

MISE EN ÉVIDENCE DE LA COMPLEXITÉ DES TERRAINS AU DROIT D'UNE BANDE TRIASIQUE PYRENEENNE

THE COMPLEXITY OF A TRIASSIC ZONE IN THE PYRENEES HIGHLIGHTED DURING A TUNNEL STUDY

Johan KASPERSKI¹, Cédric GAILLARD¹

¹ Centre d'Etudes des Tunnels, Bron, France

RÉSUMÉ – A l'occasion d'une étude de tunnel dans les Pyrénées, un secteur particulier a fait l'objet de reconnaissances approfondies considérant sa grande complexité géologique. Les lithologies triasiques rencontrées sont très hétérogènes, ayant subi tectonique et érosions glaciaires. Graduellement réalisées, les différentes reconnaissances sont présentées avec leurs apports au modèle géologique retenu.

ABSTRACT – When designing a tunnel in the Pyrenees, a Triassic passage was particularly investigated considering its great complexity. The Triassic lithologies encountered are heavily heterogeneous, having been subjected to tectonics and glacial erosion. The various geological surveys carried out are presented, together with their contribution to the geological model finally adopted.

1 Introduction

Le projet de tunnel de Quié prend place en rive gauche de l'Ariège, au droit de Tarascon-sur-Ariège dont il constitue la majeure partie du projet de déviation (Fig. 1a). En 2020 dans le cadre de l'étude de faisabilité de ce tunnel, plusieurs variantes ont été étudiées et comparées. L'une d'entre elles traverse les terrains en profondeur faisant rencontrer au tunnel de 1 500 m des terrains d'âges géologiques et de natures lithologiques variés (Fig. 1b). Parmi ces terrains, ceux situés au droit d'une zone triasique traversée sur une longueur de 150 m forment une singularité qui a fait l'objet de reconnaissances successives et approfondies. Non seulement les lithologies triasiques sont hétérogènes mais elles ont en plus subi l'érosion de plusieurs âges glaciaires.

Les reconnaissances mises en œuvre dans le cadre de cette étude de tunnel se sont notamment attachées à décrire et comprendre la mise en place des terrains au droit de cette bande triasique. Menées de manière graduelle (AFTES, 2020), ces reconnaissances sont ici décrites et analysées dans les différents apports qu'elles ont eues pour avancer sur la modélisation géologique. Elles permettent de mettre en lumière la complexité des terrains, d'en exprimer les caractéristiques et des mécanismes de mise en place sont proposés dans le modèle géologique final.

2 Reconnaissances géologiques et complexité géologique

2.1 Cadrage géologique

Le cadrage géologique est donné par la carte géologique de Foix (BRGM, 2002). Ce cadrage apporte les grandes unités lithologiques attendues ainsi que les grands éléments structuraux à retenir au modèle géologique.

La zone étudiée et concernée par le tracé du tunnel traverse la zone nord-pyrénéenne dans les terrains mésozoïques de Tarascon. Un dispositif structural complexe, associé à l'intercalation de barres calcaires ou gréseuses leur confèrent en général un aspect très accidenté et désordonné. Le contexte est caractéristique du domaine nord-pyrénéen : au nord du bassin de Tarascon se situe la haute chaîne primaire, le bassin lui-même est

bordé par la série sédimentaire plissée mésozoïque calcaire et marneuse. Il est traversé de part en part de terrains triasiques (t7-9 en jaune, Fig. 1b) qui sont maintenant uniquement considérés avec leurs contacts au nord et au sud.

