

Tunnel de base du Mont Cenis. Présentation de la coupe géologique de référence (côté France).

Apport des reconnaissances à la compréhension de la structuration géologique le long du projet de tunnel.

The Mont Cenis base tunnel. Presentation of the reference geological cross section (French part).

Contribution of investigations to the understanding of the geological structure along the tunnel project.

Emmanuel Egal^a
Thierry Baudin^b
Carole Marty^c

Géologie de la France, n° 3, 2020, p. 41-65, 11 fig., 9 planches photos

Mots-clés : Alpes occidentales, Liaison Lyon-Turin, Tunnel du Mont-Cenis, Reconnaissances géologiques, Coupe géologique, Zone ultra-dauphinoise, Front pennique, Zone subbriançonnaise, Front Houiller, Zone briançonnaise Houillère, Zone briançonnaise interne, Nappe des gypses, Zone piémontaise (Unité des Lozes), flysch ultra-dauphinois, cargneules.

Keywords: Western Alps, New Lyon-Turin Line, Mont-Cenis Tunnel, Geological investigations, Geological cross-section, Ultra-dauphinois Zone, Penninic Front, Subbriançonnais Zone, Houiller Front, Briançonnais Houiller Zone, Briançonnais internal Zone, Nappe des Gypses, Piémontais Zone (Lozes Unit), Ultra-dauphinois Flysch, Cargneules.

Résumé

Le projet de tunnel de base transalpin (« Tunnel du Mont Cenis ») de grande longueur (57,5 km) de la nouvelle ligne Lyon-Turin a été l'occasion de réaliser un volume important d'études de reconnaissance, notamment des sondages profonds, tout le long du linéaire et sur de longues années. Ces reconnaissances ont permis de proposer une coupe géologique de l'ensemble du transect alpin concerné le long du projet du tunnel de base. Cet article vise à présenter et décrire la partie française de cette coupe géologique essentiellement d'un point de vue géométrique.

Le projet de tunnel traverse essentiellement la partie interne des Alpes occidentales selon une orientation générale à peu près Est-Ouest. Côté français, le tunnel commence près de Saint-Jean-de-Maurienne dans la Zone ultra-dauphinoise et traverse ensuite le Front pennique, la Zone subbriançonnaise, le Front houiller, la Zone houillère briançonnaise, la Zone briançonnaise interne (Vanoise – Ambin) et la Nappe des gypses.

C'est principalement à travers la Zone briançonnaise interne et la Zone de la Nappe des gypses que les nouvelles données acquises

permettent de proposer une coupe géologique enrichie et actualisée.

Au sein de la Zone briançonnaise interne, une structuration complexe, contrastée d'Ouest en Est et polyphasée, est mise en évidence dans le secteur Sapey-Modane-Avrieux : de part et d'autre d'un anticlinal majeur (« du Râteau d'Aussois »), on identifie à l'Est, une structuration précoce en chevauchements vers l'Ouest selon une géométrie qui s'apparente à un système en « rampes et plats », et à l'Ouest, une succession d'écaillés et de plis plus tardifs associés à une tectonique décrochante et *rétréchissante* vers l'Est.

À l'Est du secteur Sapey-Modane-Avrieux, une interprétation structurale globale est proposée pour le tronçon du projet correspondant à la zone de la Nappe des gypses stratigraphiquement et structuralement très mal connue jusqu'à présent. Une nouvelle unité (Unité des Lozes) rapportée au domaine piémontais est individualisée dans ce secteur.

Une importante tectonique en faille normale est par ailleurs mise en évidence ou précisée au sein du Briançonnais interne et de la zone de la Nappe des gypses.

Les études de reconnaissances le long du transect ont également permis de reprendre ou

^aBRGM (jusqu'en 2013) puis Egis. emmanuel.egal@egis.fr

^bBRGM, Orléans.

^cTELT, Le Bourget du Lac

Manuscrit reçu le 5 mars 2020, accepté pour publication le 18 juin 2020

préciser la lithostratigraphie de la Zone ultradauphinoise, de la Nappe des gypses et de l'Unité piémontaise nouvellement identifiée (Unité des Lozes).

Enfin, les observations de surface couplées aux observations en sondage et en descenderie ont permis de confirmer le fait que les cargneules qui soulignent des accidents chevauchants en surface laissent place en profondeur à une brèche anhydritique et correspondent ainsi à un faciès issu de l'altération météorique de cette dernière.

Extended abstract

Introduction

The long (57.5 km) transalpine base tunnel project ("Tunnel du Mont Cenis") on the new Lyon-Turin line provided an opportunity to carry out a large volume of investigations throughout the linear and over long years (more than 65 km of deep drilling from 1989 to 2007, 4 large multi-kilometer descending galleries, ...). These investigations therefore provide elements for a better understanding of the organization of the upper crustal part (0-1000 m) of a "central" sector of the western Alps chain. This article aims to present the French part of the geological section of the project essentially from a geometric (structural) point of view and by sector, after the investigations.

The main excavation work for the base tunnel will begin in the early 2020s. We are therefore at a turning point in the construction of this large tunnel, which seems to us to be a good opportunity to present a geological section of the French part of the future tunnel.

Geological framework and initial state of knowledge

The tunnel project mainly crosses the internal part of the Alps in a general direction roughly East-West (Figure 1). From France to Italy (W-E sense), the tunnel starts near Saint-Jean-de-Maurienne in the Ultradauphinois Zone and then crosses the Penninic Front, the Subbriançonnais Zone, the Houiller Front, the Briançonnais Houiller Zone, the internal Briançonnais Zone (Vanoise - Ambin) and the Gypsum Nappe (Figure 1); it ends in Italy in the Liguro-Piemontese ophiolitic Zone

The alpine region crossed by the tunnel project was the subject of numerous studies during the 20th century, which made it possible to establish a solid

lithostratigraphy of the region, to delimit the large paleogeographic and structural (or tectonic) zones and to describe the general or detailed structure on the surface. This geological knowledge has been disseminated in the form of numerous theses and scientific articles and is widely recorded in the 1: 50,000 geological map of France and associated explanatory notes.

Evolution of knowledge along the base tunnel

The work prior to the reconnaissance for the base tunnel was based on surface data and not from deep drillings; the subsurface interpretation made for example in the form of a geological section (Figure 2) are poorly informed and sometimes very hypothetical in depth in comparison with the sections drawn from reconnaissance studies for the base tunnel.

After a general presentation of the changes in the interpretation of the geological structure along the base tunnel as the reconnaissance have progressed (Figure 3), this article describes in more detail the geology of each sector; this one is summarized hereafter.

Through the Ultradauphinois Zone

The Ultradauphinois Zone consists mainly of an Eocene flysch series which presents a regular dip towards the East (Figure 4). This dipping is very probably associated with regular folding, but the fold hinges are very rarely observed. Normal NW dip faults are clearly visible in the landscape and on a satellite image (Photo 1) but are not identified along the alignment.

Several sedimentary sequences are distinguished and dispatched in several flysch formations. The TELT surveys by drilling and detailed complementary field studies made possible to propose a refined lithostratigraphy of the flyschs (Figure 5, see also Photo 2). Large olistolites of Cretaceous age reported in the "schisto-sandstone flysch", they are surrounded by a chaotic facies of "block schist" (or wildflysch) type, the whole constituting an olistostrome (Serre, 1983).

Through the Penninic Front and the evaporites sole associated

The Penninic Front represents a major tectonic contact in the Alpine chain, which marks the separation between the external (to the West) and internal (to the East) domains of the Alps (Figure 1 and Photo 3). This initially thrusting front now reactivated in normal fault is marked on the surface over a plurihctometric thickness by the continuous presence of a megabreccia made of a matrix of

gypsum and clastic lenses and blocks of dolomite (+/- shales). The ductile nature of the gypsum matrix (anhydrite in depth) allowed the operation of thrusting as is usually the case in the Alps. No investigations survey has completely intersected the gypsum front in depth and its thickness at the level of the tunnel therefore remains imprecise. The *cargneules* do not seem to have developed at this front level below the tunnel.

Through the Subbriançonnais Zone

The narrow Subbriançonnais Zone is made up of a stack of Mesozoic layers, which underline a marked plicative structure clearly visible in the landscape (Photo 4, Figure 6); these folds are classically interpreted as a succession of anticlines and synclines overturned towards the West. A different interpretation has been proposed (Ceriani, 2001) but it did not convince us and we stayed with the classic interpretation with a few adjustments. Note, however, that no boreholes crosscut the heart of the Subbriançonnais Zone and thus the precise structural interpretation in depth remains subject to caution.

Through the Houiller tectonic Front

The Front Houiller marks the western boundary of the overlapping Houiller terrains to the West. We also include in this mega-structure the contiguous (supra) hectometric thick "Gypsum Zone" (Figure 6). Like the Penninic Front, this Gypsum Zone consists mainly of surface gypsum and deep anhydrite and contains clasts of different sizes, mainly dolomite and limestone. Two very long TELT core holes intersected the Gypsum Zone. Within the mass of anhydrites, levels of "*cargneules*" are intersected by drilling F81 in its upper part. More in depth, and in particular along the Saint-Martin-de-La-Porte descending gallery, no *cargneules* was crossed through the "Gypsum Zone" of the Front Houiller.

Through the Briançonnais Houiller Zone

The Houiller Zone covers a width of around 15 km; it consists mainly of monotonous alternations of sandstones and pelites / shales deposited during the Upper Carboniferous in a fluvial and lacustrine context. Coal lenses are sometimes present in quite large proportions. Dolerite veins intersect the series but have not been spotted along the course of the base tunnel.

Four units are distinguished within the Houiller Zone. These are from West to East (Figure 7) : the Encombres, Bréquin-Orelle, La Praz and Fourneaux units. The stratigraphic relationships between the

units are still unclear.

The Encombres, Bréquin-Orelle and Fourneaux units correspond to the "Houiller productif" big unit identified by previous authors and all contain coal intercalations. The Encombres Unit has been individualized mainly because of its large intimate deformation and very significant convergence phenomena that were observed during the digging of the first descending gallery of Saint-Martin-de-La-Porte. The Unit of La Praz corresponds to the "Houiller stérile" of the authors. Of small extent along the tunnel, it consists mainly of fine coarse sandstones and minor black pelitic schists.

The entire Briançonnaise Houiller Zone is regularly folded. The folds, from decimetric to hectometric scale, are visible on outcrops or in the landscape (Photo 5), they are mostly associated with a synschistose regional deformation. The precise deciphering of the global structure of the Houiller zone is quite difficult due to the absence of continuous well-identified strata. In addition, the detailed structuration is often very complex in the Houiller Zone.

Through the internal Briançonnais Zone

The internal Briançonnais Zone corresponds to the largest linear section of the French part of the base tunnel. We distinguish the Sapey-Modane-Avrieux area in the West and the Ambin massif in the East (Figure 8). Between the two, the tunnel intercepts the Gypsum Nappe and also a discrete unit newly identified and considered to represent the Piemontais Zone. The Schistes Lustrés Nappe is superimposed on these units at a high position above the tunnel and is not intersected by it.

Sapey-Modane-Avrieux sector (SMA)

The terrains of the Sapey-Modane-Avrieux sector (SMA) are surmounted to the west by the Houiller terrains in high position (Figure 8); they begin with an orthogneiss slice (Gneiss du Sapey) which follows the reverse contact with the Houiller series. The gneisses have a mylonitic texture over several decameters along the contact, due to the early overlapping towards the West of the gneisses on the Houiller Zone.

These gneisses, the origin and age of which have been debated for a long time now appear clearly as an ante-alpine basement slice of the Briançonnais. The prototype of the Sapey orthogneiss is dated to 452 +/- 5 Ma, that is to say to the Upper Ordovician (Bertrand et al., 2000).

The structure of the SMA area is complex ;

several deep boreholes, new detailed surface surveys and excavation front surveys of the Villarondin-Bourget-Modane descending gallery have, however, made it possible to offer a coherent and generally well-supported structural interpretation (Figure 9). Two contrasted structural zones are however distinguished which exhibit very different geometric styles on either side of a major anticline (Râteau d'Aussois anticline) (Figure 8).

West of the Râteau d'Aussois anticline, the SMA terrains are generally inclined towards the West (Figure 8A) and consist, under the Houiller Zone and the Sapey Gneiss in a succession of folded scales separated by deep descending transpressive faults dipping towards the West. These faults have been intersected by several long boreholes (1000 m or more) and detailed surface surveys. These tectonic scales and associated folds show a generalized vergence towards the East. The Râteau d'Aussois anticline shows the same eastern vergence and thus appears contemporary with the structuration of the western part of the SMA sector.

East of the Râteau d'Aussois anticline, the structure is very different (Figure 8B). From numerous core drill holes and a very long directed borehole (SDA, 1,822.5 m, of which 609 m are core drills) and land surveys, we observe a superposition of basement and cover entities separated by thrusting planes showing a geometry that is similar to a "ramp and flat" system. The dip of the layers and thrusting planes, which is generally rather weak, straightens up (folded) at the level of the Râteau d'Aussois anticline, which reveals its posteriority.

The Middle Triassic carbonate terrains (Photo 6) present at the eastern termination of the SMA sector, constitute two tectonic scales inclined towards the East in abnormal contact with the quartzitic terrains of the Lower Triassic along the Aussois detachment fault (Figure 8B)

Some thrusting planes are marked by *cargneules* at the surface and by brecciated anhydrite at depth (intersected by the VBM descending gallery). *Cargneules* thus represent a weathered facies of brecciated anhydrites. The *cargneules* which cover the slope of the right bank of the Arc in the sector of Aussois-Sardières more likely mark the trace of the initial major contact of the Schistes Lustrés Nappe in the Briançonnais Zone (thrust having probably been reactivated in detachment).

From Avrieux to the Etache Vallon

East of Avrieux and up to the valley of Etache valley (almost 7 km long), the planned tunnel

continues under the Schistes Lustrés Nappe in a superficial position, especially in gypsum-Anhydrite terrains constituting the "Gypsum Nappe".

The geology in depth of this sector, under the Longe Côte Massif, was very poorly understood before the investigations for the tunnel were carried out. Several deep vertical boreholes (largely cored) and a very long directed borehole (SDET) (2,950 m including 172 m cored) as well as detailed surface surveys around the Longe Côte massif allowed to partially decipher the complex geology of the massif (Figure 9).

Three lithostratigraphic and tectonic Mesozoic units are identified from West to East (with local repetitions) along this section (Figure 9 and Figure 10): the Gypsum Nappe (mainly gypsum or anhydrite), the newly defined Lozes Unit (gypsum, dolomite, limestones and marbles) and the Briançonnais unit "de l'Esseillon" (conglomeratic micaschists, quartzites and carbonate cover).

Normal or detachment faults have been highlighted within this set of units (Figure 8 and Figure 9, Photo 8).

The Ambin Massif

From the Etache valley and up to the Italian border (almost 10 km), the tunnel crosses the Ambin Massif under a rock cover locally greater than 2,000 m (Figure 11). This Massif represents the eastern part of the internal Briançonnais Zone, it forms a structural dome which appears in window (15 km x 20 km approximately) under the Ligurian-Piedmontais schists (Figure 1).

From the West, the tunnel first crosses the Groupe d'Ambin series for less than 2 km; these terrains were studied on surface and from drillings (especially the long directed drilling of Etache, SDE). They are essentially quartzitic micaschists and albitic gneisses, long attributed to the Permian, but at least "permo-triassic". These terrains of the Group of Ambin mark the western flank of the dome of Ambin and present a fairly simple overall structure on the scale of the longitudinal profile, according to a strong dip towards the West.

