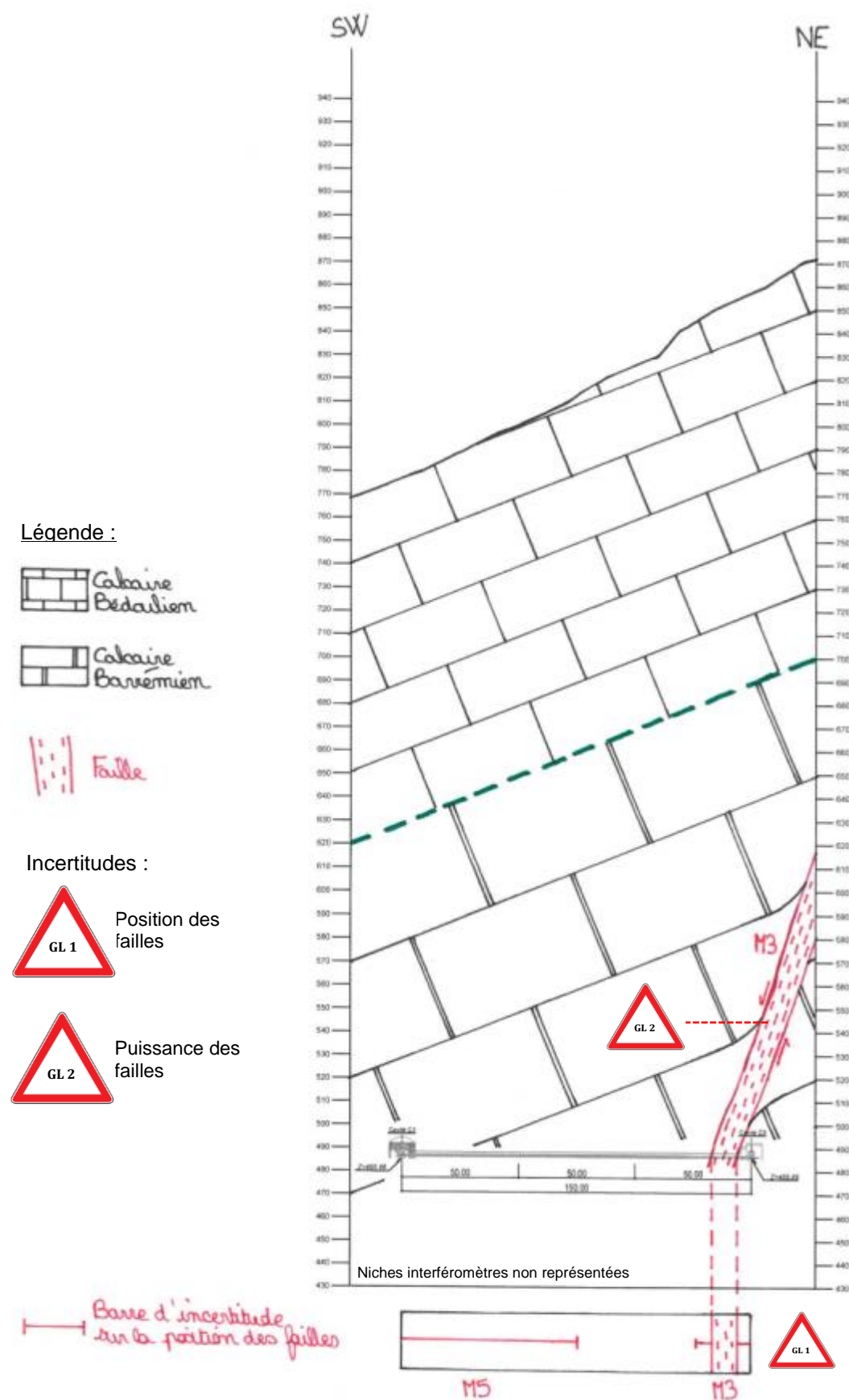


Figure 43 – Coupe géologique de la seconde branche de la galerie MIGA (2x150m)

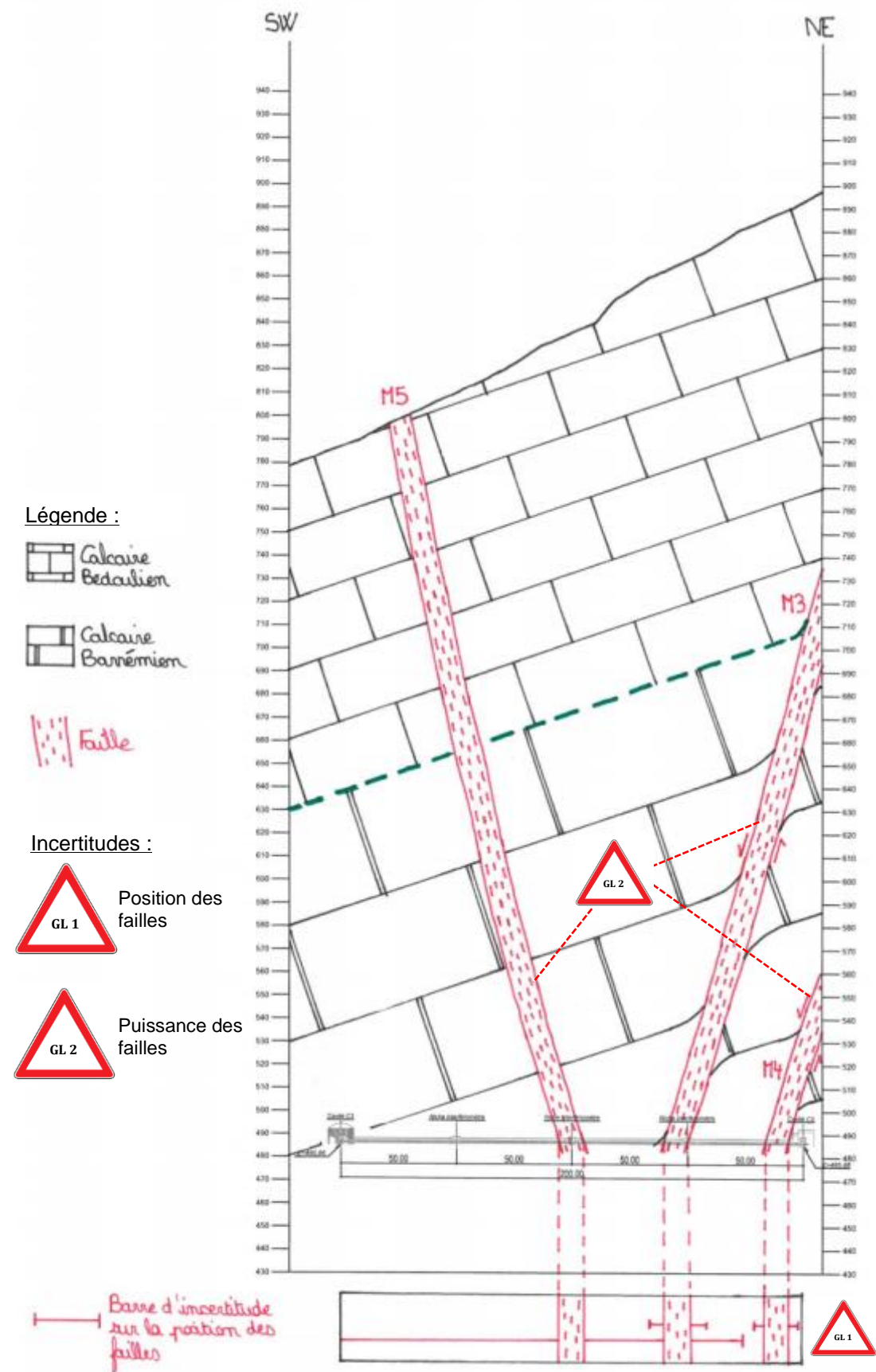


Figure 44 – Coupe géologique de la seconde branche de la galerie MIGA (2x200m)

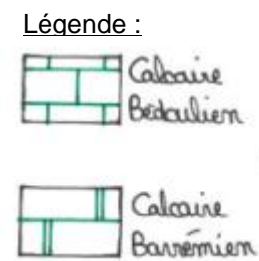
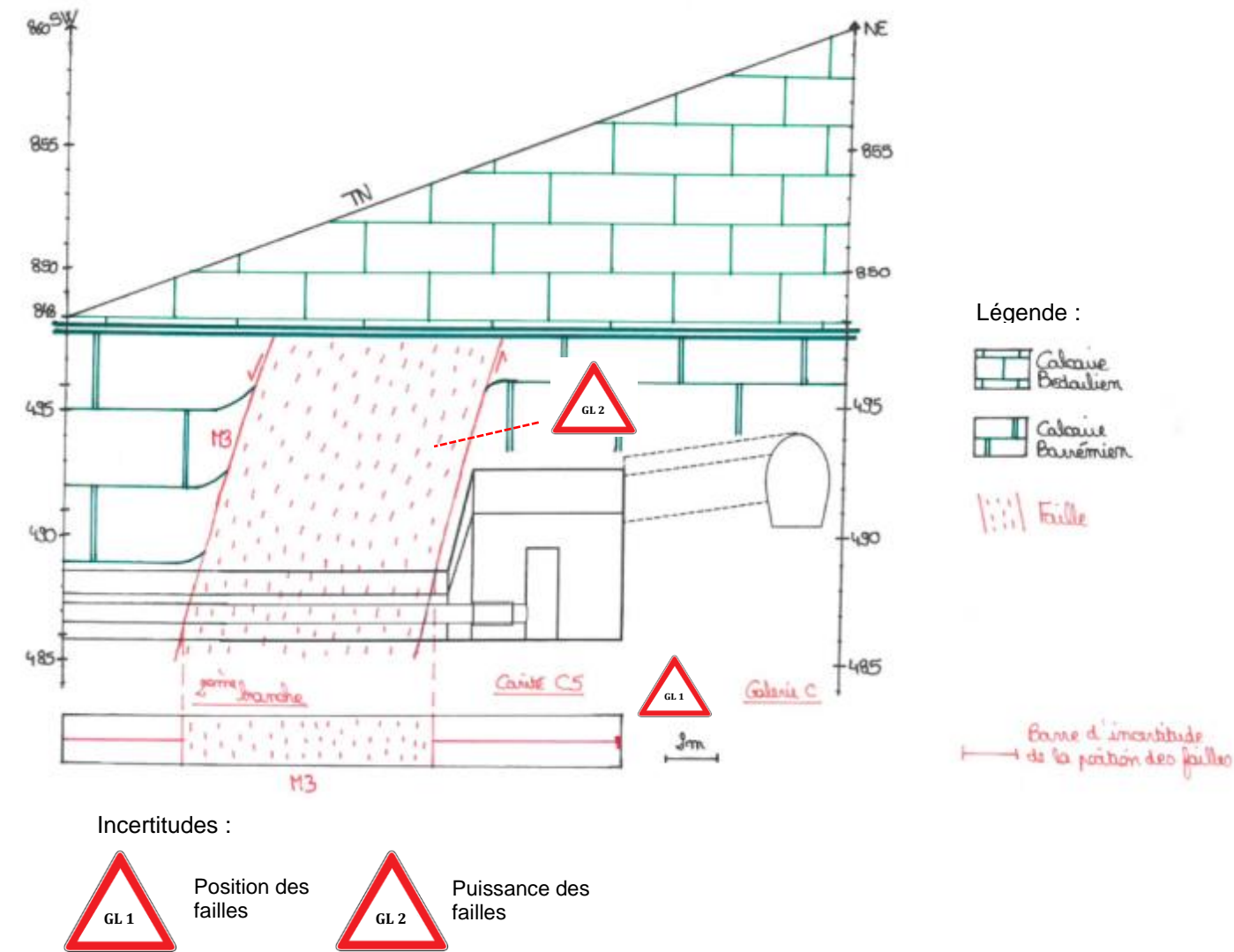
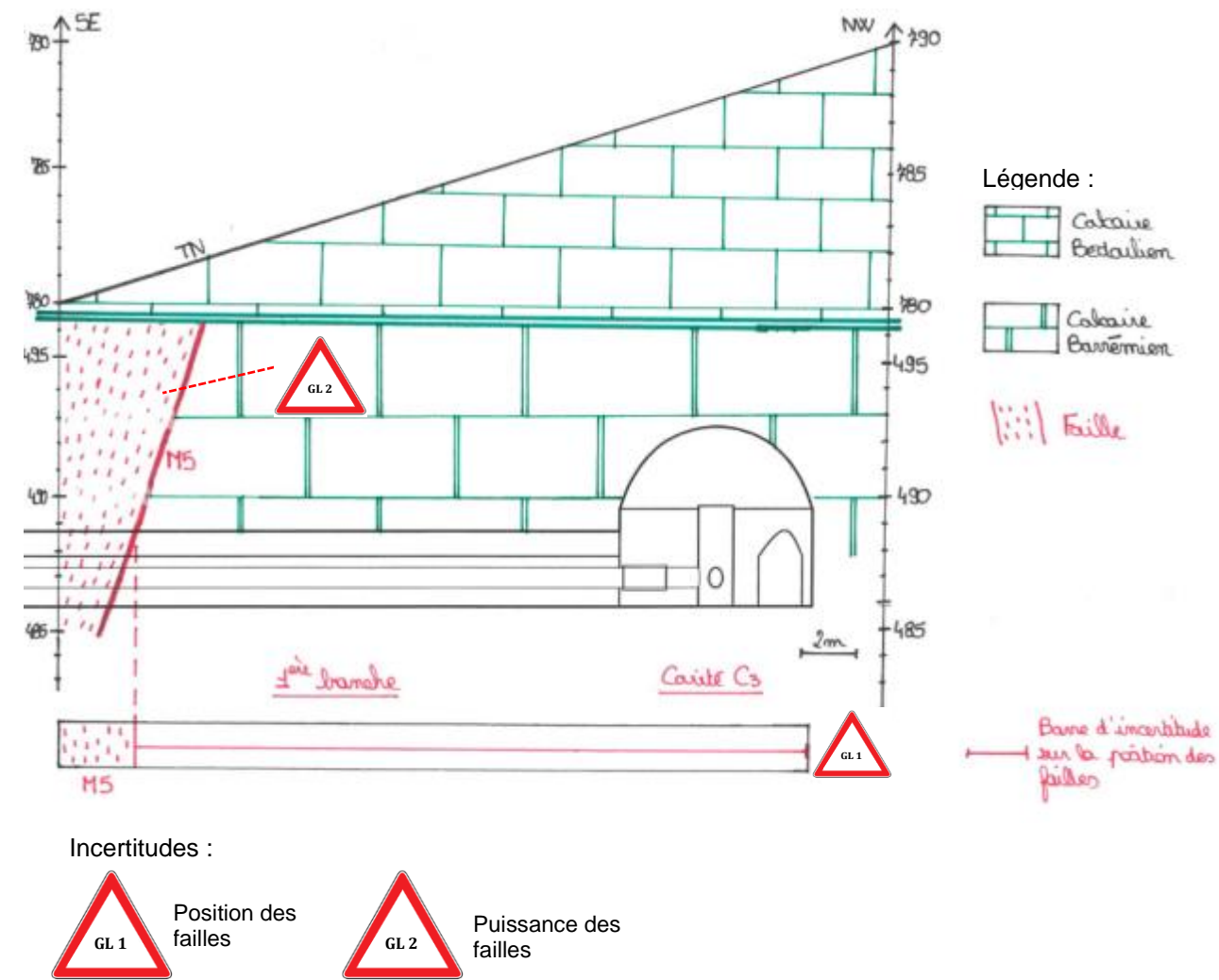


Figure 45 - Coupe géologique de la cavité C1 (2x150m et 2x200m)



Figure 46 - Coupe géologique de la cavité C3 (2x150m)



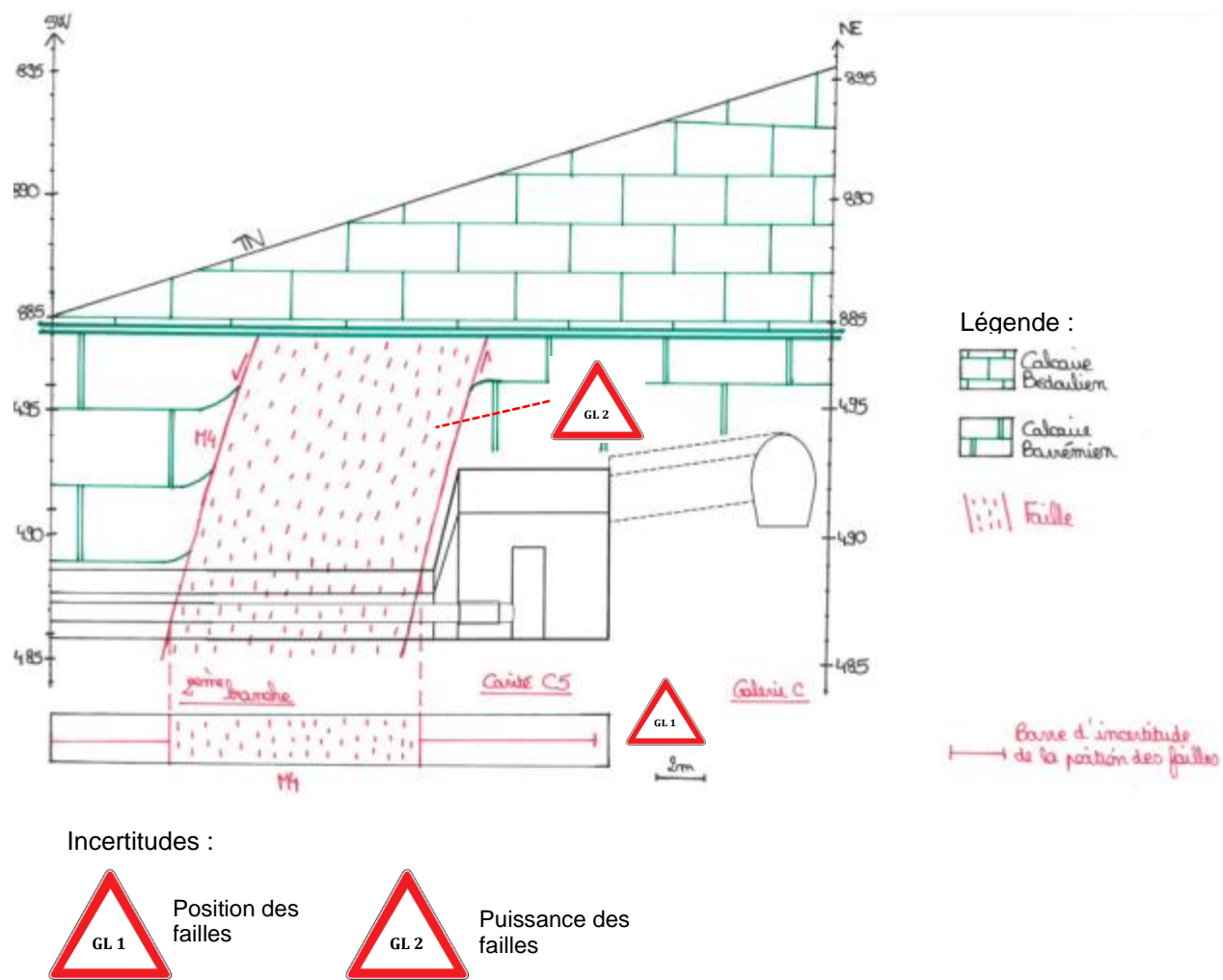


Figure 49 – Coupe géologique de la cavité C5 (2x200m)

7 SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE

De la même façon que pour la synthèse géologique, les données disponibles au niveau du LSBB sont recoupées avec les informations connues à l'échelle régionale afin de définir au mieux le contexte hydrogéologique du projet MIGA.

7.1 CADRE HYDROGÉOLOGIQUE REGIONAL

7.1.1 PRÉSENTATION DE L'HYDROSYSTÈME KARSTIQUE DE FONTAINE DE VAUCLUSE

7.1.1.1 Description générale

Comme évoqué précédemment, la zone d'étude est inscrite dans un aquifère karstique qui intéresse essentiellement les calcaires urgoniens. L'activité karstique est visible en surface, notamment sur le Plateau d'Albion qui forme un causse (plateau calcaire érodé marqué par des reliefs d'origine karstique de type dolines ou avens).

La source de Fontaine de Vaucluse constitue l'exutoire principal de ce système karstique qui regroupe le Mont Ventoux, le Plateau d'Albion et la Montagne de la Lure (cf. Figure 50). Son bassin d'alimentation couvre un territoire d'environ 1115 km². Il s'agit de l'une des plus grandes structures karstiques d'Europe par sa superficie et son débit (23,2 m³/s en moyenne à Fontaine de Vaucluse). D'autres sources sont relevées sur le pourtour du massif, comme celles indiquées à Rustrel sur la carte géologique de détail du LSBB (cf. Figure 13).

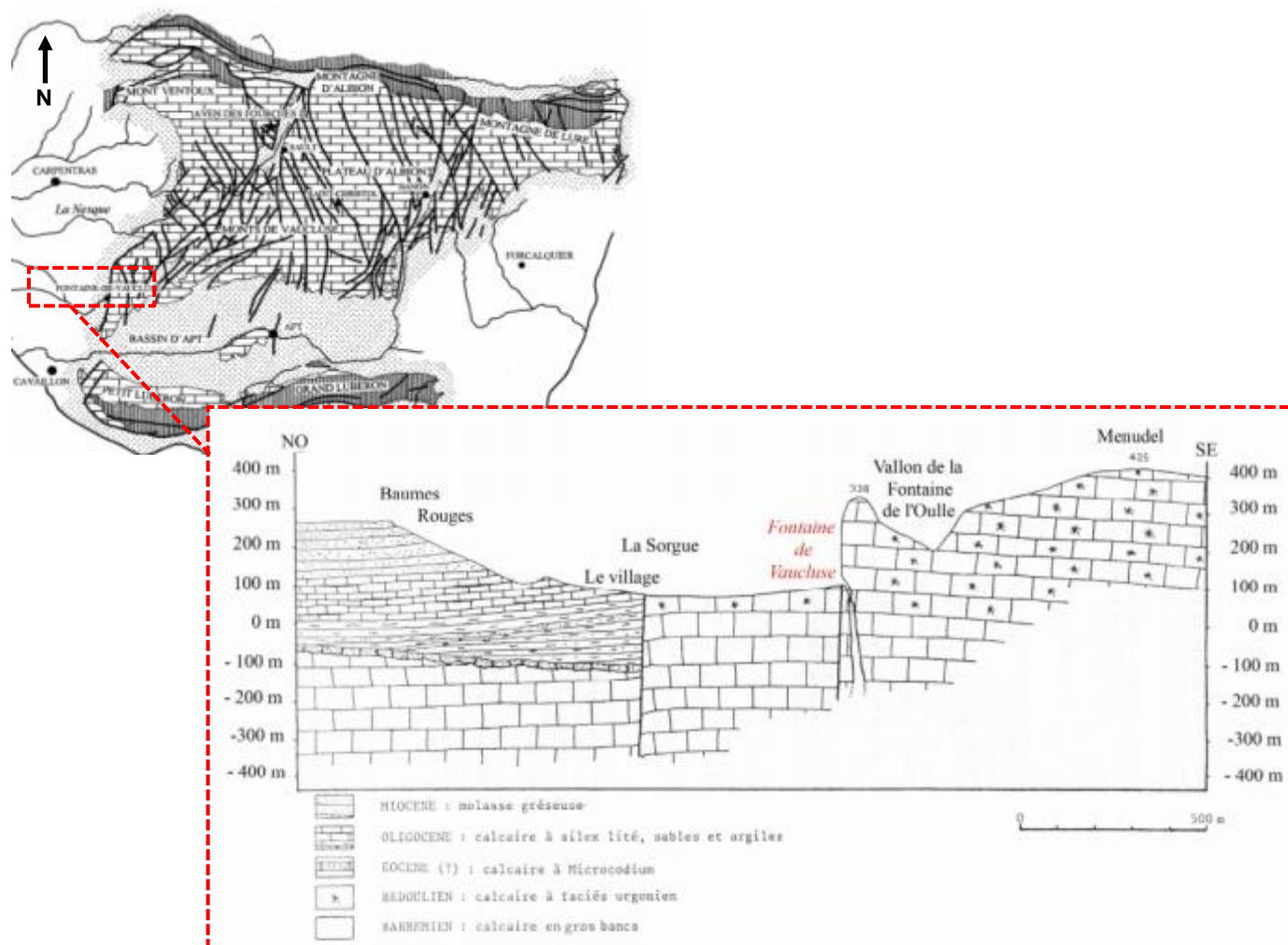


Figure 50 – Système karstique de Fontaine de Vaucluse – Carte et coupe géologique simplifiée (extrait de la thèse de Garry, 2007)

7.1.1.2 Formation du karst

La karstification du massif a débuté dès l'émersion de la plateforme carbonatée urgonienne au Crétacé inférieur (cf. §6.1.3). Les différents épisodes tectoniques de compression et d'extension qui ont suivi ont fracturé le massif et accentué le phénomène en créant des chemins préférentiels d'écoulement des eaux. Le bassin d'alimentation de Fontaine de Vaucluse est aujourd'hui marqué par de nombreux accidents majeurs et secondaires orientés NW-SE, NE-SW et E-W.