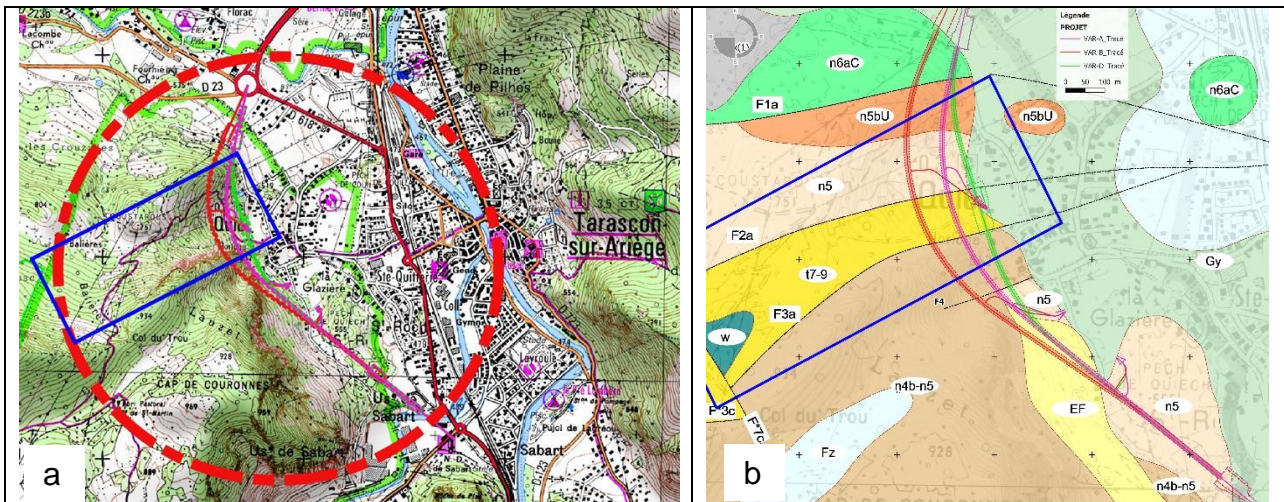


Figure 1. (a) Localisation du projet et du secteur "Balières" en bleu (b) contexte géologique.

Les marnes schisteuses noires du Bédoulien (n5) prennent place au nord du t7-9. La bande triasique est bordée au sud, par des calcaires massifs urgo-barrémiens (n4) formant de hautes falaises dominant la vallée de l'Ariège.

Les marnes du Keuper (Trias supérieur, t7-9) s'intercalent ainsi de manière discordante entre les marnes du Bédoulien (n5) et les calcaires barrémiens (n4). Ces terrains ont joué un rôle tectonique important. Ces marnes peuvent être irisées, renfermant fréquemment des amas lenticulaires d'évaporites qui peuvent prendre de larges extensions dans le bassin de Tarascon.

Un accident d'ampleur régionale traverse le bassin de Tarascon à la faveur des terrains triasiques t7-9. Les deux failles F2a et F3a (Fig. 1b) recensées par le BRGM bordent ces terrains triasiques et il est considéré que c'est leur ensemble qui a été repris par la faille régionale lors de ses activations.

Pour finir, des pointements d'ophite sont accolés à des accidents (par exemple F*7c en Fig. 1b), rendant possible la rencontre de ces terrains à la faveur des failles F2a et F3a.

2.2 Photo-interprétation

Une étude photo-interprétative a été menée avant les missions de terrain. Cette étude permet de mettre en évidence les différents terrains, de repérer les grandes structures faillées notées dans les cartes du BRGM ainsi que détecter de multiples indices géomorphologiques ici synthétisés.

Des indices de glissements dans les marnes n5a sont repérés dans la large dépression formant la rive gauche du vallon de Balières où affleurement ces marnes. La limite entre les marnes n5 et les terrains identifiés du trias t7-9 est formée par un changement net de végétation (prairie versus bois). Cette couverture forestière diminue vers le Sud à mesure que des éboulis sont observés prédominants.

Les terrains triasiques apparaissent intégralement recouverts d'éboulis. La faille courbe BRGM F3a (Fig. 1b) est observée en reprise localement par deux directions de plans qui varient. Dans la partie Est, la falaise suit une direction structurale N075-080° (LN021 à LN025, LN064 à LN066, Fig. 2). Dans la partie Ouest, la falaise est constituée de plans N20° à N40° (LN072, LN018 à LN020, Fig. 2). Le découpage de la falaise selon cette direction lui donne un aspect déchiré. A l'approche de la butte de Quié, les linéaments associés à F3a adoptent une direction N140° à N160°. Le col (LN048, Fig. 2) formé entre

la falaise du Lauzet et la butte de Quié est surprenant. Il pose question quant à la continuité du massif présentée par la carte du BRGM, un passage d'une faille ou un changement de lithologie non carté.