Contact with the Clarea basement is marked by a zone of more or less intense deformation.

The Clarea basement constitutes the major part and the core of the Ambin Massif. It is fairly well known on the surface but it has only been investigated in depth by two boreholes and thus appears to be little recognized in borehole in view of the volume it represents and the length of the tunnel concerned

(nearly 8 km in France). But this observation must be balanced by the fact that this basement appears relatively homogeneous.

This basement consists mainly of micaschists fairly dark and often bluish gray (presence of glaucophane amphibole) with quartz veins and in which lenses of chlorite-albitic gneisses are inserted and levels of boudins like amphibolite. Ante-alpine mineral parageneses (biotite and garnet) are partially preserved away from alpine shear zones. The main foliation of the basement is generally subhorizontal.

No major fault has so far been highlighted or suspected within the Ambin Massif. The presence of one or more major tectonic contacts is very likely at the base of the Ambin Massif, but probably at very great depth, below the level of the base tunnel.

Conclusions

The investigations carried out on behalf of TELT along the planned Mont Cenis tunnel made it possible to reinterpret the geological structure of a wide section of the Western Alps, on the scale of the first hectometers and up to 1-2 km of the upper part of the earth's crust.

If along a part of the transect, the structure represented is quite close to that reported by the previous authors (Ultradauphinois, Subbriançonnais and Briançonnais Houillère zone), in several sectors, the proposed reinterpretation proves to be entirely new and supported by compared to previous interpretations. This is the case for the internal Briançonnaise Zone and the Gypsum Nappe Zone:

- within the internal Briançonnais Zone, a complex polyphase structure is highlighted from West to East in the Sapey-Modane-Avrieux sector. On either side of the major anticline of the Râteau d'Ausssois in the central position in this sector, we identify in the East, an early westward phase according to geometries similar to a "ramp and flat" thrust system, and in the West, a succession of tectonic scales and related folds associated with a following retrotranspressive eastward tectonic phase;
- in the east of the Sapey-Modane-Avrieux sector, a global structural interpretation is proposed for the section of the project corresponding to the Gypsum Nappe zone structurally very little known until now. A new unit (Lozes unit) reported to the Piemontais domain is individualized in this sector.

Late extensive tectonics is also highlighted or specified within the internal Briançonnais and Gypsum nappe zones.

Investigations along the transect have also made it possible to complete or clarify the lithostratigraphy of the Ultradauphinoise Zone, the Gypsum Nappe and the newly identified Piemontais Unit (Lozes Unit).

Finally, surface observations coupled with observations on cores and along descending galleries have made it possible to confirm the fact that the *cargneules* that highlight overlapping accidents on the surface give way in depth to an anhydritic breccia and thus correspond to a facies resulting from the meteoric alteration of the latter.

1. Introduction

Le projet de tunnel de base transalpin (« Tunnel du Mont Cenis ») de grande longueur (57,5 km) de la nouvelle ligne Lyon-Turin a été l'occasion de réaliser un volume important d'études de reconnaissance tout le long du linéaire et sur de longues années. Ces reconnaissances ont ainsi fourni un très grand nombre de nouvelles données d'observation et d'analyse notamment en profondeur à partir de sondages de grande longueur et de descenderies (plus de 65 km de sondages et plus de 16 km de descenderies hors galerie de reconnaissance de Saint-Martin-de-la-Porte en cours de finalisation). Ces reconnaissances fournissent donc des éléments pour une meilleure compréhension de l'organisation de la partie supérieure (0-1 000 m) d'un secteur « central » de la chaîne des Alpes occidentales. Cette compréhension de la chaîne est illustrée sous forme principalement d'une coupe géologique proposée le long du projet du tunnel de base par les intervenants sur le projet. Cet article vise à présenter (décrire) la partie française de cette coupe géologique essentiellement d'un point de vue géométrique ou structural et par secteurs. Il ne s'agit pas de discuter toutes les problématiques abordées dans l'imposante bibliographie alpine existante qui pourraient concerner le transect. Cet article n'a pas pour ambition non plus de reprendre et discuter l'histoire géodynamique de ce tronçon de la chaîne alpine.

Après la réalisation des descenderies du tunnel dans les années 2000, puis dans les années 2010, de galeries de reconnaissance de grandes dimensions en France (Zone houillère) et en Italie (La Maddalena), la plus grosse partie des travaux de creusement commencera au début des années 2020. Nous sommes donc à un moment charnière de la réalisation de ce grand tunnel qui nous paraît constituer une bonne occasion de présenter une coupe géologique de l'ensemble de la partie française du futur tunnel.

La coupe géologique « de référence » présentée

ici est prévisionnelle et bien sûr le résultat d'interprétations entre de nombreuses données « factuelles » ; elle reste un modèle comme toute coupe géologique mais il faut cependant insister sur le fait que cette coupe complexe est globalement bien calée par de nombreux forages profonds au moins dans certains secteurs, et en tout cas, bien mieux que ne le sont la plupart des coupes géologiques habituellement présentées dans la littérature.

Les données utilisées pour la réalisation de la coupe présentée sont issues principalement de reconnaissances réalisées antérieurement à 2007. T. Baudin et E. Egal ont participé activement à la réalisation du modèle géologique au cours de la phase APR (avant-projet de référence) et sont en grande partie responsables avec Y. Gros et Y. Siméon (terrains houillers) de la coupe prévisionnelle proposée pour le projet de référence final (PRF) côté France. D'autres auteurs qui ont contribué à cette coupe sont cités au fil du texte. Cette coupe a été diffusée de manière restreinte sous la responsabilité du maître d'ouvrage (TELT) dans le cadre de ses opérations de projet et de travaux mais n'avait pas encore fait l'objet de publication dans une revue académique. Une partie de la coupe (Zone de Modane) et son interprétation ont déjà été publiées (Strzeczynski *et al.*, 2012) mais sur un secteur réduit et selon une interprétation un peu différente de celle présentée ici.

Les observations et données qui ont permis de rédiger cette synthèse géologique (en dehors des rapports de forages) sont décrites de manière plus détaillée dans plusieurs rapports fournis à TELT (LTF) de 2005 à 2007.

Localement, un travail de modélisation numérique 3D a été entrepris afin de proposer et valider une géométrie cohérente de la coupe géologique.

La réalisation du tunnel de base permettra de faire évoluer la coupe géologique présentée ici mais précisons cependant que lors du creusement au tunnelier, c'est-à-dire sur la majeure partie du projet, les observations acquises seront souvent imprécises et/ou incomplètes (pas de données structurales fines notamment) : elles résulteront de l'interprétation des reconnaissances à l'avancement et de l'analyse des matériaux d'excavation.

2. Le tunnel de base dans le cadre alpin

2.1. Cadre général

Le projet de tunnel traverse essentiellement la partie interne des Alpes selon une orientation générale à peu près Est-Ouest (Figure 1). Depuis la

France vers l'Italie (sens W-E), le tunnel commence près de Saint-Jean-de-Maurienne dans la Zone ultradauphinoise et traverse ensuite le Front pennique, la Zone subbriançonnaise, le Front houiller, la Zone houillère briançonnaise, la Zone briançonnaise interne (Vanoise – Ambin) et la Nappe des gypses (Figure 1) ; il se termine en Italie dans la Zone liguro-piémontaise ophiolitique.

Ces différentes zones sont issues de la collision alpine mais elles correspondent également à différents domaines paléogéographiques individualisés avant l'orogénèse alpine (c'est-à-dire avant la fermeture de l'océan liguro-piémontais,

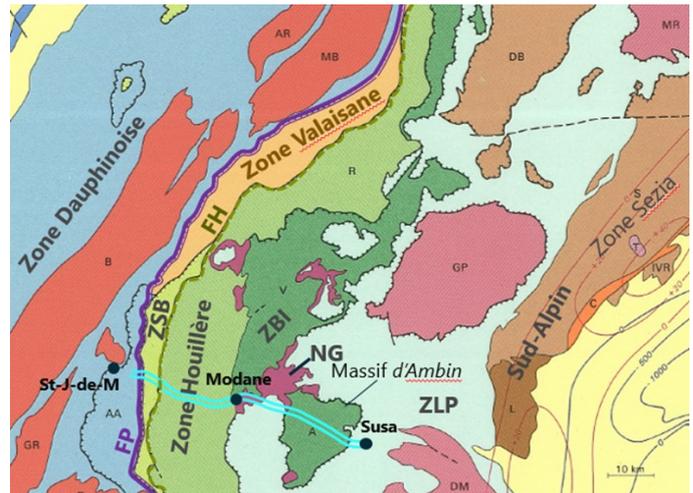


Figure 1 : Implantation du tunnel de base (double trait bleu turquoise) sur un fond géologique simplifié (schéma structural de la feuille Ancecy de la carte de France à 1/250 000, Debelmas *et al.*, 1980). FP = Front pennique ; ZSB = Zone subbriançonnaise ; FH = Front houiller ; NG = Nappe des Gypse ; ZLP = Zone liguro-piémontaise. En rouge et rose les Massifs cristallins externes et internes, respectivement.

Figure 1: Layout of the base tunnel (double turquoise line) on a simplified geological map ("structural schema" of the Ancecy sheet of the 1/250 000 map of France, Debelmas *et al.*, 1980). FP = Penninic front; ZSB = Subbriançonnais area; FH = Coal front; NG = Gypsum tablecloth; ZLP = Liguro-Piedmont area. In red and pink: external and internal crystalline Massifs, respectively.

initialement localisé entre les marges continentales européenne et apulienne) et représentant successivement les terrains de marge passive externe, de marge passive amincie et du domaine océanique. Les principales caractéristiques de ces différentes zones et leur signification paléogéographique et tectonique sont décrites dans de nombreux ouvrages ou publications ; on citera notamment les notices de la carte géologique de France à l'échelle du 1/250 000 (feuille Ancecy, Debelmas *et al.*, 1980 pour la zone qui nous concerne) ou du 1/50 000 (par exemple feuille Névache-Bardonecchia-Modane, Barféty *et al.*, 2006) ainsi qu'une brochure de présentation synthétique et didactique de l'ensemble de la chaîne alpine et de son évolution par P. Agard et M. Lemoine (2003). De nombreuses références historiques sont par ailleurs citées dans les notices des cartes géologiques.

2.1. La connaissance avant les reconnaissances le long du transect

La région alpine traversée par le projet de tunnel a fait l'objet de très nombreuses études au cours du 20^{ème} siècle qui ont permis : i) d'établir une lithostratigraphie solide de la région, ii) de délimiter les grandes zones paléogéographiques et tectoniques et iii) de décrire la structuration générale ou détaillée en surface. Cette connaissance géologique a été diffusée sous forme de nombreuses thèses et articles scientifiques (certains seront cités dans les paragraphes et chapitres suivants) et est largement consignée au sein des coupures de la carte géologique de France à 1/50 000 et des notices associées : le projet concerne les feuilles Saint-Jean-de-Maurienne (Barbier *et al.*, 1977) dans sa partie Est, Modane (Debelmas *et al.*, 1988 ; voir également Barféty *et al.*, 2005), entièrement traversée et Lanslebourg - Mont d'Ambin (Fudral *et al.*, 1994) dans sa partie SW.

Ces travaux n'ont cependant pas eu accès à des données de sondages profonds ; l'interprétation de subsurface faite par exemple sous forme de coupe géologique associée à la carte géologique Modane (figure ci-dessous) va se révéler peu renseignée et parfois très hypothétique en profondeur en comparaison avec les coupes qui pourront être dessinées à partir des études de reconnaissances pour le tunnel de base du projet Lyon-Turin (voir sections suivantes).

3. La coupe géologique du tunnel

3.1. Les études et reconnaissances

Les études et reconnaissances pour le projet du tunnel de base de la nouvelle ligne ferroviaire Lyon-Turin ont débuté dans le cadre de « premières réflexions » sur le projet dans les années 1989-1990 puis se sont intensifiées de 1994 à 2001 dans le cadre d'études de faisabilité (sous la responsabilité de Alpetunnel GEIE), puis de 2001 à 2015 dans le cadre

des études de projet et des travaux de reconnaissances réalisés sous la responsabilité de LTF SAS (Monin *et al.*, 2011a, 2014). Depuis, TELT SAS est en charge du creusement du tunnel ; certaines reconnaissances continuent encore actuellement dans des secteurs particulièrement complexes, ensuite les reconnaissances se poursuivront à l'avancement des chantiers.

Au total, pratiquement 270 sondages (de 20 m à environ 3 km de longueur, pour un linéaire total de plus de 65 km) ont été réalisés depuis la surface le long du tracé du futur tunnel. De la sismique en surface et en sondage a été associée à ces reconnaissances, pour un linéaire de plus de 210 km de profils acquis.

Les observations issues du creusement de la galerie de reconnaissance de Saint-Martin-de-la-Porte (Zone houillère) encore en cours d'excavation au moment où s'écrivent ces lignes ne sont pas prises en compte ici ou de manière marginale.

3.2. Évolution générale de la coupe géologique prévisionnelle au fil des reconnaissances

Six coupes principales ou profil en long ont été successivement éditées par Alpetunnel, LTF puis TELT de 1996 à 2014 (puis 2017), au fur et à mesure de l'avancée des phases d'études et de reconnaissances ; globalement, un degré de complexité croissant apparaît d'une coupe à l'autre (Figure 3). La description structurale de la coupe actuelle de référence est faite dans le chapitre suivant, par secteurs. Des informations lithostratigraphiques nouvelles sont également fournies de manière plus ponctuelle.

3.3. La coupe géologique par secteurs et les principaux acquis

La présentation du profil en long géologique qui

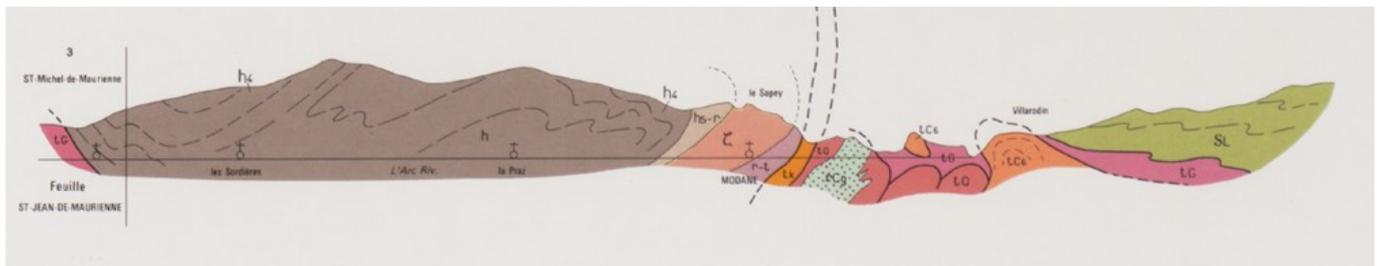


Figure 2 : Coupe géologique sensiblement W-E associée à la carte géologique de France à 1/50 000 (feuille Modane, Debelmas *et al.*, 1988) selon une orientation proche du tracé du tunnel de base depuis le Front houiller jusqu'à la Nappe des Schistes lustrés. Les terrains houillers sont représentés en marron ; entre ces derniers et les Schistes lustrés (SL, en vert) on identifie les terrains de la Zone briançonnaise interne et de la Nappe des gypses. Coupe de 26 km environ.