A plus petite échelle, le développement d'un karst dépend du potentiel de karstification, de la nature (lithologie) et de la structure interne (fracturation et porosité) du massif rocheux. Le potentiel de karstification est défini par l'action conjointe d'un moteur de l'écoulement souterrain (charge hydraulique, circulation gravitaire de l'eau) et du pouvoir de dissolution des eaux (fonction de la teneur en CO₂ dissout dans l'eau). Il dépend donc directement de la pluviométrie et de l'activité végétale (production de CO₂ par la respiration racinaire).

La vitesse d'écoulement a une importance déterminante dans la karstogénèse puisqu'elle conditionne la réalisation de la réaction calco-carbonique (dissolution des carbonates sous l'action du CO₂ dissout). Si l'écoulement est trop rapide, l'adsorption des réactifs sur le support rocheux n'est pas possible. Au contraire, si l'écoulement est trop lent, il ne peut y avoir transport des réactifs jusqu'au support de la réaction.

7.1.1.3 Organisation et fonctionnement du karst

L'organisation générale d'un système karstique se compose de trois parties :

- la zone d'alimentation (ou impluvium) : zone en surface où débute l'infiltration des eaux météoriques. A la différence d'un sol, la matrice rocheuse étant peu perméable, l'eau pénètre dans le massif principalement via les discontinuités. Sont distingués les karsts unaires pour lesquels l'infiltration de l'eau est diffuse à travers le massif, et les karsts binaires dont l'impluvium est constitué en partie de terrains non karstifiables et imperméables concentrant ainsi l'infiltration en un point,
- la zone d'écoulement : elle est subdivisée verticalement en trois unités :
 - l'Epikarst : zone superficielle très perméable qui assure l'interface entre le sol et le calcaire. Cette zone est marquée par une dissolution très intense qui induit à terme un contraste de perméabilité avec la zone non saturée sous-jacente. L'épikarst peut alors constituer un aquifère temporaire qui stocke les eaux d'infiltration (zone tampon),
 - la Zone non Saturée (ZNS) : elle correspond à la zone d'infiltration et assure la connexion entre l'épikarst et la zone noyée. Les circulations peuvent se faire soit de manière lente à travers la porosité de la matrice rocheuse, soit de façon très rapide à partir de fractures verticales ou subverticales. Les flux verticaux sont plus importants que les flux horizontaux. L'épaisseur moyenne de la ZNS du karst de Fontaine de Vaucluse est de l'ordre de 800m,
 - la Zone Noyée (ZN) : elle constitue la réserve d'eau de l'aquifère karstique. Elle comporte plusieurs axes de drainage qui assurent la fonction transmissive du karst (écoulement rapide jusqu'à l'exutoire) et des réserves annexes qui entretiennent la fonction capacitive du système (zones de stockage des eaux où l'écoulement est lent). Les flux horizontaux vers l'exutoire sont prépondérants,
- la zone d'émergence : exutoire des chemins de drainage principaux (cas de la source de Fontaine de Vaucluse).

Le substratum étanche de l'aquifère karstique de Fontaine de Vaucluse correspond au marno-calcaire de l'Hauterivien.

Une représentation schématique d'un système karstique, proposée par Mangin (1975), est présentée dans la Figure 51.

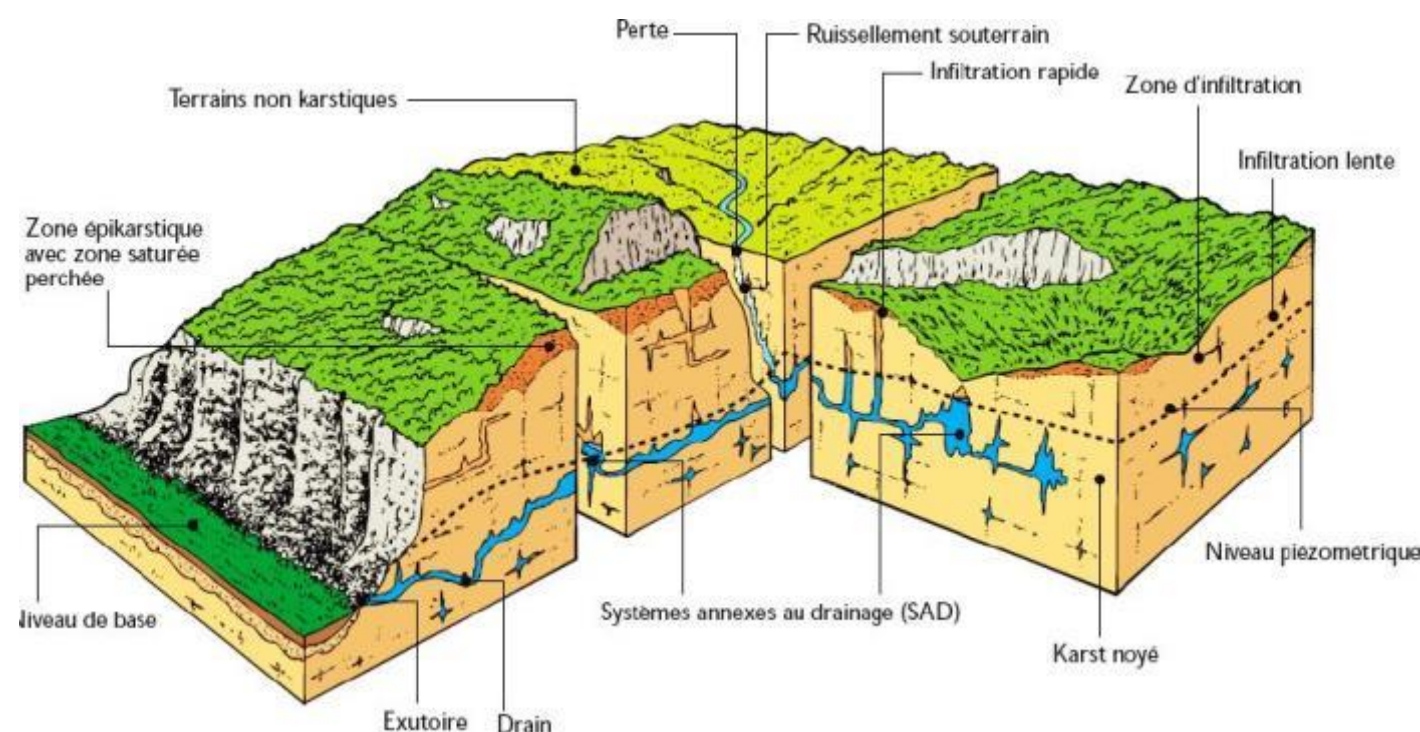


Figure 51 – Représentation simplifiée d'un système karstique (Mangin, 1975)

Auparavant, la ZNS était uniquement considérée comme un lieu de transfert des eaux vers la ZN, l'épikarst constituant la seule zone de stockage perchée. Aujourd'hui, plusieurs études montrent que la ZNS peut également jouer le rôle de réservoir au niveau des zones broyées des failles (structures dont le remplissage est plus ou moins argileux) ou au niveau des horizons plus marneux comme ceux retrouvés dans les calcaires barrémo-bédouliens. Ces lentilles marneuses imperméables permettent de retenir des nappes suspendues dans la ZNS (exemple de la rivière souterraine d'Albion perchée 200m au-dessus de la ZN). Cette fonction capacitive de la ZNS expliquerait l'existence d'un débit d'étiage minimal au niveau de la source de Fontaine de Vaucluse, même en période de forte sécheresse.

La ZNS assure aussi un rôle de régulation des flux d'eau joué par la matrice rocheuse. C'est le cas pour les calcaires urgoniens dont certains faciès présentent une forte porosité (cf. l'étude d'une carotte de la plateforme urgonienne du Vaucluse : approches sédimentologique, pétrographique et numérique, Bouaziz I., 2015).

7.1.2 DONNEES CLIMATIQUES

La zone d'étude est sous influence du climat méditerranéen : les étés sont chauds et secs, les hivers doux et secs et les périodes humides sont au printemps et à l'automne.

Les données météorologiques les plus proches proviennent de la station de mesure de Saint-Saturnin-lès-Apt. Les moyennes mensuelles des températures et des pluies sont indiquées dans la figure suivante pour la période 1998-2012. Les valeurs moyennes ne dépassent pas 100 mm de pluie par mois.

Les épisodes pluvieux les plus intenses sont généralement observés au mois de novembre, comme en 2011 avec 175mm d'eau tombés entre le 01 et le 08 novembre.

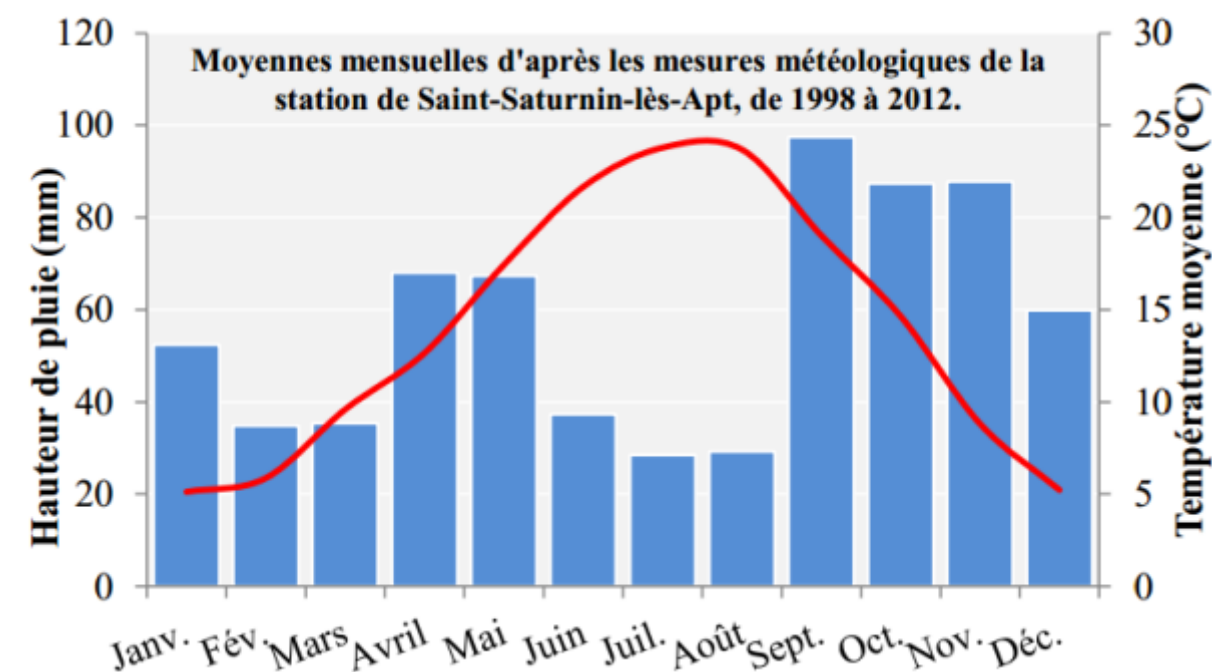
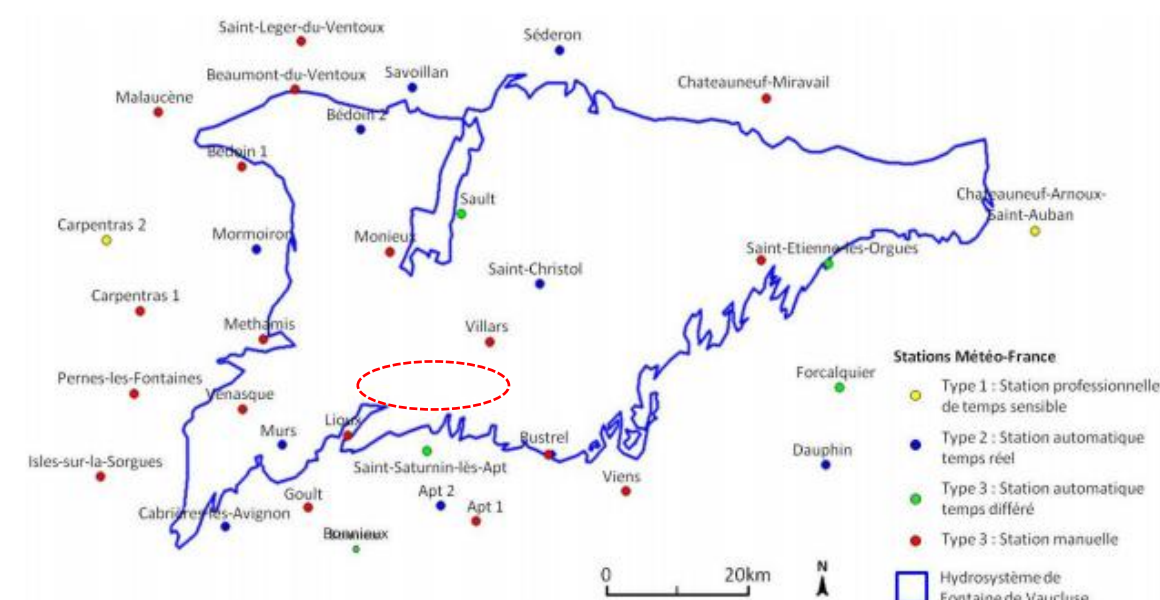


Figure 52 – Moyennes mensuelles des pluies et des températures à Saint-Saturnin-lès-Apt (extrait du rapport d'Ollivier, réf. [1])

7.2 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE AU DROIT DU PROJET

7.2.1 SITUATION HYDROGÉOLOGIQUE DU LSBB

Le LSBB est creusé dans la ZNS de l'aquifère karstique de Fontaine de Vaucluse, à environ 300m au-dessus de la ZN (cf. Figure 53). Il offre un accès privilégié à cette unité karstique et attire ainsi de nombreux chercheurs qui profitent de sa position idéale, de ses infrastructures et de son environnement à bas bruit (faible niveau des perturbations extérieures). Son tracé recoupe notamment des fractures et des chemins de drainage principaux et secondaires dont l'étude permet une meilleure caractérisation des écoulements dans la ZNS.

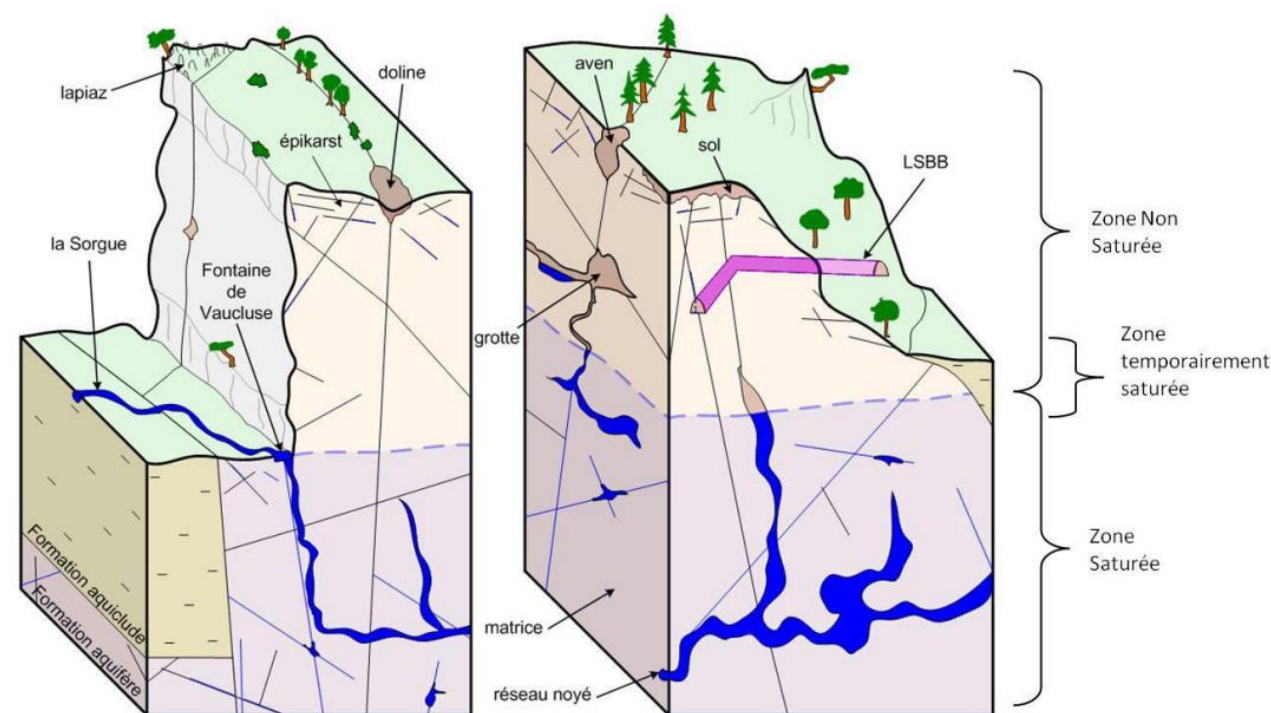


Fig. 7 : Schéma conceptuel du karst de Fontaine de Vaucluse

Figure 53 – Schéma conceptuel du système karstique de Fontaine de Vaucluse avec position du LSBB (extrait de la thèse de Carrière, réf. [24])

Actuellement, jusqu'à 45 points d'écoulement sont relevés dans le laboratoire dont cinq font l'objet d'un suivi hebdomadaire depuis 2003 (quatre dans la galerie de secours et un dans la GAS). Ils correspondent au drainage de la ZNS et concordent avec les suintements observés lors du creusement des galeries. D'autres suintements apparaissent de façon temporaire lors d'épisodes pluvieux importants. Les relevés détaillés de l'ensemble des points d'écoulement n'ont pas été transmis.

7.2.2 IDENTIFICATION DES STRUCTURES KARSTIQUES

7.2.2.1 Analyse des forages GAS

Parmi les discontinuités ouvertes observées sur les forages GAS, trois catégories se distinguent :

- 1) les joints à faible ouverture (d'ordre millimétrique à centimétrique) dont les épontes lisses semblent avoir peu souffert de la dissolution. Ces fractures peuvent toutefois être le siège de circulations d'eau si elles sont connectées au réseau karstique,
- 2) les joints à faible ouverture dont les épontes ondulées témoignent d'une altération probable par dissolution. Ces fractures constituent les conduits karstiques,
- 3) les vides d'extension décimétrique à métrique assimilés à des cavités karstiques.

Les trois catégories de fractures sont illustrées sur la figure suivante. Les deux premières sont prépondérantes et présentent des ouvertures inférieures à 5cm. Les deux seules cavités karstiques de dimension significative sont observées sur le forage P5. La hauteur de la plus grande ne dépasse pas 1m.

Par ailleurs, des niveaux d'eau ont été mesurés à différentes profondeurs dans les forages. Le niveau le plus élevé est relevé dans le forage P5 qui pourrait avoir intercepté un conduit de drainage majeur. L'aspect trouble de l'eau signifie cependant que la vitesse d'écoulement est lente : il pourrait donc s'agir d'un réservoir local.

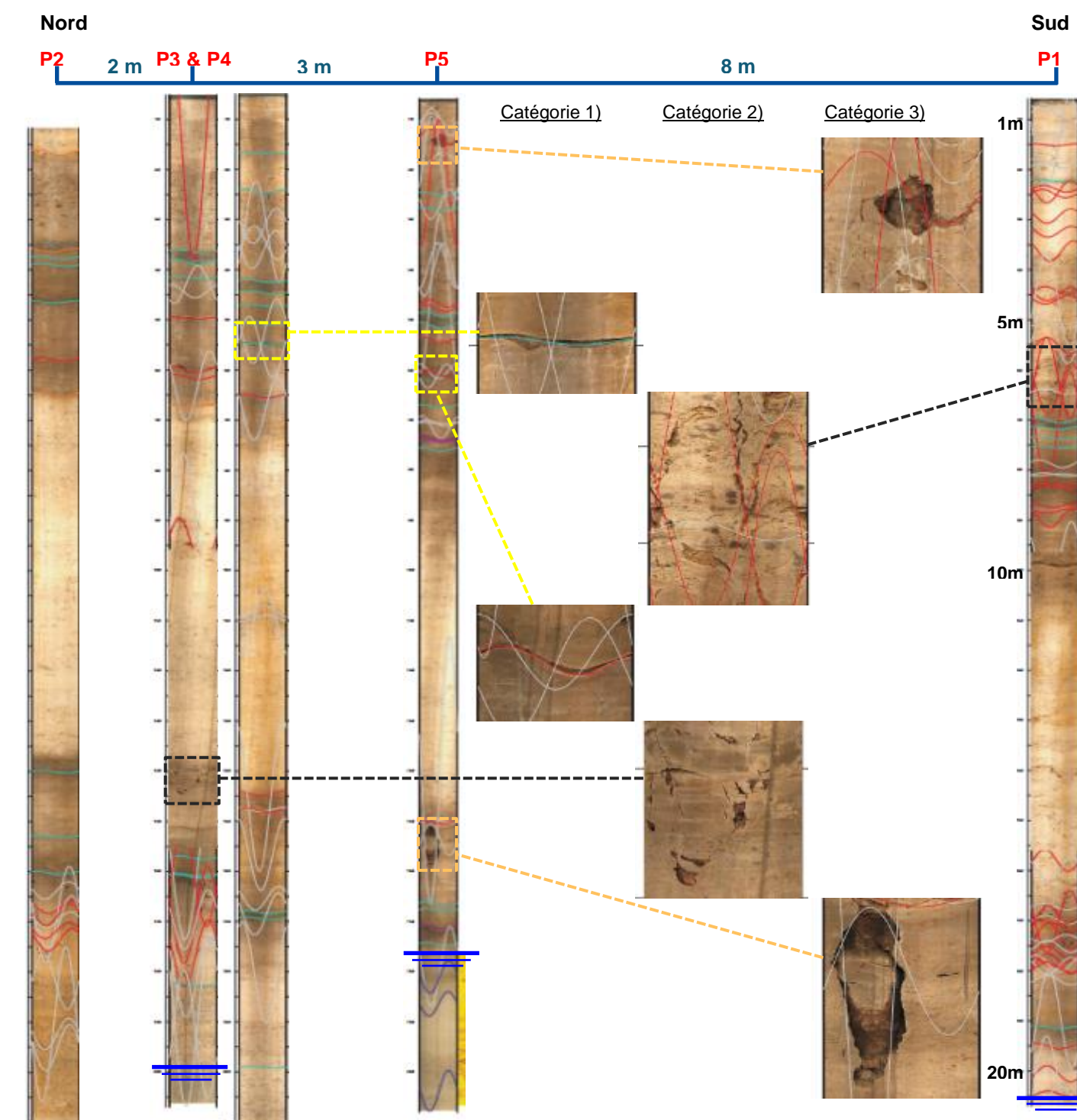


Figure 54 – Niveaux d'eau et différenciation des fractures observées sur les forages GAS d'un point de vue hydrogéologique

Les mesures de résistivité et de densité effectuées dans les forages ne permettent pas de localiser nettement les zones fracturées de faible ampleur. En revanche, la grande cavité traversée dans le sondage P5 est repérable par une augmentation significative de la résistivité et une baisse de la densité (cf. Figure 55).

