

Élaboration d'un modèle géologique de structure anticlinale complexe : contribution aux études géotechniques d'un tracé routier et de ses ouvrages d'art (voie des Mercureaux, Besançon, est de la France)

Grégory BIÈVRE

Laboratoire régional des ponts et chaussées d'Autun

gregory.bievre@equipement.gouv.fr

■ RÉSUMÉ

La partie du contournement de Besançon nommée voie des Mercureaux traverse de part en part le faisceau bisontin, composé de formations triasiques et jurassiques plissées et fracturées. De nombreuses études géologiques et géotechniques soulignent la complexité du site. Une cartographie géologique détaillée entre deux ouvrages d'art, sur une distance d'environ 500 m au cœur de l'anticlinal des Mercureaux, est proposée, afin de localiser précisément les failles et d'estimer l'influence de niveaux évaporitiques du Trias sur la stabilité du tracé et des ouvrages. Une étude de terrain de détail a permis, d'une part, d'établir un log stratigraphique précis afin de pouvoir identifier les différentes unités marneuses présentes et, d'autre part, de cartographier une surface importante afin de comprendre l'organisation géologique au sein du vallon. La carte géologique établie est fondée sur la synthèse de données existantes (bibliographie, études géotechniques) ainsi que sur un travail de terrain et de laboratoire (analyse de faciès, mesures de pendages et de directions, paléontologie, analyse de forages et de diagraphies). La connaissance détaillée de l'organisation du secteur permet de disposer de données fiables pour le dimensionnement des ouvrages et du tracé, et rend compte des pièges géologiques comme les failles, duplex et micro-duplex, pouvant générer des instabilités, ainsi que la présence de gypse à faible profondeur pouvant induire des montées de fontis.

Development of a geological model describing complex anticlinal structures: contribution to the geotechnical studies on a road layout and engineering structures (the Mercureaux project in Besançon – eastern France)

■ ABSTRACT

The Besançon highway bypass project, known as the "Voie des Mercureaux", crosses in and out of what is referred to as the Besançon bundle, composed of folded and faulted Triassic and Jurassic formations. Many geological and geotechnical studies have depicted this site's complexity. A detailed geological mapping between two successive road structures, over a distance of approximately 500 m through the core of the Mercureaux anticline, will be proposed herein as a means for both accurately localizing fault lines and estimating the influence of evaporitic levels from the Triassic period on the stability of the road alignment and structures. An detailed field study has allowed to establish a precise stratigraphic log for identifying the various marly units present within the project area, as well as to map a large surface area in order to better understand the geological configuration within this short valley. The geological map produced is based on a synthesis of existing data (bibliography, geotechnical studies) along with a combined field and laboratory investigation (analysis of geological facies, dip and direction measurements, paleontology, analysis of boreholes and logs). A detailed knowledge of this sector's geological configuration yields reliable data for designing road structures and layout, in addition to detecting geological traps such as faults, duplex and micro-duplex, which are capable of generating instabilities, and the presence of shallow gypsum deposits capable of inducing (potential) collapses.