Figure 2: Geological section roughly W-E associated with the 1: 50,000 geological map of France (Modane sheet, Debelmas *et al.*, 1988) with a layout close to that of the base tunnel from the Front Houiller to the Schistes Lustrés Nappe. The Houiller Zone is represented in brown; between it and the Schistes Lustrés (in green) we identify the Briançonnais Zone and the Nappe des gypses. The section is approximately 26 km long.

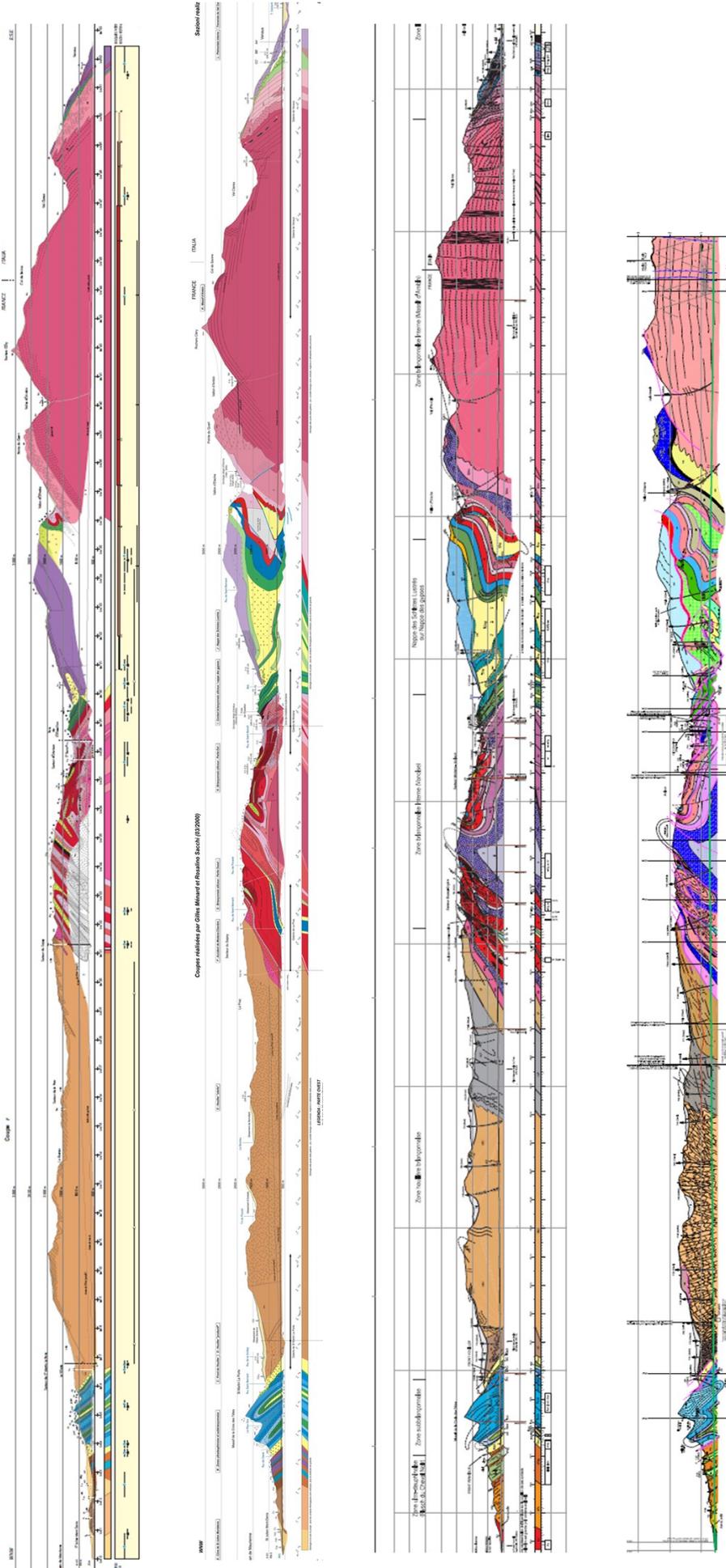


Figure 3 : Évolution de 1996 à 2014-2017 du profil géologique prévisionnel le long du projet du tunnel de base. Les profils successifs sont dessinés suivant un tracé similaire (Ouest à gauche). La partie italienne n'est pas représentée sur le profil le plus récent. Le profil complet s'étend actuellement sur 57,5 km (54 km avant 2014). Des images haute résolution de ces coupes peuvent être obtenues par demande auprès de la co-auteur C. Marty.

Figure 3: Evolution from 1996 to 2014-2017 of the provisionnal geological profile along the base tunnel project. Successive profiles are drawn following a similar layout (West on the left). The Italian side is not shown on the most recent profile. The full profile is currently 57.5 km (54 km before 2014). High resolution images of these profiles may be obtain by request to the co-author C. Marty.

suit est faite de l'Ouest vers l'Est, depuis le portail de Saint-Jean-de-Maurienne jusqu'à la frontière italienne au cœur du Massif d'Ambin.

Avant de traverser les séries alpines du massif de la Vanoise présentées ci-après, le tunnel débute dans un cône de déjection récent dans la vallée de la Maurienne. De nombreux sondages courts ainsi que des reconnaissances géophysiques ont été réalisés à travers ce cône par TELT. C. Crouzet *et al.* (1999) ont identifié le cône de déjection proprement dit, d'âge holocène et de 20-50 mètres d'épaisseur reposant sur des coulées boueuses, des matériaux écroulés et des alluvions « anciennes » de l'Arc.

NB : Les coupes géologiques présentées ci-après sont issues (extraites) de la coupe géologique générale établie pour TELT ; elles suivent strictement le tracé du projet de tunnel et sont toutes présentées avec l'Ouest à gauche et l'Est à droite. Une description détaillée de ce profil (lithotypes et structures) est disponible sous forme d'un mémoire de synthèse géologique rédigé pour le compte de TELT.

3.3.1. À travers la Zone ultradauphinoise (Flysch du Cheval noir)

La Zone ultradauphinoise est constituée principalement d'une série flyschoidé éocène dénommée « Flysch du Cheval noir » équivalent du « Flysch des Aiguilles d'Arves » identifié plus au Sud. Ce flysch repose sur des terrains mésozoïques non recoupés par le tunnel en projet et non présentés ici. Cette série présente un pendage régulier vers l'Est (Figure 4) mis en évidence depuis les premières études dans le secteur et confirmé par les galeries existantes (galerie EDF de l'Echaillon, galerie « Trimet ») puis par les reconnaissances TELT en surface et en sondages (trois forages carottés inclinés) (Figure 4). Ce pendage des couches est très vraisemblablement associé à un plissement plus ou

moins régulier mais des polarités sédimentaires ou structurales comme des charnières de plis sont rarement observables. Une charnière d'échelle plurimétrique à vergence ouest a cependant pu être récemment observée au sein de la galerie EDF de l'Echaillon lors d'une courte période de vidange exceptionnelle.

Plusieurs séquences sédimentaires (plusieurs formations de flysch) sont en fait distinguées au sein du Flysch du Cheval noir. Les études de reconnaissances TELT par sondages et des études de terrain complémentaires (Y. Callec) ont permis de proposer une lithostratigraphie détaillée des flyschs (Figure 5, voir également Photo 2) à partir du découpage proposé antérieurement (cf. carte géologique de France à 1/50 000, Barbier *et al.*, 1977).

Le long du tracé, on distingue principalement un « Flysch schisteux » à l'Ouest passant à un « Flysch schisto-gréseux » vers l'Est. Des séquences plus fines de Flysch gréseux ou de grès conglomératiques sont intercalées dans l'ensemble (Figure 4 et Figure 5) et des olistolithes de grande taille sont identifiés au sein du « Flysch schisto-gréseux ». Un faciès chaotique de « Schistes à blocs » (ou « Flysch à blocs ») est observé entre les olistolithes et définit l'ensemble comme un olistostrome.

Les olistolithes et olistostrome ont été préalablement identifiés en tant que tels par A. Serre (1983). En revanche, sur la carte géologique à 1/50 000, les olistolithes sont interprétés comme des intercalations sédimentaires et/ou tectoniques au sein du flysch, et regroupés avec ces derniers au sein des « écailles externes » de la Zone subbriançonnaise (Barbier *et al.*, 1977 ; feuille Saint-Jean-de-Maurienne de la carte géologique de France à 1/50 000).

Les séquences schisteuses et schisto-gréseuses

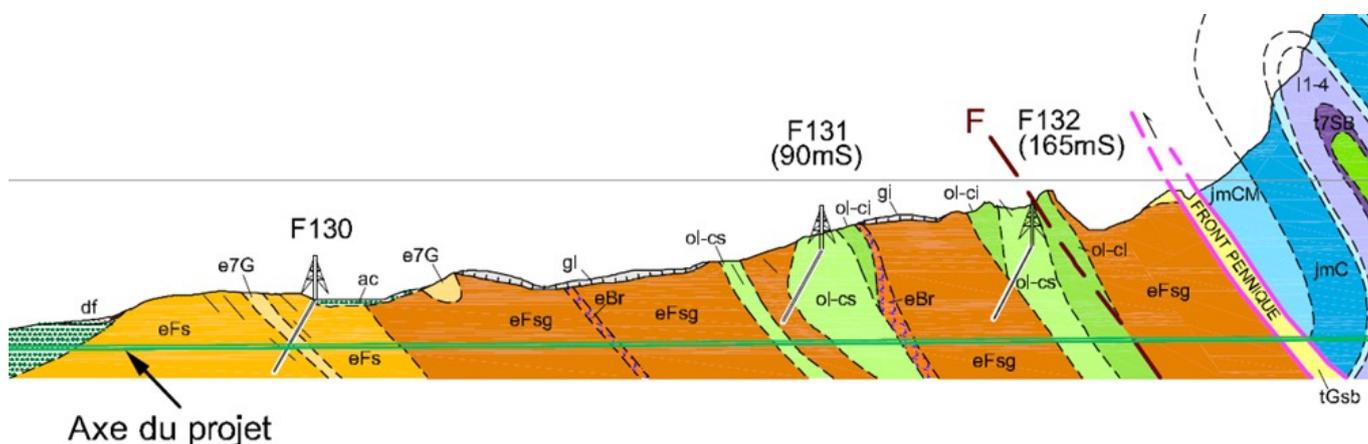


Figure 4 : Extrait du profil en long géologique TELT le long du tunnel en projet à travers la Zone ultradauphinoise, à l'Ouest du Front penninque, avec report des sondages carottés F130 à F132 réalisés pour le projet (avec indication du décalage éventuel par rapport au tracé). Légende lithologique : voir figure suivante. La coupe représentée fait un peu plus de 3 km.

Figure 4: Extract from the TELT longitudinal geological profile along the planned tunnel through the UltraDauphinoise zone, west of the Penninic front, with location of core drilling F130 to F132 carried out for the project (with indication of the possible offset from the configuration). Lithological legend: see following figure. The section shown is just over 3 km long.

du Flysch du Cheval noir passent rapidement mais progressivement des unes aux autres et constituent un même ensemble sédimentaire, sans chevauchement ou écaillage interne. Une faille est reportée sur la coupe géologique du projet de tunnel (Figure 4) mais celle-ci est hypothétique et tardive.

Dans l'environnement du projet, des failles normales bien visibles dans le paysage et sur image

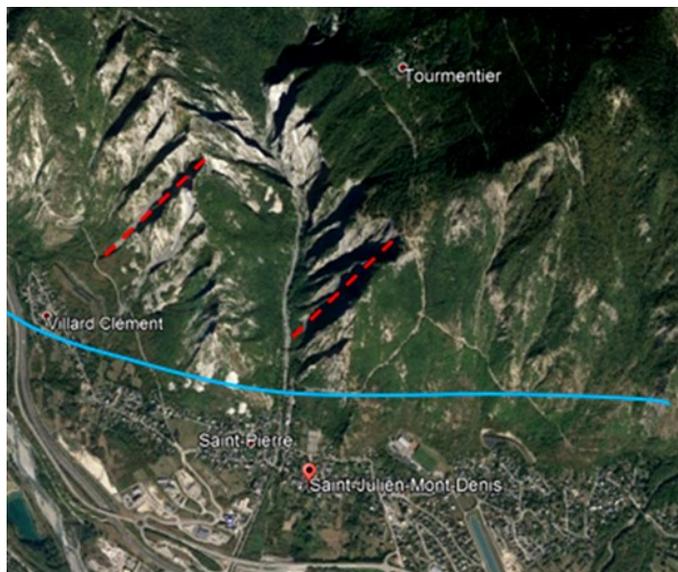


Photo 1 : Image Google Earth sur laquelle on voit très nettement le jeu de failles SW-NE (direction générale en rouge) qui affectent le Flysch du Cheval noir au Nord du tunnel (trace approximative en plan en bleu).

Photo 1: Google Earth image on which we clearly see SW-NE faults (general direction in red) in the Flysch du Cheval noir, north to the base tunnel (alignment in blue).



Photo 2 : Affleurements de Flysch schisteux (eFs), à gauche et de Flysch gréseux (e7g), à droite.

Photo 2: Outcrops of Flysch schisteux (eFs) on the left and of Flysch gréseux (e7g) on the right.

satellitaire (Photo 1) affectent les flyschs, mais ces failles à pendage NW n'ont pas été identifiées à l'aplomb du tracé et n'ont pas été étudiées plus en détail.

3.3.2. À travers le Front pennique et la « lame de gypses » associée

Le Front pennique représente un contact anormal majeur de la chaîne alpine ; il marque la séparation au

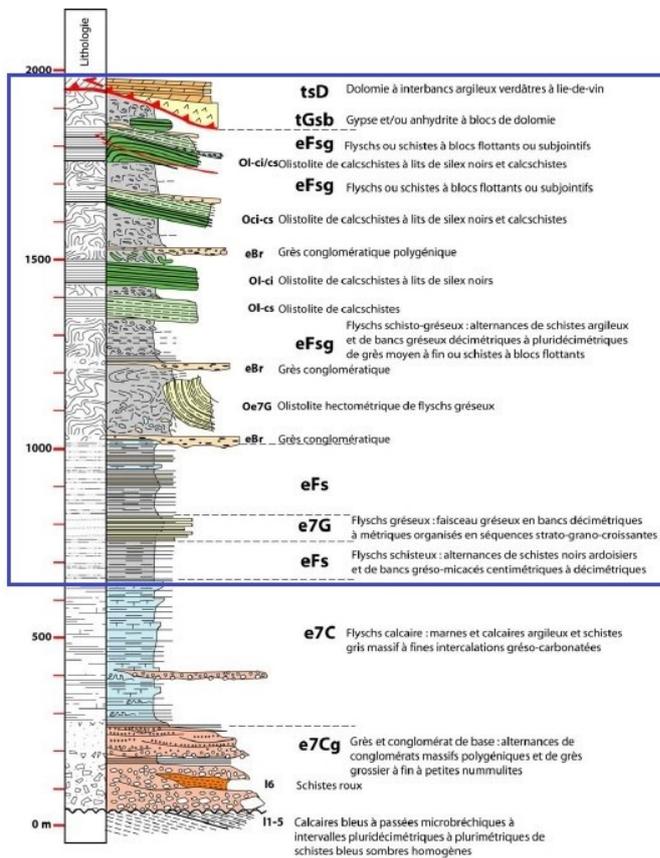


Figure 5 : Colonne lithostratigraphique relevée et synthétisée dans le cadre des études de reconnaissances en 2007 (Y. Callec, Brgm). Les formations, horizons particuliers et olistolithes recoupés par le tracé du tunnel sont inclus dans le cadre bleu.