Il est noté une anomalie dans la falaise avec un découpage par les linéaments LN022/LN074 qui forment une dépression marquée avec la partie Nord de la falaise. Ce point sera ré-évoqué par la suite. Des escarpements correspondant à des terrasses alluviales sont visibles qui mettent en lumière différents épisodes fluviaux de l'Ariège (T04, T05, T07). De nombreux blocs sont disséminés dans le vallon de Balières (indiqués Bxx). Ces blocs atteignent le bas de la pente jusqu'à la limite de l'escarpement alluvial le plus bas. Certains blocs ont des dimensions décamétriques (B18 à B21).

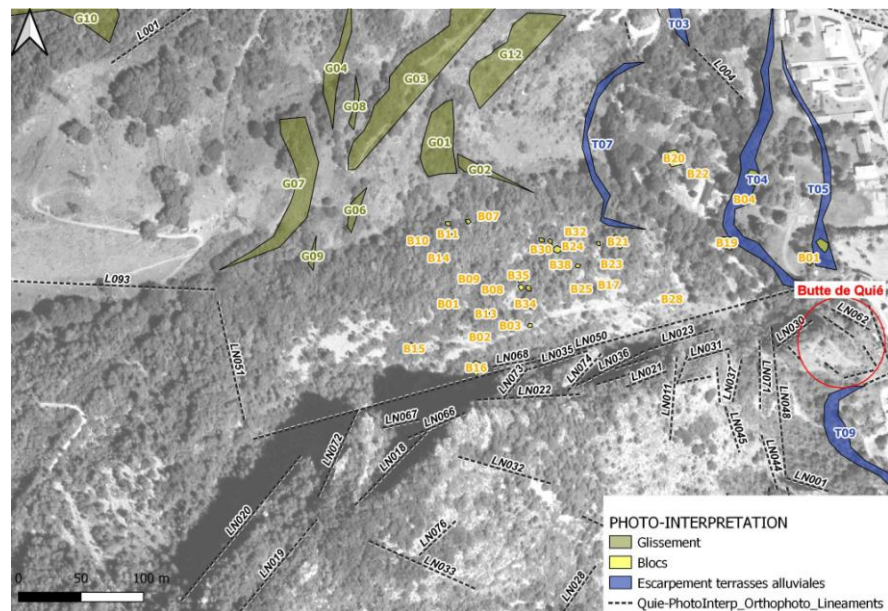


Figure 2. Indices photo-interprétatifs dans le secteur de "Balières".

2.3 Levés de terrain

Les différentes campagnes de levés de terrains totalisent 150 points d'observations (CETU, 2021 ; Kasperski & Gaillard, 2022). Dans le secteur intéressant cette communication, ces levés ont permis de décrire précisément toutes les lithologies de surface.

Les marnes n5a sont observées avec une matrice assez altérée (points d'observations A12, K08, Fig. 3). Leur schistosité varie entre un secteur Est avec un vecteur pendage de l'ordre de N140/160 70/85 (A12, B05, F05, F06) et un secteur ouest avec un vecteur pendage N105-110 65 en conformité avec l'orientation en grand des structures et contacts (notamment n5/n6b via F1a). Le contact est net entre les marnes et les éboulis et fluvioglaciale du vallon de « Balières » (G08, G14, Fig. 3). Sur toute leur partie Nord, les marnes n5a sont observées parsemées de blocs erratiques métriques aux lithologies diverses : gneiss (G10), calcaire, marnes noires, (G11), granite (G12).