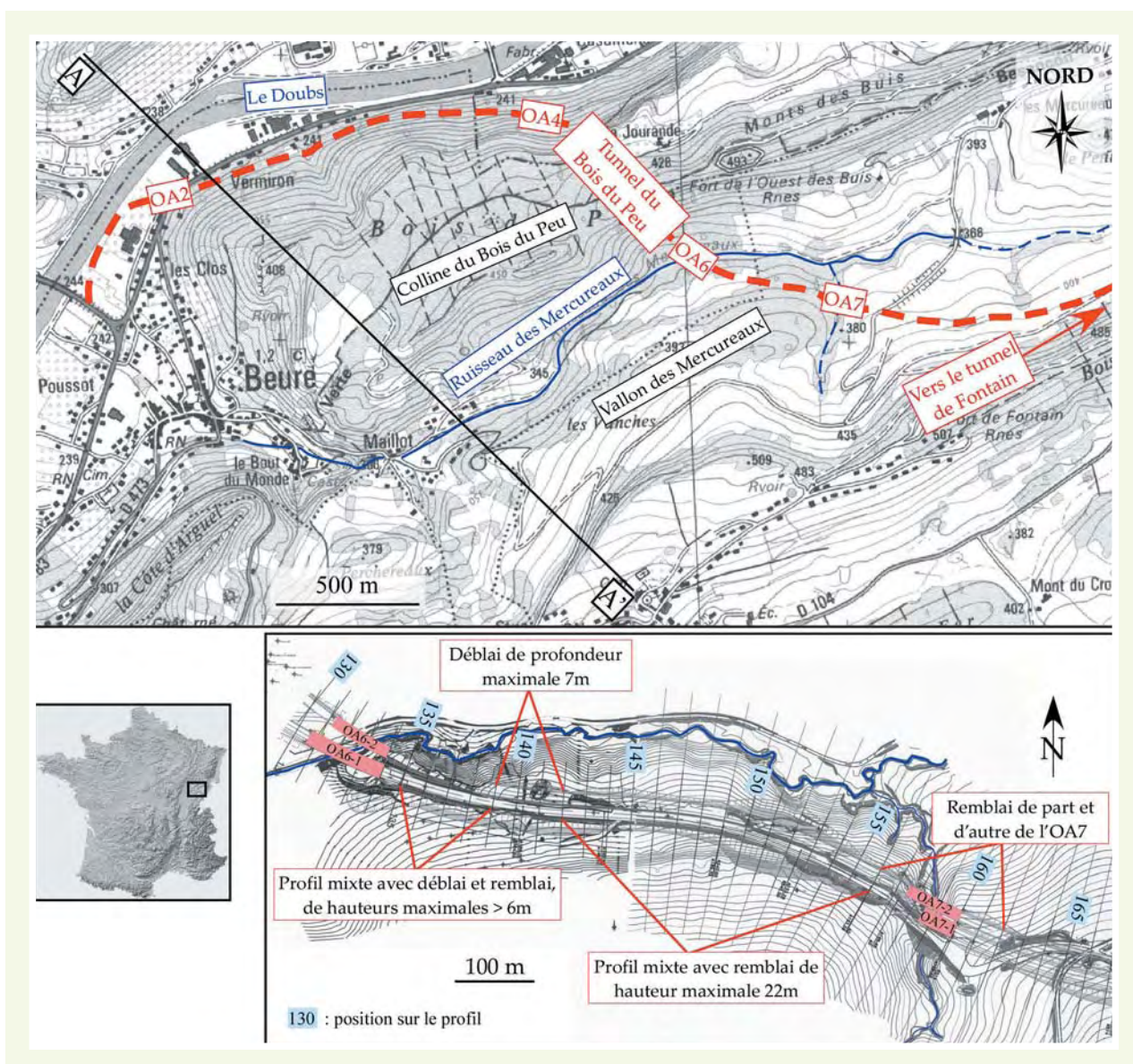
INTRODUCTION

La voie des Mercureaux est la rocade sud de Besançon. Cet aménagement à 2 x 2 voies débute à partir d'une section de la route nationale 273 située au nord-ouest de la commune de Beure. Le tracé surplombe ensuite la route nationale 83, traverse le Bois du Peu et le vallon des Mercureaux, se raccorde à la route départementale 104 au niveau de la commune de Vèze et finalement à la route nationale 57 au lieu-dit du Trou au Loup situé au sud-est de la commune de Morre. Le laboratoire régional des ponts et chaussées (LRPC) d'Autun réalise les études géotechniques de cette partie du contournement de Besançon pour le compte de la direction départementale de l'Équipement du Doubs (DDE 25).

Le travail exposé ici concerne une partie de la voie des Mercureaux, plus précisément la section comprise entre l'ouvrage d'art 6 (OA6) et l'ouvrage d'art 7 (OA7) qui sont des ouvrages doubles de deux voies chacun (**figure 1** ; l'OA6-1 est déjà construit). Cette section est divisible en plusieurs ouvrages de terrassement : un déblai de profondeur 7 m, un remblai et deux profils mixtes dont un avec remblai d'une hauteur de 22 mètres.

figure 1
Localisation géographique
du vallon des Mercureaux
et présentation
des ouvrages et des
sections de terrassement.

Dans la zone comprise entre les deux ouvrages d'art (OA6 et OA7), les conditions d'affleurement sont médiocres, tant en quantité qu'en qualité, de par la nature du *substratum* (principalement marneux), la présence d'une importante végétation ainsi que d'une couverture d'altération ; il a



donc été nécessaire de déborder du secteur propre de l'étude afin d'en comprendre l'organisation géologique. L'examen de ces formations, à des échelles variées (analyse de forages et de diagraphies, analyse de faciès et de microfaciès, déterminations paléontologiques et micropaléontologiques, relevés de pendages) apporte des informations nouvelles quant à leur organisation géométrique dans le vallon des Mercureaux. L'établissement d'un modèle géologique et géotechnique permet de dimensionner dans les meilleures conditions les deux ouvrages et d'appréhender l'ensemble des paramètres d'influence sur la stabilité du tracé. Notamment, il est possible de préciser la polarité des couches, la position et l'orientation des failles ainsi que la présence de niveaux de gypse et les instabilités potentielles qu'ils peuvent engendrer.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE DU PROJET