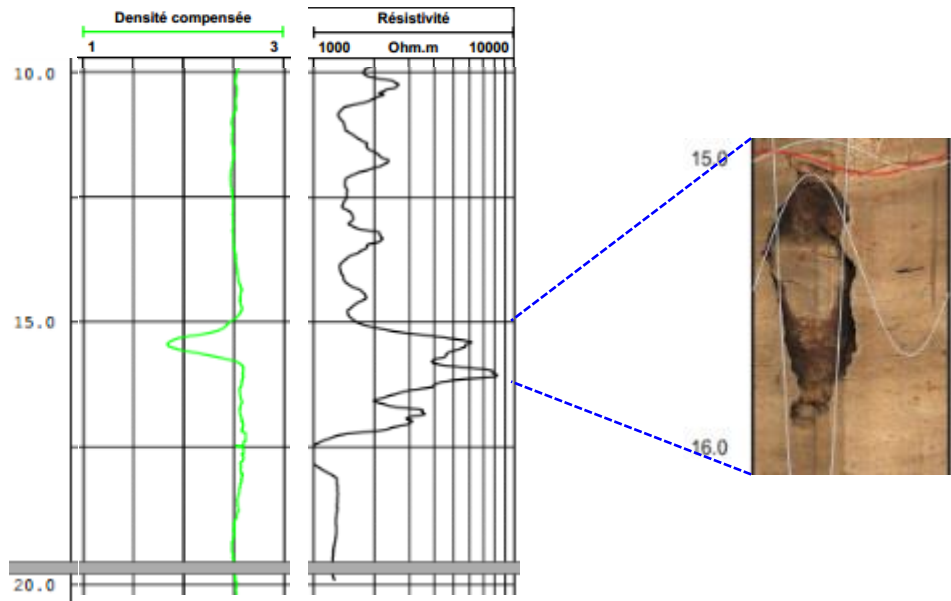


Figure 55 – Mesures de la résistivité et de la densité dans le forage P5 au niveau d'une cavité karstique

7.2.2.2 Analyse du creusement des galeries du LSBB

La Figure 56 répertorie l'ensemble des évènements hydrogéologiques survenus lors du creusement des galeries existantes :

- les venues d'eau** : une cinquantaine de points d'eau sont relevés lors du creusement et sont indiquées sur les coupes géotechniques du BEG. Les débits de captage ne sont pas mentionnés hormis pour un point d'écoulement significatif situé à proximité de l'entrée de la Galerie E et qui présente un débit de 9L/h. Ces venues d'eau sont repérées au niveau de diverses structures : des fractures, des cavités karstiques (notées avens sur les documents de l'entreprise et du BEG mais le terme n'est pas approprié), des cheminées de taille modérée (quelques dizaines de cm) parfois remplies d'argile, etc. Il apparait que les venues d'eau surgissent également dans les zones où le massif est peu fracturé : de nombreux écoulements sont identifiés en-dehors des zones Z3 et Z4.

Les secteurs qui présentent la plus forte densité de venues d'eau sont indiqués dans le tableau suivant.

N° Secteur (cf. Figure 56)	1	2	3	4	5	6
Galerie	B1	Jonction K et C	C	E	E	E
PM	20 à 80	660 (C) à 20 (K)	1060 à 1180	1600 à 1730	560 à 1140	80 à 150
Nombre d'écoulements	5	3	4	5	16	3 (dont 1 majeur avec débit de 9L/h)
Densité moyenne	1 venue d'eau / 12m	1 venue d'eau / 13m	1 venue d'eau / 30m	1 venue d'eau / 25m	1 venue d'eau / 35m (avec des zones à 1 venue/10m)	1 venue d'eau / 23m

Tableau 8 – Densité des venues d'eau par secteur dans le LSBB

- les suintements** en paroi et les **zones humides**,
- les passages identifiés comme karstiques** : seules les cavités significatives (de dimension décimétrique à métrique) sont représentées sur la Figure 56. De nombreux vides ou poches remplies d'argile ont été rencontrés le long du tracé mais leur dimension principale est généralement inférieure à 1m. Les cavités karstiques concernent essentiellement la Galerie E et la Galerie B1. Un vide de 20 à 30m de haut a été rencontré au PM 1540 de la Galerie E et a contraint la modification du tracé de l'ouvrage.

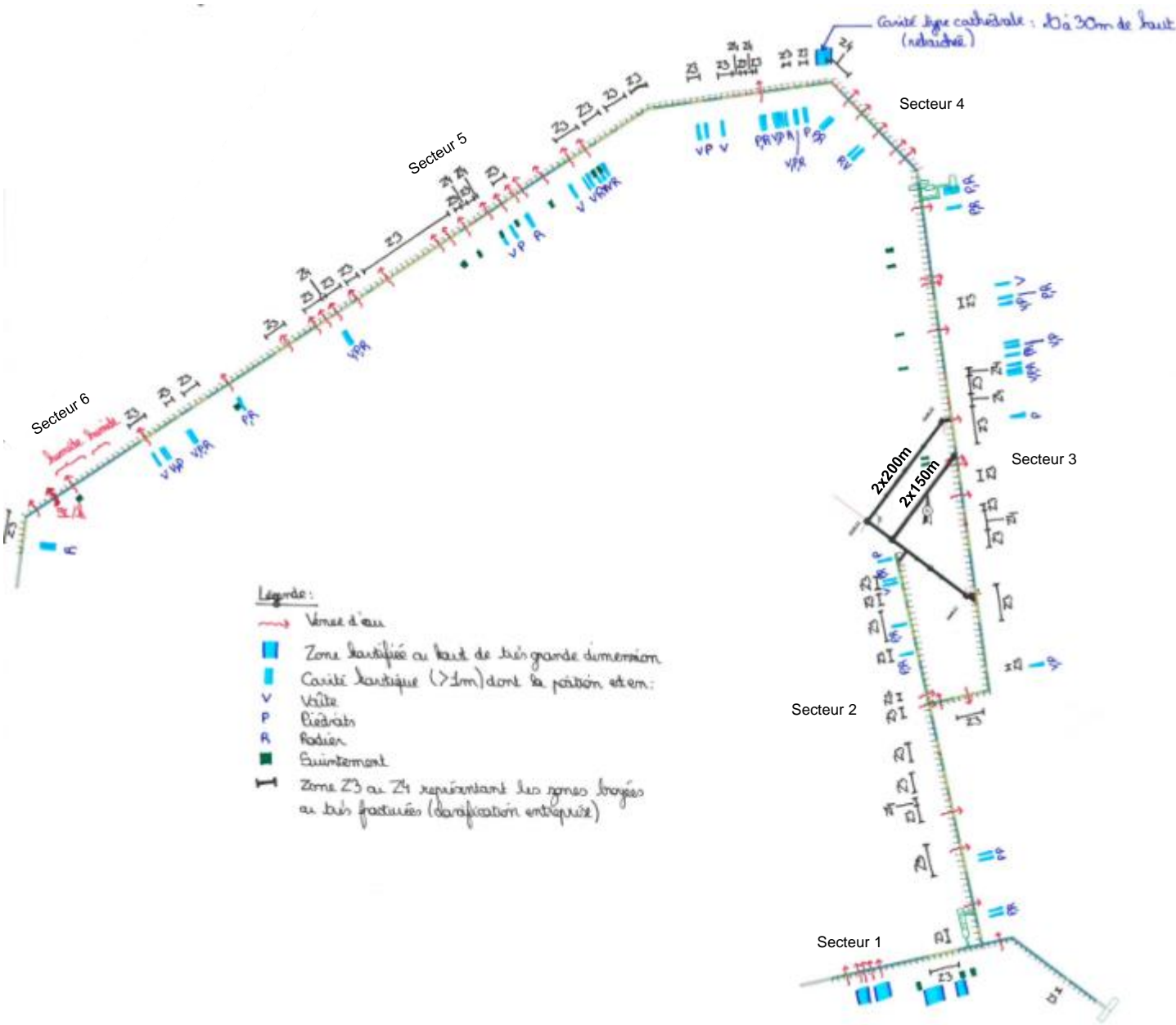


Figure 56 – Evènements hydrogéologiques identifiés lors du creusement du LSBB

7.2.2.3 Analyse des reconnaissances menées en 2014

Ces reconnaissances apportent les informations suivantes :

- le forage F1, d'une profondeur d'environ 400m, rencontre le niveau d'eau statique à environ 350m de profondeur, soit à la cote +100 NGF. Ce niveau concorde avec la profondeur de la Zone noyée décrite dans la bibliographie et avec la cote de la source de Fontaine de Vaucluse. La ZN se situerait environ 380m sous le projet MIGA,
- les forages F2 et F3, plus courts (100m) rencontrent un niveau d'eau statique entre 85m et 100m de profondeur. Il pourrait s'agir d'une nappe perchée au sein de la ZNS. La forte variation du niveau d'eau observée entre les deux forages, seulement espacés de 20m, témoigne de l'hétérogénéité qui caractérise les milieux karstiques : de fortes variations du niveau d'eau peuvent être mesurées sur une faible distance. Ils confirment également la présence possible de poches d'eau suspendues dans la ZNS. Un courrier de l'Université d'Avignon (réf. [27]) indique que ces aquifères perchés sont peu productifs : les forages peuvent être vidés assez rapidement à l'aide d'un pompage à 2 L/min,
- les trois forages rencontrent peu d'indices karstiques, hormis à 50m de profondeur sur le forage F3 (cavité karstique) et à partir de 350m de profondeur sur le forage F1.

7.2.3 POROSITE ET PERMEABILITE

Aucun essai de perméabilité n'est disponible à proximité du projet. Les données analysées proviennent de différentes études hydrogéologiques menées au LSBB.

Comme évoqué dans la thèse de Carrière (réf. [24]), plusieurs niveaux de porosité interviennent en milieu karstique :

- la porosité de karstification constituée de conduits karstiques,
- la porosité de fracture,
- la porosité matricielle de la roche.

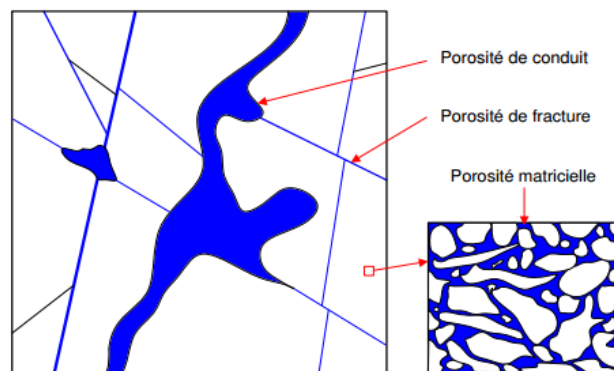


Figure 57 – Porosité des roches karstifiées (extrait de la thèse de Carrière, réf. [24])

L'interconnexion entre ces porosités est très hétérogène et difficile à appréhender ce qui rend délicat la détermination de la perméabilité à l'échelle du massif karstique. Elle peut être très élevée localement au niveau des conduits karstiques où les écoulements sont rapides et plus faible au niveau de la matrice où la circulation est lente.

L'étude de Bouaziz (réf. [1]) donne des indications concernant la porosité et la perméabilité de la matrice dans les faciès urgoniens :

- faciès non poreux avec une porosité inférieure à 5% (faciès à Orbitolines et à Rudistes compact),
- faciès modérément poreux avec une porosité comprise entre 5 et 10% (calcarénite compacte),
- faciès poreux avec une porosité supérieure à 10% (faciès à Rudistes et calcarénite poreuse).

La perméabilité de la matrice varie de 10^{-7} à 10^{-8} m/s sur l'ensemble des échantillons analysés.

7.2.4 EXHAURE PREVISIONNELLE

Les meilleurs indicateurs de l'exhaure qui peut être attendue dans les Galeries MIGA sont les suivis des écoulements repérés dans le laboratoire. Plusieurs thèses se sont intéressées à ce sujet :

- thèse de Garry (2007, réf. [1]) : analyse de cinq points d'écoulement faisant l'objet d'un suivi hebdomadaire depuis 2003. Ces points sont situés à différentes profondeurs :
 - A (442m), B (418m), C (363m) et D (30m) dans la Galerie E,
 - GAS (249m) dans la Galerie K (Anti-souffle),

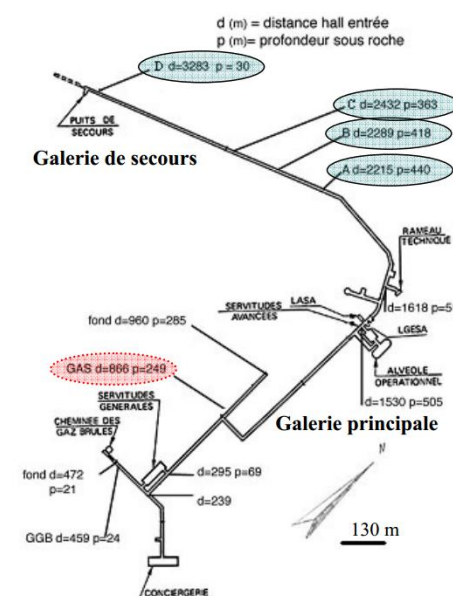


Figure 58 – Localisation des points d'écoulement étudiés par Garry

Garry a étudié ces cinq écoulements à l'aide d'analyses chimiques portées sur la teneur en COT (Carbone Organique Total), en Mg^{2+} et en silice.

- thèse de Barbel-Périneau (2014, réf. [23]) : l'étude s'intéresse à une quarantaine d'écoulements répartis sur l'ensemble du laboratoire (y compris les points A, B, C, D et GAS) et suivis entre 2008 et 2009. La majorité d'entre eux constitue des écoulements temporaires. Là encore, les écoulements ont été analysés à l'aide de traceurs naturels,
- thèse de Carrière (2015, réf. [24]) : l'étude s'intéresse plus particulièrement à l'origine de l'écoulement du point D.

Ces études permettent de mieux caractériser la dynamique des écoulements en milieu karstique. La synthèse est présentée dans la thèse de Carrière :

- Garry propose une hiérarchisation des écoulements :
 - le point GAS correspond à un écoulement ponctuel à temps de résidence court : les eaux prélevées sont riches en COT et pauvres en minéraux ce qui traduit un écoulement rapide depuis l'épikarst via le réseau de fracturation. Ce type d'écoulement est cohérent avec la présence d'une faille à ce niveau (cf. photo en Figure 32). L'écoulement répond de manière impulsionnelle aux précipitations,
 - les points A et B sont riches en silice et en Mg^{2+} et pauvres en COT : il s'agit d'eaux de réserve du karst qui traduisent la fonction capacitive de la ZNS (long temps de séjour),
 - les écoulements C et D sont plus difficiles à caractériser car pauvres en Mg^{2+} , en COT et en silice. Le point D notamment présente un débit régulier alors qu'il se situe à proximité de l'épikarst et devrait être plus sensible aux précipitations.

En référence à ces résultats, Garry propose le schéma conceptuel suivant des écoulements dans la ZNS.

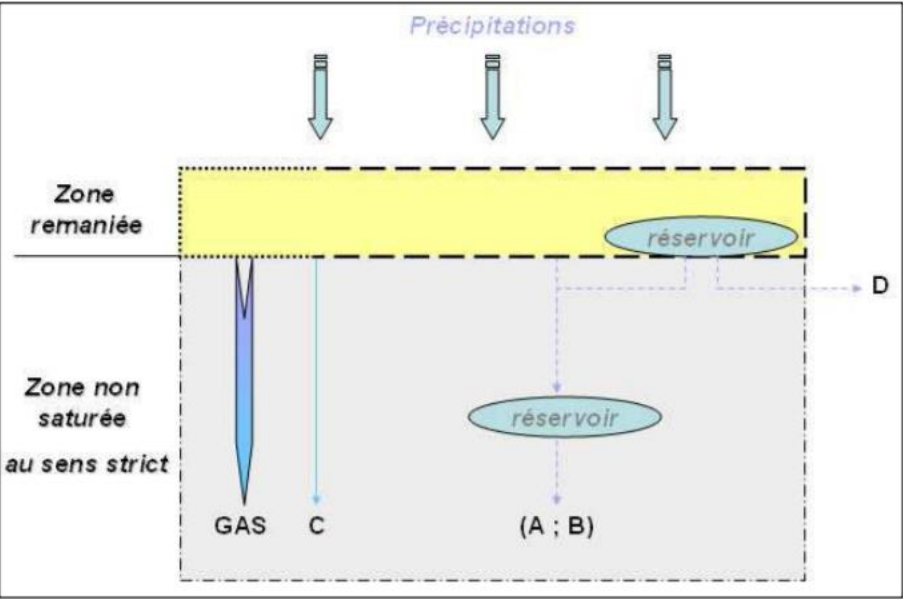


Figure 59 – Schéma conceptuel des écoulements dans la ZNS d'après Garry

- Barbel-Périneau propose une analyse plus précise, toujours à partir des traceurs naturels, et met en évidence trois composantes d'écoulement :
 - une composante lente, permanente, drainant les réserves (notée B),
 - une composante intermédiaire, temporaire avec une certaine continuité temporelle et un fonctionnement de type hystérésis (notée Q),
 - une composante rapide et intermittente (notée U).

Elle dresse une carte de l'origine de chaque point d'écoulement à partir de cette décomposition. Il apparaît que la plupart des écoulements ont une composante temporaire (catégories Q et U avec une majorité de type U). Seuls 3 points (A, B et D) sont de type B et proviennent des eaux de réserve de la ZNS.

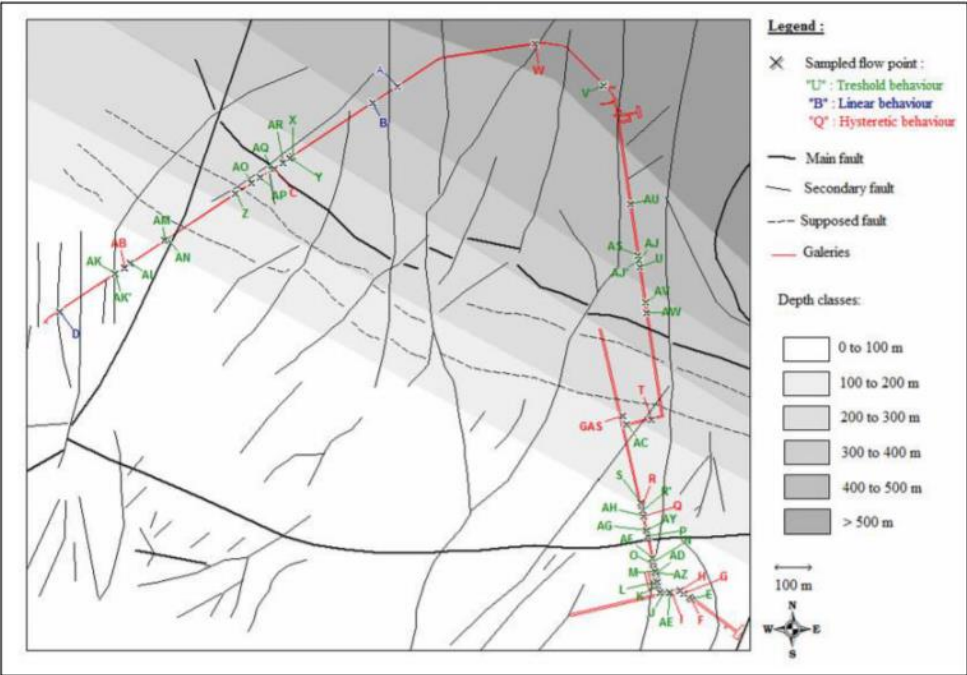


Figure 60 – Carte de l'origine des écoulements d'après Barbel-Périneau (réf. [23])

Barbel-Périneau étudie également le lien éventuel entre la localisation des points d'écoulement et plusieurs autres facteurs :

- comme évoqué dans le §7.2.2.2, la relation entre les venues d'eau et la fracturation n'est pas évidente puisque certains écoulements sont observés dans des zones peu fracturées. La plupart des zones faillées et fracturées sont toutefois le siège d'arrivées d'eau plus ou moins importantes,
- il apparaît que le nombre de points d'écoulement diminue avec la profondeur et que les circulations à grande profondeur ne s'activent que lors d'épisodes pluvieux intenses (caractère transmissif et impulsionnel des écoulements). Ces points s'accompagnent dans ce cas d'un débit élevé mais temporaire.

En conclusion, les galeries MIGA sont susceptibles de traverser trois types d'écoulement :

- des écoulements réguliers, lents et peu dépendant des conditions climatiques. Ils sont issus de réservoirs suffisamment capacitifs pour tamponner les impulsions de recharge et sont actifs même en période sèche. Les eaux en circulation sont riches en minéraux du fait de leur long temps de séjour dans le massif. Ces écoulements semblent minoritaires à l'échelle du LSBB puisque seulement trois points sur une cinquantaine sont de ce type. Les galeries C et K, situées à proximité du projet MIGA, n'ont pas recoupé ce mode de circulation. Cependant, la possibilité de rencontrer un réservoir de ce type sur le tracé des galeries MIGA ne peut pas être écartée,
- des écoulements temporaires rapides, alimentés par un réservoir peu capacitif transmettant directement les épisodes de recharge. Ces écoulements sont activés suite à des événements pluvieux importants et ne durent que quelques jours (en fonction de l'épisode pluvieux). Ils constituent la majorité des écoulements relevés dans le LSBB (65% des points étudiés) et ceux qui sont les plus susceptibles d'être rencontrés à la profondeur du projet MIGA,
- des écoulements temporaires intermédiaires qui présentent une certaine continuité temporelle. La gamme des débits est plus étalée que pour les deux types précédents. Ils sont sensibles aux précipitations mais sont également issus d'un réservoir présentant une réserve minimale assurant la continuité des écoulements dans le temps. Ils représentent environ 27% des points de mesure.

Des mesures de débits ont été réalisées au niveau de chaque point d'écoulement (valeurs issues de la thèse de Barbel-Périneau). La campagne de mesure s'est déroulée pendant 268 jours.

Type d'écoulement	Type 1	Type 2	Type 3
Débit moyen (L/h)	5 à 15	1 à 65	2 à 190
Débit maximal (L/h)	15 à 35	2 à 230	6 à 720
% de jours où les débits d'écoulement étaient suffisants pour être mesurés	100%	0,3 à 3%	1 à 65%

Tableau 9 – Débits mesurés par type d'écoulement mis en évidence dans le LSBB (thèse de Barbel-Périneau, réf. [23])

L'exhaure attendue dans les galeries MIGA se rapproche de celle observée au niveau des points d'écoulement les plus proches du projet, à savoir les points AU, AS, AJ, AV et AW qui sont de type 2 ou 3 (cf. Figure 60).