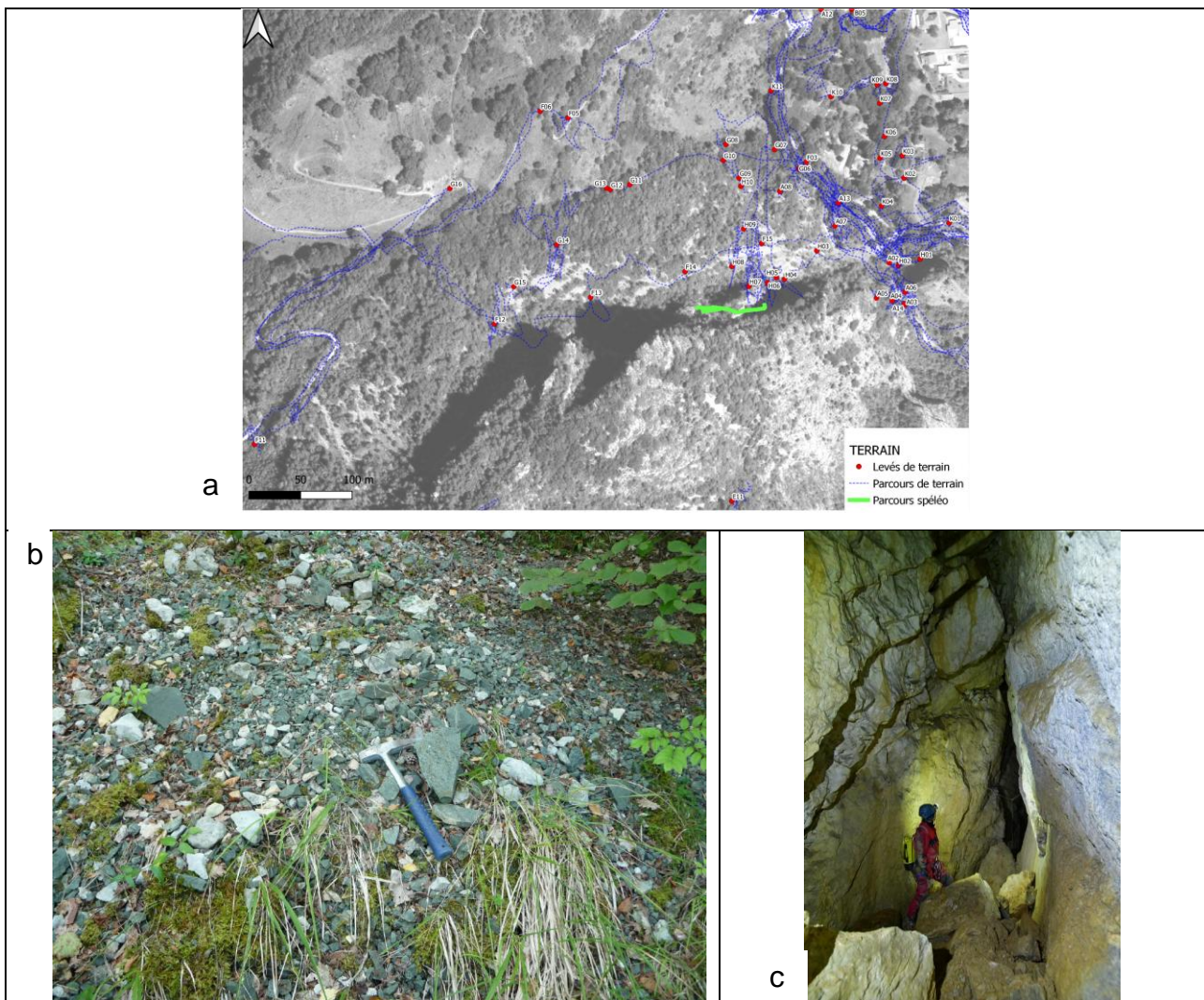
Les terrains triasiques ne sont pas observés, masqués par les éboulis comme suggéré par l'étude photo-interprétative.

Les ophites sont rencontrées de manière massive et dans les éboulis. Massive (F11, Fig. 3), la roche est sombre, verdâtre, luisante et présentant une cassure nette au marteau. La matrice est une pâte volcanique micro-grenue avec quelques ferromagnésiens. Dans les éboulis (F12 à F15), les éléments d'ophite ont une granulométrie identique à celle des éléments calcaires suggérant une mise en place contemporaine sans qu'un gisement ait pu être identifié en falaise n4. Des pointements d'ophite sont observés sans qu'il soit possible d'être certains qu'ils soient en place (F12). Des blocs

sont vus sur le terrain qui n'étaient pas observables en photo-interprétation (A13). Plusieurs gros blocs ont atteint le replat fluvial et ses prairies (K01, K03, K04, K10), preuve de l'activité de la falaise pour ces chutes de blocs.