Figure 5: Lithostratigraphic column established as part of investigations studies in 2007 (Y. Callec, Brgm). The geological part cross-cut by the tunnel in project are included in the blue rectangle.



sein des Alpes entre les domaines externe (à l'Ouest) et interne (à l'Est) (Figure 1) et met en contact par chevauchement des ensembles lithostratigraphiques et structuraux bien différents. Cette limite principale des Alpes occidentales est généralement bien marquée morphologiquement car soulignée par des roches évaporitiques et des cargneules associées. La nature ductile des évaporites a permis le déplacement relatif des unités de part et d'autre comme c'est

classiquement le cas dans les Alpes.

Le Front pennique est interprété pour l'essentiel de son histoire comme une surface de chevauchement majeure à l'échelle alpine. Cependant, sa cinématique récente et actuelle apparaît se traduire par des mouvements en faille normale (par exemple Bertrand *et al.*, 1996) ; les données sismologiques interprétées vont dans ce sens (Sue et Tricart, 1999).

Le long du projet de tunnel de base, le Front pennique se marque en surface (Photo 3) sur une épaisseur d'ordre (pluri)hectométrique par la présence continue de gypse qui renferme des lentilles et blocs de dolomie ainsi que et des lambeaux de schistes. Cet ensemble constitue ainsi une mégabrèche tectonique qui jalonne le Front pennique. Un sondage a partiellement traversé ce front et indique que le gypse laisse place à l'anhydrite massive en profondeur, les cargneules ne semblent pas s'être développées au niveau de ce front à l'aplomb et à la cote du tunnel.

Aucun sondage de reconnaissance n'a toutefois entièrement recoupé les évaporites en profondeur et l'épaisseur de celles-ci reste donc imprécise au niveau du tunnel.

3.3.3. À travers la Zone subbriançonnaise

La Zone subbriançonnaise est relativement étroite, elle est recoupée sur environ 3 kilomètres le long de l'axe du projet. La succession stratigraphique des terrains qui constituent la zone est celle reportée sur la carte géologique de France à 1/50 000 (feuille Saint-Jean-de-Maurienne, R. Barbier *et al.*, 1977) et comprenant des couches gypseuses et carbonatées du Trias supérieur surmontées par des couches carbonatées du Jurassique inférieur et moyen (Lias et Dogger). Cette succession est visible sur la Figure 6 et décrite sommairement en légende.

Les couches mésozoïques de la Zone subbriançonnaise présentent une structuration plicative marquée et bien visible dans le paysage (Photo 4) ; ces plis sont classiquement interprétés comme une succession monophasée d'anticlinaux et de synclinaux déversés vers l'Ouest et affectant une série en position normale (cf. Barbier, 1948 ; Barbier *et al.*, 1977 ou M. Gidon : site web Geol'Alp). Plus récemment, S. Ceriani (2001) a proposé une interprétation plus complexe et polyphasée à partir de critères structuraux ; il considère que l'anticlinal « apparent » situé le plus à l'Est (« pli du Château ») serait en fait un synclinal à axe très plongeant (> à la pente) reprenant une série préalablement inversée au cours d'une phase antérieure. Cependant, nos



Photo 3 : Le Front pennique en limite ouest du massif de la Croix des Têtes (Zone sub-briançonnaise). Vue vers le Nord depuis la vallée de l'Arc près de St-Julien-Mont-Denis

Photo 3: The Penninic Front on the western limit of the Croix des Têtes massif (Sub-briançonnaise Zone). View to the North from the Arc valley near St-Julien-Mont-Denis

observations de terrain de part et d'autre de l'Arc ne nous ont pas amenés à retenir cette interprétation. Nous n'avons pas observé de critères structuraux de polarité permettant de la conforter. Les rares observations d'une relation schistosité-stratification faites dans les calcaires marneux sur le flanc Est du pli du château plaident pour une polarité structurale « normale » (pas d'inversion préalable des couches). Nous maintenons l'interprétation classique d'une série plissée en position normale déversée vers l'Ouest suivant un pendage assez régulier d'une cinquantaine de degrés (Figure 6). L'allure apparemment en synclinal de la charnière depuis le versant opposée de la vallée étant interprétée à titre d'hypothèse comme le résultat d'un redressement localisé et tardif de l'axe du pli.

Reconnaissons cependant que l'interprétation structurale proposée pour ce secteur ne s'appuie pas sur des forages profonds (aucun de réalisé dans le



Photo 4 : Plis anticlinaux de la Zone subbriançonnaise bien visibles depuis la vallée (« Pli de la Serpolière et « Pli du Château » de gauche à droite = de l'Ouest vers l'Est). Vue vers le Nord-Ouest depuis la vallée de l'Arc près de St-Julien-Mont-Denis. Les tiretés bleus soulignent la base des calcaires massifs du Dogger (jmC sur Figure 6).

Photo 4: Anticline folds of the Subbriançonnais area clearly visible from the valley ("Pli de la Serpolière" and "Pli du Château" from left to right = West to East). View to the North-West from the Arc valley near St-Julien-Mont-Denis. The blue dashes underline the base of the massive Dogger limestones (jmC in Figure 6).

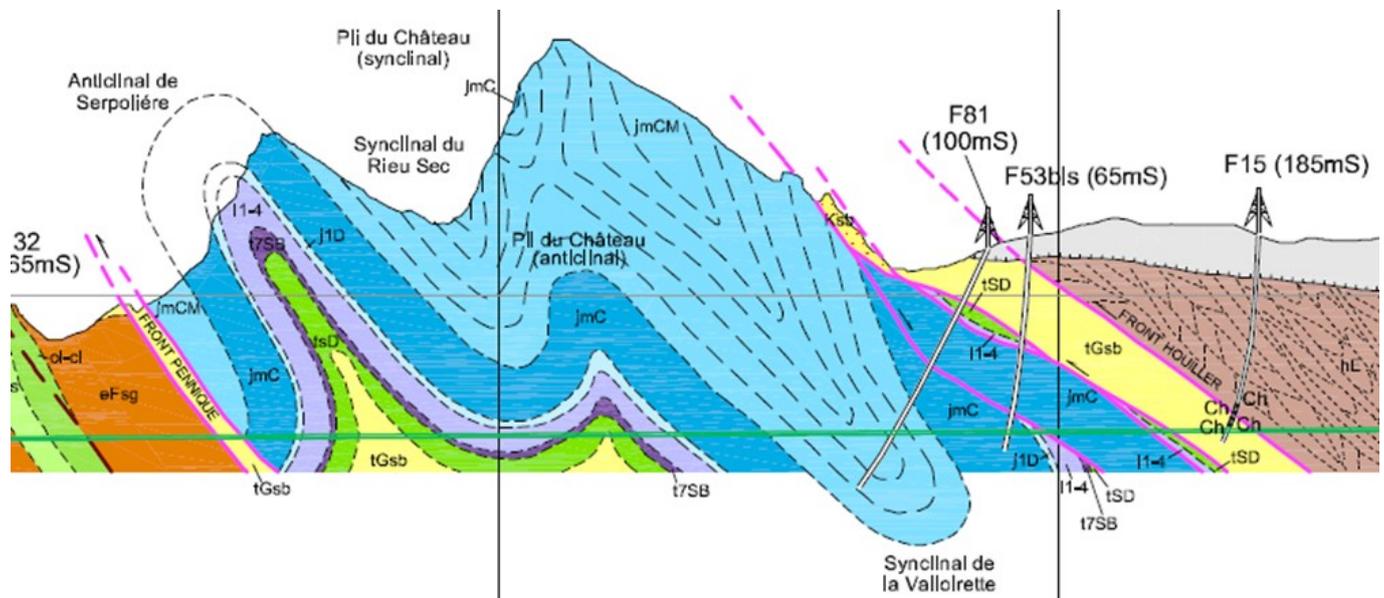


Figure 6 : Extrait du profil en long géologique TELT à travers le Front pennique, la Zone subbriançonnaise, et le Front houiller. Formations de la Zone subbriançonnaise, de bas en haut de la série : tGsb (jaune) = anhydrites et gypse du Trias supérieur (Carnien probable) ; tSD (vert) = Dolomites et argillites du Trias supérieur (Norien probable) ; t7SB (violet sombre) = Calcaires du Rhétien ; j1-4 (mauve) = Calcaires lités à silex ; j1D (bleu pâle) = Calcschistes de l'Aalénien ; jmC (bleu vif) = Calcaires massifs du Dogger (Bajocien-Bathonien) ; jmCM (bleu clair) = Calcaires marneux du Dogger (Callovien). Terrains houillers en marron (ch : charbon). En grisé, masse glissée de terrains houillers. Fnn = sondage carotté. La lame de gypse-anhydrite qui marque le Front pennique est potentiellement plus épaisse que représentée. La distance entre le Front pennique et le Front Houiller est supérieure à 11,5 km.

Figure 6: Extract from the TELT long geological profile across the Subbriançonnais Zone, and the Front Houiller. Formations in the Subbriançonnais Zone, from bottom to top of the series : tGsb (yellow) = anhydrites and gypsum from the Upper Triassic (probable Carnian) ; tSD (green) = Dolomites and argillites of the Upper Triassic (probable Norian) ; t7SB (dark purple) = Limestone from the Rhetian ; j1-4 (purple) = Limestones with flint ; j1D (pale blue) = Calcschists of the Aalenian ; jmC (bright blue) = Massive limestones of the Dogger (Bajocian-Bathonian) ; jmCM (light blue) = Dogger (Callovian) marly limestones. Houiller in brown (ch : coal). In grey : landslide of Houiller terrains. Fnn = core drilling. The gypsum-anhydrite sole, which marks the penninic front, is potentially thicker than shown. The distance between the Penninic Front and the Houiller Front exceeds 11,5 km.

cœur de la zone subbriançonnaise) et reste sujette à caution. Notamment, la géométrie des plis en profondeur et donc la position des interfaces lithologiques par rapport au tunnel (Figure 6) ne sont pas précisément calées.

Près de sa limite orientale, un redoublement de la barre de calcaires massifs du Dogger (JmC) est mise en évidence en sondage (F81). Ce redoublement est à corrélérer au chevauchement de la Zone houillère sur la Zone subbriançonnaise par l'intermédiaire de la Zone des gypses.

3.3.4. À travers le Front houiller et la Zone des gypses

Comme son nom l'indique, le Front houiller marque la limite occidentale des terrains houillers chevauchants vers l'Ouest. Il peut être assimilé à la simple surface limitant la Zone houillère ou de manière plus réaliste à une zone plus large autour de cette surface et intégrant la « Zone des gypses » (cf. Barbier *et al.*, 1977) d'une épaisseur (supra) hectométrique (Figure 6).

Le Front houiller n'a pas une signification symboliquement aussi forte que le Front pennique pour les géologues alpins mais il constitue cependant lui aussi une limite majeure des Alpes occidentales. A l'instar du Front pennique, le Front houiller a fonctionné essentiellement en chevauchement à l'échelle de l'histoire alpine mais une cinématique « normale » semble devoir lui être associée pour les temps récents et actuels.

Trois sondages carottés TELT de grande longueur (F53bis, F81 et F15) ont permis de reporter de manière assez précise la géométrie d'ensemble de la Zone des Gypses et du Front Houiller le long du projet de tunnel (Figure 6).

Comme pour le Front pennique, la Zone des gypses est constituée principalement de gypse en surface mais les sondages F53bis et F81 montrent que rapidement en profondeur (sous une masse glissée de terrains houillers, Figure 6) le gypse laisse place à l'anhydrite massive. Celle-ci présente régulièrement un rubanement et renferme des petits clastes carbonatés millimétriques à centimétriques ainsi que des niveaux ou lambeaux de schistes fins. De plus, le forage F81 recoupe au sein de la masse des anhydrites, des intercalations de 15 à 25 m d'épaisseur de dolomies du Trias supérieur, calcschistes du Crétacé supérieur, marbres du Jurassique supérieur ; ces intercalations correspondent selon toute vraisemblance à des blocs exotiques en provenance de la zone briançonnaise et introduits dans la masse de gypse par des processus gravitaires précoces.

Au sein de la masse des anhydrites, des niveaux de cargneules sont recoupés par le forage F81 jusqu'à la cote de 935 m NGF. Ces cargneules sont interprétées comme un faciès d'altération des évaporites de la Zone des gypses. Plus en profondeur et notamment à la cote tunnel, le forage F15 (réalisé en surface depuis le Houiller) et les descenderies de Saint-Martin-de-la-Porte n'ont pas traversé de zones

de cargneules au niveau du Front houiller. L'altération des évaporites en cargneules n'a donc pas atteint la cote du tunnel.

3.3.5. A travers la Zone houillère briançonnaise

La Zone houillère s'étend sur une largeur d'environ 15 km (Figure 7). La série sédimentaire qui la compose présente un caractère assez monotone ; elle est constituée principalement d'alternances de grès et de pélites (siltites et argilites) schisteuses déposées au Carbonifère supérieur (Serpukhovien à Gzhélien, anciennement Namurien-Stéphanien) en contexte fluviatile et lacustre. S'ajoutent de manière plus minoritaires des faciès conglomératiques et bien sûr de charbon en proportion parfois assez importante (exploitation ancienne artisanale à semi-industrielle). Des filons de dolérite recoupent la série carbonifère mais sont quasi absents le long du tracé du tunnel de base et nettement plus développés plus au Sud.

Deux grands ensembles sont classiquement distingués au sein de la Zone houillère à l'aplomb du tracé du tunnel de base (Fabre 1961 ; Debelmas *et al.*, 1988) : à l'Ouest, sur près de 10 km (et revenant au niveau de Fourneaux) le « Houiller productif » constitué d'alternances à différentes échelles mais bien marquées de grès, de pélites schisteuses et de charbon relativement abondant ; et à l'Est le « Houiller stérile » constitué principalement de grès massifs, à rares et fines intercalations schisteuses et quasiment dépourvu de charbon. Ces deux ensembles ont ensuite été dénommés respectivement « Formation de Tarentaise » et « Grès de la Praz » (Barféty *et al.*, 2005).

Cette subdivision a été reprise et affinée suite aux reconnaissances menées dans les années 1990 et 2000 sous la tutelle de Alpetunnel puis LTF (ex-TELT). On distingue ainsi (travaux de Y. Gros) le long du profil géologique de référence TELT et d'Ouest en Est (Figure 7) les unités des Encombres (partie occidentale de la Zone houillère), de Bréquin-Orelle, de La Praz et de Fourneaux. Les relations stratigraphiques entre les unités sont floues.

Les unités des Encombres, de Bréquin-Orelle et de Fourneaux correspondent au Houiller productif des anciens auteurs et contiennent toutes des intercalations de charbon ou de schistes carbonneux. L'Unité des Encombres a été individualisée du fait principalement de sa forte déformation pénétrative (et d'apparence complexe et « désordonnée ») et des phénomènes de convergence (resserrement d'une galerie sous l'effet des contraintes dans le massif encaissant) très importants qui ont été observés dans cette zone lors du creusement de la première descendrière de Saint-Martin-de-La-Porte (Mathieu, 2013).