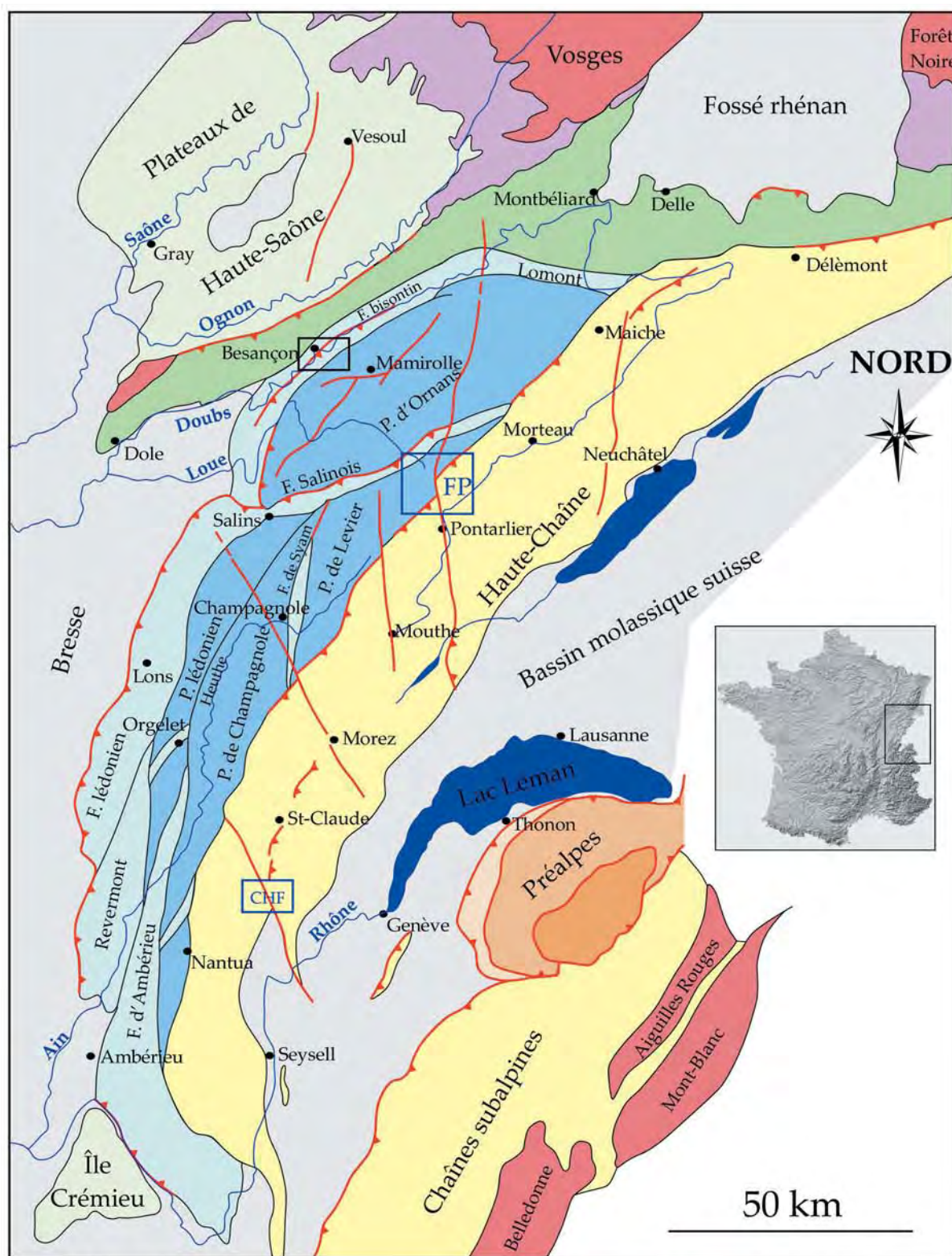
Le Jura est une chaîne de montagne arquée, ayant une extension latérale d'environ 350 km, qui se situe au nord-ouest (NW) du bassin molassique suisse. Le secteur d'étude se situe dans le Jura externe (**figure 2**), principalement composé de formations sédimentaires jurassiques où alternent des zones tabulaires peu déformées (les plateaux) et des bandes étroites allongées intensément plissées et fracturées (les faisceaux). Le faisceau bisontin constitue une de ces bandes, marquée par des plis et des chevauchements (*cf.* **figure 2**). Au niveau du secteur d'étude, il est orienté N045 ; il est bordé, au NW, par le plateau de Besançon et, au sud-est, par le plateau de Montrond (**figure 3**). Les déformations subies résultent du décollement, lors de la surrection des Alpes pendant le Cénozoïque, de l'ensemble de la série mésozoïque sur le *substratum* permo-carbonifère *via* la série argilo-évacaporitique du Trias [2]. Le Jura externe s'est alors mis en place selon trois phases classiquement admises [3-6] :

- une compression de direction nord-sud d'âge Éocène préstructure la plate-forme jurassienne ;
- à l'Oligocène, une distension est-ouest résulte en la création des fossés de Bresse et du Rhin ainsi que de petits fossés d'effondrement internes ;
- le paroxysme de la déformation s'effectue au Miocène, selon une compression du SE vers le NW. Cette phase se traduit par la formation des faisceaux qui se trouvent séparés par les plateaux. Les grandes failles méridiennes héritées jouent alors en décrochement sénestre, ce qui permet aux panneaux de coulisser et de définir un style tectonique « en relais » pour la chaîne jurassienne. D'après les relevés paléomagnétiques, cette translation s'est effectuée sans rotation notable des structures [7].

Les formations géologiques rencontrées dans le secteur d'étude, à l'exception des niveaux d'altération situés en surface, sont toutes sédimentaires et d'origine principalement marine. Elles sont datées du Trias et du Jurassique (Keuper à Aalénien). Succinctement, la série étudiée montre, suite à la pénéplénation du massif hercynien, l'installation d'une mer épicontinentale. Les variations de faciès observées indiquent des fluctuations du niveau marin depuis des environnements continentaux et/ou littoraux (Trias) qui sont surmontés par des niveaux transgressifs correspondant à des milieux de sédimentation carbonatée très peu profonds (calcaires à Gryphées sinémuriens), pour atteindre des environnements sédimentaires de bassin sous quelques centaines de mètres d'eau (schistes cartons et pélites argileuses du Toarcien). La mer se retire à la fin du Secondaire lorsque débute la surrection des Alpes.

MÉTHODES D'ÉTUDE

Les terrains qui composent le secteur de l'étude (tracé routier entre l'OA6 et l'OA7 ; *cf.* **figure 1**) comprennent des formations allant du Trias à la base du Toarcien. Le sous-sol constituant le *substratum* géologiquement en place est principalement marneux. Il se situe sous une couverture argileuse d'altération, pouvant atteindre 3 mètres, qui le recouvre sur la totalité de la zone d'étude. Les affleurements sont plutôt médiocres en termes d'extension et de qualité et il s'est avéré impossible de dresser une coupe continue de la série géologique étudiée. La première étape de ce travail a



- | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------|
| Dépressions tertiaires & quaternaires | Haute-Chaîne & chaînes subalpines | Massifs cristallins |
| Plateaux de Haute-Saône & Île Crémieu | Préalpes | Faille |
| Avants-Monts & collines préjurassiennes | Dépressions structurales triasiques | Chevauchement |
| Plateaux du Jura externe | | Secteur d'étude |
| Faisceaux plissés | | CHF Champfromier |
| | | FP Faille de Pontarlier |