Par ailleurs, un courrier de l'université d'Avignon datant du 12 juin 2017 (réf. [27]) fournit des indications sur les débits actuellement collectés dans le laboratoire :

- le plus fort débit cumulé sur l'ensemble des points d'écoulement repérés au sein des 4 km de galeries existantes a été de 2 L/s, soit 7200 L/h. Ce débit n'a été observé qu'une seule fois le 15 décembre 2008 en pratiquement 15 ans de suivi,
- le débit moyen drainé en permanence sur l'ensemble du laboratoire est de l'ordre de 0,3 L/s, soit environ 1000L/h,
- le système de drainage actuel, largement surdimensionné, est constitué d'un tube de 20cm de diamètre capable d'absorber les surplus de débit occasionnels.

7.2.5 QUALITE DES EAUX

Aucune analyse chimique des eaux n’a été réalisée dans le cadre du projet MIGA. Les données disponibles sont issues des thèses citées précédemment mais elles n’abordent que certains traceurs tels que Mg^{2+} , la matière organique (COT) et la silice. Ce qui apparait :

- les écoulements de type 1 sont pauvres en Mg^{2+} et en silice et riche en COT,
- les écoulements de type 2 sont pauvres en COT et riches en Mg^{2+} et en silice,
- les écoulements de type 3 sont pauvres en Mg^{2+} , en silice et en COT.

Ces éléments ne sont pas suffisants pour juger de l’agressivité des eaux vis-à-vis des bétons. Des analyses complémentaires seront à réaliser sur les eaux prélevées dans le laboratoire afin de déterminer la classe de béton à mettre en œuvre.

7.3 MODELE HYDROGEOLOGIQUE

Le modèle hydrogéologique à l’échelle du projet est essentiellement conditionné par l’organisation structurale du système karstique et par les régimes hydrodynamiques qui règnent dans la Zone Non Saturée.

Le modèle hydrogéologique s’articule autour de trois axes principaux :

- 1) **Présence de zones karstifiées** : le REX du creusement des galeries du laboratoire indique que la rencontre d’anomalies karstiques est fortement probable au droit du projet. La majorité des cavités traversées avaient une hauteur inférieure à 1m. Il s’agissait de vides ou de poches remplies de matériaux argileux. Elles ont essentiellement été croisées dans les zones fracturées à broyées (zones Z3 et Z4). Les vides observés sur les forages GAS sont également de taille limitée (1m de hauteur maximum) même si la reconnaissance par forage ne permet pas de déterminer avec certitude l’extension latérale des cavités. Là encore, les vides se sont surtout développés au niveau des joints.

Les tableaux suivants répertorient par galerie et sur l’ensemble du LSBB la proportion des zones karstiques impactant un linéaire supérieur à 1m et d’une profondeur supérieure à 1m. Les cavités rencontrées en radier ou en voûte/piédroits sont distinguées. En effet, les solutions de franchissement des karsts diffèrent en fonction de leur position sur la section excavée :

- karst en radier : en fonction de la profondeur du vide, un comblement ou la mise en œuvre d’un pontage (dalle en béton armé) peut être nécessaire,
- karst en voûte ou en piedroit : le comblement du vide par du coulis (si le volume n’est pas trop conséquent) ou la réalisation d’une coque en béton (si le volume est important) peuvent être envisagés.

Galerie	Cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur comprise entre 1 et 5m			Proportion		
	Radier	Voûte + Piédroits	Total	Radier	Voûte + Piédroits	Total
A	0	0	0	0	0	0
B1	68 m		68 m	27 %		27 %
C	3 m	29 m	32 m	0,2 %	2,2 %	2,5 %
K	3 m	2 m	5 m	1,2 %	0,8 %	2 %
E	15 m	27 m	42 m	1 %	1,5 %	2,5 %
LSBB	89 m	126 m	147 m	2,3 %	3,2 %	4 %

Tableau 10 – Proportion par galerie du LSBB des structures karstiques impactant un linéaire compris entre 1 et 5m ou d’une hauteur comprise entre 1 et 5m

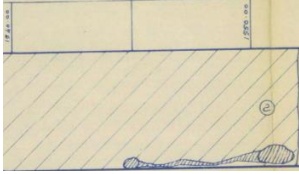
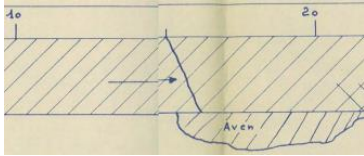
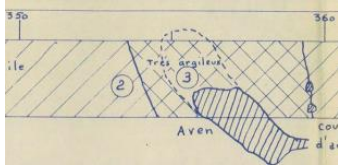
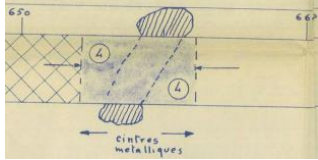
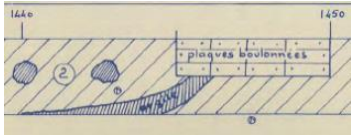
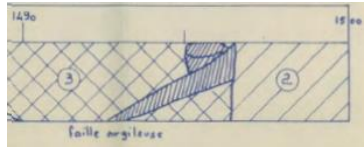
Galerie	Cavités impactant un linéaire compris entre 5 et 20m et d'une profondeur comprise entre 5 et 20m			Proportion		
	Radier	Voûte + Piédroits	Total	Radier	Voûte + Piédroits	Total
A	0	0	0	0	0	0
B1	0	0	0	0	0	0
C	0	7 m (PM 1545 à 1552) 	7 m	0	0,5 %	0,5 %
K	0	0	0	0	0	0
E	25 m (PM 15 à 21)  PM (355 à 360)  (PM 652 à 656)  (PM 1440 à 1446)  (PM 1493 à 1497) 			25 m	1,5 %	1,5 %
LSBB	32 m		32 m	< 1%		< 1%

Tableau 11 - Proportion par galerie du LSBB des structures karstiques impactant un linéaire compris entre 5 et 20m ou d’une hauteur comprise entre 5 et 20m

Les résultats précédents restent indicatifs puisque l'extension transversale des cavités n'est pas mentionnée sur les relevés des accidents géologiques. La proportion peut donc être supérieure à celle indiquée si certaines cavités de faible ouverture sont plus profondes que prévu.

A noter **qu'une cavité de très grande dimension, de l'ordre de 20 à 30m**, a été rencontrée lors du creusement de la Galerie E, au PM 1540. Le tracé a été modifié par la suite pour contourner ce vide. La possibilité de rencontrer ce type de cavité au droit du projet MIGA ne peut pas être exclue.

Par ailleurs, le tableau suivant indique la répartition des karsts impactant un linéaire supérieur à 1m en fonction des zones de fracturation. 90% des structures karstiques se situent en zone Z2 (massif peu fracturé) et Z3 (massif fracturé à broyé).

	Z1	Z2	Z3	Z4
Répartition	5 %	38 %	53 %	4 %

Tableau 12 – Répartition des structures karstiques impactant un linéaire supérieur à 1m par zone de fracturation

En conclusion sur la présence de zones karstifiées au droit de la galerie MIGA :

- les cavités karstiques peuvent se présenter sous la forme de vides ou de poches argileuses qui pourront nécessiter une purge préalable,
- la rencontre de cavités dont la dimension maximale est de 1m est fortement probable le long du tracé. Seule la proportion reste incertaine,
- la rencontre de cavités impactant un linéaire de galerie compris entre 1 et 5m et de profondeur limitée à quelques mètres est possible mais reste ponctuelle. Les Galeries C et K, les plus proches du projet, sont concernées par ce type de karsts sur seulement 2 à 3% de leur linéaire. Les solutions de franchissement envisageables diffèrent en fonction de la position de la cavité en radier ou en voûte/piédroits. Dans la Galerie C, la majorité des vides ont été rencontrés en voûte et en piédroits,
- la rencontre de grandes cavités (sur un linéaire supérieur à 5m et d'une profondeur de plusieurs mètres, voire plusieurs dizaines de mètres) est peu probable. Ce type de karsts concerne moins de 1 % du linéaire de la Galerie C. Une seule « cathédrale » de 20 à 30m de haut a été rencontrée au niveau de la Galerie E,
- les structures karstiques se développent majoritairement dans les zones fracturées et faillées (zones Z2 à Z4).

3) Exhaure : les écoulements survenant à proximité du projet MIGA sont définis comme des écoulements temporaires, rapides ou avec une certaine continuité temporelle. Ils sont alimentés par un réservoir peu à moyennement capacitif et leur régime hydraulique est essentiellement conditionné par les précipitations. Ils peuvent apporter une quantité d'eau importante en peu de temps suite à un épisode pluvieux intense. Les débits maximaux mesurés au niveau d'un point d'écoulement lors des différentes études menées dans le laboratoire sont inférieurs à 800 L/h.

Les débits limites estimés au niveau du projet MIGA sont définis de la façon suivante :

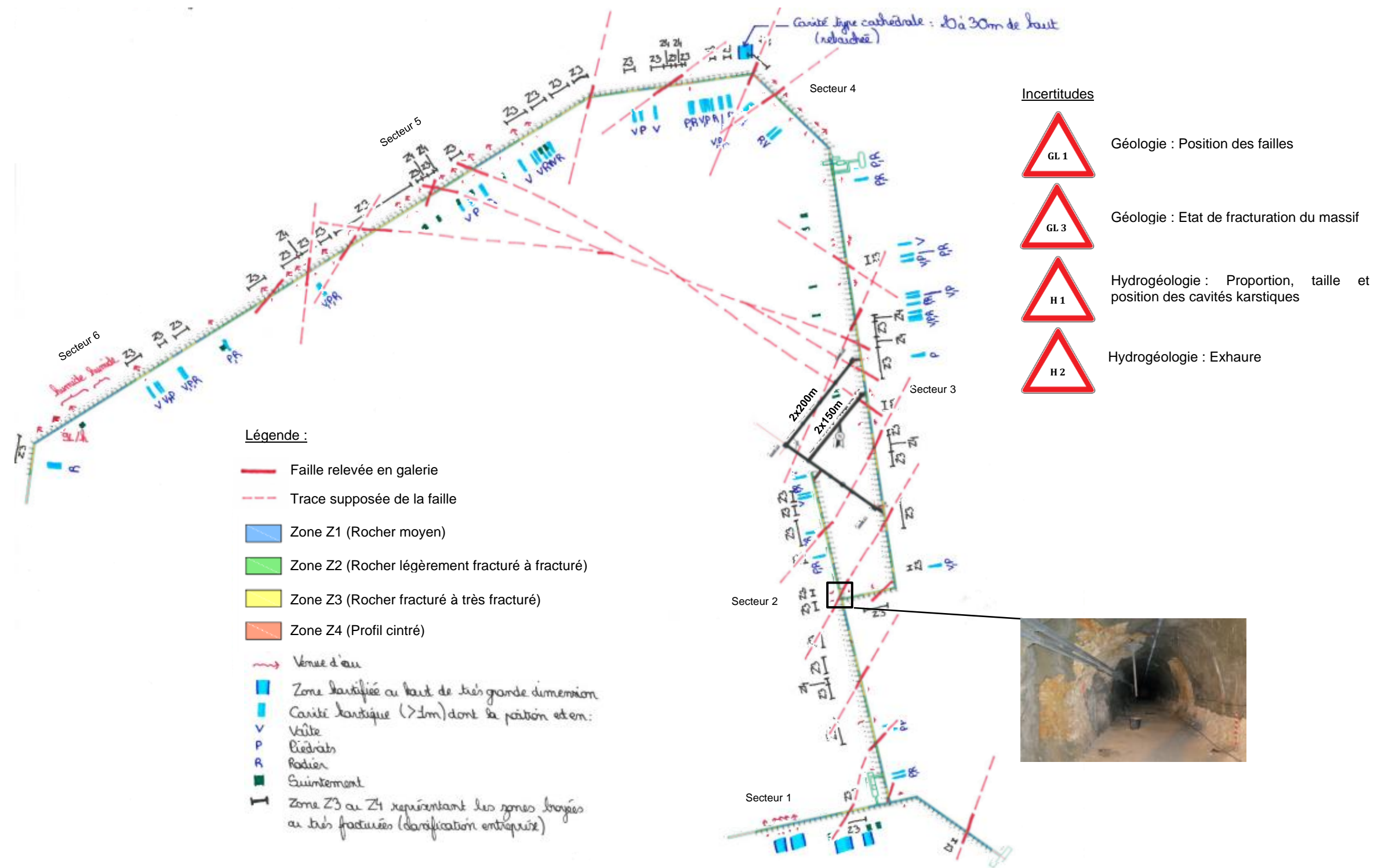
- en phase chantier : conformément au fascicule 69 (réf. [19]), les seuils sont définis sur une certaine distance à l'arrière du front. Cette distance est fixée à 20m dans le cadre du projet MIGA. La fréquence des venues d'eau étant estimée à 1 venue/10m de galerie, il est proposé de retenir deux arrivées d'eau avec un débit égal au débit maximal mesuré au niveau d'un point d'écoulement dans le LSBB, soit 720 L/h. Compte tenu de l'incertitude sur la perméabilité du massif, un facteur de sécurité de 10 est pris en compte. Le débit limite est donc fixé à 5L/s dans la zone de 20m située à l'arrière du front. Le dispositif de drainage doit être dimensionné en conséquence et la continuité hydraulique doit être sauvegardée.
- en phase exploitation : le débit maximal pompé dans le laboratoire a été de 2 L/s pour 4 km de galerie (débit mesuré un seul jour en 15 ans de suivi), ce qui équivaldrait à 0,2 L/s pour les 300 à 400m de galerie MIGA. En tenant compte d'un facteur de sécurité de 2, le débit limite est fixé à 0,4 L/s en phase exploitation, soit environ 1,5 m³/h.

L'ensemble des incertitudes qui subsistent au niveau hydrogéologique sont signalées sur le modèle hydrogéologique présenté dans les figures suivantes (vue en plan et coupes). Elles sont décrites plus en détail dans le §9.

Les incertitudes hydrogéologiques définies sur les Figures 62 à 64 (coupes pour les deux branches) sont également valables pour les cavités C1, C3 et C5.

2) Caractérisation des écoulements : les écoulements ne se produisent pas qu'au niveau des conduits karstiques. Ils peuvent également survenir au niveau des joints de discontinuité et à travers la matrice (zones humides, suintements). Six secteurs concentrent les écoulements dans le LSBB (cf. Figure 56 et Tableau 8). La densité moyenne des arrivées d'eau varie de 1/10m à 1/30m en fonction des secteurs. A proximité du projet, le nombre de venues d'eau est faible (Galerie C et extrémité Galerie K). Cependant, en l'absence d'informations complémentaires sur les conditions hydrauliques au droit des galeries MIGA, une densité moyenne de 1 venue d'eau/10m est retenue. Localement, le nombre de venues d'eau peut toutefois être supérieur,

La carte des événements hydrogéologiques est superposée au modèle structural dans la Figure 61. La plupart des secteurs à forte concentration de venues d'eau sont situés à proximité des zones fracturées ou faillées. D'autres écoulements apparaissent de façon ponctuelle dans des zones de rocher peu fracturé. Par exemple, le point D, situé à la sortie de la Galerie E, présente un débit permanent de 9L/h alors que le massif est classé en zone Z1 (rocher moyen) à ce niveau,



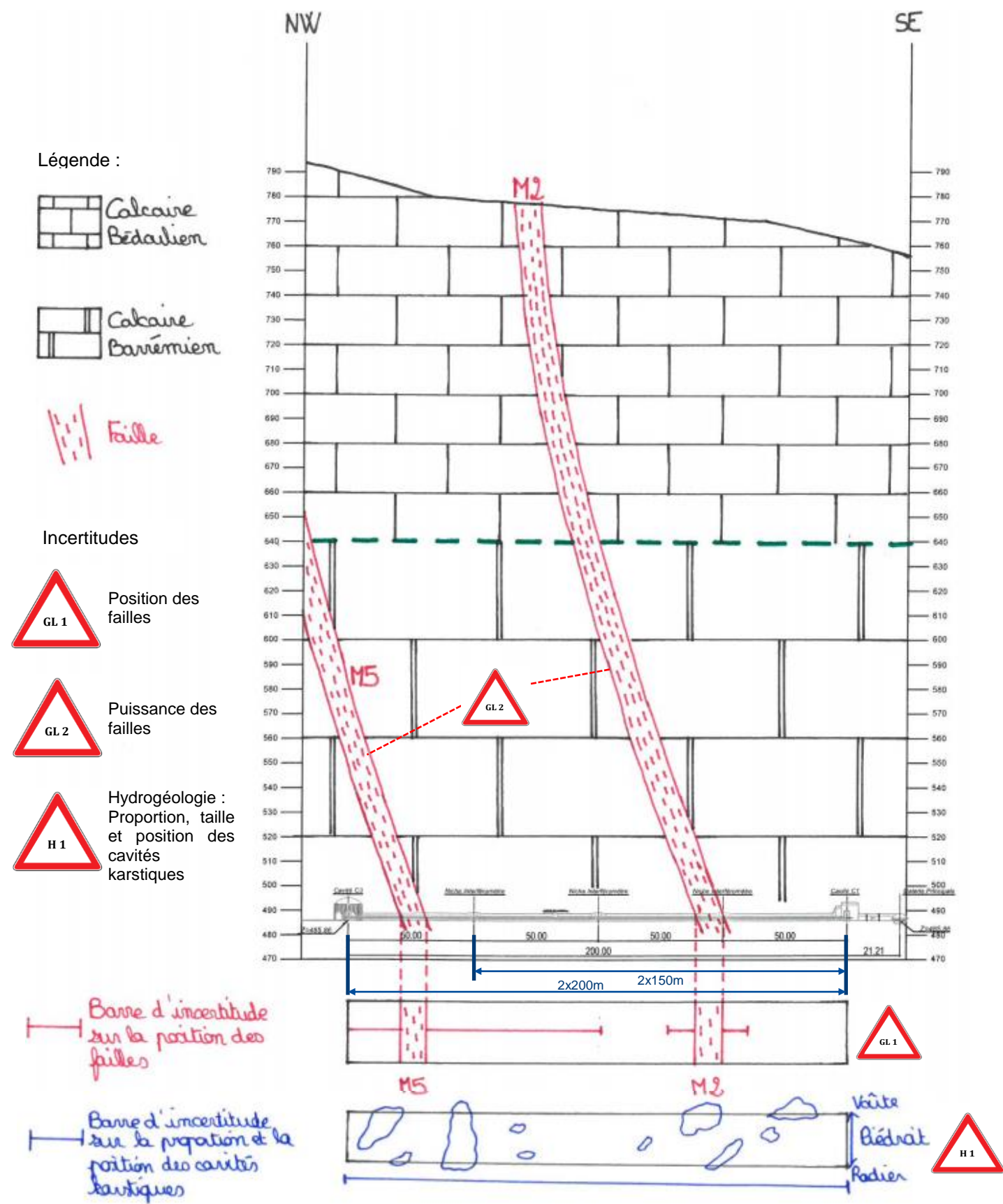


Figure 62 – Coupe géologique et modèle hydrogéologique de la première branche de la galerie MIGA (2x150m et 2x200m)

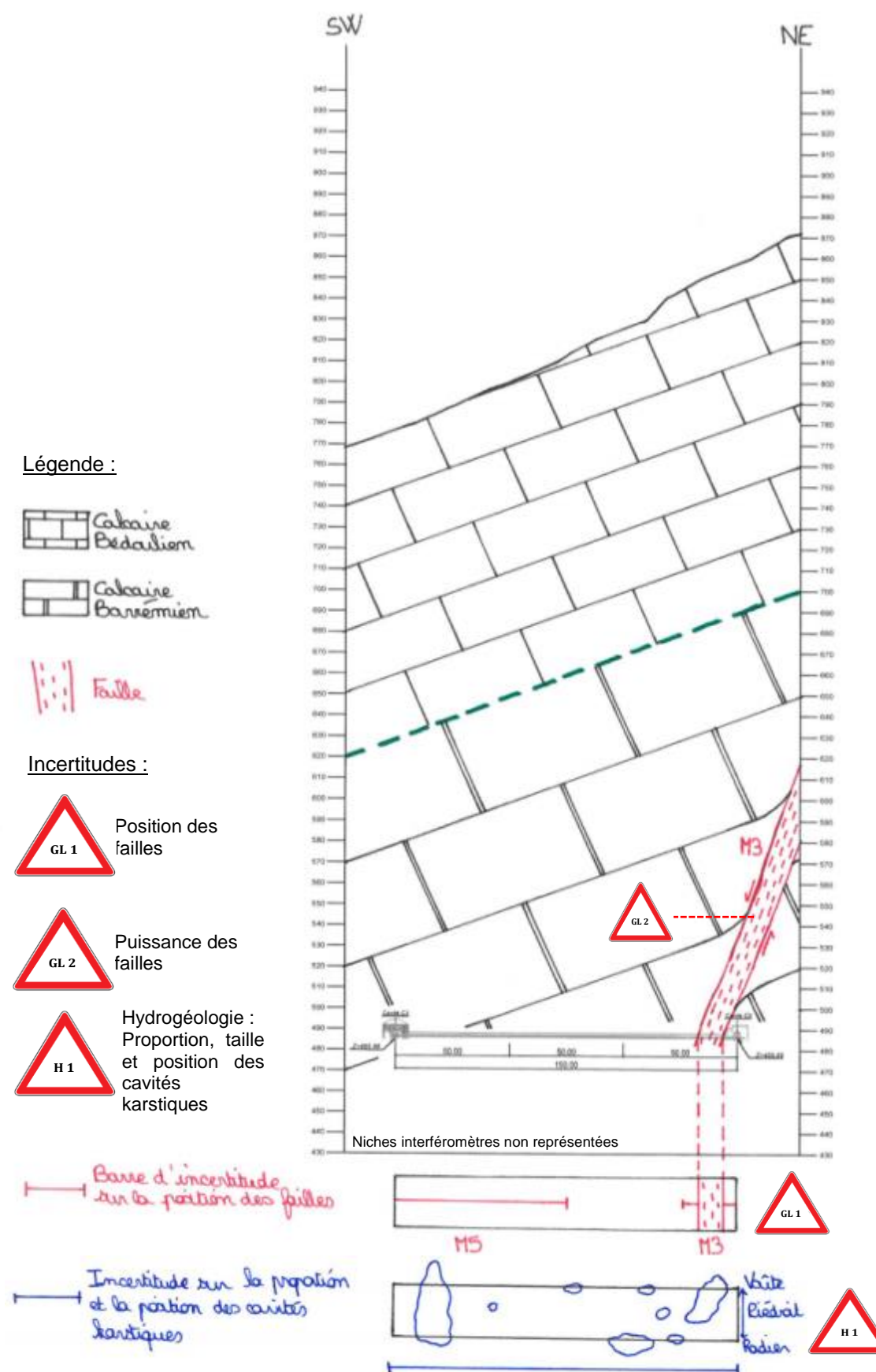


Figure 63 – Coupe géologique et modèle hydrogéologique de la seconde branche de la galerie MIGA (2x150m)