L'anomalie LN022/LN074 détectée dans la falaise est explorée notamment avec des méthodes spéléologiques (H6 et tracé vert, Fig. 3) : il s'agit vraisemblablement d'un grand pan de falaise qui s'est effondré dans la vallée selon un plan de faille observé en souterrain (Fig. 3c). Lors de la prospection de cette cavité, un puits n'a pas pu être exploré.

Une source est observée (F03, Fig. 3) avec un débit estimé à 5 L/min en septembre 2018 et un réseau karstique est observé en falaise (H07) dans les calcaires n4.



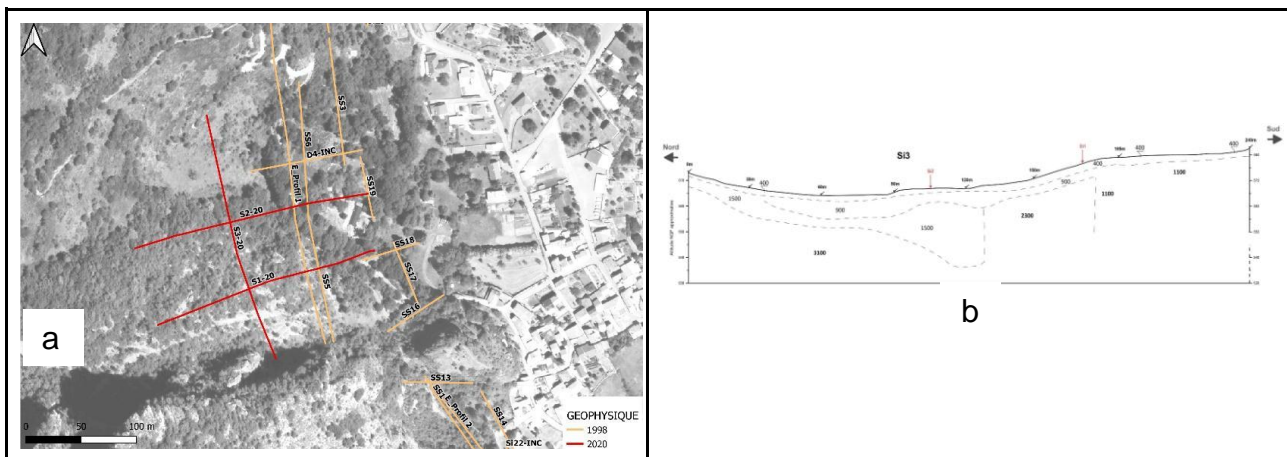
2.4 Profils sismiques réfraction

Plusieurs campagnes de reconnaissances géophysiques sont disponibles. Les profils de sismique réfraction associés permettent d'approcher les natures des terrains et les contacts entre les formations triasiques et les faciès en bordure Nord et Sud ainsi qu'avec les terrains de couverture fluvio-glaciaire et d'éboulis.

Le profil longitudinal S3-20 (Fig. 4a et 4b) confirme les interprétations des profils SS5-SS6 : une première couverture fluvio-glaciaire est interprétée avec présence d'un surcreusement bien délimité associé à une vitesse V_p faible de l'ordre de 400 m/s, expliquée par une faible consolidation des derniers terrains déposés. La couverture d'éboulis est