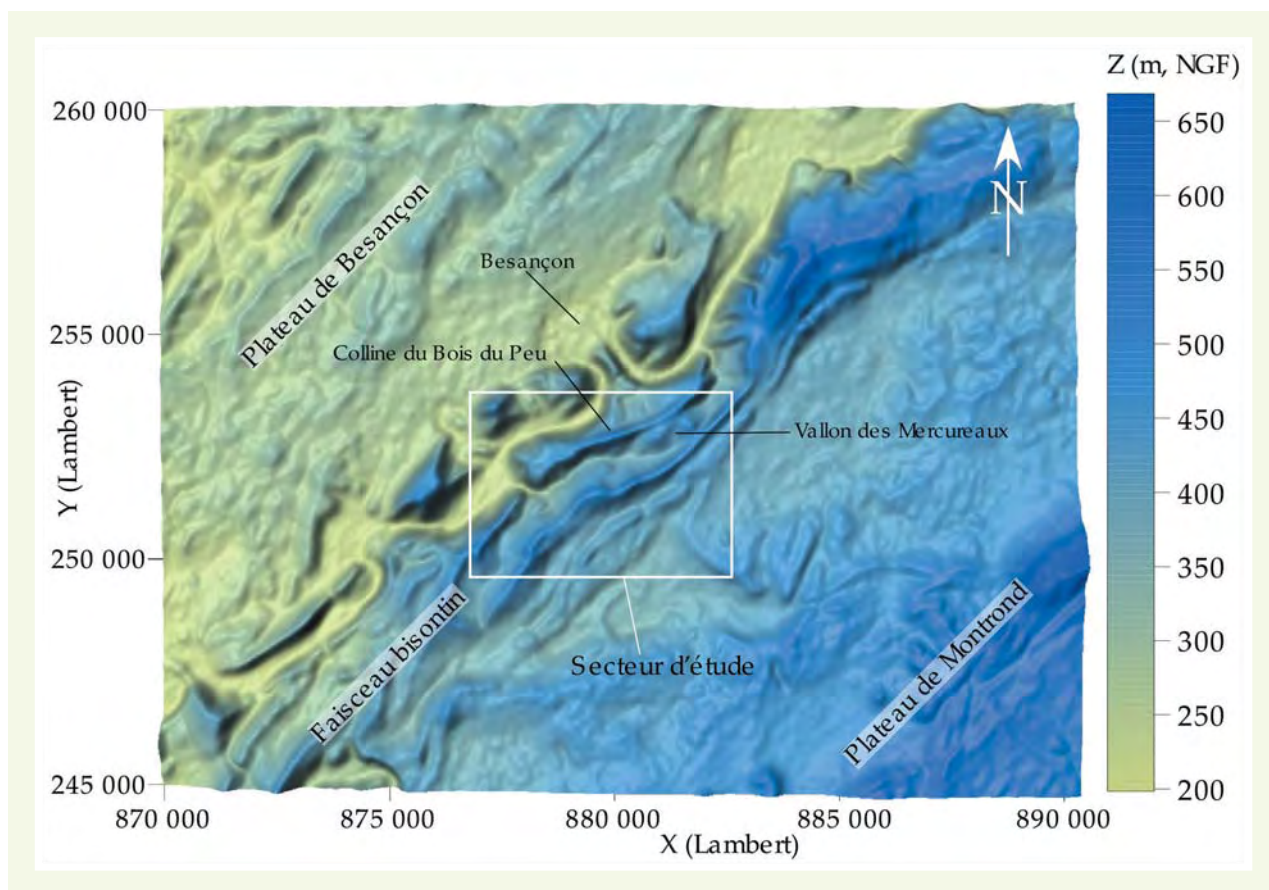


figure 2 (p. ci-contre)
Carte structurale du Jura
et des régions voisines,
adaptée de Chauve [1].

figure 3
Géomorphologie de la
région de Besançon. Le
faisceau plissé bisontin,
orienté N045, sépare
deux plateaux tabulaires
aux faibles variations
de relief et dont le plus
élevé topographiquement
se situe au SE. Les
données topographiques
proviennent de la
campagne Shuttle Radar
Topography Mission
(SRTM) effectuée par la
navette Space Shuttle
Endeavour en 2000.

consisté à définir une série lithostratigraphique la plus précise possible à partir de données issues de la littérature et d'études géotechniques précédentes.

La série adoptée pour cette étude regroupe plusieurs sources : carte géologique de Besançon à 1/50 000 [8], Blaison *et al.* [9] pour le Lias inférieur et le Carixien, Contini et Martin ([10] ; il faut noter que, dans cette étude, les auteurs se sont appuyés sur un levé cartographique au 2 000^e réalisé par un géologue du LRPC d'Autun) ainsi que les observations de terrain effectuées pour ce travail. Un utile complément peut être trouvé dans Meyer *et al.* [11], avec une description lithostratigraphique très complète du Trias et du Lias de l'Ain (région de Champfromier ; localisation sur la **figure 2**), qui sert ici d'élément de comparaison malgré la distance importante entre les deux sites : les descriptions de faciès, macro et microfaunes permettent la plupart du temps une très bonne analogie bien que les contextes paléogéographiques puissent différer (induisant d'éventuelles variations de faciès ainsi que des épaisseurs différentes des unités). Le log lithostratigraphique adopté est présenté sur la **figure 4**.

La faible densité d'affleurements disponibles dans le vallon a rendu difficile l'établissement d'une carte à une échelle de précision adaptée à l'infrastructure à implanter. Afin de comprendre au mieux l'organisation du vallon, il a été nécessaire de déborder du secteur précis d'étude, c'est-à-dire le tracé entre l'OA6 et l'OA7, et de définir la géologie de l'ensemble du faisceau bisontin dans la région de Beure.

Les méthodes utilisées pour construire la carte ont englobé une synthèse des données existantes (bibliographie, études géotechniques) ainsi qu'une étude de terrain et de laboratoire de détail (géomorphologie, analyse de faciès et de microfaciès, mesures de pendages, détermination de polarité des couches, paléontologie et micropaléontologie, analyse de forages, géophysique).