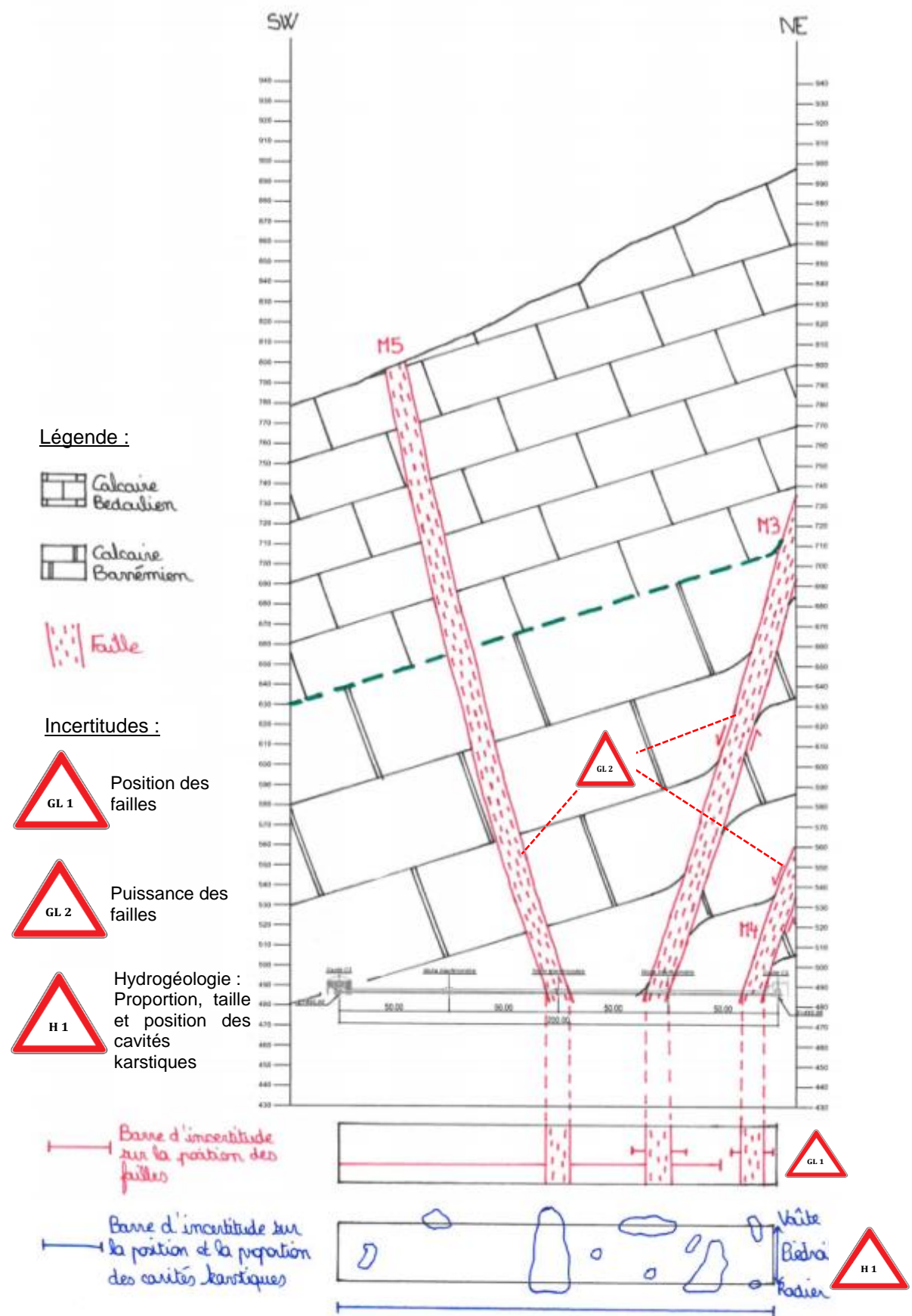


Figure 64 – Coupe géologique et modèle hydrogéologique de la seconde branche de la galerie MIGA (2x200m)

8 SYNTHESE GEOTECHNIQUE

Les modèles géologique et hydrogéologique établis précédemment constituent la base à partir de laquelle est construit le modèle géotechnique. L'objectif est d'aboutir au découpage du projet en tronçons homogènes du point de vue géotechnique et d'attribuer à chacun de ces sous-ensembles des propriétés physiques et mécaniques qui seront utilisées pour la conception (Cahier C).

8.1 CARACTERISATION DES SOUS-ENSEMBLES GEOTECHNIQUES

8.1.1 LITHOLOGIE

D'après le modèle géologique (cf. §6.3), la galerie MIGA intéressera exclusivement les calcaires du Barrémien présents dans la zone d'étude sous leur faciès urgonien. Ces calcaires bioclastiques sont organisés en bancs massifs, généralement de couleur claire. Ils peuvent présenter des niveaux plus marneux.

Au droit du projet, deux sous-faciès sont distingués :

- les calcaires spathiques organogènes qui concernent potentiellement la première branche de la galerie. Ils se caractérisent par la présence de débris de coquilles cristallisés et une rupture nette en facettes,
- les calcaires sublithographiques retrouvés au niveau des deux branches de la galerie. Il possède un grain fin à très fin, une couleur blanche à beige avec quelques passages plus foncés et une faible proportion d'argile.

8.1.2 PROPRIETES DU TERRAIN ENCAISSANT

En milieu rocheux, le massif est caractérisé en étudiant séparément :

- les propriétés de la matrice,
- les discontinuités,
- le comportement du massif.

8.1.2.1 Propriétés de la matrice

Les recommandations du GT1 et du GT7 de l'AFTES (cf. [7] et [8]) proposent un classement du rocher en fonction de la valeur de la résistance à la compression uniaxiale (cf. Tableau 13).

Catégorie	Désignation	Rc [MPa]
R1	Roche de résistance très élevée	>200
R2a	Roche de résistance élevée	120 à 200
R2b		60 à 120
R3a	Roche de résistance moyenne	40 à 60
R3b		20 à 40
R4	Roche de résistance faible	6 à 20
R5a	Roche de très faible résistance & sols cohérents consolidés	0,5 à 6
R5b		<0.5
R6a	Sols plastiques ou peu consolidés	x
R6b		x

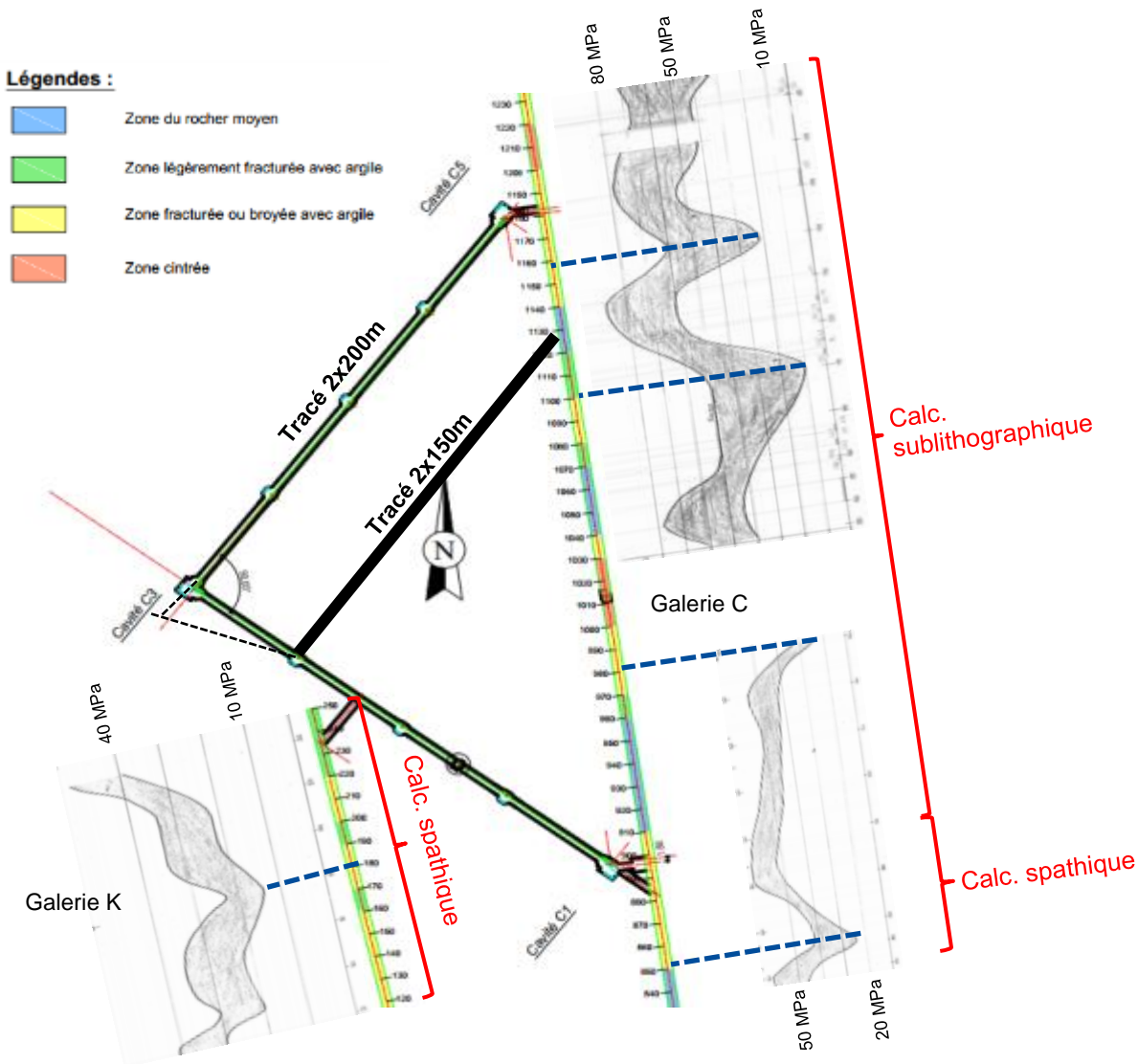
Tableau 13 – Classes de résistance des roches et des sols en fonction de la résistance à la compression R_c .

L'évolution de la résistance à la compression sur cube le long des galeries du LSBB est inscrite sur les coupes géotechniques du BEG. La synthèse par galerie est fournie dans le tableau ci-dessous.

	Galerie A	Galerie B1	Galerie C (PM240 à 960)	Galerie C (PM900 à 1560)	Galerie K	Galerie E (PM0 à 560)	Galerie E (PM560 à 1830)
Rc (MPa)	20 - 50	35 - 80	10 - 60	10 - 90	15 - 50	10 - 70	10 - 80
Classe	R3b à R3a	R3b à R2b	R4 à R3a (9% R4)	R4 à R2b (4% R4)	R4 à R3a (17% R4)	R4 à R2b (3% R4)	R4 à R2b (1% R4)

Tableau 14 – Résistance à la compression uniaxiale mesurée au droit de chaque galerie du LSBB

Conformément au Tableau 13, la roche est globalement de résistance faible à moyenne. Les valeurs minimales sont obtenues au niveau des zones broyées ou très fracturées (zones Z3 et Z4). A proximité du projet, les résistances varient de 10 à 80 MPa dans les Galeries C et K (cf. Figure 65). Entre les PM840 et 1230 de la Galerie C (les plus proches du projet), la classe R4 représente 6% du linéaire, le reste correspondant aux classes R3 et R2b. Quatre zones de faiblesse sont mises en évidence (résistance < 25 MPa). Certaines d'entre elles se situent à proximité des fronts d'attaque de la galerie MIGA (côté cavité C1 et côté cavité C5).



Au droit des Galeries C et K, les calcaires sublithographiques présentent une résistance moyenne légèrement plus élevée que celle des calcaires spathiques. En revanche, les valeurs minimales au niveau des zones très fracturées sont similaires :

- calcaires spathiques organogènes : de l'ordre de 30 à 40 MPa en moyenne avec une valeur minimale de 15 MPa (zone Z3, PM180 de la Galerie K) et une valeur maximale de 60 MPa (PM880 de la Galerie C),
- calcaires sublithographiques : en moyenne de l'ordre de 40 à 60 MPa (entre les PM900 et 1230 de la Galerie C) avec une valeur minimale de 10 MPa (zone Z3, PM1100) et une valeur maximale de 90 MPa (PM 1140).

Les valeurs minimales de résistance peuvent être plus faibles au niveau des profils cintrés pour lesquels aucune mesure n'est disponible.

D'après le tableau suivant, issu des recommandations du GT 7 de l'AFTES, il est possible d'avoir des excavations nues pour des classes de résistance R3b à R2b si les conditions de creusement sont favorables. En revanche, un soutènement est nécessaire pour la classe R4.

Comportement mécanique	Pas de soutènement	Bâti en béton	Doulins				Cintres				Vissacis				Procédés spéciaux			
			Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton	Bâti en béton
R1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
R2a	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
R2b	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
R3a	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
R3b	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
R4	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
R5a	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
R5b	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
R6a	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
R6b	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Tableau 15 – Procédés de soutènement recommandés en fonction des classes de résistance (GT7 de l'AFTES, cf. [8])

8.1.2.2 Discontinuités

L'exploitation des données factuelles (REX des galeries existantes, forages GAS, cartes géologiques) a mis en évidence la présence de cinq familles principales de discontinuités (orientations en convention AFTES) :

- Stratification décomposée en deux sous-familles : **S0**, subhorizontale et orientée N200-270 10-30°, et **F3** orientée N210-240 40-70°,
- Famille **F1** : N270-320 50-90°,
- Famille **F2** : N90-135 50-90°,
- Famille **F4** : N220-250 70-80°,
- Famille **F5** : N0-50 10-60°.

Seules les familles S0+F3, F1 et F2 sont repérées dans les forages GAS et les Galeries C et K (les plus proches du projet). Leurs stéréogrammes sont rappelés en Figure 66 (projection sur l'hémisphère supérieur). D'autres fractures, aux orientations plus dispersées, peuvent être rencontrées localement. Les familles F4 et F5, seulement retrouvées dans la Galerie E, ne sont pas intégrées dans le modèle géotechnique de la galerie MIGA.

Comme vu au §6.3.2, l'orientation des familles principales observées dans le laboratoire concorde globalement à celle indiquée sur la carte géologique de détail du LSBB. Cependant, la position exacte des failles en profondeur et la connexion entre les mesures du laboratoire et celles en surface ne sont pas évidentes.

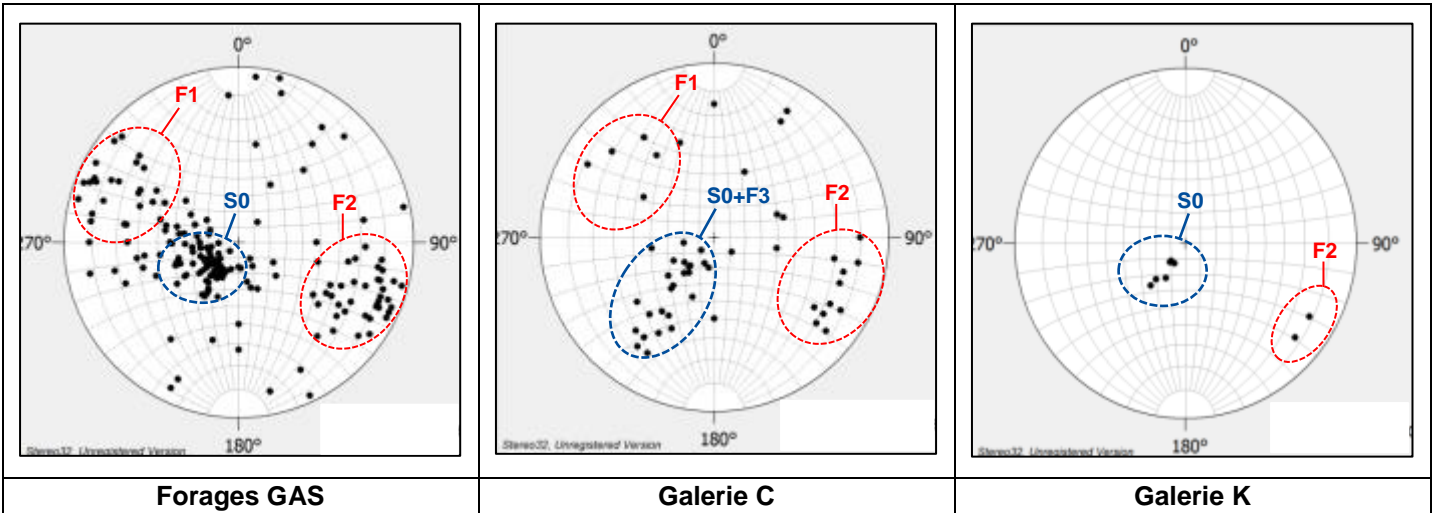


Figure 66 – Indication des familles de discontinuités principales sur les stéréogrammes des forages GAS et des Galeries C et K

Le site peut être classé en fonction des données de fracturation : nombre de familles, orientation et densité. Le GT1 et le GT7 proposent les catégories suivantes (cf. [7] et [8]) :

- N1 : pas de discontinuités,
- N2 : une famille principale,
- N3 : deux familles principales,
- N4 : plus de deux familles principales,
- N5 : nombreuses discontinuités sans hiérarchisation.

La zone d'étude est caractérisée par plus de deux familles principales (classe N4).

Le tableau suivant présente l'orientation des discontinuités par rapport à l'axe d'avancement des deux branches de la galerie MIGA. Les relevés des forages GAS, de la Galerie C (PM900 à 1560) et de la Galerie K sont superposés.

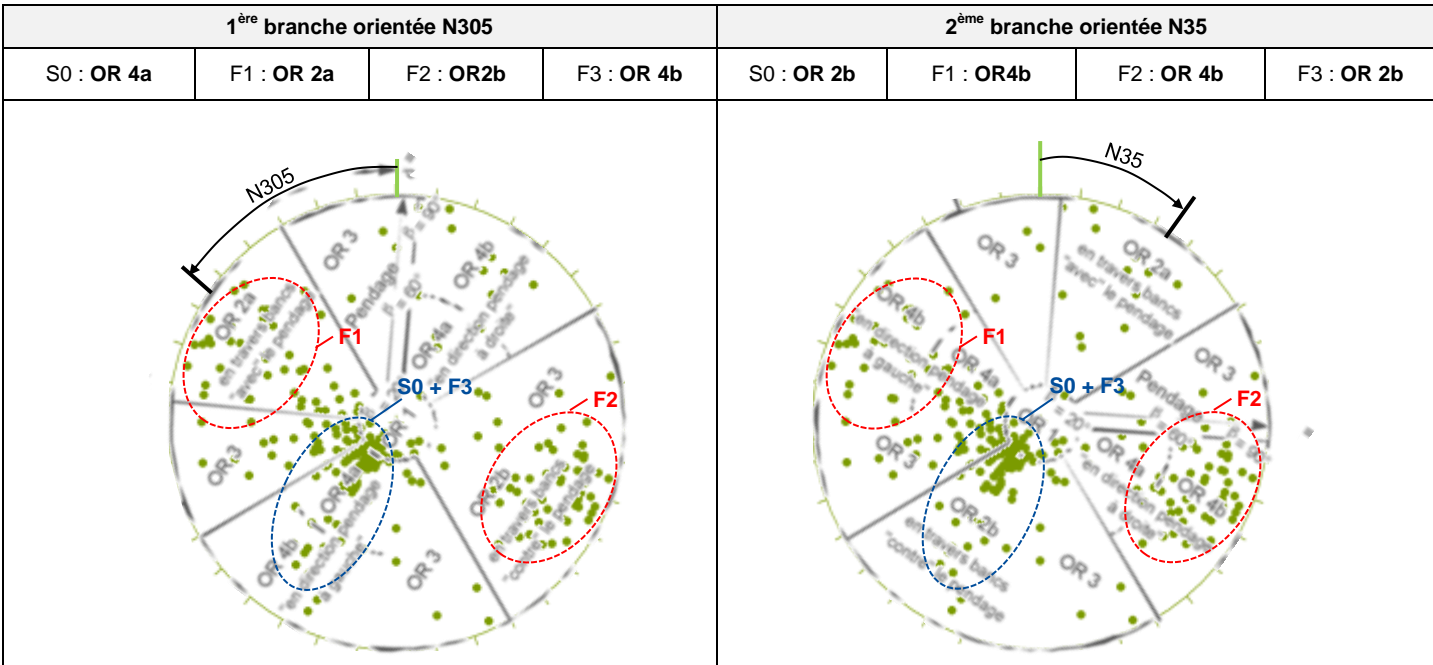


Tableau 16 – Orientation des familles principales de discontinuités par rapport à l'axe de creusement des galeries MIGA

La famille F2 présente l'orientation la plus défavorable vis-à-vis du creusement de la première branche. Il en est de même pour la stratification S0+F3 concernant la seconde branche.

Une analyse comparative de la fracturation entre les calcaires sublithographiques et spathiques dans les Galeries C et K est fournie ci-dessous. Le faciès sublithographique a fait l'objet de beaucoup de mesures et l'on retrouve les familles observées à l'échelle de la Galerie C. Pour les calcaires spathiques, seule la stratigraphie (S0) et la famille F2 sont repérées mais seulement une quinzaine de discontinuités ont fait l'objet d'un relevé.

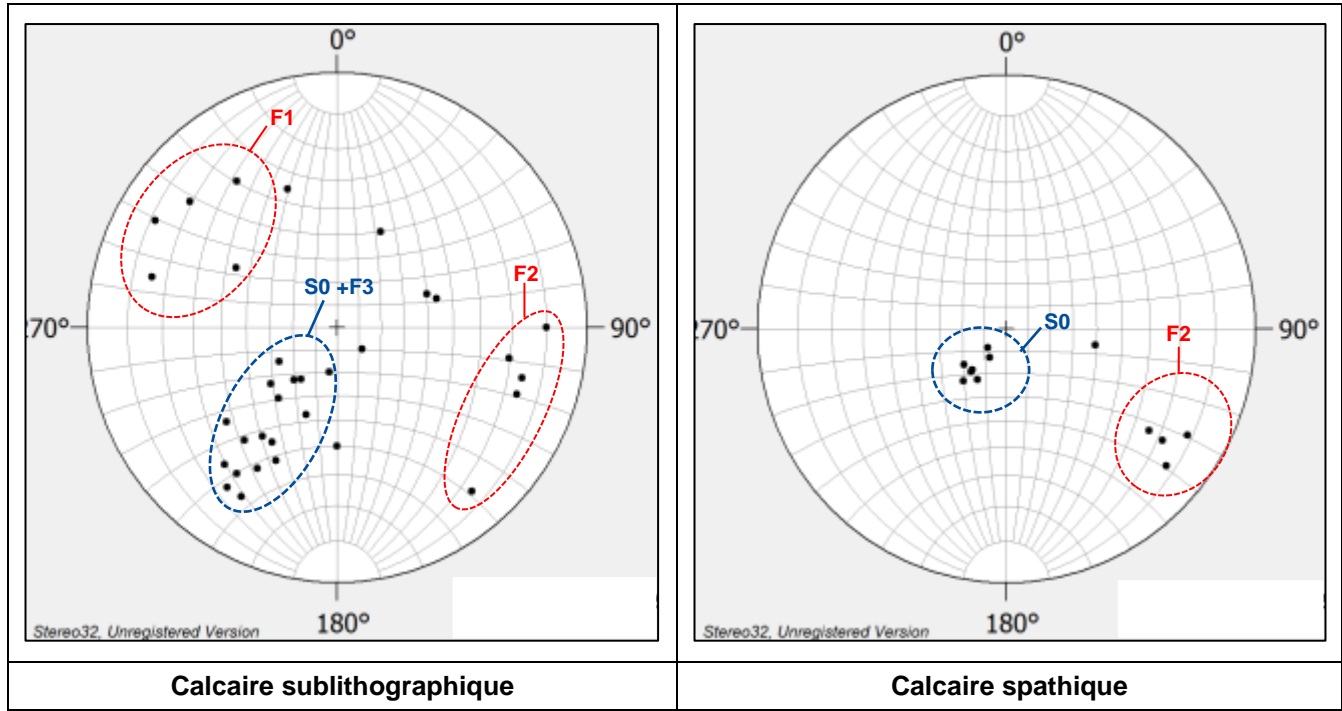


Figure 67 – Comparaison des stéréogrammes dans les calcaires sublithographiques et spathiques

8.1.2.3 Caractérisation du massif

Les données actuellement à disposition ne sont pas suffisantes pour caractériser de manière fine le comportement du massif. Les méthodes couramment utilisées pour la conception d'ouvrages souterrains en milieu rocheux nécessitent d'avoir accès à des informations plus précises concernant les propriétés de la roche (masse volumique, résistance mécanique, déformabilité) et des discontinuités (espacement, ouverture, remplissage, résistance des joints, etc.). Ces paramètres seront apportés par le sondage carotté en cours de réalisation qui s'accompagne d'une série de mesures in-situ (RQD, gamma-ray, imagerie de paroi, résistivité électrique) et d'essais en laboratoire (identification, compressions simples, résistance à la traction).