L'Unité de La Praz correspond au Houiller stérile des auteurs (Fabre, 1961). De faible étendue le long du tracé, elle est constituée essentiellement de grès grossiers à fins et parfois de pélites noires.

L'ensemble de la série houillère briançonnaise est régulièrement plissé. Les plis, d'échelle décimétrique à hectométrique, sont visibles à l'affleurement ou dans le paysage (Photo 5) mais il est difficile voire impossible de les suivre ou les corrélérer d'un point à l'autre du fait de l'absence de niveaux repères. De ce fait, les plis figurés sur le PL géologique visent d'abord à illustrer leurs style et géométrie à travers la zone houillère mais ne correspondent pas à des plis *précisément* observés là où ils sont reportés. Une schistosité plus ou moins pénétrative suivant la lithologie est associée aux plis et régulièrement visible dans les niveaux pélitiques ou gréseux fins (Photo 5).

Le plissement principal de la série houillère montre un déversement vers l'Est, à l'Est, et vers l'Ouest, à l'Ouest, l'inversion, visible dans le paysage, se faisant selon une limite N-S passant à l'Ouest d'Orelle. Cette structuration globalement en éventail est représentative de la structure de la chaîne alpine occidentale dans son ensemble. On note que le déversement des plis et de la schistosité associée est dissymétrique ; faible à l'Ouest et très marqué à l'Est en association avec le rétrochevauchement majeur des terrains houillers sur le Briançonnais interne (voir plus loin). D'après L. Aillères (1996), le plissement

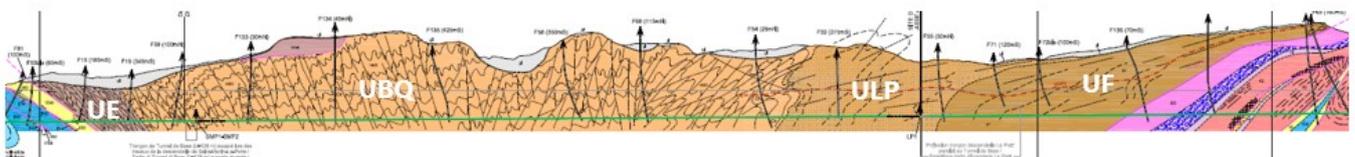


Figure 7 : Extrait du PL géologique TELT à travers la Zone houillère. Les terrains houillers sont représentés en beige marron : UE = Unité des Encombres ; UBQ = Unité de Bréquin-Orelle ; ULP = Unité de La Praz ; UF = Unité de Fourneaux. Les traits noirs surmontés d'un triangle représentent les sondages carottés réalisés. Une image haute résolution de cette coupe est visible dans le document « Fig_3-Coupe_4 » annexé à cet article.

Figure 7: Extract from the TELT geological PL through the Houiller Zone. The Houiller terrains are represented in brown beige: UE = Encombres unit ; UBQ = Bréquin-Orelle unit; ULP = La Praz Unit; UF = Fourneaux Unit. The black lines surmounted by a triangle represent the core drilling carried out. A high resolution image of this section may be seen in the file « Fig_3-Coupe_4 » annexed to this article.



Photo 5 : À gauche, exemple de pli affectant les terrains houillers et (à droite), schistosité associée au plissement général de la série houillère, ici en vert, oblique sur la stratification (en bleu), pénétrative dans les niveaux pélitiques (« schistes ») et peu ou pas visible dans les bancs gréseux (photos Y. Gros).

Photo 5: On the left, example of a fold in the Houiller terrains and (on the right), cleavage associated with the general folding of the Houiller series, here in green, oblique on the stratification (in blue), penetrating in the pelitic levels ("shales") and little or not visible in the sandstone banks (photos by Y. Gros).

synschisteux de la série houillère est principalement attribué dans la partie occidentale de celle-ci à une deuxième phase régionale D2 de déformation alors que la déformation plicative orientale fortement déversée vers l'Est résulterait d'une phase D3.

Dans le détail, les plis de la série houillère et les petites failles associées engendrent parfois une complexité très difficile à déchiffrer comme on peut le voir en rive gauche de l'Arc depuis le haut d'Orelle ou comme l'indiquent les relevés détaillés effectués dans la descenderie de Saint-Martin-la Porte (Mathieu, 2013).

3.3.6. À travers la Zone Briançonnaise interne (Vanoise – Ambin) et la Nappe des gypses

La Zone Briançonnaise interne correspond au plus grand linéaire de la partie française du tunnel de base entre la limite orientale de la Zone houillère et la terminaison de la partie française de la coupe. Une unité particulière, la Nappe des gypses, s'intercale au sein de la Zone Briançonnaise. La nappe des Schistes Lustrés liguro-piémontais surmonte cette Nappe des gypses et une partie des terrains Briançonnais, mais elle se situe en position haute par rapport au tunnel de base et n'est pas décrite dans ce qui suit.

Une série de sondages profonds dont deux sondages dirigés de très grande longueur, de nouveaux levés de terrain détaillés et les levés de front de la descenderie de Villarondin-Bourget-Modane (Monin *et al.*, 2011b) ont permis de proposer une interprétation structurale complexe mais cohérente et globalement bien renseignée pour la Zone Briançonnaise interne et la Zone de la Nappe des gypses. La coupe géologique proposée (Figure 8 et Figure 9 notamment) montre une évolution certaine dans sa représentation et son interprétation par

rapport à celle fournie avec la carte géologique de France à l'Ouest du Massif d'Ambin (feuille Modane, Debelmas *et al.*, 1988) (Figure 2).

Le passage de la Zone houillère Briançonnaise à la Zone Briançonnaise interne (Vanoise-Ambin) est marqué par un contact incliné vers l'Ouest. Trois sondages profonds ont permis de préciser la géométrie de ce contact et de mettre en évidence son inclinaison relativement faible (Figure 8) traduisant un rétrodéversement marqué du chevauchement du Briançonnais interne sur le Houiller (Barféty *et al.*, 2005 et notice associée).

Les terrains du Briançonnais interne et de la Nappe des gypses successivement traversés d'Ouest en Est par le projet de tunnel de base sont présentés ci-dessous à travers un découpage en trois secteurs.

3.3.6.1. Le secteur de Sapey-Modane-Avrieux

Les terrains du secteur Sapey-Modane-Avrieux (SMA), surmontés à l'Ouest par les terrains houillers en position haute (Figure 8) débutent par une lame d'orthogneiss (Gneiss du Sapey) qui suit le contact renversé et inversé avec le Houiller. La continuité d'une lame de gneiss au niveau du plan de la coupe du tracé du tunnel a été bien mise en évidence par les trois sondages profonds du secteur. Les gneiss présentent une texture mylonitique sur plusieurs décimètres au contact des terrains houillers marquant le chevauchement précoce des gneiss sur le Houiller. À noter que celui-ci livre encore des figures sédimentaires qui indiquent une déformation bien moins pénétrative.

Ces gneiss dont l'origine et l'âge ont été longtemps débattus (voir notice de la carte géologique à 1/50 000 Modane, Debelmas *et al.*, 1988)

apparaissent maintenant de manière claire comme une lame de socle anté-alpin du Briançonnais (Barfétty *et al.*, 2005 et notice associée). Le protolithe de l'orthogneiss du Sapey est daté à 452 +/- 5 Ma soit de l'Ordovicien supérieur (Bertrand *et al.*, 2000).

À l'Est de la lame des Gneiss du Sapey, le secteur SMA est constitué principalement d'une succession écaillée, « multi redoublée » et plissée de terrains quartzitiques permo-triasiques et triasiques, dont la partie orientale peut être interprétée comme la couverture de l'unité des gneiss du Sapey, en position inverse (Photo 6). Des dolomies et calcaires du Trias moyen surmontent stratigraphiquement les quartzites (Scythien) mais sont représentés principalement dans la partie orientale du secteur (Figure 8). Ces formations de quartzite (Scythien) et calcaires triasiques surmontent dans ce secteur une épaisse série conglomératique (« Conglomérats de Loutraz ») par l'intermédiaire d'une bande peu épaisse de quartzites phylliteux (Photo 6). Le conglomérat de Loutraz était classiquement rapporté au Permien et les quartzites phylliteux à l'horizon stratigraphiquement mal calé du « Permo-Trias » (Debelmas *et al.*, 1988). En fait, le caractère quartzitique et le passage continu entre ces deux formations amènent à les intégrer dans un ensemble permo-triasique en passage progressif avec les quartzites francs du Trias inférieur. Le terme historique de Permo-Trias est donc conservé ici pour signifier la position intermédiaire des conglomérats et quartzites phylliteux entre le socle et les quartzites francs. Les conglomérats de Loutraz constituent donc un bassin permo-triasique limité par deux unités de socle bordières, les Gneiss du Sapey (à l'Ouest) et des gneiss de l'Arpont (à l'Est).

Ce bassin et la couverture triasique qui le scelle sont aujourd'hui structurés et axés autour d'un anticlinal majeur (Anticlinal du Râteau d'Aussois, Figure 8) mis en évidence à partir de données de surface et d'un sondage profond sur son flanc ouest ; la géométrie du flanc oriental est déduite de données de surface et du pendage du flanc ouest mais n'a cependant pu être confirmée en profondeur faute de réalisation d'un sondage.

De part et d'autre de l'anticlinal, le secteur SMA présente une structuration de géométrie et de style contrastés (Figure 8). Les deux tronçons sont décrits successivement ci-après.

À l'Ouest de l'anticlinal du Râteau d'Aussois, les terrains sont constitués, sous le Houiller et les Gneiss du Sapey, d'une répétition de terrains quartzitiques (quartzites conglomératiques, quartzites phylliteux et quartzites francs) globalement inclinés vers l'Ouest

(Figure 8A). Plusieurs sondages carottés de grande longueur (1 000 m ou plus) et des levés de terrain ont permis d'identifier plusieurs écailles séparées par des contacts anormaux (failles) également pentés vers l'Ouest. Ces contacts sont en grande partie soulignés par une mince épaisseur d'anhydrite-gypse ou de cargneules (près de la surface), des lambeaux de calcaires du Trias moyen et/ou des zones intensément broyées ; les observations de terrain (les décalages cartographiques essentiellement) indiquent une cinématique décrochevauchante. Des plis sont reportés au sein de plusieurs écailles. Le pendage général des écailles et des failles décrochevauchantes comme la géométrie des plis indiquent une vergence généralisée vers l'Est de la structuration du secteur. Les contacts anormaux décrochevauchants présentent un pendage vers l'Ouest constant sur toute la tranche de terrains investigués et rien n'indique qu'il s'agit de chevauchements vers l'Ouest ultérieurement replissés ou basculés. L'anticlinal du Râteau d'Aussois montre la même vergence Est et apparaît ainsi contemporain de la structuration de la partie occidentale du secteur SMA.

À l'Est de l'anticlinal du Râteau d'Aussois, la structuration est bien différente (Figure 8B). A partir de sondages carottés nombreux dans le secteur Modane-Avrieux, d'un sondage dirigé de grande longueur (SDA : 1 822,5 m dont 609 m carottés) et des levés de terrain, on observe à nouveau une répétition d'unités de terrains de socle (notés SV sur la coupe B), parfois riches en glaucophane (Micaschistes de Vanoise ou de l'Arpont, Debelmas *et al.*, 1988, Photo 6) avec leur couverture quartzitique mais selon un pendage vers l'Est faible à moyen, sauf notamment au niveau du flanc Est de l'anticlinal du Râteau d'Aussois. La répétition des entités socle-couverture traduit l'existence de plans de chevauchements précoces replissés dans le flanc inverse de l'Anticlinal du Râteau d'Aussois. La variation de pendage de ces plans de chevauchements précoces ainsi que les effets de troncature et biseautage des couches chevauchantes et chevauchées révèlent une géométrie qui s'apparente à un système en « rampes et plats ». Ce type de géométrie est décrit dans les parties externes peu profondes des orogènes (Vercors, Jura, voir par exemple J.-L. Mugnier, 1984). On peut envisager que cette géométrie de chevauchement superficiel a été initiée lors des prémices de la compression éocène, avant d'être amplifiée dans une déformation ductile et dans des conditions HP-BT liées à la subduction Briançonnaise.

Les plis couchés dans les terrains de couverture décrits par G. Détraz (1984) et E. Jaillard (1984) au

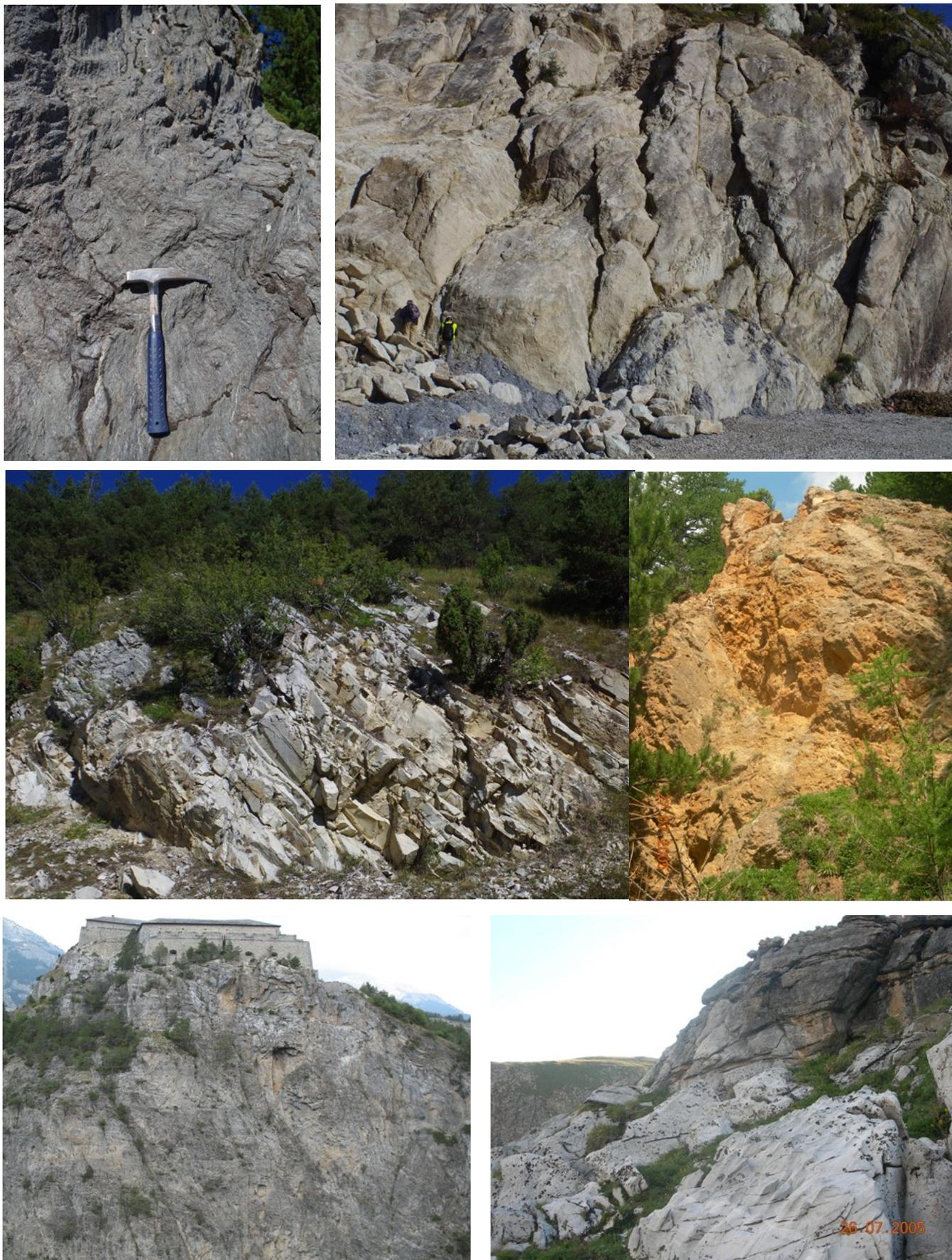


Photo 6 : Affleurements de la série Briançonnaise interne : micaschistes du socle de Vanoise (en haut à gauche), conglomérat permo-triasique quartzitique de Loutraz (en haut à droite), quartzites francs du Trias inférieur (au centre à gauche), cargneules au niveau de l'émergence d'un chevauchement majeur (au centre à droite), falaise et affleurement de dolomies du Trias supérieur (en bas).