L'analyse des faciès consiste en la caractérisation des éléments constitutifs des échantillons représentatifs récoltés (éléments figurés, nature du ciment). Les roches consolidées (calcaires, grès, dolo-

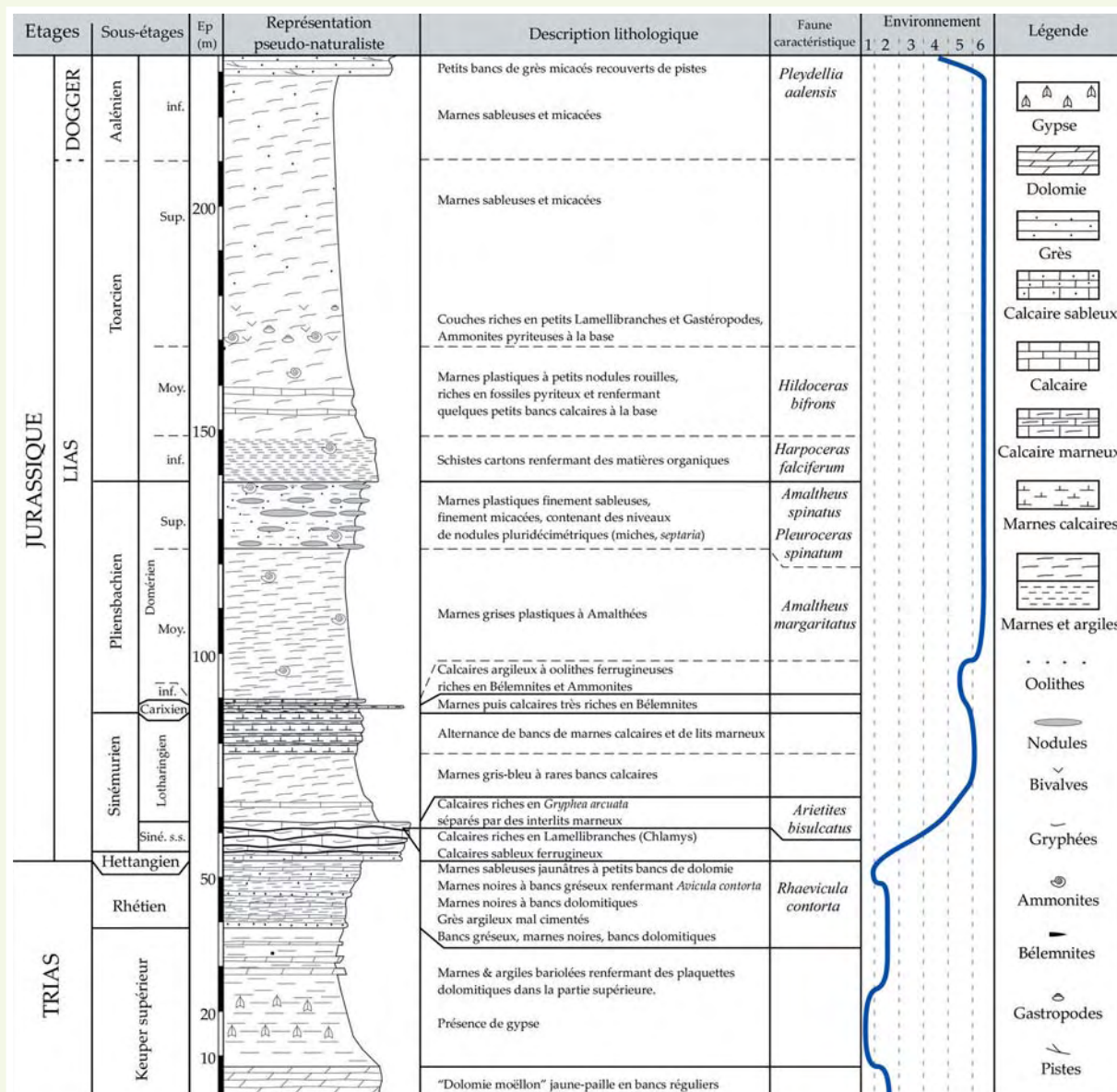


figure 4
Log lithostratigraphique
adopté, modifié d'après
Dreyfuss et Kuntz [8],
Blaison et al. [9] et
Contini et Martin [10].
Environnements de dépôt
adaptés de Meyer et al.
[11] (1 : continental ;
2 : estuaire, lacustre ;
3 : estran, plage ;
4 : plate-forme interne ;
5 : plate-forme externe ;
6 : talus, bassin).

mies) sont sciées puis analysées à l'aide d'une loupe binoculaire. Les roches meubles (marnes, argiles) sont lavées, séchées puis tamisées. Les différents refus sont analysés avec une loupe binoculaire. Le prélèvement et la détermination des microfossiles dans les différents refus de tamisage permettent de dater les échantillons.

La principale méthode géophysique employée pour ce travail est la diagraphie de radioactivité naturelle (RAN). La diagraphie de RAN est une mesure du rayonnement gamma naturel total émis par des particules radioactives (potassium, uranium et thorium). C'est généralement le potassium radioactif qui est détecté lors des mesures (sauf cas de gisement d'uranium ou bien d'argiles karstiques qui piègent les minéraux radioactifs). Le potassium radioactif est principalement contenu dans les argiles ; on peut aussi le trouver dans certaines roches et dépôts meubles riches en minéraux potassiques [12].