8.1.2.3.1 Etat des contraintes naturelles au niveau du projet

Dans le cas des massifs rocheux, la conception des ouvrages souterrains dépend du rapport entre la résistance à la compression R_c de la roche et la contrainte géostatique majeure σ_0 à la profondeur du projet. Selon le GT7 de l'AFTES (cf. [8]), trois classes de l'état des contraintes naturelles sont distinguées :

- CN1 : $R_c/\sigma_0 > 4$ (pas de soutènement nécessaire sauf pour des conditions de sécurité),
- CN2 : $2 < R_c/\sigma_0 < 4$ (soutènement nécessaire dont le choix dépend d'autres critères),
- CN3 : $R_c/\sigma_0 < 2$ (soutènement nécessaire et risque d'instabilité marqué).

La contrainte géostatique verticale au droit des futures galeries MIGA ne dépasse pas la valeur de 11 MPa. En l'absence de données complémentaires, l'état de contraintes ne peut pas être défini avec certitude à ce stade. La contrainte annoncée correspond donc à la contrainte verticale même si la contrainte principale, généralement horizontale en milieu rocheux, peut être supérieure.

Les états de contraintes associés aux classes de résistance retenues précédemment (cf. §8.1.2.1) sont fournis dans le tableau suivant.

Classe de résistance		Zone	R_c [MPa]	R_c/σ_0	Classe de l'état de contraintes
R2b	Roche de résistance élevée	Z1 + Z2	60 à 120	5,5 à 11	CN1
R3a	Roche de résistance moyenne	Z1 + Z2	40 à 60	3,6 à 5,5	CN2 à CN1
R3b		Z2 + Z3	20 à 40	1,8 à 3,6	CN3 à CN2
R4	Roche de résistance faible	Z4 + Z3	6 à 20	0,5 à 1,8	CN3

Tableau 17 – Caractérisation du massif selon l'état des contraintes naturelles

8.1.2.3.2 Qualité du massif

La qualité du massif, qui dépend essentiellement de son état de fracturation, peut être évaluée à partir du zonage indiqué par l'entreprise sur les relevés d'accidents géologiques :

- zones Z1 et Z2 : rocher moyen, peu fracturé,
- zone Z3 : rocher fracturé avec présence de zones broyées,
- zone Z4 : zone cintrée correspondant à un rocher de qualité médiocre (zone très fracturée).

A titre indicatif, le tableau suivant résume la répartition des zones Z1 à Z4 pour chaque galerie du LSBB.

Ouvrage	Z1	Z2	Z3	Z4
Galerie A	225m	0	0	5m
	97.5%	0%	0%	2.5%
Galerie B1	130m	70m	50m	0
	52%	28%	20%	0%
Galerie C	370m	410m	470m	70m
	28%	31%	36%	5%
Galerie E	460m	630m	630m	110m
	25%	34.5%	34.5%	6%
Galerie K	10m	100m	140m	0m
	4%	40%	56%	0%
Somme	1195m	1210m	1290m	185m
	31%	31%	33%	5%

Tableau 18 – Répartition des zones Z1 à Z4 pour l'ensemble des galeries du LSBB



Pour le projet MIGA, le linéaire de zone Z4 dans la section courante est estimé à l'aide du modèle géologique établi dans le §6.3 :

- la puissance des failles est fixée à 10m. Une épaisseur plus élevée est traitée dans le cadre de l'analyse des risques (cf. §9),
- deux failles sont susceptibles de croiser la galerie MIGA dans le cas 2x150m : M2 et M3. 10m de zone Z4 sont prévus au droit de chaque branche de l'ouvrage. Les cavités C1 et C5 sont situées à proximité de zones très fracturées (M1 et M4),
- quatre failles sont susceptibles de croiser la galerie MIGA dans le cas 2x200m : M2, M3, M4 et M5. 50m de zone Z4 sont prévus au droit de l'ouvrage dont 20m au niveau de la première branche et 30m au niveau de la seconde branche. Les cavités C1 et C5 sont implantées à proximité de zones très fracturées et faillées (M1, M4 et M5).

La répartition des autres zones (Z1 à Z3) est évaluée à partir des pourcentages mesurés dans la Galerie C (cf. Tableau 18) qui est la plus proche du projet MIGA. Ces pourcentages sont appliqués au linéaire de galerie en retirant la longueur des zones Z4 définies précédemment.

Le tableau suivant récapitule la répartition considérée pour la section courante de l'ouvrage MIGA.

			Z1 + Z2	Z3	Z4
2 x 150m	1 ^{ère} branche	Linéaire	75 m	46 m	10 m
		Répartition	57 %	35 %	8 %
	2 ^{nde} branche	Linéaire	75 m	46 m	10 m
		Répartition	57 %	35 %	8 %
	Répartition totale		57 %	35 %	8 %
2 x 200m	1 ^{ère} branche	Linéaire	99 m	62 m	20 m
		Répartition	55 %	34 %	11 %
	2 ^{nde} branche	Linéaire	93 m	58 m	30 m
		Répartition	51 %	32 %	17%
	Répartition totale		53 %	33 %	14 %

Tableau 19 – Répartition des zones Z1 à Z4 pour la section courante de la galerie MIGA

Le tableau suivant présente la répartition prise en compte pour les cavités en s'appuyant sur le modèle géologique.

		Z1 + Z2	Z3	Z4 ⁽¹⁾	Commentaires
2 x 150m	Sas jusqu'à C1	0	100 %	0	A proximité d'une zone Z3
	Cavité C1	38 %	62 %	0	Transition entre le sas et la section courante : inversion par sécurité des proportions retenues pour la section courante
	Cavité C3	0	100 %	0	Préconisation sécuritaire compte tenu de la taille de la cavité
	Cavité C5	38 %	62 %	0	A proximité de zones Z1 et Z3 : inversion par sécurité des proportions retenues pour la section courante
2 x 200m	Sas jusqu'à C1	0	100 %	0	Idem 2x150m
	Cavité C1	38 %	62 %	0	Idem 2x150m
	Cavité C3	0	100 %	0	Idem 2x150m
	Cavité C5	0	100 %	0	A proximité d'une zone Z3 et d'une zone faillée Z4

Tableau 20 – Répartition des zones Z1 à Z4 pour les cavités

⁽¹⁾ La rencontre d'une zone faillée (Z4) au sein d'une cavité est traitée comme un risque, voir le §9.

Dans l'attente des résultats complémentaires du sondage carotté, il est proposé de retenir les réparitions indiquées dans les Tableau 19 et 20 pour la conception (voir Cahier C).

8.1.3 PROPAGATION DES VIBRATIONS

Suite aux échanges du MOE avec le LSBB, les acquisitions pourront être arrêtées pendant la durée des travaux et les appareils scientifiques seront mis en sécurité si les vitesses dépassent le seuil défini dans le programme fonctionnel initial (10 mm/s à 10m). Les appareils seront remis en route lorsque les vitesses seront revenues à des valeurs acceptables.

Le site étant éloigné de toutes structures sensibles, aucune contrainte spécifique vis-à-vis des vibrations est à prendre en compte pour la phase chantier.

Des essais de tir préalables devront être réalisés par l'entreprise de façon à déterminer la quantité d'explosifs à mettre en œuvre pour l'excavation.

Durant toute la durée du chantier, les vibrations seront mesurées régulièrement (au moins à chaque passe de creusement), que l'excavation soit à l'explosif ou au BRH. La méthodologie et les équipements de mesure devront être conformes aux normes en vigueur.

8.1.4 REEMPLOI DES MATERIAUX

Le foisonnement est la capacité d'un sol à augmenter de volume lors de l'extraction du matériau. Le coefficient de foisonnement est le rapport entre le volume foisonné extrait (V_f) et le volume initial géométrique en place (V_e). Lors de la mise en œuvre des matériaux, le compactage produit le phénomène inverse ou contre-foisonnement, c'est-à-dire que le volume géométrique après mise en œuvre (V_{meo}) est inférieur au volume approvisionné à partir des sites d'extraction (V_i).

Dans le cadre du projet, le coefficient de foisonnement retenu dans les calcaires ($C_f = V_{meo}/V_i$) est 1,50.

Les volumes extraits de l'ouvrage MIGA sont estimés à :

- environ 5000 m³ dans la configuration 2x150m, soit un volume foisonné de l'ordre de 7500 m³,
- environ 6100 m³ dans la configuration 2x200m, soit un volume foisonné de l'ordre de 9200 m³.

D'après les données disponibles, il semble que les déblais extraits de la galerie MIGA peuvent être réutilisés. La caractérisation des matériaux sera précisée après réception des résultats du sondage carotté de grande longueur qui permettra notamment :

- d'estimer le pourcentage de réemploi en fonction de l'état du massif et de la proportion de poches argileuses effectivement rencontrées, la présence de ces dernières pouvant compliquer les opérations de valorisation des déblais,
- de définir les options envisageables pour le réemploi (corps de remblai, ZI, etc.) et les opérations nécessaires avant réutilisation.

La stratégie mise en place pour la gestion des déblais (stockages provisoire et définitif, suivi, procédures environnementales, etc.) est présentée dans le Cahier C du projet.

8.2 MODELE GEOTECHNIQUE

Le modèle géotechnique est présenté ci-dessous sur la base des coupes géologiques précédemment établies. Il reprend l'ensemble des points évoqués ci-dessus ainsi que les considérations structurales et hydrogéologiques.

Il couvre les deux configurations architecturales étudiées à ce stade (2x150m et 2x200m). Un modèle est proposé pour chaque branche et chaque cavité.

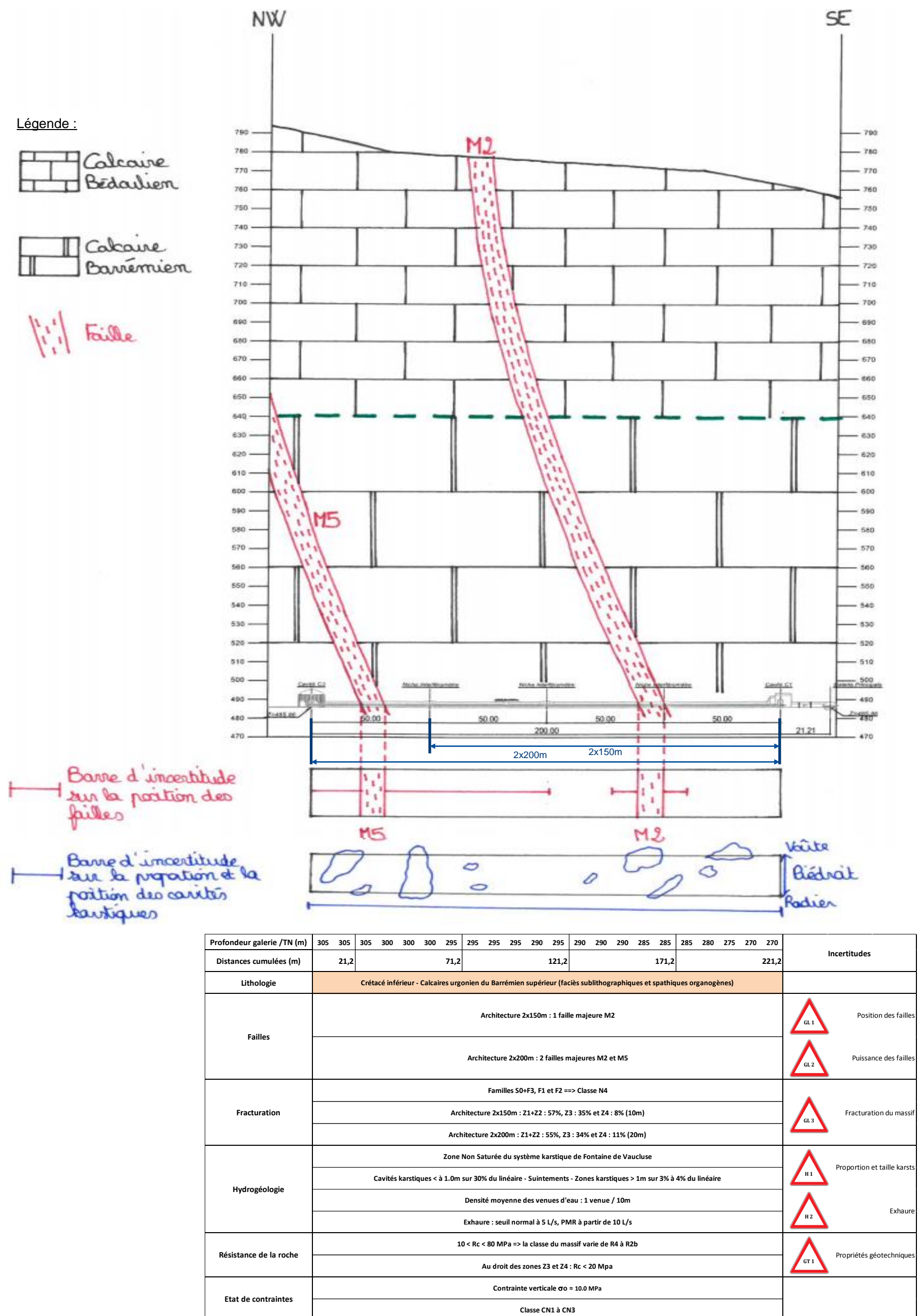
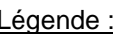





Figure 68 – Modèle géotechnique de la première branche de la Galerie MIGA (2x150m et 2x200m)





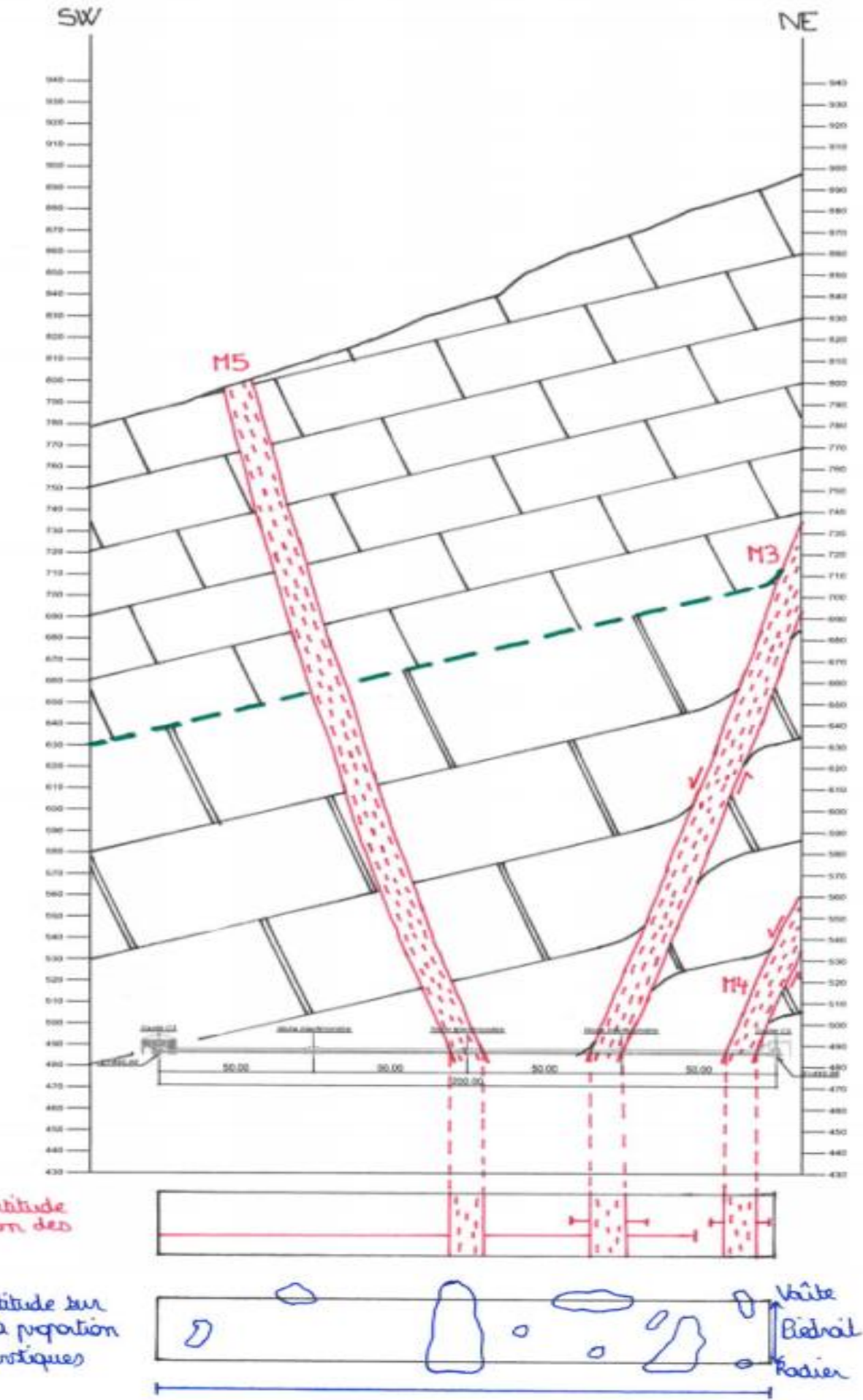
Profondeur galerie /TN (m)	300	305	310	320	325	330	335	340	345	350	355	360	365	370	380	Incertitudes
Distances cumulées (m)	50					100					150					
Lithologie	Crétacé inférieur - Calcaires urgonien du Barrémien supérieur (faciès sublithographique)															
Faïlles	Architecture 2x150m : 1 faille majeure M3															<div><div>GL 1</div><div>Position des failles</div></div> <div><div>GL 2</div><div>Puissance des failles</div></div>
Fracturation	Familles S0+F3, F1 et F2 ==> Classe N4															<div><div>GL 3</div><div>Fracturation du massif</div></div>
	Architecture 2x150m : Z1+Z2 : 57%, Z3 : 35% et Z4 : 8% (10m)															
Hydrogéologie	Zone Non Saturée du système karstique de Fontaine de Vaucluse															<div><div>H 1</div><div>Proportion et taille karst</div></div> <div><div>H 2</div><div>Exhaustivité</div></div>
	Cavités karstiques < à 1.0m sur 30% du linéaire - Suintements - Zones karstiques > 1m sur 3% à 4% du linéaire															
	Densité moyenne des venues d'eau : 1 venue / 10m															
	Exhaure : seuil normal à 5 L/s, PMR à partir de 10 L/s															
Résistance de la roche	10 < Rc < 80 MPa ==> la classe du massif varie de R4 à R2b															<div><div>GT 1</div><div>Propriétés géotechniques</div></div>
	Au droit des zones Z3 et Z4 : Rc < 20 Mpa															
Etat de contraintes	Contrainte verticale $\sigma_o = 11.0$ MPa															
	Classe CN1 à CN3															

Figure 69 – Modèle géotechnique de la seconde branche de la Galerie MIGA (2x150m)

Légende :

-  Calcaire Bédoulien
-  Calcaire Barrémien
-  Faille

-  Barre d'incertitude sur la position des failles
-  Barre d'incertitude sur la position et la proportion des cavités karstiques









Profondeur galerie /TN (m)	300	305	310	320	325	330	335	340	345	350	355	360	365	370	380	385	390	395	400	405	Incertitudes	
Distances cumulées (m)	50					100					150					200						
Lithologie	Crétacé inférieur - Calcaires urgonien du Barrémien supérieur (faciès sublithographique)																					
Failles	Architecture 2x200m : 3 failles majeures (M3, M4 et M5)																					Position des failles
																						Puissance des failles
Fracturation	Familles S0+F3, F1 et F2 ==> Classe N4																					Fracturation du massif
	Architecture 2x150m : Z1+Z2 : 51%, Z3 : 32% et Z4 : 17% (10m)																					
Hydrogéologie	Zone Non Saturée du système karstique de Fontaine de Vaucluse																					Proportion et taille karsts
	Cavités karstiques < à 1.0m sur 30% du linéaire - Suintements - Zones karstiques > 1m sur 3% à 4% du linéaire																					
	Densité moyenne des venues d'eau : 1 venue / 10m																					Exhaure
	Exhaure : seuil normal à 5 L/s, PMR à partir de 10 L/s																					
Résistance de la roche	10 < Rc < 80 MPa => la classe du massif varie de R4 à R2b																					Propriétés géotechniques
	Au droit des zones Z3 et Z4 : Rc < 20 Mpa																					
Etat de contraintes	Contrainte verticale σ_o = 11.0 MPa																					
	Classe CN1 à CN3																					

Figure 70 – Modèle géotechnique de la seconde branche de la Galerie MIGA (2x200m)

Les modèles géotechniques retenus pour chaque cavité sont présentés dans les tableaux suivants.