Photo 6: Outcrops of the internal Briançonnais series: micaschists from the Vanoise basement (top left), Loutraz permo-Triassic quartzitic conglomerate (top right), lower Triassic quartzites (center left), cargneules at level of the emergence of a major thrust (center right), cliff and outcrop of upper Triassic dolomites (bottom).

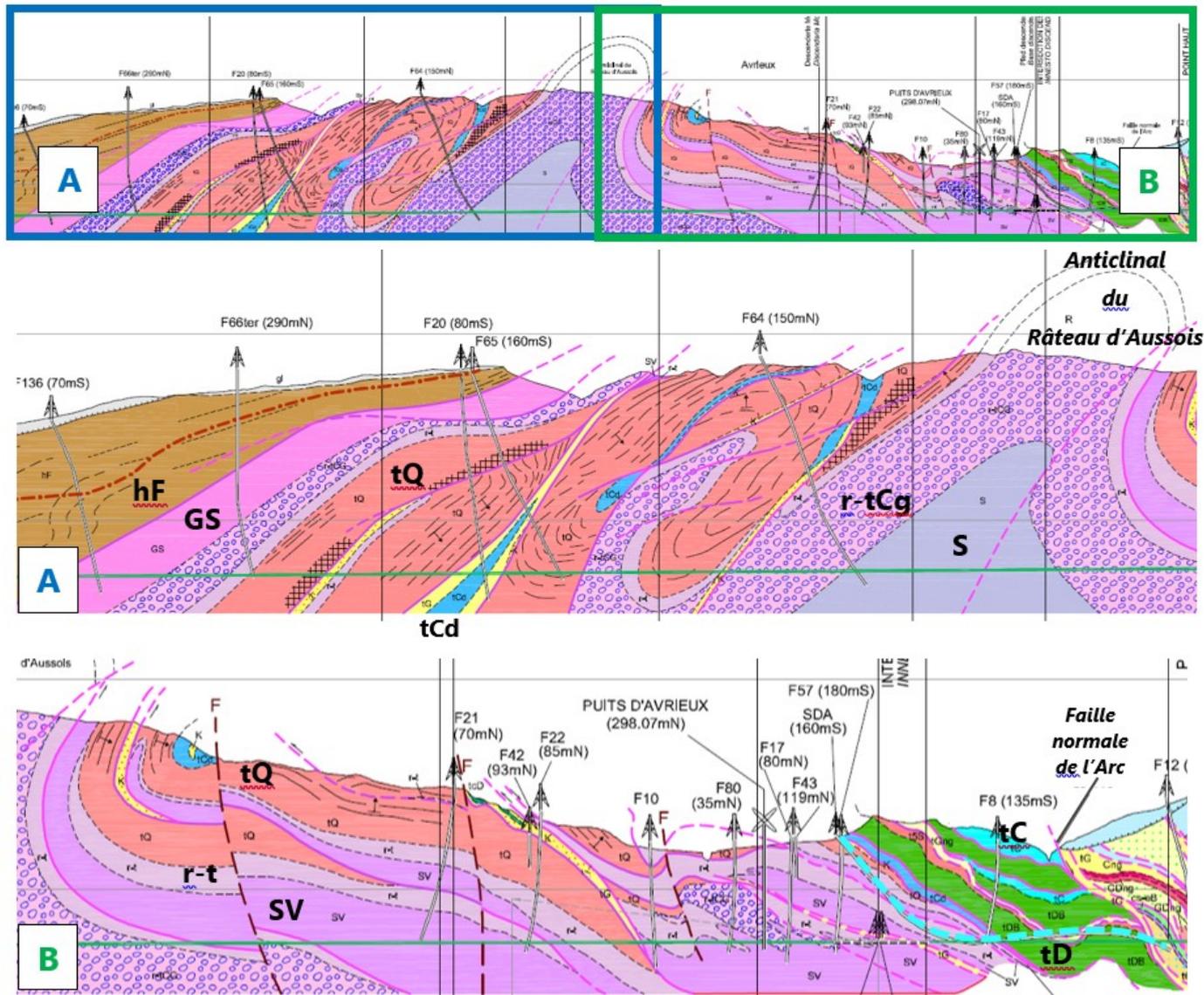


Figure 8 : Extrait du PL géologique à travers la partie occidentale SMA (Sapey-Modane-Avrieux) de la Zone Briançonnaise interne. A : secteur à l'Ouest de l'anticlinal du Râteau d'Aussois, constitué d'écaillés pour partie plissées et de décro-chevauchements à vergence Est ; B : secteur à l'Est de l'anticlinal du Râteau d'Aussois, constitué d'un empilement d'unités chevauchantes en rampes et plats à vergence Ouest. hF = terrains houillers ; GS = Gneiss du Sapey ; S = socle de l'anticlinal du Râteau d'Aussois ; SV = Socle de Vanoise (Micaschistes de l'Arpont) ; r-tCg = conglomérat quartzitique permo-triasique (Conglomérat de Loutraz) ; r-t = Quartzites phylliteux permo-triasiques ; tQ = Quartzites du Trias inférieur ; tCd et tC = calcaires et dolomies de l'Anisien-Ladinien inf. ; tD = dolomies du Ladinien supérieur. Gypse (tG) en jaune pâle, cargneules (K) en jaune pâle surchargé de pointillés. Fnn = forage carotté. Tiretés bleu (sur figure B) = sondage dirigé de grande longueur « d'Avrieux » (SDA). L'ensemble du tronçon SMA s'étend sur plus de 5 km.

Figure 8 : Extract of the geological cross-section through the western SMA (Sapey-Modane-Avrieux) part of the internal Briançonnais Zone. A : sector to the West of the Râteau d'Aussois anticline, consisting of partly folded tectonic scales and east-verging overlaps ; B : sector to the east of the Râteau d'Aussois anticline, consisting of a stack of overlapping units in ramps and flats with western vergence. GS = Sapey gneisses ; S = basement of the Râteau d'Aussois anticline ; SV = Arpont Micaschists ; r-tCg = permo-triassic quartzitic conglomerate (Loutraz Conglomerate) ; r-t = Phyllitic permo-triassic quartzites ; tQ = Lower Triassic Quartzites ; tCd and tC = Anisien to lower Ladinian limestones and dolomites ; tD = upper Ladinian dolomites. Gypsum (tG) in pale yellow, cargneules (K) in pale yellow overloaded with dotted lines. Fnn = core drilling. Blue dashed lines (on figure B) = Avrieux long directed drilling (SDA). The whole SMA area extends over more than 5 km. The protolith of the Sapey orthogneiss is dated to 452 +/- 5 Ma, that is to say from the Upper Ordovician (Bertrand et al., 2000).

Nord devraient correspondre à cette première phase tectonique.

Les plans de chevauchement sont mis en évidence principalement par le dédoublement des unités mais beaucoup d'entre eux sont jalonnés par des cargneules en surface et à faible profondeur et d'anhydrite bréchique (à éléments carbonatés et notamment de dolomie) en profondeur (Figure 8). Cette évolution avec la profondeur a été bien mise en évidence par la descenderie de Villarodin-Bourget-Modane : un accident majeur rempli de cargneules en surface et à faible profondeur (cf. sondage F22 sur Figure 8B) est recoupé plus en profondeur par la descenderie au niveau de laquelle cet accident est uniquement constitué d'anhydrite bréchique. Ces observations démontrent que les cargneules représentent un faciès altéré superficiel (altération météorique) des anhydrites bréchiques comme cela a été interprété ailleurs le long du transect.

À noter que lorsque les chevauchements ne sont pas soulignés par des évaporites ou des cargneules et déduits du dédoublement d'unités, ils ne se distinguent pas particulièrement en sondage, sauf parfois par un faciès d'« ankéritisation » ou par une concentration d'exsudats de quartz.

Les terrains carbonatés du Trias moyen (Photo 6) qui affleurent dans la terminaison orientale du secteur SMA constituent à cet endroit deux écailles inclinées vers l'Est en contact basal anormal avec les terrains quartzitiques du Trias inférieur. Ce contact anormal tronque la série quartzitique et présente un caractère soustractif (Figure 8B) : les observations en forage et sur le terrain (Photo 8) indiquent que les carbonates reposent directement sur les terrains permo-triasiques : la formation triasique de quartzites francs a donc été soustraite par ce plan de décollement qui prend alors la valeur d'un "plan de détachement" (« Détachement d'Aussois »). La composante globale de cisaillement déduite de ces observations (en forage et sur le terrain) indique un abaissement général des séries carbonatées vers le SSE.

À noter enfin que les terrains quartzitiques présentent dans le secteur Modane-Avrieux (le long de la route Modane-Aussois) un pendage vers le Sud résultant d'un plissement E-W tardif.

3.3.6.2. Du secteur d'Avrieux au vallon d'Etache

À l'Est d'Avrieux et jusqu'à l'aplomb du vallon d'Etache (linéaire de près de 7 km), le tunnel en projet se poursuit sous la nappe des Schistes Lustrés en position superficielle (massif de Longe Côte), au sein de terrains très gypseux (anhydritiques) constituant

l'unité de la « Nappe des gypses », et de terrains briançonnais de couverture, quartzitiques et carbonatés de « l'Unité de l'Esseillon » (Figure 9). Une pellicule de sédiments carbonatés et schisteux s'intercale à la base de la Nappe des gypses, ils constituent « l'Unité des Lozes », nouvellement identifiée.

La géologie profonde de ce secteur, sous le Massif de Longe Côte, était très mal connue avant la réalisation des reconnaissances pour le tunnel ; le substratum des Schistes Lustrés était représenté sous la simple forme d'une nappe de gypses homogène (Figure 2). Plusieurs sondages profonds subverticaux (en grande partie carottés) et un sondage dirigé (SDET) de très grande longueur (2 950 m dont 172 m carottés) réalisé depuis le vallon d'Etache ainsi que des levés détaillés spécifiques autour du massif de Longe Côte ont permis, en partie par projection et extrapolation, de décrypter la géologie complexe du massif dans son ensemble et notamment à la cote du tunnel (Figure 9). Dans le détail, la structuration de ce secteur masqué reste cependant encore mal contrainte.

Trois unités sont distinguées le long de ce tronçon (Figure 9 et Figure 10).

L'unité de la **Nappe des gypses** (tNG) est recoupée dans la partie ouest du secteur sur une longueur prévisionnelle d'ordre kilométrique et plus à l'Est sur moins d'un km (entité mise en évidence par le sondage dirigé SDET). Elle est constituée principalement d'anhydrite (gypse en surface) mais comprend de nombreuses intercalations fines à parfois épaisses de calcaires et dolomies (éventuellement schistes ou calcschistes). Il est à noter que ces intercalations carbonatées étaient pour la plupart interprétées en terme d'écailles tectoniques, elles sont aujourd'hui considérées comme partie intégrante de la stratigraphie de la Nappe des gypses. Les masses de gypse de cette unité sont bien visibles dans le paysage (Photo 7) et tout le long de la route qui relie Modane à Termignon. Les intercalations calcaires et dolomitiques peu épaisses, bien visibles à l'affleurement, sont largement fragmentées et boudinées au sein du gypse ductile sous l'effet de l'intense déformation interne qui a affecté l'unité. Les terrains de la Nappe des gypses s'affinent vers l'Est et laissent place à des cargneules sous les Schistes Lustrés près de la surface et à l'affleurement.

Le contact à l'Ouest de la Nappe des gypses avec les terrains briançonnais du tronçon SMA (décrits précédemment) est interprété comme une faille normale du fait de la position basse de la Nappe des gypses et la troncature des terrains carbonatés

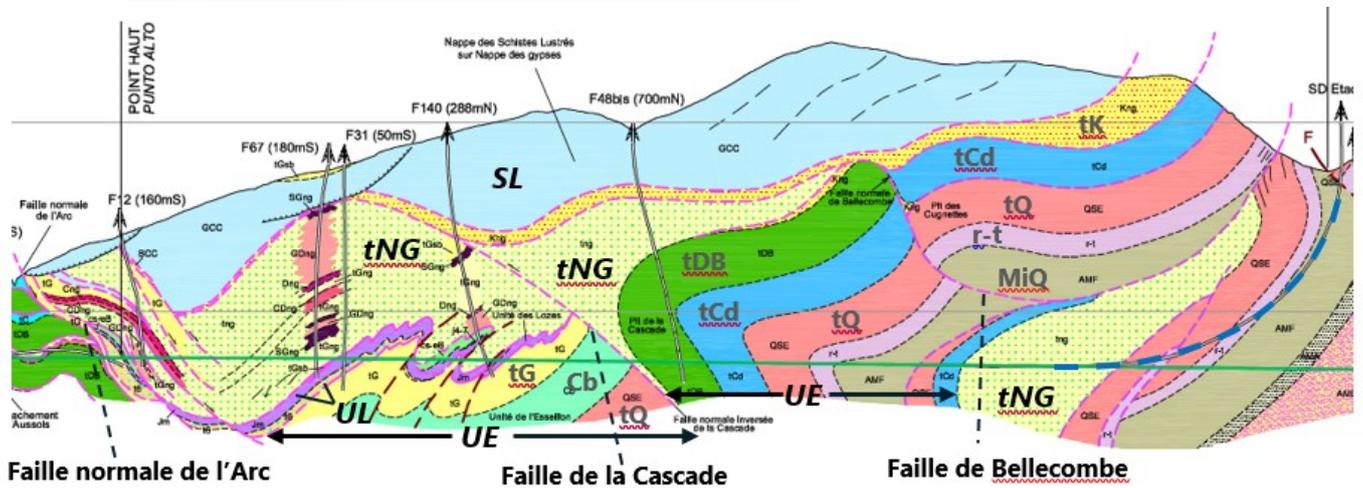


Figure 9 : Extrait du profil géologique à l'aplomb du massif de Longe Côte et de la Nappe des Schistes lustrés. Sous les Schistes lustrés liguro-piémontais (SL), trois unités tectoniques distinctes sont distinguées : la Nappe des gypses (tNG), l'Unité piémontaise des Lozes (UL) et l'Unité briannonnaise de l'Esseillon (UE) ; MiQ = Micaschistes quartzitiques (Permo-Trias ?), r-t = Permo-Trias quartzitique et phylliteux, tQ = Quartzites du Trias inférieur, tCd = Calcaires et dolomies triasiques (Anisien-Ladinien), tDB = Dolomies triasiques (Ladinien sup.), tG = Couverture carbonatée indifférenciée, tK = gypse et anhydrite triasiques ; tK = cargneules. Le contenu détaillé de l'Unité des Lozes et de la Nappe des gypses est présenté sur la figure 10. Le sondage dirigé SDET est représenté par un tireté bleu épais. Tunnel = axe vert. Longueur de la coupe présentée : ~ 7 km

Figure 9: Extract from the geological profile at the right of the Longe Côte massif and the Schistes Lustrés Nappe. Under these nappes (SL), three distinct tectonic units are distinguished: the Gypsum Nappe (tNG), the Lozes Unit (UL) and the Esseillon Unit (EU) ; MiQ = Quartz micaschists (Permo-Trias ?), r-t = Quartzitic and phyllitic Permo-Trias, tQ = Lower triassic Quartzites, tCd = Triassic limestones and dolomites (Anisien-Ladinian), tDB = Triassic dolomites (Upper Ladinian), tG = Undifferentiated carbonate cover, tK = Triassic gypsum and anhydrite ; tK = cargneules. The detailed content of the Lozes Unit and the Gypsum Nappe is presented on figure 10. A thick blue dashed line represents the SDET directed borehole. Tunnel = green axis. Length of the section : ~ 7 km.

briannonnais par la masse évaporitique de la Nappe des gypses (Figure 8 et Figure 9). Cette « faille normale de l'Arc » est à relier avec le plan tapissé de cargneules qui souligne le versant entre Aussois et Sardières et que nous apparaît comme un plan de détachement majeur qui rabaisse vers le Sud-Est l'ensemble des Schistes lustrés – Nappe des gypses.