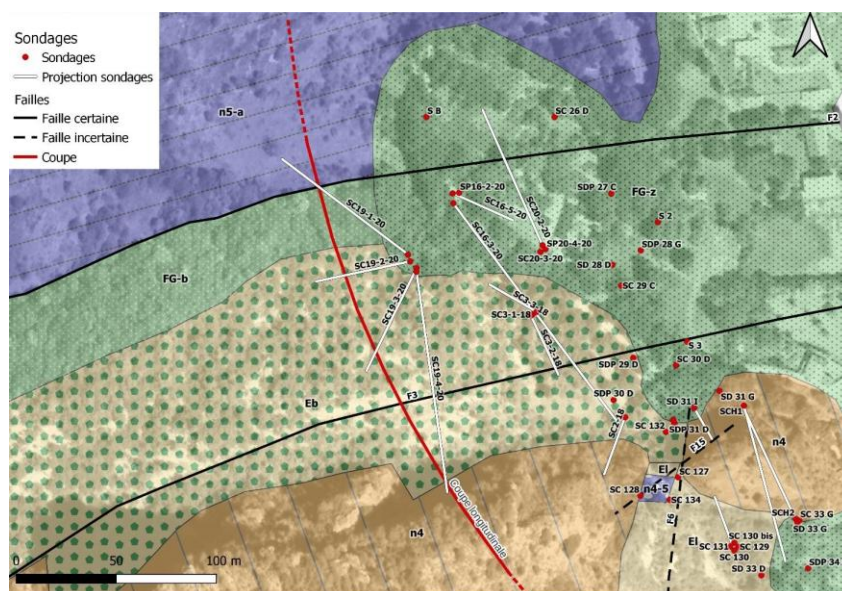
interprétée avec une vitesse V_p de l'ordre de 900 m/s. D'autres terrains sont interprétés fluvioglaciers plus anciens, consolidés avec des vitesses V_p de l'ordre de 1 500 m/s. Les terrains marneux n5a sont interprétés en substratum sur le profil SS6 avec un V_p de l'ordre de 3 100 m/s vraisemblablement identique aux terrains triasiques t7-9 aux lithologies et organisations inconnues à ce moment-là. La présence d'une zone aux vitesses $V_p \sim 2\,300$ m/s en contact au Sud avec ce qui est interprété comme des éboulis ($V_p \sim 1\,100$ m/s) laisse penser à une remontée de terrains triasiques indurés (?).

Enfin, les profils SS17, SS18, SS19 permettent d'approximer la géométrie des formations fluviales (FGz à $V_p \sim 500$ m/s jusqu'à $V_p \sim 900$ m/s) d'une épaisseur de 10 m et distinguer d'autres formations fluvioglaciers sous-jacentes ($V_p \sim 1800$ m/s).



2.5 Sondages carottés

Plusieurs sondages ont été réalisés avec pour objectif de confirmer et préciser les interprétations faites sur la base des précédentes reconnaissances (Fig. 5). Le contact n5a/t7-9 était visé par les sondages inclinés SC19-1-20 et SC20-2-20, le contact n4/t7-9 par les sondages inclinés SC16-3-20 et SC19-4-20. Les autres sondages, notamment SC3-1-18, SC3-2-18, SC3-3-18, SC19-2-20, SC19-3-20 et SC16-5-20 visaient l'identification des faciès lithologiques ainsi que leur caractérisation géomécanique.



L'ensemble de ces sondages s'est révélé précieux pour consolider le modèle géologique. On présente ici quelques-unes des particularités qui y ont été observées.

Le sondage SC19-1-20 a recoupé la faille F2 (Fig. 1b). Cette faille correspond à une zone broyée métrique mettant en contact les terrains sains rattachés au t7-9-dolomie et au n5a. A l'observation des carottes, les faciès de dolomie bréchique gris-noir peu fracturé du t7-9 (Fig. 6a) et celui des marnes schisteuses noires sont identiques (Fig. 6b et 6c) : ils ont le même faciès noir recoupé de filonnets de calcite. Seul le test à l'acide a permis de distinguer ces deux faciès lors du levé géologique des carottes : les dolomies ne réagissent pas tandis que les marnes sont effervescentes. Les descriptions pétrographiques sur lame mince ainsi que les analyses minéralogiques effectuées par la suite ont confirmé cette identification de faciès (Tableau 1).