La mesure se fait au moyen d'une sonde, introduite dans le trou de forage sec ou non, tubé ou non, qui contient un compteur à scintillations enregistrant, pour un temps d'écoute et une vitesse de remontée de l'outil adaptés, le nombre de particules radioactives émises [13]. Les résultats se présentent sous la forme d'une courbe, appelée log, indiquant le nombre de particules radioactives émises, en coups par seconde (cps/s), en fonction de la profondeur dans le forage. Il s'agit d'une

méthode peu coûteuse qui permet l'enregistrement de plusieurs centaines de mètres de diagraphies par jour et permet ainsi de valoriser les sondages destructifs, généralement difficiles à exploiter pour des applications géologiques.

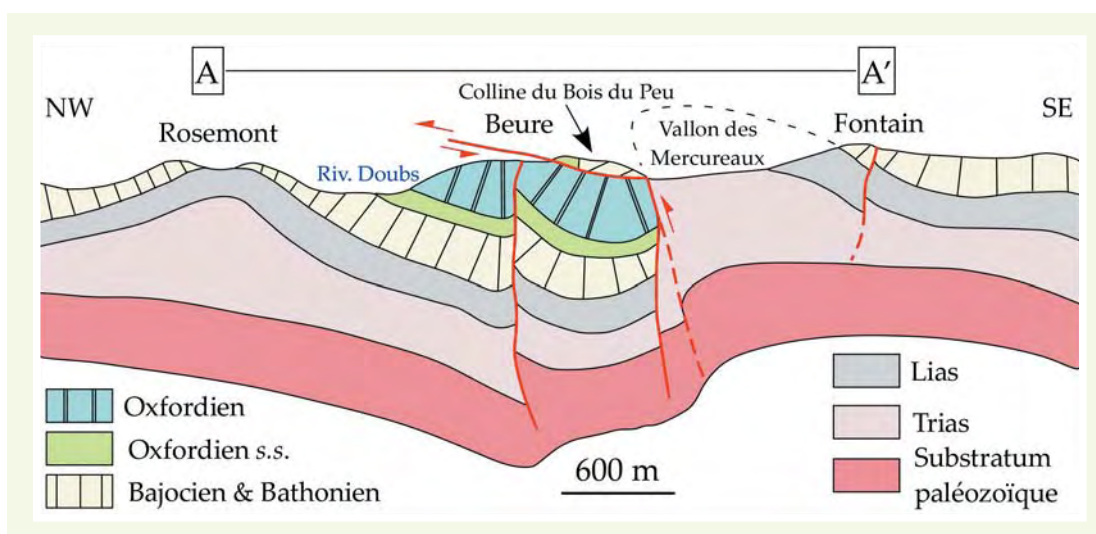
Dans la pratique, c'est la comparaison des allures relatives des logs qui permet éventuellement de dresser des corrélations géologiques entre forages, de suivre ainsi l'évolution latérale des formations et de calculer leurs pendages. Pour l'étude de l'OA4 de la voie des Mercureaux, par exemple, la construction du modèle géologique a été rendue possible principalement à partir des données de RAN [14]. Dans le contexte géologique du vallon des Mercureaux, les niveaux à faible teneur en minéraux radioactifs correspondent à des calcaires ou bien des grès et les niveaux à teneur relativement forte à des argiles. L'occurrence de niveaux à émission radioactive très faible peut éventuellement correspondre à du gypse.

Cette approche de terrain, menée conjointement avec un travail bibliographique et de laboratoire, a permis de construire, à partir d'une carte d'affleurements, une carte géologique interprétative qui recoupe l'ensemble du faisceau bisontin et qui couvre une surface d'environ 8 km². Dans le vallon, au niveau du tracé, cette carte a été dressée à l'échelle 1/500.

Le site constituant par ailleurs la localité de référence historique pour la notion de faille-pli, une structure tectonique complexe définie par Glangeaud ([15, 16] ; **figure 5**), une modélisation cinématique a été menée afin d'actualiser le modèle de mise en place du faisceau bisontin au niveau de la voie des Mercureaux. Les résultats seront présentés dans un article à venir [17].

figure 5

Coupe du faisceau bisontin à Beure selon Glangeaud [15, 16]. La position de la coupe AA' est matérialisée sur la figure 1. La structure anticlinale serait mise en place par le plissement d'une faille normale pré-existante réactivée pendant la phase compressive alpine.



RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

Par la suite, on propose de décrire et d'interpréter les affleurements rencontrés selon un cheminement de l'OA6 vers l'OA7, c'est-à-dire une direction moyenne de l'ouest vers l'est.

■ Du tunnel du Bois du Peu au ruisseau des Mercureaux

Depuis la tête de tunnel du Bois du Peu côté vallon jusqu'au ruisseau des Mercureaux (Loc. 1 sur **figure 6**), une série en polarité inverse appartient aux écaillés tectoniques du Bois du Peu de Glangeaud [15, 16]. Les formations géologiques rencontrées sont, du nord-ouest vers le sud-est, les marnes toarciennes [19] puis les marnes pliensbachiennes (le Domérien inférieur a été identifié immédiatement au nord du ruisseau des Mercureaux).