L'Unité des Lozes (UL), nouvellement définie dans le cadre des reconnaissances, est constituée d'une base de gypse du Trias supérieur surmonté d'une épaisse formation dolomitique norienne et de calcaires et marbres du Jurassique et du Crétacé (Figure 10). Au niveau du tunnel, seuls les calcaires du Jurassique semblent avoir été recoupés, sur une faible épaisseur mais de manière répétée du fait de l'existence probable de plis et de failles inverses secondaires. Cette unité pourrait être apparentée à la nappe de la grande Motte compte tenu de la présence probable du Lias qui la compose.

L'Unité briannonnaise de l'Esseillon (UE) représente un linéaire important du tunnel (~ 3 km). Elle est faite d'une base de micaschistes conglomératiques de la série du Massif d'Ambin (voir plus loin) et d'une succession « classique » et épaisse de terrains quartzitiques permo-triasiques, de quartzites francs puis de calcaires et dolomies du Trias moyen. Cette série est en partie tectoniquement redoublée avec intercalation de la Nappe des gypses et affectée d'un mégapli en « genou » bien visible dans le paysage à l'écart du massif de Longe Côte (Photo 7). À noter que des terrains rapportés à la série du Massif d'Ambin (voir plus loin) sont intercalés au sein de l'unité de l'Esseillon.

Plusieurs failles sont déduites le long du tronçon Avrieux – Vallon d'Etache, notamment les failles de la Cascade et de Bellecombe (Figure 9). Ces failles sont géométriquement associées à des mégaplis. L'ensemble traduit un mouvement inverse vers le NW mais l'observation sur le terrain de critères de mouvements normaux (Photo 8) nous fait dire que ces failles inverses et les plis associés résultent probablement d'un mouvement d'inversion le long de failles normales antérieures.

3.3.6.3. Le massif d'Ambin

Depuis l'aplomb du vallon d'Etache et jusqu'à la frontière italienne (sur près de 10 km), le tunnel traverse le Massif d'Ambin sous les plus fortes épaisseurs de couverture rocheuse du projet (localement > 2 000 m) (Figure 11). Ce Massif représente la partie orientale de la Zone briannonnaise interne, il forme un dôme structural qui apparaît en fenêtre (15 km x 20 km environ) sous les Schistes lustrés liguro-piémontais (Figure 1) ; il est classiquement divisé en un socle ancien anté-alpin et anté-carbonifère et une couverture post-hercynienne (voir par exemple notice de la carte géologique de



Photo 7 : À gauche, falaise de gypse de la Nappe des gypses à proximité de Bramans ; à droite, vue panoramique vers le Nord et le massif/unité de Bellecombe : on distingue notamment le pli de la Pointe de Bellecombe marqué par la barre de quartzite (tQ) et la faille normale de Bellecombe (en bleu). En arrière-plan, les Schistes Lustrés reposent tectoniquement à la fois sur l'Unité des Gypses, qu'ils biseautent, et sur l'Unité de Bellecombe. En jaune, une faille tardive NE-SW.

Photo 7 : On the left, gypsum cliff of the Nappe des gypses near Bramans; on the right, panoramic view towards the North and the Bellecombe massif (unit): we can see in particular the fold of the Pointe de Bellecombe marked by the quartzite cliff (tQ) and the j3 normal fault (in blue). In the background, the Schistes Lustrés rest tectonically both on the Gypsum Unit, which they bevel, and on the Bellecombe Unit. In yellow, a late NE-SW fault.

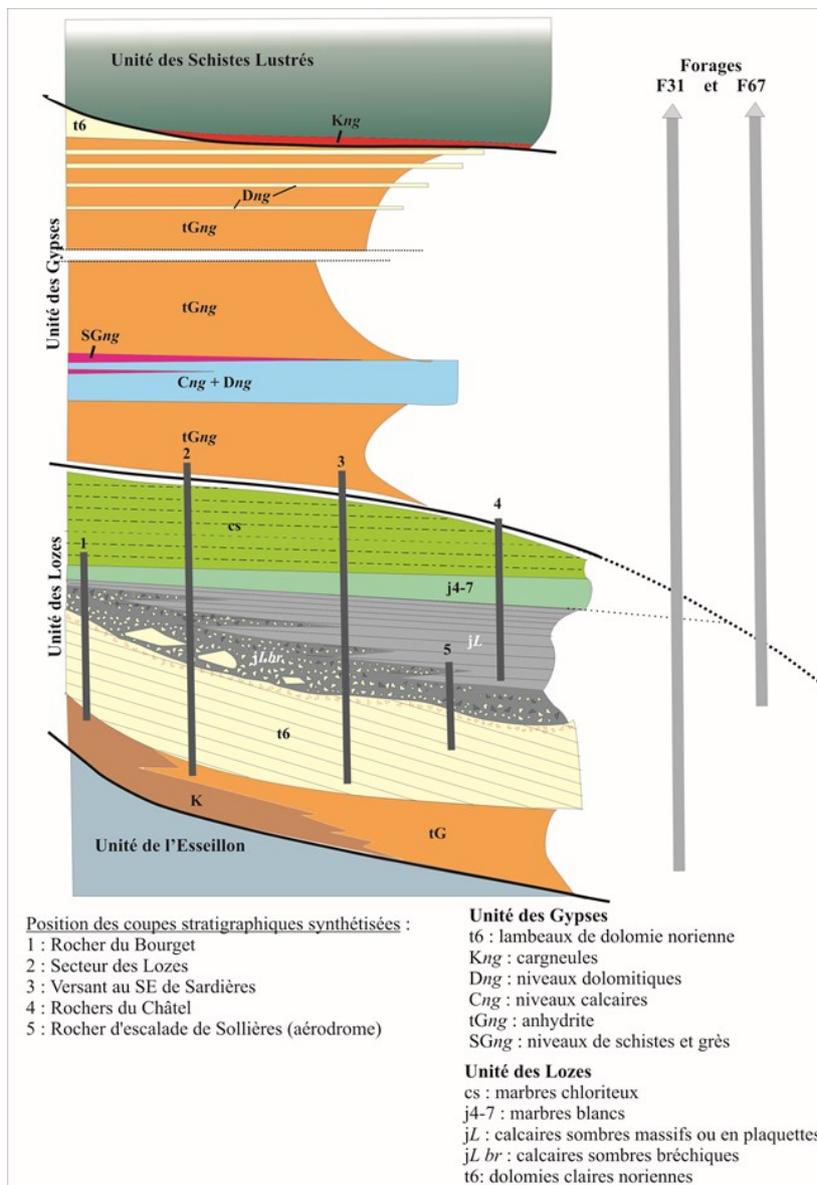


Figure 10 : Représentation synthétique de la succession tectonique (Unités de l'Esseillon, les Lozes et des Gypses) et stratigraphique observée sous la nappe des Schistes Lustrés.

Figure 10: Synthetic representation of the tectonic and stratigraphic succession observed below the Schistes Lustrés nappe.

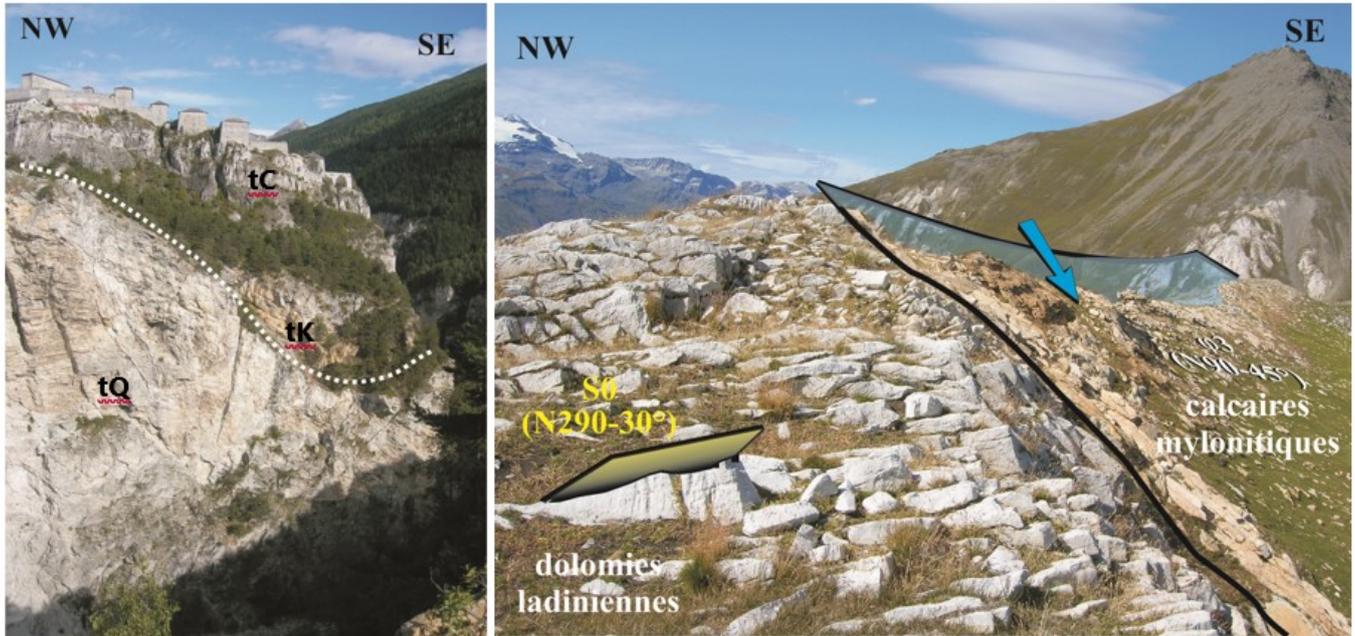


Photo 8 : Exemples de failles normales mises en évidence à l’affleurement. A gauche : Contact tectonique soustractif entre les quartzites (tQ) et les calcaires anisiens (tC). Ce contact (« Détachement d’Aussois »), marqué par un niveau de cagneules (tK), soustrait la base des calcaires anisiens. Fort Victor-Emmanuel, rive droite de l’Arc. **A droite :** dolomies ladinienes recoupées par la faille normale de Bellecombe jalonnée par des calcaires mylonitisés (calcschistes bréchiques crétaqués). Le compartiment oriental est abaissé (col des Archettes, en haut à droite : le Mont-Froid).

Photo 8 : Examples of normal fault highlighted on the field. Left: Subtractive tectonic contact between quartzites (tQ) and Anisian limestones (tC). This contact (“Aussois detachment”), marked by cagneules (tK), subtracts the base of the Anisian limestones. Fort Victor-Emmanuel, right bank of the Arc. **Right:** Ladinian dolomites intersected by the normal Bellecombe fault punctuated by mylonitized limestones (Cretaceous brecciated calcschists). The eastern compartment has collapsed (Col des Archettes, top right: Mont-Froid).

Lanslebourg-Mont d’Ambin, Fudral *et al.*, 1994). Ces deux ensembles sont identifiés selon des termes variables suivant les auteurs et les époques ; sur le profil longitudinal TELT, le socle ante-alpin a d’abord été désigné sous le terme de Socle ou Groupe de Clarea (en référence aux anciens auteurs italiens) puis de Complexe de Clarea dans la dernière version du profil ; les différents membres de la couverture du socle sont regroupés sous l’appellation de Groupe ou Complexe d’Ambin. Le terme de groupe nous paraît dans ce dernier cas plus adapté dans la mesure où il comprend une succession stratigraphique de formations métasédimentaires ou métavolcano-sédimentaires ayant subi une histoire tectonique commune.

Depuis l’Ouest, le tunnel traverse d’abord les terrains de couverture du Groupe d’Ambin sur moins de 2 km ; ces terrains ont été ré-étudiés à l’affleurement de manière très détaillée (travaux de J. Ganne à la suite de Ganne, 2003) et en sondage : partie supérieure du sondage dirigé d’Etache (SDET) et sondage « incliné » (trajectoire courbe) F30-F30bis. Il s’agit essentiellement de micaschistes quartzitiques et de gneiss albitiques, de teinte claire, répartis au sein de plusieurs formations (Figure 11). Ces terrains ont été longtemps rapportés au Permien mais au moins une partie d’entre eux seraient plutôt « permotriasiques » ; la présence au sein de cette couverture mais au-dessus du niveau du tunnel d’un conglomérat quartzitique et phylliteux similaire au Conglomérat de Loutraz (secteur de Modane) va dans ce sens. Ces

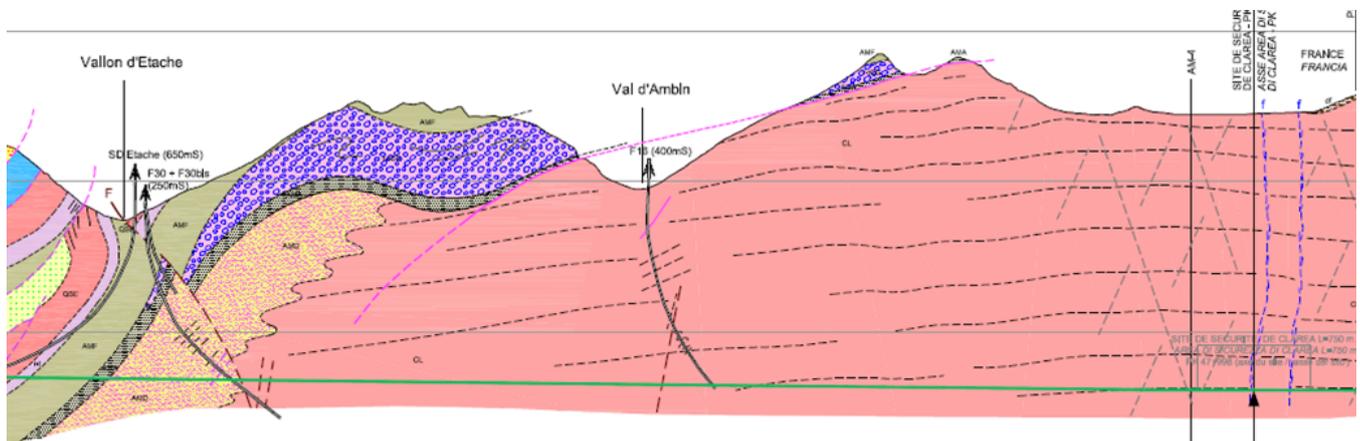


Figure 11 : Extrait de la coupe géologique, à travers le Massif d’Ambin depuis l’aplomb du vallon d’Etache jusqu’à la frontière franco-italienne (limite à droite de la figure). Trait vert = tracé du tunnel. Longueur de l’extrait : ~ 9 km.