Figure 6. Extrait des photographies des carottes du sondage SC19-1-20
a : 38,5-39,5 m ; b : 51,5-52,5 m ; c : 66,5-67,5m

Tableau 1. Extraits des analyses minéralogiques des échantillons du sondage SC19-1-20

Nature échantillon	prof. (m)	dolomites	calcite	quartz	phylosilicates	autres
Dolomies	38.5-38.6 m	44%	7%	4%	44%	1 % pyrite
Marnes	67.2-67.3 m	19%	36%	32%	13%	1% hématite

Le sondage SC19-4-20 (Fig. 7) a rencontré des évaporites rubanées (anhydrite) non altérées verdâtres à vert foncé entre 99,2 m et 121,9 m, ces mêmes évaporites très altérées jusqu'à 123,8 m avant un vide sur lequel s'est terminé le sondage. Cette succession (massif sain, frange altérée et vide) est interprétée comme de la dissolution gypseuse, signe de circulations d'eau en profondeur.



Figure 7. Dernières carottes du sondage SC19-4-20 avant interception du vide

Le sondage SC16-5-20 (Fig. 8) recoupe plusieurs formations hétérogènes du Trias (t7-9) : des évaporites à phyllite verdâtre (chlorite) déformées, des horizons d'argile bariolée et un faciès ultramafique en dyke - roche intrusive gris noirâtre très fracturée, à très fortes concentrations d'oxydes de fer rouille brunâtre en fin de sondage.



Figure 8. Dernières carottes du sondage SC16-5-20 avant interception du dyke

Les deux sondages SC19-2-20 et SC19-4-20 ont rencontré plusieurs passages fluvio-glaciaires en profondeur. C'est le cas à 64 m dans le sondage SC19-2-20 (Fig. 9.) : des sables argileux bariolés beige-verdâtre reposent sur une cargneule bréchique très altérée, roche vacuolaire carbonatée très poreuse de teinte ocre-verdâtre. La présence de telles passées sableuses en profondeur et sous des éboulis sont interprétés comme des sillons glaciaires ou des conduits karstiques postérieurement remplis de sable fluvio-glaciaire. En effet, la dissolution des terrains t7-9 par l'eau glaciaire a pu former des sillons ou conduits atypiques aux organisations anarchiques associés à des remplissages de matériaux fluvio-glaciaires. L'organisation des terrains est particulièrement complexe et incertaine entre l'hétérogénéité des terrains triasiques et ces présences d'horizons fluvio-glaciaires atypiques.



Figure 9. Sables argileux fluvio-glaciaires (FGb) et cargneule bréchique très altérée (t7-9) dans le sondage SC19-2-20.

3 Construction du modèle géologique du secteur Balières

Les différents indices recueillis par l'ensemble des reconnaissances menées (voir §.2), ainsi que leurs interprétations ont participé à la construction de manière étayée du modèle géologique du secteur de Balières (Fig. 10).

Les levés de terrains révèlent que les terrains de couvertures sont des éboulis (Eb) ainsi que des terrains fluvio-glaciaires (FGb). Les épaisseurs associées sont confirmées par les prospections géophysiques et les sondages. Plus en profondeur, le substratum triasique est marqué par une importante hétérogénéité : différents faciès sont rencontrés (dolomie, cargneule, argile bariolée, anhydrite, gypse). Sur ce secteur affecté par une large faille régionale, plusieurs zones de failles plurimétriques ont été détectées sous forme argileuse grise. Le contact nord de cette zone se fait via une zone broyée métrique (F2, décelée en SC19-1-20) mettant en contact les terrains sains n5a et n7a-dolomie. Le contact sud de cette zone se fait via des vides entre le n4 et t7-9anhydrite (SC19-4-20). On note la présence d'une macro-écaille ayant glissé de la falaise. Le plan de glissement est observé par la cavité naturelle qu'il forme. Considérant sa prolongation non explorée, il est plausible mais non établi que cette cavité se prolonge à l'Est qui aurait été rencontrée par la fin du sondage SC19-4-20 qui n'a pas atteint le n4. Ce vide en fin de sondage est interprété comme issu de la dissolution de gypse. Il pourrait également correspondre au prolongement du plan de glissement (hypothèse non retenue).

Les zones fluvi-glaciaires (FGb) formant des contacts latéraux anormaux avec les terrains triasiques sont considérées comme des sillons glaciaires. Ces sillons peuvent avoir une morphologie atypique (doigts de gants ? conduits anarchiques ?) au gré de l'érosion ou dissolution des faciès gypseux présents. La localisation et l'extension de tels sillons sont très incertaines : ceux-ci pourraient être de dimensions beaucoup plus importantes. Enfin la rencontre fortuite de roche ultramafique intrusive dans le sondage SC16-5-20 pousse à considérer la présence de dyke ou de pointement intrusif au sein de la bande triasique, sans pour autant pouvoir les localiser spatialement.