D'un point de vue structural, cette série en polarité inverse correspond, selon la définition de Glangeaud ([15, 16] ; **figure 5**), au flanc nord déversé et écaillé de l'anticlinal des Mercureaux

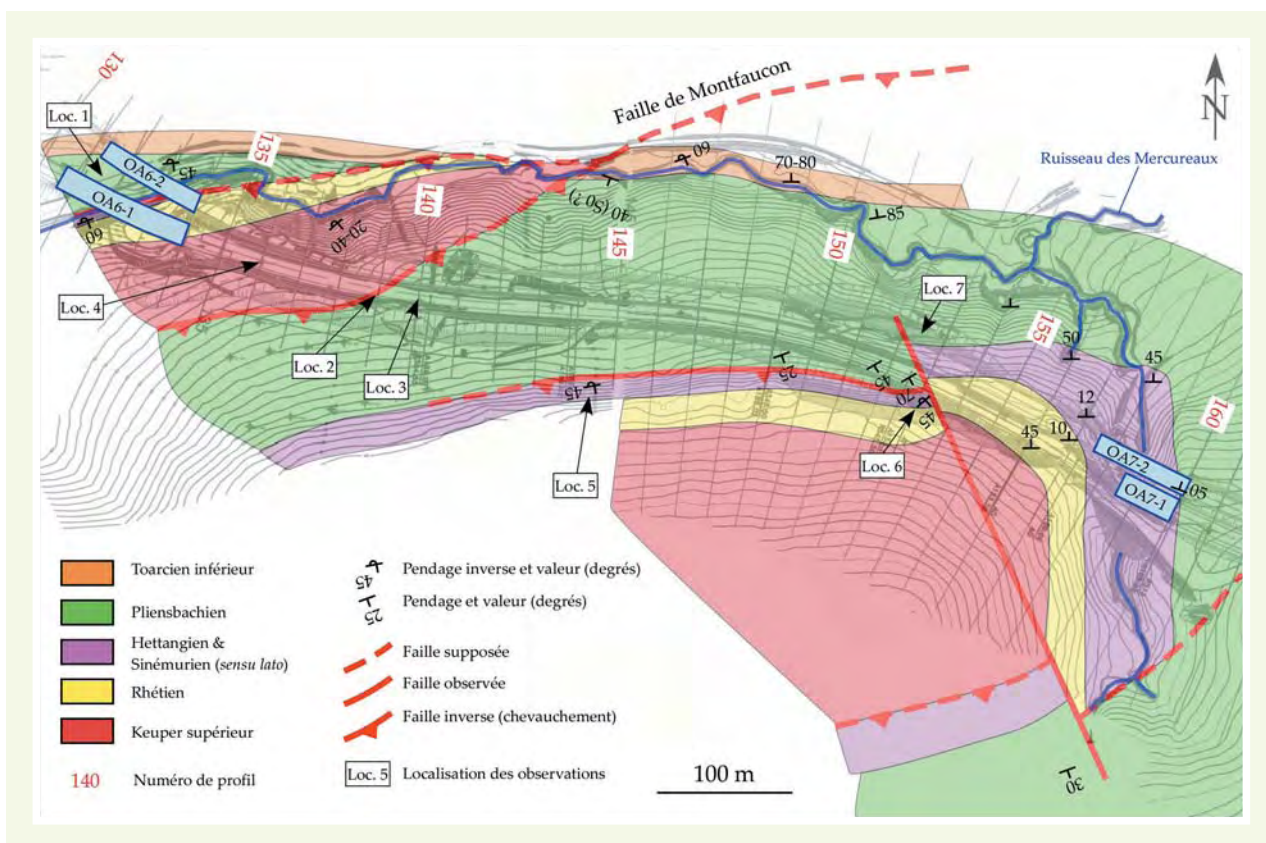


figure 6
Carte géologique
interprétative de la zone
OA6-OA7 ; modifié d'après
Dreyfuss et Kuntz [8] et
Guttierez [18].

Bièvre et Mercier [17] proposent ces écailles tectoniques comme des copeaux de charriage isolés (ou duplex) formés lors de la structuration du faisceau bisontin.

■ Profils 135 à 139

Le ruisseau des Mercureaux se situe au niveau de la faille de Montfaucon, accident chevauchant à pendage S-SE d'une valeur d'environ 45 à 60 degrés en surface (**figure 6**). Il est possible d'observer, en direction du S-SE, des niveaux d'âge sinémurien en polarité inverse, avec un pendage d'environ 60 degrés vers le sud (**figure 6**). En suivant le tracé en direction du tunnel de Fontain, on passe à des formations rhétiennes puis du Keuper supérieur, ces dernières étant caractérisées par des argiles de couleur lie-de-vin. Lorsque l'on suit la piste en direction de l'OA7, on trouve, au profil 139 (Loc. 2 sur **figure 6**), un contact anormal entre les argiles lie-de-vin du Trias et les marnes grises du Lias. L'association faunique récoltée dans ces derniers niveaux confirme un âge liasique des formations affleurantes (Bélemnites du Pliensbachien inférieur et Ammonites du Pliensbachien moyen, dont *Amaltheus margaritatus* [Loc. 3 sur **figure 6**]).

D'après ces observations, les niveaux triasiques à sinémuriens rencontrés ici constituent une écaille (c'est-à-dire duplex). Cette interprétation est appuyée par des observations de forage : une brèche de faille observée en forage (sondage carotté SC136-1 ; Loc. 4 sur **figure 6** [20]) sépare les marnes bariolées du Keuper (en bas) des marnes grises plienschachiennes (en haut). L'identification de ce contact tectonique montre un pendage dirigé vers le Nord. Ceci laisse penser qu'il pourrait s'agir d'une faille normale héritée de la phase distensive oligocène.

Des diagraphies de radioactivité naturelle (RAN) en forage au niveau de l'OA6 ont été réalisées, dans les sondages pressiométriques au niveau des appuis prévisionnels, lors des études géotechniques préliminaires et APS [21, 22]. L'implantation des sondages et la position des ouvrages sont matérialisés sur la **figure 7**.