Figure 11: Extract of the long geological profile, through the Ambin Massif from the base of the Etache valley to the Franco-Italian border (lon the right of the figure). Green line = tunnel layout. Length of extract : ~ 9 km.

terrains du Groupe d'Ambin marquent le flanc ouest du dôme d'Ambin et présentent une structuration d'ensemble assez simple à l'échelle du profil en long, selon un pendage fort vers l'Ouest. Dans le détail, à l'échelle de l'affleurement, la structuration intime parfois très complexe est observée sous forme de schistosité(s) et de plis associés.

Le contact avec le socle ou complexe de la Clarea est marqué par une zone de déformation plus ou moins intense et en partie soulignée par des schistes mylonitiques quartzo-chloriteux à (hydr) oxydes.

Le Socle de Clarea constitue l'essentiel du Massif d'Ambin ; il est assez bien connu en surface (voir notice de la carte géologique Lanslebourg et références citées) ; il a été traversé en forage par la partie inférieure du F30-F30 bis et tout le long du F16 (réalisé depuis le Val D'Ambin sur une longueur de 1 520 m, ce qui en fait le sondage non dirigé (la déviation observée n'était pas voulue) le plus long du projet). Ce socle apparaît peu reconnu en sondage au regard du volume qu'il représente et du linéaire concerné par le tunnel (près de 8 km en France) mais ce constat est à nuancer par le fait que ce socle apparaît relativement homogène. *A noter par ailleurs que ce socle est également reconnu par la galerie de reconnaissance de la Maddalena depuis l'Italie : ces résultats ne sont pas exposés ici.*

Ce socle est constitué principalement de micaschistes gris assez sombres et souvent bleutés (abondance d'amphibole sodique de type glaucophane), +/- zébrés de veines de quartz (plus rarement calcite) dans lesquels s'intercalent des lentilles de gneiss chlorito-albitiques et des niveaux d'amphibolite boudinés. Des faciès plus occasionnels peuvent être rencontrés (un banc de marbre saccharoïde observé).

Ce socle principalement micaschisteux présente des paragenèses minérales ante-alpines (à biotite et grenat) partiellement préservées à l'écart de zones de cisaillement (mylonitiques) alpines. La foliation principale du socle, pénétrative mais plus ou moins visible à l'œil nu, est globalement subhorizontale.

Aucune faille majeure n'est mise en évidence ou soupçonnée jusqu'à présent au sein du Massif d'Ambin. La présence d'un ou plusieurs contacts tectoniques majeurs est très vraisemblable à la base du Massif d'Ambin, mais sans doute à très grande profondeur, en dessous du niveau du tunnel de base.

3.3.7. Conclusions

Les études et reconnaissances réalisées pour le compte de TELT le long du tracé du tunnel du Mont-Cenis en projet ont permis, à partir principalement d'études de terrains ciblées et de nombreux sondages profonds, complétés des données de descenderies, de réinterpréter la structure géologique d'un long transect des Alpes occidentales françaises, à l'échelle des premiers hectomètres et jusqu'à 1-2 km de la partie supérieure de la croûte terrestre.

Si le long d'une partie du transect, la structuration représentée est assez proche de celle reportée par les auteurs précédents (Zones ultradauphinoise, subbriançonnaise et Briançonnaise houillère), dans plusieurs secteurs, la réinterprétation proposée s'avère tout à fait nouvelle. C'est le cas pour la Zone briançonnaise interne et la Zone de la Nappe des gypses :

- au sein de la Zone briançonnaise interne, une structuration complexe, contrastée d'Ouest en Est et polyphasée, est mise en évidence dans le secteur Sapey-Modane-Avrieux : de part et d'autre de l'anticlinal majeur du Râteau d'Aussois en position centrale de ce secteur, on identifie à l'Est,



Photo 9 : À gauche, la Roche d'Etache constituée sur sa partie supérieure affleurante de terrains appartenant au Groupe d'Ambin (photo Altituderando.com). À droite, affleurement de micaschistes sombres à veines de quartz du Socle de la Clarea.

Photo 9: On the left, the Roche d'Etache consisting of land belonging to the Ambin Group on its upper outcrop (photo Altituderando.com). Right, outcrop of dark micaschists with quartz veins from the Clarea basement.

une structuration précoce de phase 1 en chevauchements vers l'Ouest selon des géométries de type « rampes et plats », et à l'Ouest, une succession d'écailles et de plis associée à une tectonique de phase 2 décrochante et *rétrochévauchante* vers l'Est;

- à l'Est du secteur Sapey-Modane-Avrieux, une interprétation structurale globale est proposée pour le tronçon du projet correspondant à la zone de la Nappe des gypses, stratigraphiquement et structuralement très mal connue jusqu'à présent. Une nouvelle unité (Unité des Lozes) rapportée au domaine piémontais est individualisée sous la Nappe des gypses.

Une importante tectonique en faille normale est par ailleurs mise en évidence ou précisée au sein du Briançonnais interne et de la zone de la Nappe des gypses.

Les études de reconnaissances le long du transect ont également permis de reprendre ou préciser la lithostratigraphie de la Zone ultradauphinoise, de la Nappe des gypses et de l'Unité piémontaise nouvellement identifiée (Unité des Lozes).

Enfin, les observations de surface couplées aux observations en sondage et en descenderie ont permis de confirmer le fait que les cargneules qui soulignent des accidents chevauchants en surface laissent place en profondeur à une brèche anhydritique et correspondent ainsi à un faciès issu de l'altération météorique de cette dernière.

Remerciements et crédits

Le profil en long géologique présenté dans cet article est issu principalement du travail d'observation (sondages et terrain), d'interprétation et de synthèse de T. Baudin (Zone briançonnaise interne, Nappe des gypses, Massif d'Ambin), E. Egal (Zone sub-briançonnaise, Zone briançonnaise interne), Y. Callec (Zone ultradauphinoise), Y. Gros et Y. Siméon (Zone houillère). S. Gabalda, pendant sa Thèse, et son encadrant D. Mercier (Armines) ont également contribué à ce travail de synthèse. Au sein du secteur Sapey-Modane-Avrieux, G. Courrioux et P. Calcagno (BRGM) ont réalisé localement une modélisation 3D d'une zone structuralement complexe secteur-clé afin d'aider au dessin de la carte géologique.

Nous remercions également S. Fudral et S. Schwartz pour leur travail de relecture du manuscrit. Leurs remarques et commentaires ont permis d'améliorer significativement la présentation et le contenu de l'article.

BIBLIOGRAPHIE

- Agard P., Lemoine M.** (2003) – Visages des Alpes : structure et évolution géodynamique. Commission de la Carte géologique du Monde, 50 p.
- Aillères L.** (1996) - Structure et Cinématique de la Zone Houillère Briançonnaise entre Arc et Isère (Alpes françaises) : Apport de l'Inversion des Données de la Déformation Finie aux Modèles Cinématiques Classiques Tectonique. Thèse, INPL, Nancy, 137 p. et annexes.
- Barbier R.** (1948) - Les zones ultradauphinoise et subbriançonnaise entre l'Arc et l'Isère. *Mém. Carte géol. Fr.*, thèse, 291 p.
- Barbier R. et al.** (1977) – Carte géol. France (1/50 000), feuille St-Jean-de-Maurienne (774). Orléans : BRGM. Notice explicative par Barféty J.-C. *et al.* (1977).
- Barféty J.-C. et al.** (2005) - Carte géol. France (1/50 000), feuille Névache – Bardonecchia – Modane (799). Orléans : BRGM. Notice explicative par Barféty J.-C. *et al.* (2006).
- Bertrand J.-M., Aillères L., Gasquet D., Macaudière J.** (1996) - The Pennine Front zone in Savoie (western Alps), a review and new interpretations from the Zone Houillère Briançonnaise. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 89, 297-320.
- Bertrand J.-M., Pidgeon R.T., Leterrier J., Guillot F., Gasque, D., Gattiglio M.** (2000) - SHRIMP and IDTIMS U-Pb zircon ages of the pre-Alpine basement of the Internal Western Alps (Savoy and Piemont). *Schweiz. Mineral Petrogr. Mitt.*, 80, 225-248.
- Ceriani S.** (2001) - A combined study of structure and metamorphism in the frontal penninic units between the Arc and Isère valleys (Western Alps): Implications for the geodynamic evolution of the Western Alps. Inauguraldissertation, Bale, 181 p.
- Crouzet C., Nicoud G., Fudral S., Rampnoux J.-P., Dzikowski M., Paillet A., Lacombe P.** (1999) - Contrôle du remplissage détritique Tardiglaciaire à Holocène d'une haute vallée alpine par les dynamiques de versant : l'exemple de la moyenne Maurienne (Savoie), *Quaternaire*, 10, 37-48.
- Debelmas J. et al.** (1980) - Carte géol. France (1/250 000), feuille Annecy (30). Orléans : BRGM. Notice explicative par Debelmas J. *et al.* (1979).
- Debelmas J. et al.** (1988) - Carte géol. France (1/50 000), feuille Modane (775). Orléans : BRGM. Notice explicative par Debelmas J. *et al.* (1989).
- Détraz G.** (1984) - Étude géologique du bord interne de la zone houillère briançonnaise entre la vallée de l'Arc et le massif de Péclet-Polset (Alpes de Savoie). Thèse 3^{ème} cycle, Grenoble, 207 p.
- Fabre J.** (1961) - Contribution à l'étude de la zone houillère en Maurienne et en Tarentaise (Alpes de Savoie). *Mém. B.R.G.M.*, n°2, 315 p.
- Fudral S. et al.** (1994) - Carte géol. France (1/50 000), feuille Lanslebourg – Mont-d'Ambin (776). Orléans : BRGM. Notice explicative par Fudral S. *et al.* (1994).
- Ganne J.** (2003) - Les dômes de socles HP-BT dans le domaine Pennique des Alpes nord-occidentales (massifs d'Ambin et de Vanoise sud) : modalités de leur exhumation. Thèse de doctorat, Université de Savoie, 338 p.
- Gidon M.** – Site internet www.geol-alp.com.
- Jaillard E.** (1984) – Etude géologique des unités briançonnaises de Vanoise occidentale au Sud de Pralognan (Savoie). Thèse 3^{ème} cycle, Grenoble, 207 p.
- Mathieu E.** (2013) – Le creusement de la descenderie de Saint-Martin-de-la-Porte, p. 255-282. Manuel de mécanique des roches, tome IV, Coord. P.Duffaut. Comité Français de Mécanique des Roches.
- Monin N., Brino L., Darmendrail X.** (2011a) - Le projet ferroviaire Lyon-Turin – 20 ans d'études et de reconnaissances techniques pour la conception du tunnel de base, Géologie de l'ingénieur, Hommage à la mémoire de Marcel Arnould, Journée scientifique internationale, CFGI (Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement) et IAEG (International Association for Engineering Geology and the environment), Paris, 12 octobre 2011, pp. 25-40, Presse des Mines.
- Monin N., Brino L., Fabre F.** (2011b) - Du modèle géologique prévisionnel à la géologie excavée : exemple de la descenderie de Villarodin-Bourget/Modane (LTF), Congrès International AFTES 2011, Lyon, 17-19 octobre 2011
- Monin N., Brino L., Chabert A.** (2011) - Le tunnel de base de la nouvelle liaison ferroviaire Lyon-Turin : retour d'expérience des ouvrages de reconnaissance, Congrès International AFTES 2014, Lyon, 13-15 octobre 2014.

Mugnier J.-L. (1984) – Déplacements et déformations dans l'avant-pays d'une chaîne de collision. Méthodes d'études et modélisation. Exemples du Jura. Thèse Dr. Ing., Univ. Grenoble, 163 p.

Serre A. (1983) – Évolution géodynamique d'un secteur de la paléomarge tethysienne dans les Alpes occidentales : les unités à flysch paléogène de la région de Saint-Jean-de-Maurienne, Savoie – Alpes françaises. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. De Savoie, 180 p.

Strzeczynski P., Guillot S., Leloup P.H., Arnaud N., Vidal O., Ledru P., Courrioux G., Darmendrail X. (2012) – Tectonometamorphic evolution of the Briançonnais zone (Modane-Aussois and Southern Vanoise units, Lyon-Turin transect, Western Alps. *J. Geodynamics*, 56-57, 55-75.

Rapports et coupes géologiques TELT

Les rapports géologiques TELT dans lesquels sont présentées de manière plus détaillée les observations et données géologiques reprises dans cet article ne sont pas publics. De même pour les coupes géologiques réalisées le long du tracé du tunnel. Cependant, ces documents peuvent éventuellement être mis à disposition de manière formalisée (convention, accords de confidentialité, ...). Une demande dans ce sens peut être faite à TELT (carole.marty@telt-sas.com).

Les références des versions successives de la coupe géologique du projet sont les suivantes (Les coupes géologiques de 1996 et 2000 ne sont pas référencées selon la numérotation considérée ci-dessous) :

- Coupe géologique verticale le long du tracé (France – Italie ; T. Baudin, E. Egal, BRGM ; Y. Gros, Anteagroup ; S. Principi, Geodata) : APR-B2-TS2-0010-C (2007)
- Coupe géologique verticale le long du tracé du tunnel de base – côté France (T. Baudin, E. Egal, BRGM ; Y. Gros, Anteagroup ; G. Airoidi et G. Mancari, SEA) : PR-C3B-TS3-0006-B (2014)

Les mémoires originaux contenant l'essentiel des données présentées dans cet article sont les suivants :

- Mémoire géologique (côté France) de l'avant-projet de référence (T. Baudin et E. Egal, BRGM ; Y. Gros, Antea) : APR-B2-TS2-0040-C (2006)
- Annexes au mémoire géologique (côté France) de l'avant-projet de référence (T. Baudin et E. Egal, BRGM) : APR-B2-TS2-0044-C (2006)
- Levés géologiques et structuraux de la Zone ultra-dauphinoise [pour la mise à jour de l'avant-projet de référence] (Y. Callec et T. Baudin, BRGM): APR-GEO-ANT-4885-A (2007)
- Levés géologiques et structuraux de la Zone subbriançonnaise [pour la mise à jour de l'avant-projet de référence] (E. Egal, BRGM) : APR-GEO-ANT-4885-A (2007)
- Levés géologiques et structuraux de la Zone houillère [pour la mise à jour de l'avant-projet de référence] (Y. Gros et Y. Siméon, Antea) : APR-GEO-ANT-4882-A (2007)
- Levés géologiques et structuraux du secteur de la Nappe des Gypse [pour la mise à jour de l'avant-projet de référence] (T. Baudin, BRGM) : APR-GEO-ANT-4885-A (2007)
- Annexes au Mémoire géologique (côté France) du projet de référence (T. Baudin et E. Egal, BRGM ; Y. Gros, AnteaGroup, G. Airoidi, SEA) : PR-C3B-TS3-0003-C (2014)