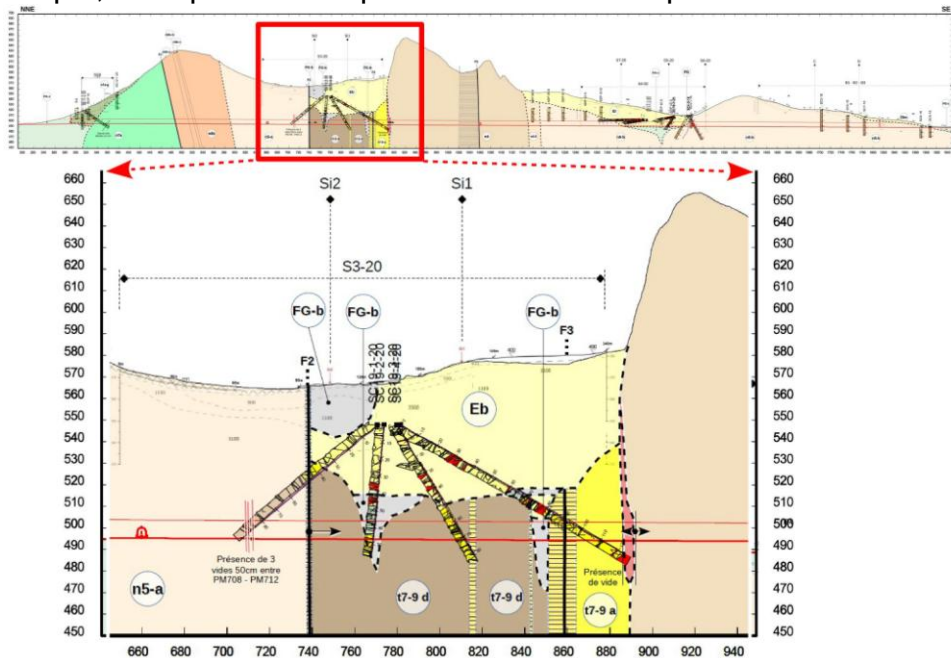


Figure 10. Extrait de la coupe géologique longitudinale sur le secteur Balières.

4 Conclusions

L'étude d'un tunnel au droit d'une bande de terrains triasiques dans les Pyrénées a mis localement en évidence la complexité de ces terrains. Dans le bassin de Tarascon-sur-Ariège, le secteur Balières a fait l'objet de reconnaissances approfondies. Exécutées graduellement, toutes les reconnaissances ont apporté des informations précieuses pour la construction du modèle géologique : le cadrage géologique documentaire, les indices géomorphologiques soulignés par l'étude photo-interprétative, les levés géologiques de terrain, les variations de vitesses de propagation sismiques en profondeur fournies par les investigations géophysiques non destructives et pour finir des descriptions précises (mais ponctuelles) des terrains par les sondages carottés. L'ensemble de ces reconnaissances met en avant la très grande complexité de la bande de terrains triasiques. Ceux-ci sont éminemment hétérogènes. Les faciès anhydrite et gypseux sont vraisemblablement à l'origine de dissolutions comblées par des terrains fluvi-glaciaires. Pour couronner le tout, l'ensemble de la zone est recouvert de plus de 70 m d'éboulis.

5 Références bibliographiques

BRGM (2002). Carte et notice explicative de la feuille Foix à 1/50 000 (1075)
 AFTES, GT24R3F1 (2020). Reconnaissances géologiques, hydrogéologiques et géotechniques nécessaires à la conception des ouvrages souterrains
 CETU (2021). Levés géologiques et hydrogéologiques de terrain pour les ouvrages souterrains. Guide, 24 p.
 Kasperski J., Gaillard C. (2022). Levés de terrain pour la modélisation géologique : illustration de leur efficacité. JNGG 2022