Profondeur cavité /TN (m)	275	Incertitudes
Lithologie	Crétacé inférieur - Calcaires urgonien du Barrémien supérieur (faciès sublithographiques et spathiques organogènes)	
Faïlles	-	<div><div>GL 1</div>Position des failles</div>
Fracturation	Familles S0+F3, F1 et F2 ==> Classe N4	<div><div>GL 3</div>Fracturation du massif</div>
	Z1+Z2 : 38% et Z3 : 62%	
Hydrogéologie	Zone Non Saturée du système karstique de Fontaine de Vaucluse	<div><div>H 1</div>Proportion et taille karsts</div>
	Cavités karstiques < à 1.0m sur 30% du linéaire - Suintements - Zones karstiques > 1m sur 3% à 4% du linéaire	
	Densité moyenne des venues d'eau : 1 venue / 10m	<div><div>H 2</div>Exhaure</div>
	Exhaure : seuil normal à 5 L/s, PMR à partir de 10 L/s	
Résistance de la roche	10 < Rc < 80 MPa ==> la classe du massif varie de R4 à R2b	<div><div>GT 1</div>Propriétés géotechniques</div>
	Au droit des zones Z3 : Rc < 20 Mpa	
Etat de contraintes	Contrainte verticale σ_o = 10.0 MPa	
	Classe CN1 à CN3	

Tableau 21 – Modèle géotechnique de la Cavité C1 (2x150m et 2x200m)

Profondeur cavité/TN (m)	370	Incertitudes
Lithologie	Crétacé inférieur - Calcaires urgonien du Barrémien supérieur (faciès sublithographique)	
Faïlles	-	<div><div>GL 1</div>Position des failles</div>
Fracturation	Familles S0+F3, F1 et F2 ==> Classe N4	<div><div>GL 3</div>Fracturation du massif</div>
	Architecture 2x150m : Z1+Z2 : 38% et Z3 : 62%	
	Architecture 2x200m : 100% en Z3	
Hydrogéologie	Zone Non Saturée du système karstique de Fontaine de Vaucluse	<div><div>H 1</div>Proportion et taille karsts</div>
	Cavités karstiques < à 1.0m sur 30% du linéaire - Suintements - Zones karstiques > 1m sur 3% à 4% du linéaire	
	Densité moyenne des venues d'eau : 1 venue / 10m	<div><div>H 2</div>Exhaure</div>
	Exhaure : seuil normal à 5 L/s, PMR à partir de 10 L/s	
Résistance de la roche	10 < Rc < 80 MPa ==> la classe du massif varie de R4 à R2b	<div><div>GT 1</div>Propriétés géotechniques</div>
	Au droit de Z3 : Rc < 20 Mpa	
Etat de contraintes	Contrainte verticale σ_o = 11.0 MPa	
	Classe CN1 à CN3	

Tableau 23 – Modèle géotechnique de la Cavité C5 (2x150m et 2x200m)

Profondeur cavité /TN (m)	300	Incertitudes
Lithologie	Crétacé inférieur - Calcaires urgonien du Barrémien supérieur (faciès sublithographique)	
Faïlles	-	<div><div>GL 1</div>Position des failles</div>
		<div><div>GL 2</div>Puissance des failles</div>
Fracturation	Familles S0+F3, F1 et F2 ==> Classe N4	
	100 % en Z3	
Hydrogéologie	Zone Non Saturée du système karstique de Fontaine de Vaucluse	<div><div>H 1</div>Proportion et taille karsts</div>
	Cavités karstiques < à 1.0m sur 30% du linéaire - Suintements - Zones karstiques > 1m sur 3% à 4% du linéaire	
	Densité moyenne des venues d'eau : 1 venue / 10m	<div><div>H 2</div>Exhaure</div>
	Exhaure : seuil normal à 5 L/s, PMR à partir de 10 L/s	
Résistance de la roche	10 < Rc < 80 MPa ==> la classe du massif varie de R4 à R2b	<div><div>GT 1</div>Propriétés géotechniques</div>
	Au droit de Z3 : Rc < 20 Mpa	
Etat de contraintes	Contrainte verticale σ_o = 10.0 MPa	
	Classe CN1 à CN3	

Tableau 22 – Modèle géotechnique de la Cavité C3 (2x150m et 2x200m)

9 REGISTRE DES INCERTITUDES

Les travaux souterrains comportent de nombreux risques essentiellement liés à la connaissance imparfaite de la géologie encaissante et à la variabilité mécanique du massif. Les conditions géotechniques de chaque ouvrage constituent des facteurs de risques dont il convient d'apprécier la vraisemblance et les conséquences au travers d'une analyse de risques. Cet outil permet l'anticipation des aléas qui peuvent influencer sur le bon déroulement du projet. Il conduit à élaborer une stratégie cohérente de partage des risques entre l'entreprise et le Maître d'Ouvrage en concertation avec ce dernier.

9.1 METHODOLOGIE D'ANALYSE DES RISQUES

L'analyse des risques (de nature géologique, géomécanique et hydrogéologique) est menée en utilisant la méthode recommandée par le GT32 de l'AFTES (réf. [10]). Elle reprend la terminologie définie au niveau international par les normes ISO 31000 et ISO Guide 73.

L'objectif de l'analyse est de qualifier l'ensemble des risques et de chiffrer les conséquences néfastes pour le projet à la fois en termes de coûts et de délais. La Provision pour Risques et Imprévus (PRI) sera calculée comme suit :
 $PRI = \text{Max}(\sum(PRI_{\text{risque_majeur_I}} ; \text{risque_majeur_II}) ; \Delta\text{coût_risque_majeur})$.

La méthodologie mise en œuvre est la suivante :

- 1) Bilan des connaissances et des incertitudes** : Le registre des incertitudes subsistantes à l'issue des études est bâti à partir de la synthèse et de l'interprétation des données et informations disponibles,
- 2) Appréciation des risques** : Il s'agit de l'identification, de l'analyse et de l'évaluation de chaque risque sur la base des incertitudes identifiées au cours de l'étape précédente.

Les risques sont analysés en proposant une valeur de vraisemblance des événements redoutés ainsi qu'une estimation de la (des) conséquence(s) sur les objectifs du Maître d'Ouvrage.

- 3) Evaluation du risque** : Le produit de la vraisemblance par la conséquence détermine le niveau de risque pour chaque événement redouté.

Matrice des risques					
Vraisemblance	Possible	4	8	12	16
	Peu probable	3	6	9	12
	Très peu probable	2	4	6	8
	Improbable	1	2	3	4
		Faibles	Moyennes	Fortes	Très fortes
Conséquences					

Tableau 1 - Exemple de matrice des risques à deux entrées (vraisemblance et conséquence) et 4 niveaux de risque. Les coefficients ne sont donnés qu'à titre indicatif et doivent être adaptés en fonction de chaque projet.

Une légende des couleurs correspondant aux différents niveaux de risque est présentée ci-dessous :

Indice NR (Niveau de risque)	Qualification indicative du niveau de risque à adapter en fonction de chaque projet	
NR < 2	Risque négligeable / Mineur	Aucune action requise, les facteurs de risque doivent faire l'objet d'un suivi spécifique par le biais de procédures adaptées.
2 < NR < 5	Risque significatif (mais a priori acceptable)	La construction peut débuter, les facteurs de risque doivent faire l'objet d'un suivi spécifique par le biais de procédures adaptées et le projet doit éventuellement être complété par une série de mesures prédéfinies pouvant faire l'objet d'adaptations durant la phase d'exécution.
5 < NR < 10	Risque important (à surveiller)	La construction ne peut pas débuter avant que le risque soit réduit ou annulé. Des solutions sont possibles sans changement important du projet.
NR > 10	Risque inacceptable	La construction ne peut pas débuter avant que le risque soit réduit ou annulé. Si le risque ne peut être maîtrisé, il est possible que le projet soit abandonné ou modifié.

Tableau 2 - Exemple de définition et qualification indicative des niveaux de risque (à adapter en fonction de chaque projet).

Tableau 24 – Définition du niveau de risque selon les recommandations du GT32 de l'AFTES

- 4) Traitement des risques** : Des actions d'anticipation sont définies pour chaque événement redouté. Elles correspondent à des mesures de détection et/ou de prévention.

La matrice des risques constitue la synthèse de l'analyse des risques et reprend l'ensemble des éléments précédents.

Selon la recommandation du GT32 de l'AFTES (réf. [11]) :

- le Cahier B introduit le registre des incertitudes élaboré à partir des modèles géologique, géotechnique et hydrogéologique,
- le Cahier C présente l'analyse des risques menée par le MOE : la matrice des risques et l'estimation de la PRI sont détaillées dans ce document.

9.2 REGISTRE DES INCERTITUDES

Les incertitudes sont listées ci-après par domaine : géologie, hydrogéologie et géotechnique.

9.2.1 INCERTITUDES GEOLOGIQUES

9.2.1.1 Position des zones faillées

Selon le modèle géologique établi au §6.3, les deux branches de la Galerie MIGA sont traversées par plusieurs failles (1 à 2 sur la première branche, 1 à 3 sur la seconde). La localisation de ces failles a été définie à partir des relevés de fracturation effectués dans le laboratoire. Néanmoins, une incertitude demeure sur leur réelle position du fait des intervalles de mesure qui couvrent parfois une gamme d'azimut et de pendage de plusieurs dizaines de degrés.

L'incertitude concerne particulièrement les cavités. En effet, il est fortement probable de croiser des zones faillées en section courante, ce qui est moins le cas pour les ouvrages ponctuels comme les cavités.

L'incertitude relative à la position des failles est signalée dans le modèle géologique à l'aide du panneau d'alerte suivant :



9.2.1.2 Puissance des zones faillées

L'épaisseur des zones faillées (zone Z4) a été estimée à partir de la longueur des sections cintrées mises en œuvre dans les galeries existantes. Celle-ci est généralement inférieure à 10m. Par conséquent, la puissance des failles est fixée à 10m dans le modèle géologique.

L'incertitude porte sur la rencontre d'une zone faillée de plus grande épaisseur, comme ce fut le cas dans la Galerie C où une section a été cintrée sur une longueur de 25m.

L'incertitude est représentée dans le modèle géologique par le pictogramme suivant :



9.2.1.3 Fracturation du massif

L'analyse structurale a permis de distinguer différentes zones définies en fonction de l'état de fracturation du massif (zones Z1 à Z4). A ce jour, aucune reconnaissance ne recoupe les galeries MIGA. Il n'est donc pas exclu que la proportion des passages broyés et très fracturés soit plus élevée que celle prévue (cf. §8.1.2.3.2).

L'incertitude sur le linéaire des zones Z4 étant intégrée dans le paragraphe précédent, la présente incertitude traite exclusivement de la proportion de zone Z3.

L'incertitude est mise en évidence dans le modèle géologique par l'affichage du panneau d'alerte suivant :



9.2.2 INCERTITUDES HYDROGEOLOGIQUES

9.2.2.1 Proportion, taille et position des structures karstiques

La probabilité de rencontrer des anomalies karstiques est forte. En effet, toutes les galeries existantes du LSBB ont traversé au moins un conduit d'origine karstique (quelle qu'en soit la taille). Cependant, la nature hétérogène des systèmes karstifiés rend délicate la prévision du nombre de structures karstiques présentes sur le tracé des galeries MIGA.

La majorité des anomalies karstiques relevées au cours du creusement du laboratoire ont une hauteur d'ordre centimétrique à décimétrique. L'incertitude porte sur la présence de cavités karstiques de taille plus importante.

L'analyse portera sur plusieurs intervalles de dimensions :

- cavités impactant un linéaire compris entre 0,5 et 1m et d'une profondeur comprise entre 0,5 et 1m,
- cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur comprise entre 1 et 5m. Les karsts rencontrés en radier sont distingués de ceux croisés en voûte/piédroits. En effet, la solution de franchissement diffère en fonction de la position du vide karstique,
- cavités impactant un linéaire compris entre 5 et 20m et d'une profondeur comprise entre 5 et 20m.

Cette incertitude est signalée sur le modèle hydrogéologique via le panneau d'alerte suivant :



9.2.2.2 Exhaure

L'incertitude porte essentiellement sur les débits d'exhaure en phase chantier. Les seuils sont définis de la façon suivante :

- débit < 5 L/s : conditions normales d'exécution,
- 5 L/s < débit < 10 L/s : rémunération par une plus-value,
- débit > 10 L/s : la gestion du débit entre dans le cadre du PMR.

L'analyse de la bibliographie indique que la majorité des écoulements étudiés dans le laboratoire sont de type impulsif, c'est-à-dire rapide, temporaire et directement en lien avec les précipitations. Les débits associés à ces écoulements peuvent être très élevés sur une courte période.

La rencontre d'un réservoir perché dans la ZNS, caractérisé par un écoulement lent et un débit permanent, ne peut cependant pas être exclue. Ce type d'écoulement est actuellement suivi en deux points de la Galerie E.

L'incertitude relative à l'exhaure est signalée avec le pictogramme suivant sur le modèle hydrogéologique.



9.2.3 INCERTITUDES GEOTECHNIQUES

Les caractéristiques géotechniques définies pour le massif sur la base des reconnaissances disponibles présentent une marge d'incertitude potentielle. En effet, les résultats des investigations s'appuient sur une reconnaissance ponctuelle, représentative d'une zone donnée, ce qui ne permet pas de lever toutes les incertitudes relatives à l'ensemble du terrain encaissant qui n'aurait pas été sondé.











Ceci est d'autant plus vrai pour les galeries MIGA qui n'ont été traversées par aucun forage de reconnaissance.

Cette incertitude est indiquée dans le modèle géotechnique par le panneau d'alerte suivant :



9.2.4 SYNTHÈSE

Le tableau suivant correspond au registre des incertitudes énumérées dans les paragraphes précédents. Il est bâti pour chaque ouvrage intégré dans la tranche ferme du projet (section courante des deux branches et cavités). Il est valable pour les deux configurations envisagées : 2x150m et 2x200m.

Ouvrage	N° du risque			Catégorie	Incertitude	Panneau d'alerte
Sas	SAS-1	-	-	Géologie	Position des zones faillées	
	SAS-2	a	-	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 0,5 et 1m et d'une profondeur entre 0,5 et 1m	
		b	Radier	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur entre 1 et 5m	
		b	Hors radier	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur entre 1 et 5m	
	SAS-3	-	-	Géotechnique	Caractéristiques géotechniques	
Cavité C1	C1-1	-	-	Géologie	Position des zones faillées	
	C1-2	a	-	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 0,5 et 1m et d'une profondeur entre 0,5 et 1m	
		b	Radier	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur entre 1 et 5m	
		b	Hors radier	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur entre 1 et 5m	
		c	-	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 5 et 20m et d'une profondeur entre 5 et 20m	
		c	-	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 5 et 20m et d'une profondeur entre 5 et 20m	
	C1-3	-	-	Géotechnique	Caractéristiques géotechniques	
1 ^{ère} branche - Section courante + Niches interféromètres	SC1-1	-	-	Géologie	Puissance des zones faillées	
	SC1-2	-	-	Géologie	Fracturation du massif	
	SC1-3	a	-	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 0,5 et 1m et d'une profondeur entre 0,5 et 1m	
		b	Radier	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur entre 1 et 5m	
		b	Hors radier	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur entre 1 et 5m	
		c	-	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 5 et 20m et d'une profondeur entre 5 et 20m	
	SC1-4	-	-	Géotechnique	Caractéristiques géotechniques	
		-	-	Géotechnique	Caractéristiques géotechniques	














Ouvrage	N° du risque			Catégorie	Incertitude	Panneau d'alerte
Cavité C3	C3-1	a	-	Géologie	Position des zones faillées	
		b	-	Géologie	Puissance des zones faillées	
	C3-2	a	-	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 0,5 et 1m et d'une profondeur entre 0,5 et 1m	
		b	Radier	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur entre 1 et 5m	
		b	Hors radier	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur entre 1 et 5m	
		c	-	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 5 et 20m et d'une profondeur entre 5 et 20m	
	C3-3	-	-	Géotechnique	Caractéristiques géotechniques	
2 ^{ème} branche - Section courante + Niches interféromètres	SC2-1	-	-	Géologie	Puissance des zones faillées	
	SC2-2	-	-	Géologie	Fracturation du massif	
	SC2-3	a	-	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 0,5 et 1m et d'une profondeur entre 0,5 et 1m	
		b	Radier	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur entre 1 et 5m	
		b	Hors radier	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur entre 1 et 5m	
		c	-	Hydrogéologie	Proportion des structures karstiques de taille comprise entre 5m et 20m	
	SC2-4	-	-	Géotechnique	Caractéristiques géotechniques	
Cavité C5	C5-1	-	-	Géologie	Position des zones faillées	
	C5-2	-	-	Géologie	Fracturation du massif	
	C5-3	a	-	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 0,5 et 1m et d'une profondeur entre 0,5 et 1m	
		b	Radier	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur entre 1 et 5m	
		b	Hors radier	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 1 et 5m et d'une profondeur entre 1 et 5m	
		c	-	Hydrogéologie	Proportion des cavités impactant un linéaire compris entre 5 et 20m et d'une profondeur entre 5 et 20m	
	C5-4	-	-	Géotechnique	Caractéristiques géotechniques	
Tous les ouvrages	EXH-1	-	-	Hydrogéologie	Exhaure en phase chantier	

Tableau 25 – Registre des incertitudes



ANNEXE A

Relevés de fracturation dans les forages GAS



Forage	Profondeur (m)		Etat de Fracturation	Convention AFTES	
	de	à		Direction du vecteur pendage °	Pendage °
PF1	320	340	Fractures non traversantes	100	65
PF1	320	340	Fractures non traversantes	100	70
PF1	320	340	Fractures non traversantes	110	65
PF1	380	400	Fractures non traversantes	95	80
PF2	280	300	Fractures non traversantes	170	30
PF2	300	320	Fractures non traversantes	175	85
PF2	320	340	Fractures non traversantes	160	70
PF2	320	340	Fractures non traversantes	160	80
PF2	360	380	Fractures non traversantes	220	85
PF3	280	300	Fractures non traversantes	170	80
PF3	320	340	Fractures non traversantes	110	80
PF3	380	400	Fractures non traversantes	290	90
PF4	280	300	Fractures non traversantes	260	60
PF4	280	300	Fractures non traversantes	290	40
PF4	300	320	Fractures non traversantes	280	80
PF5	280	300	Fractures non traversantes	250	70
PF5	280	300	Fractures non traversantes	240	55
PF5	300	320	Fractures non traversantes	135	70
PF5	320	340	Fractures non traversantes	270	40
PF5	320	340	Fractures non traversantes	290	50
PF5	340	360	Fractures non traversantes	90	50
PF5	340	360	Fractures non traversantes	125	70
PF5	360	380	Fractures non traversantes	300	50
PF5	360	380	Fractures non traversantes	310	90
PF5	380	400	Fractures non traversantes	220	25
PF5	380	400	Fractures non traversantes	40	70
PF1	320	340	Fractures traversantes	120	60
PF1	320	340	Fractures traversantes	100	70
PF1	340	360	Fractures traversantes	100	65
PF1	340	360	Fractures traversantes	120	70
PF2	280	300	Fractures traversantes	170	25
PF2	280	300	Fractures traversantes	220	30
PF3	280	300	Fractures traversantes	120	60
PF3	320	340	Fractures traversantes	280	85
PF3	340	360	Fractures traversantes	110	80
PF4	300	320	Fractures traversantes	220	30
PF4	340	360	Fractures traversantes	240	25
PF5	280	300	Fractures traversantes	300	30
PF5	280	300	Fractures traversantes	280	30
PF5	280	300	Fractures traversantes	260	60
PF5	280	300	Fractures traversantes	270	30
PF5	280	300	Fractures traversantes	265	60
PF5	300	320	Fractures traversantes	250	40
PF5	300	320	Fractures traversantes	290	70
PF5	320	340	Fractures traversantes	300	75
PF5	340	360	Fractures traversantes	210	40
PF5	340	360	Fractures traversantes	310	70
PF5	340	360	Fractures traversantes	300	60
PF5	340	360	Fractures traversantes	180	50
PF5	340	360	Fractures traversantes	300	70
PF5	340	360	Fractures traversantes	300	60
PF5	380	400	Fractures traversantes	210	35
PF5	380	400	Fractures traversantes	305	65
PF5	380	400	Fractures traversantes	305	40
PF1	280	300	Stratification	270	20
PF1	300	310	Stratification	220	20
PF1	310	320	Stratification	220	30
PF2	320	340	Stratification	230	20
PF2	280	400	Stratification	270	15
PF3	280	300	Stratification	230	20
PF3	300	320	Stratification	260	25
PF3	300	320	Stratification	250	20
PF3	320	340	Stratification	230	20
PF3	360	380	Stratification	230	20
PF4	320	340	Stratification	240	30
PF4	320	340	Stratification	240	25
PF4	340	360	Stratification	240	25
PF5	380	400	Stratification	230	20



ANNEXE B

Synthèse des relevés dans les galeries existantes du laboratoire

Données Factuelles Galerie A

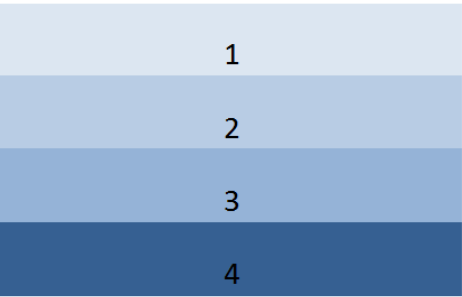
Coupe Géotechnique	PM	0	10	20	30	40	50	55	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	185	190	200	210	220	
	Nature	C1																									
	Couleur	Blanc							Blanc massif à rudistes										Blanc	Beige			Blanc	Beige			
	Etat du massif	Assez fracturé																									
	Direction N °	110																									
	Pendage °	22 SO																									
	Accidents géologiques	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Zone du rocher moyen

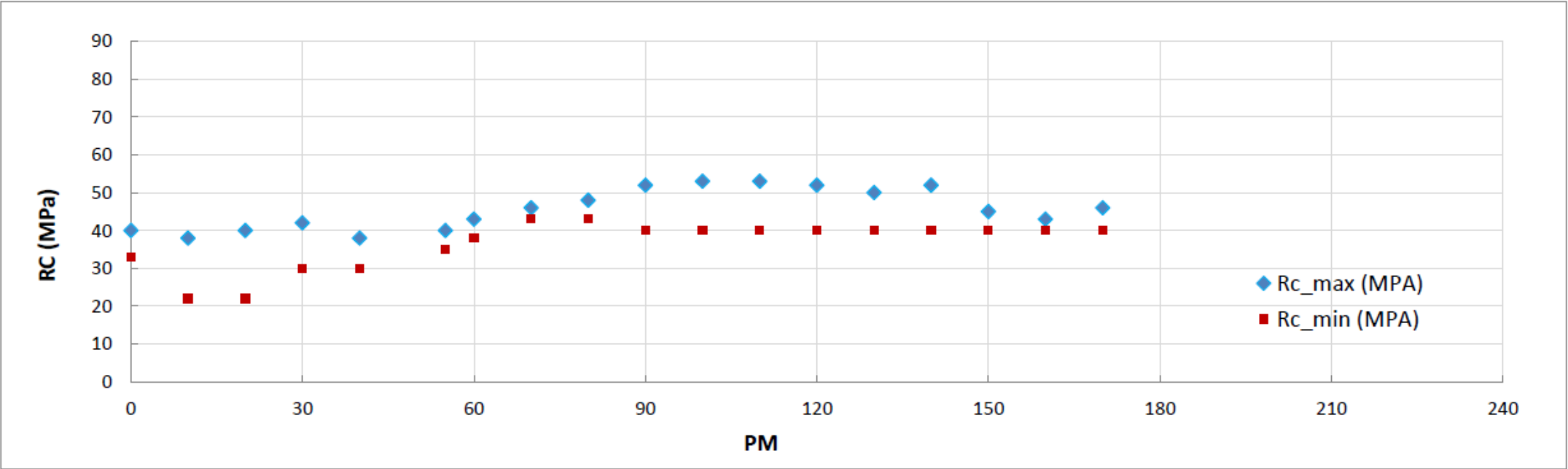
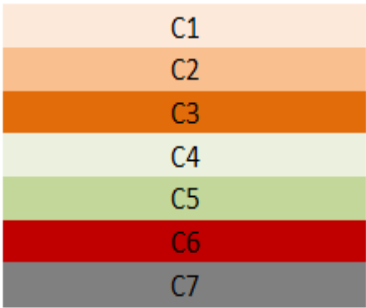
Zone légèrement fracturée

Zone fracturée ou broyée avec argile

Zone cintrée



Calcaire sublithographique
Calcaire cristallin
Calcaire oolithique
Calcaire crayeux
Calcaire Spathique
Calcaire marneux
Calcaire noir compact



Données Factuelles Galerie B1

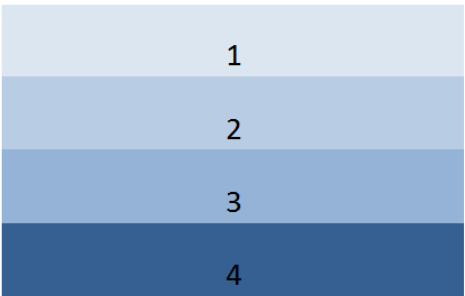
Coupe Géotechnique	PM	0	10	20	30	40	45	50	60	65	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240							
	Nature	C6					C2																		C3										
	Couleur	Gris à jaune					Beige																												
	Etat du massif	Assez fracturé, au PM 30 zone marneuse broyé										Fracturé, zones karstiques										Peu fracturé avec zone karstique entre PM 140 à 160										Fracturé			
	Direction N °	110					110					120					115																		
	Pendage °	20 O					20 O					28 O					15 O																		
	Accidents géologiques	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2 +3	3 +2	3 +2	3 +2	3	3 +1	1	1	1	1							

Zone du rocher moyen

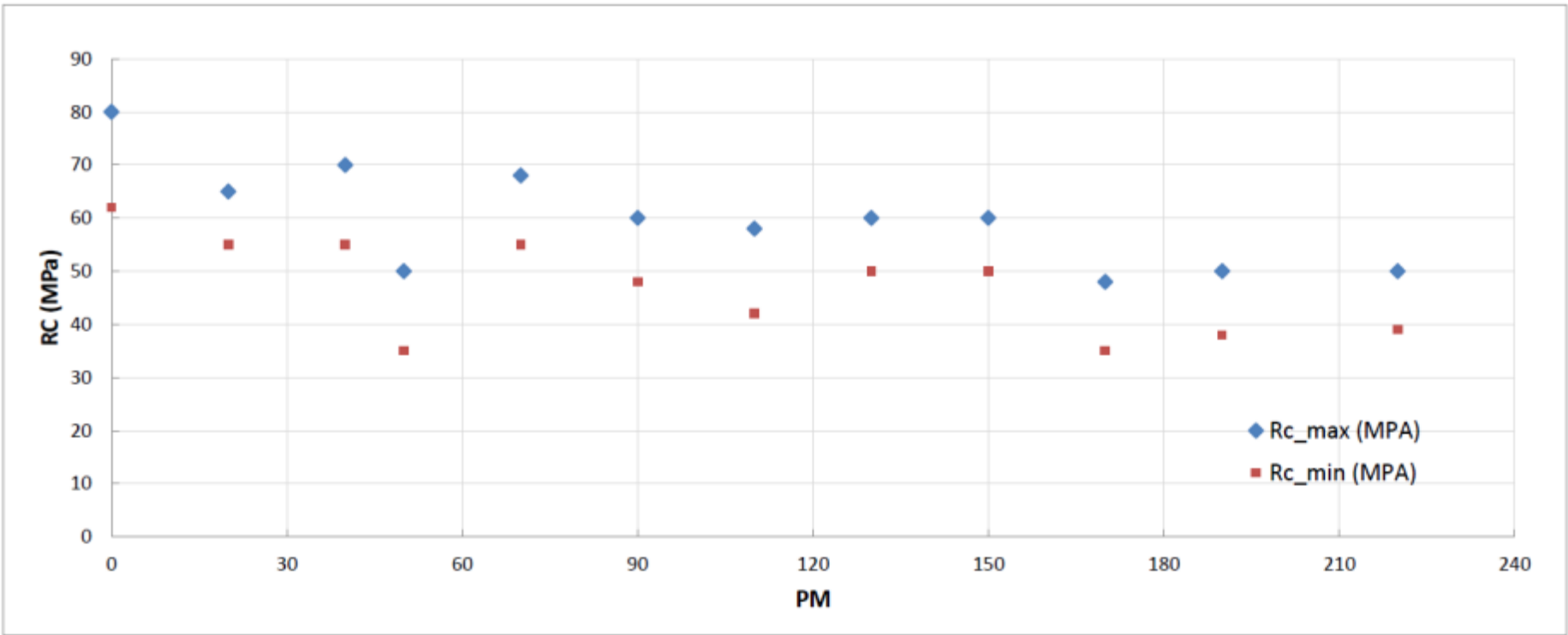
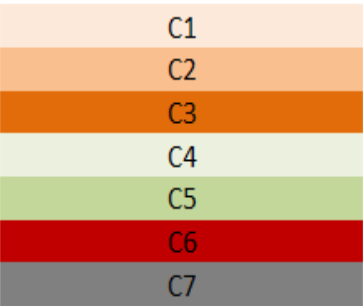
Zone légèrement fracturée

Zone fracturée ou broyée avec argile

Zone cintrée



Calcaire sublithographique
Calcaire cristallin
Calcaire oolithique
Calcaire crayeux
Calcaire Spathique
Calcaire marneux
Calcaire noir compact





Données Factuelles Galerie C

Coupe Géotechnique	PM	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450	460
	Nature	C1					C2										C1							
	Couleur	Beige					Brun										Beige							
	Etat du massif	Assez fracturé			Peu fracturé		Peu fracturé						Très diaclasé					Peu fracturé avec calcite					Fracturé	Très fracturé
	Direction N °	120	15				120	90	120			170	10							165			160	
	Pendage °	75 SO	75 SE				75 NE	75 N	80 NE			20 O	80 E							45 SE			42 SE	
	Accidents géologiques	1	3	3	1	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3

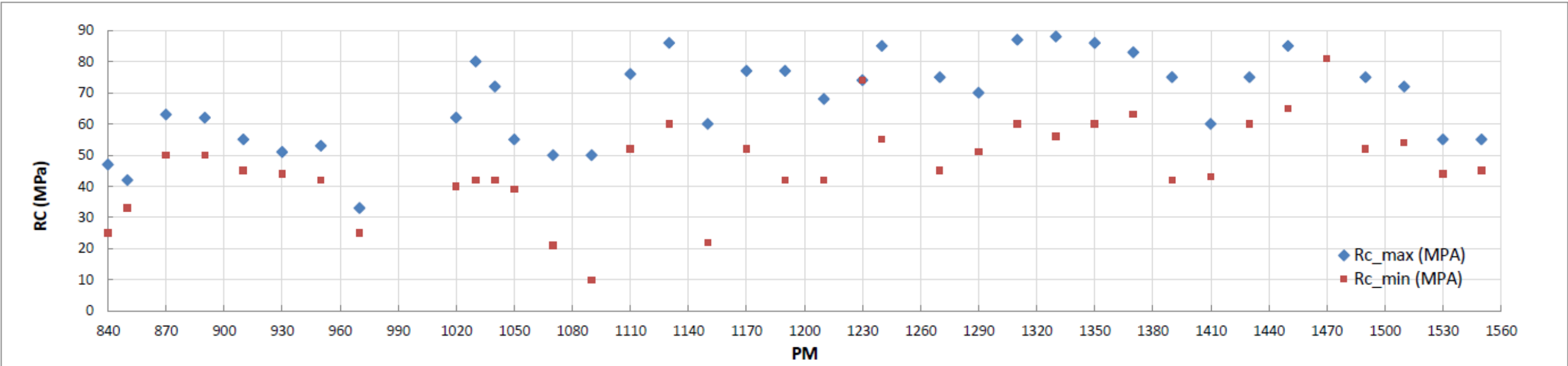
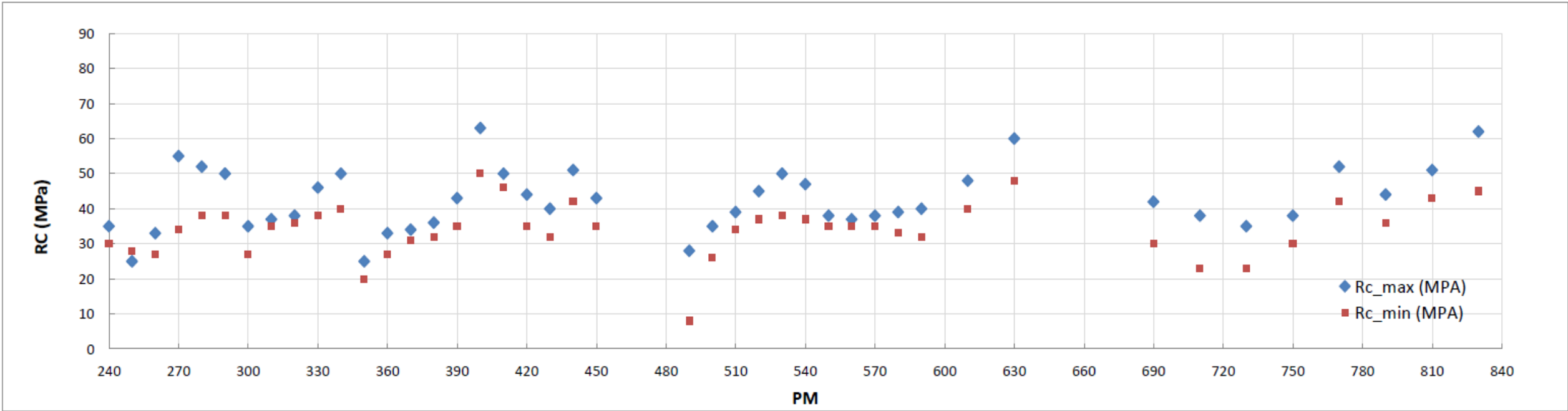
Coupe Géotechnique	PM	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	
	Nature	C2									C4					C4				C5			
	Couleur	Brun									Blanc					Blanc							
	Etat du massif	Très broyé			Peu fracturé				Fracturé			Très peu fracturé				Très peu fracturé					Très fracturé		
	Direction N °	170									11									130			
	Pendage °	40 O									18 SO									24 SO			
	Accidents géologiques	3	4	2	3	3	3	2	2	3	3	3	1	1	1	1	3	3	2	2	2	2	

Coupe Géotechnique	PM	680	690	700	710	720	730	740	750	760	770	780	790	800	810	820	830	840
	Nature	C5																
	Couleur																	
	Etat du massif	Très fracturé			Légèrement broyé		Fracturé			Peu fracturé								
	Direction N °	140			130					35					35		30	
	Pendage °	25 SO			25 SO					75 SE					70 E		70 E	
	Accidents géologiques	3	3	3	3	3	2	1	2	2	3	2	2	2	1	2	1	1
		dalles en toit avec suintement					argile avec suintement											

Coupe Géotechnique	PM	840	850	860	870	880	890	900	910	920	930	940	950	960	970	980	990	1000	1010	1020	1030	1040	1050
	Nature	C5						C1			C6	C1											
	Couleur							Gris			Gris	Blanc											
	Etat du massif	Fracturé		Peu fracturé			Fracturé			Fracturé			Fracturé	Très fracturé (avec argile)				Très broyé		Fracturé à peu fracturé			
	Direction N °	135			10								20	125									
	Pendage °	12/16 O			40 E								75 E	28 O									
	Accidents géologiques	1	3 + 2			3	3	1	1	1	1	1	2	3 + 2		3	4	4	3 + 2	1 + 3	1		
		Front mixte						Front mixte					Passage marne jaune				Front mixte	Front mixte					

Coupe Géotechnique	PM	1310	1320	1330	1340	1350	1360	1370	1380	1390	1400	1410	1420	1430	1440	1450	1460	1470	1480	1490	1500	1510	1520	1530	1540	1550	1560												
	Nature													C7				C1																					
	Couleur	Gris & noir			Blanc (passages de calcite noir)										Noir				Blanc & gris																				
	Etat du massif	Très peu fracturé						Peu fracturé				Massif très tectonisé						Très peu fracturé				Fracturé		Peu fracture															
	Direction N °							10		140								55		130 / 40		130 / 30		40 / 130		40		130		130		55		0 40		30		100	
	Pendage °							70 SE		60 SO								60 NO		40 SO / 75 SE		42 SO / 75 NE		80 SE / 40 SO		75 NO		40 SO		30 SO		70 NO		80 NE / 15 SE		80 SO		20 SO	
	Accidents géologiques	2	1	1	2	2	3	3	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1 + 2	2 + 1	2	2	2	2	1										
		Front mixte																																					

Zone du rocher moyen	1	Calcaire sublithographique	C1
Zone légèrement fracturée	2	Calcaire cristallin	C2
Zone fracturée ou broyée avec argile	3	Calcaire oolithique	C3
Zone cintrée	4	Calcaire crayeux	C4
		Calcaire Spathique	C5
		Calcaire marneux	C6
		Calcaire noir compact	C7



Coupe Géotechnique	PM	0102030405060708090100110120130140150160170180190200210220230240																											
	Nature	C4										C5				C4													
	Couleur	Blanc										Blanc																	
	Etat du massif	Disjoint					Très peu fracturé - massif					Peu fracturé - massif					Humide												
	Direction N °	120					120		100		100		90		100		100		100										
	Pendage °	15 SO					12 SO		12 SO		12 SO		14 SO		12 SO		48 SO		18 SO										
	Accidents géologiques	2	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
		Logement de faille très argileuse										Faille?					Venues deau					Coupes d'agile fines							

Coupe Géotechnique	PM	250260270280290300310320330340350360370380390400410420430440450460470480490500																													
	Nature	C4		C1		C5		alternances spatitique et coveux		C4										C5		C4		C1		C5		C1		C5	
	Couleur	Blanc		Beige		Blanc										Blanc															
	Etat du massif	Diaclaté		Très fracturé		Très faillé		Peu fracturé										Banc 4/5m épaisseur		Peu fracturé		Peu fracturé		Très peu fracturé		Fracturé		Fracturé			
	Direction N °	90				135		80		0 / 160 / 155 / 160 / 25 / 160 / 145 / 155 / 25 / 155 / 150 / 140 / 90																					
	Pendage °	12 S				80 O		18 O		70 O / 75 O / 80 O / 80 O / 88 O / 80 O / 80 O / 75 O / 80 O / 75 O / 80 O / 85 O																					
	Accidents géologiques	1	2	2	3	3	3	2	2	2	2	3	1	1	3	3	3	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2				
		Présence d'argile				Coupes d'agile fines						Très argileux																			

Coupe Géotechnique	PM	510520530540550560570580590600610620630640650660670680690700710720730740750																										
	Nature	C1				alternances spatitique et coveux		C5		C1																		
	Couleur									Beige																		
	Etat du massif	Très fracturé		Très fracturé		Très fracturé & broyeux		Fracturé		Peu fracturé		Légèrement croyeux		Zone cintré		Fracturé, passages très argileux aux Pm 740 à 760, 790 à 810												
	Direction N °	120																										
	Pendage °	20 SO																										
	Accidents géologiques	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	4	Argile		3	2	3	3	2	3	3	3		
		Coupes d'argile tres dense rapprochées, pendage 10 à 15° sur l'axe de la galerie								Coupes d'argile tous les 1m				Coupes d'argile entrecroisées				Argile + zone fracturée, broyée				Grosse caillasse				Grosses et moyennes caillasses		

Coupe Géotechnique	PM	760770780790800810820830840850860870880890900910920930940950960970980990																																	
	Nature	C1																																	
	Couleur	Beige																																	
	Etat du massif	Fracturé, passages très argileux aux Pm 740 à 760, 790 à 810										Peu fracturé				Fracturé, zone cintrée entre PM 920 à 930				Très fracturé, zone cintrée				Fracturé											
	Direction N °	90										40														100				120		120		120	
	Pendage °	40 S										75 SE														50 SO				60 NE		45 NE		40 NE	
	Accidents géologiques	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	4	2	4	2	2	2	2	2	3									

Coupe Géotechnique	PM	1000	1010	1020	1030	1040	1050	1060	1070	1080	1090	1100	1110	1120	1130	1140	1150	1160	1170	1180	1190	1200	1210	1220	1230	1240	1250
	Nature	C1																									
	Couleur	Blanc & gris	Blanc	Blanc & noir								Blanc				Gris / noir				Blanc							
	Etat du massif	Très fracturé	Fracturé	Peu fracturé, blanc et noir					Fracturé			Très fracturé et argileux				Fracturé		Très fracturé		Fracturé			Très fracturé		Peu fracturé		
	Direction N °	130	140	120 / 30		30 / 30	50 / 140		130 / 140		120				110				90		140		140		130		
	Pendage °	42 SO	40 SO	30 SO / 60 SE		10 SO / 55 NE	80 SE / 28 SO		30 NE / 30 SO		24 SE				50 NE				65 S		15 SO		20 SO		20 SO		
	Accidents géologiques	3	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	2	3	3	3	2	3	3	3	3	2

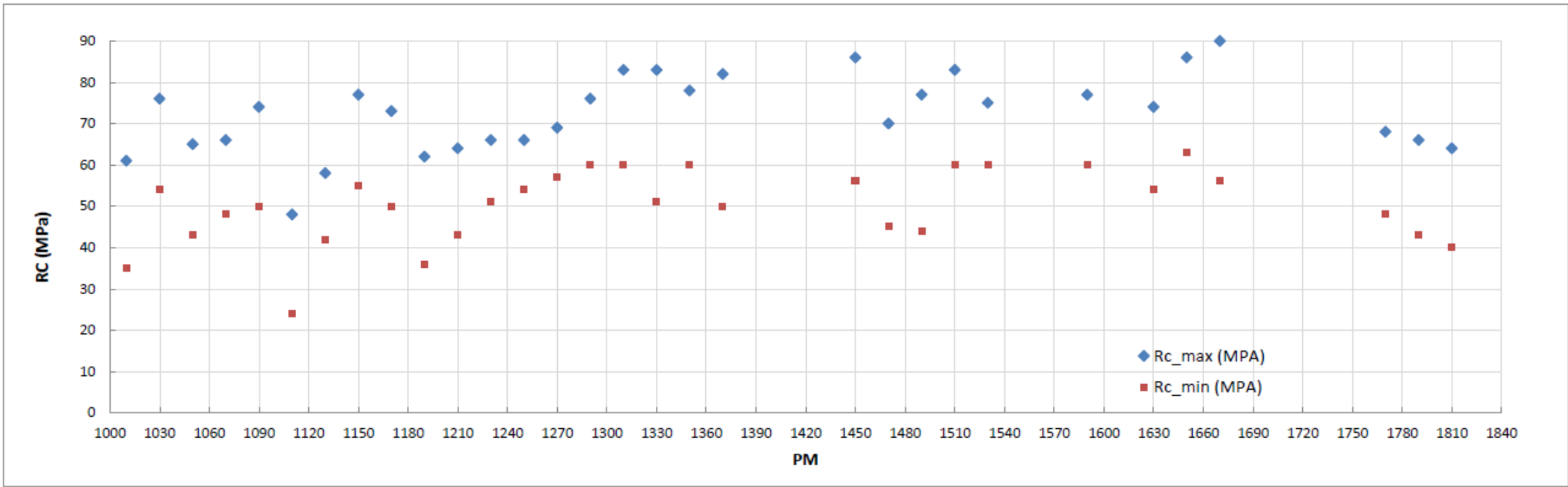
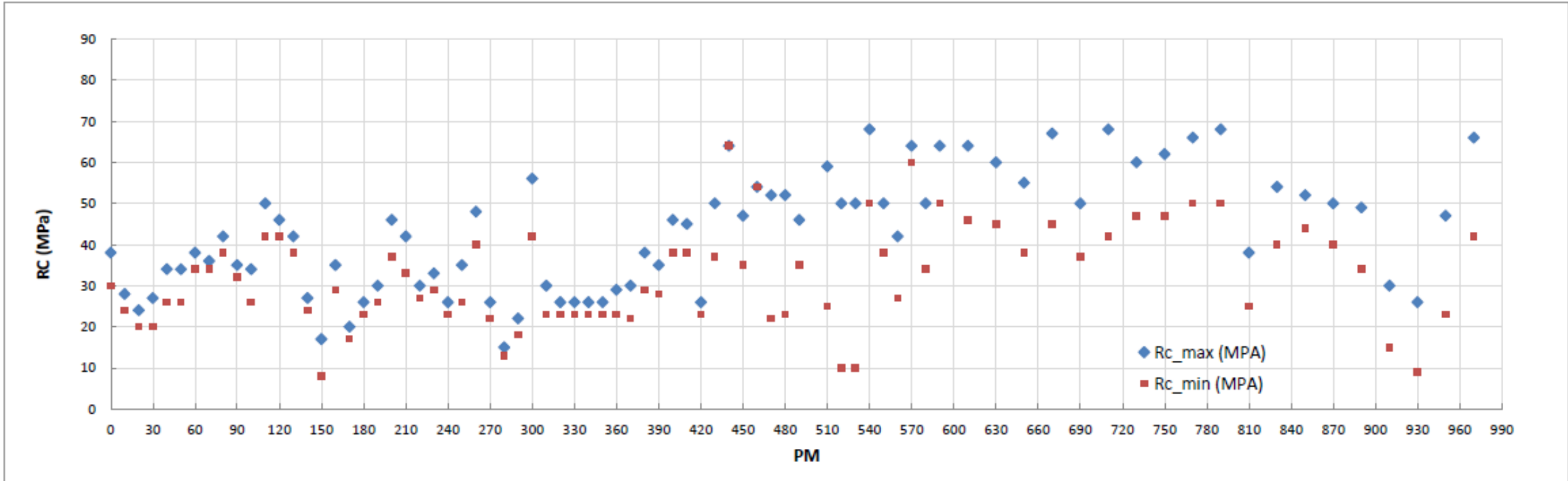
Coupe Géotechnique	PM	1260	1270	1280	1290	1300	1310	1320	1330	1340	1350	1360	1370	1380	1390	1400	1410	1420	1430	1440	1450	1460	1470	1480	1490	1500	1510	
	Nature	C1																										
	Couleur	Blanc												Blanc, passages noir														
	Etat du massif	Peu fracturé												Fracuré				Zone cintrée	Très fracturé	Zone cintrée	Très fracturé	Très fracturé, argileux, Zone cintrée		Fracuré		Fracturé - très argileux		
	Direction N °	120 / 125	120 / 155	110				130		110		90 / 90			40		60				120			110		80		
	Pendage °	15 SO / 15 SO	56 NE / 17 SO	10 SO				30 SO		20 SO		80 NE / 85 NE			30 NO		80 NO				20 SO			20 SO		85 NO		
	Accidents géologiques	3	2	2	2	2	2	2	3	3	2	1	2	3	3	4	3	4	3	4	2	2	2	2	3	2	3	
plaques boulonnées, en voûte et en radier																										Failles argileuses		

Coupe Géotechnique	PM	1520	1530	1540	1550	1560	1570	1580	1590	1600	1610	1620	1630	1640	1650	1660	1670	1680	1690	1700	1710	1720	1730	1740	1750	
	Nature	C1																								
	Couleur	Blanc et gris, passage noir																								
	Etat du massif	Peu fracturé			Très fracturé	Blocs calcaire enrobés d'argile			Peu fracturé					Très fracturé	Fracturé		Peu fracturé									
	Direction N °	140																								
	Pendage °	40 SO																								
	Accidents géologiques	2	2	2	2	4	4	1	1	1	4	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Plasues boulonnées																										

Coupe Géotechnique	PM	1760	1770	1780	1790	1800	1810	1820
	Nature	C1						
	Couleur	Blanc et gris, passage noir						
	Etat du massif	Fracturé	Fracturé - Croyeux		Peu fracturé	Fracturé		
	Direction N °	90 / 90		75		100/25/10		
	Pendage °	70 SO / 30 SE		60 NO		20SO/75S E/15SE		
	Accidents géologiques	1	1	1	2	2	2	2

Zone du rocher moyen	1
Zone légèrement fracturée avec argile	2
Zone fracturées ou broyées avec argile	3
Zone cintrée	4

Calcaire sublithographique	C1
Calcaire cristallin	C2
Calcaire oolithique	C3
Calcaire crayeux	C4
Calcaire Spathique	C5
Calcaire marneux	C6
Calcaire noir compact	C7





Données Factuelles Galerie K

Coupe Géotechnique	PM	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240						
	Nature	C5																														
	Couleur																															
	Etat du massif	Très fracturé				Peu fracturé				Fracturé				Peu fracturé				Fracturé				Peu fracturé				Fracturé				Peu fracturé		Silex
	Direction N °	30				120								40				120								130						
	Pendage °	80 E				26 O								80 E				15 O								30 O						
	Accidents géologiques	2	3	2 + 3	2	2	2	1	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	3	3	2 + 3	3	3	2	2	2						
		Front mixte				Argile				Argile								Front mixte				Argile										

Zone du rocher moyen

1

Zone légèrement fracturée

2

Zone fracturée ou broyée avec argile

3

Zone cintrée

4

Calcaire sublithographique

C1

Calcaire cristallin

C2

Calcaire oolithique

C3

Calcaire crayeux

C4

Calcaire Spathique

C5

Calcaire marneux

C6

Calcaire noir compact

C7