L'analyse des logs de l'OA6 indique une impossibilité de corréler les sondages entre eux (**figure 7**). Les pendages des couches en surface étant compris entre 45 et 60 degrés vers le sud, il semble

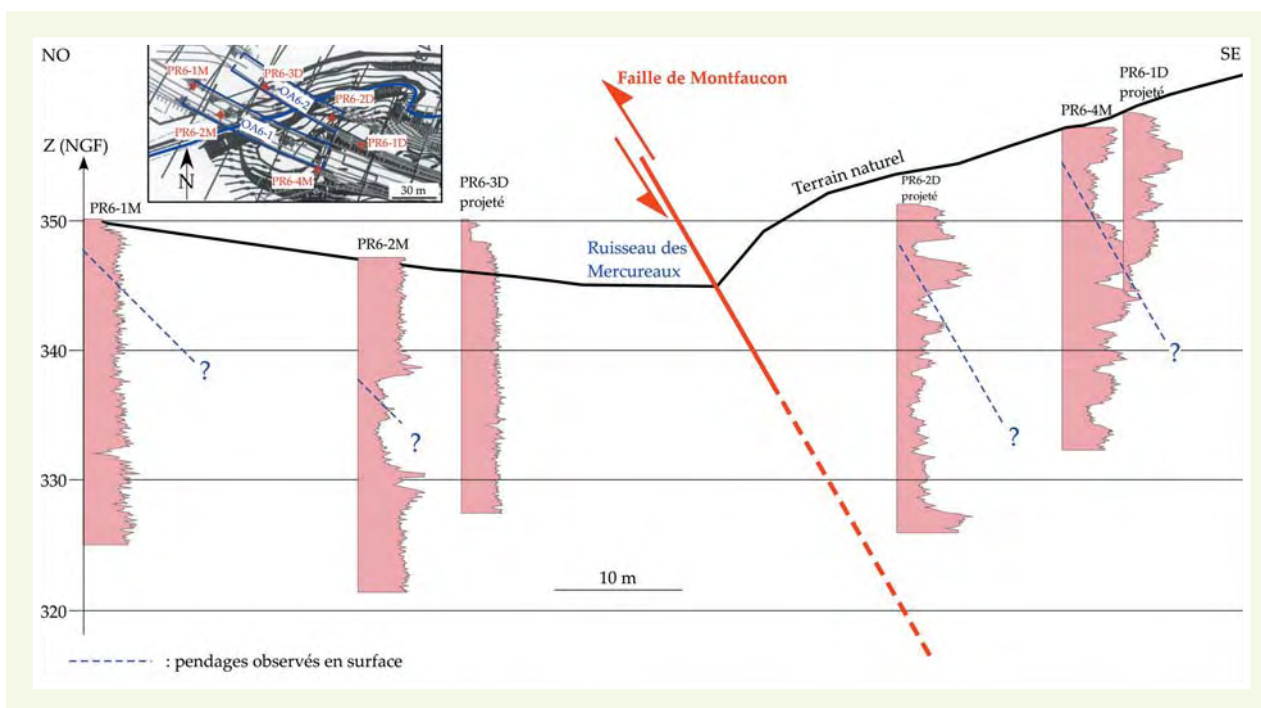


figure 7
Diagraphies RAN au
niveau de l'OA6 ; modifié
d'après Valfort [21, 22].
Les logs sont projetés sur
un axe qui correspond à
l'axe de l'OA6-1.

que les sondages ne sont pas assez proches les uns des autres pour permettre un recouvrement et l'établissement de corrélations sondage à sondage. Ceci permet néanmoins de préciser que le pendage des couches en profondeur est *a priori* le même qu'en surface. De plus, les mesures diagraphiques fournissent de précieuses indications sur les variations lithologiques rencontrées de part et d'autre du ruisseau des Mercureaux : des formations argilo-marneuses dominent dans la partie nord (nombre de cps/s élevé ; [figure 7](#)), tandis qu'au sud elles sont principalement représentées par une alternance de couches riches et pauvres en argiles, caractéristique des formations rhétiennes et sinémuriennes (cf. [figure 4](#)).

■ Profils 139 à 153

Le long du tracé de la piste de chantier en direction de l'est, les formations observables dans le talus sont composées de niveaux uniquement plienschachiens (Carixien et Domérien). Des niveaux d'âge Lotharingien supérieur sont supposés mais n'ont jamais été identifiés de façon formelle. Au vu des conditions d'affleurement, il est très difficile de dresser une organisation de ces dépôts ; on peut les observer et mesurer leurs pendages dans le ruisseau des Mercureaux ainsi que sur la piste du chantier, mais aucun affleurement n'est visible entre les deux. Il semble néanmoins, d'après les relevés de pendage, que la structure générale de cette unité corresponde à une antiforme s'évasant en direction de l'est (cf. [figure 6](#)).

Cependant, il est certain que cette bande marneuse, bordée par deux failles chevauchantes au nord et au sud, a une organisation assez complexe. De nombreux indices, à l'affleurement et en forage, laissent penser que plusieurs failles décrochantes verticales découpent cette bande liasique. Il est difficile de préciser leur nombre de même que leur orientation. Toutefois, les relevés de terrain suggèrent que ces décrochements sont hérités d'une phase tectonique régionale et ont une orientation N160. Ces failles de déchirement se créent lorsque la compression ne peut plus être accommodée latéralement selon les mêmes modalités. Ce genre d'accident est concordant avec le style tectonique régional « en relais » et, à titre d'exemple, on retrouve ce type de déformation à d'autres échelles dans la région, par exemple les failles qui séparent les différentes écailles du Bois du Peu, faille de Pontarlier (FP sur la [figure 2](#)), du Vuache (CHF sur [figure 2](#)), de Mouthe ou encore de Morez (cf. [figure 2](#)).

Au sud, cette bande liasique est bordée par une barre chevauchante sinémurienne d'épaisseur très réduite (1 m ; Loc. 5 sur [figure 6](#)) et en polarité inverse. L'inversion de polarité est indiquée par

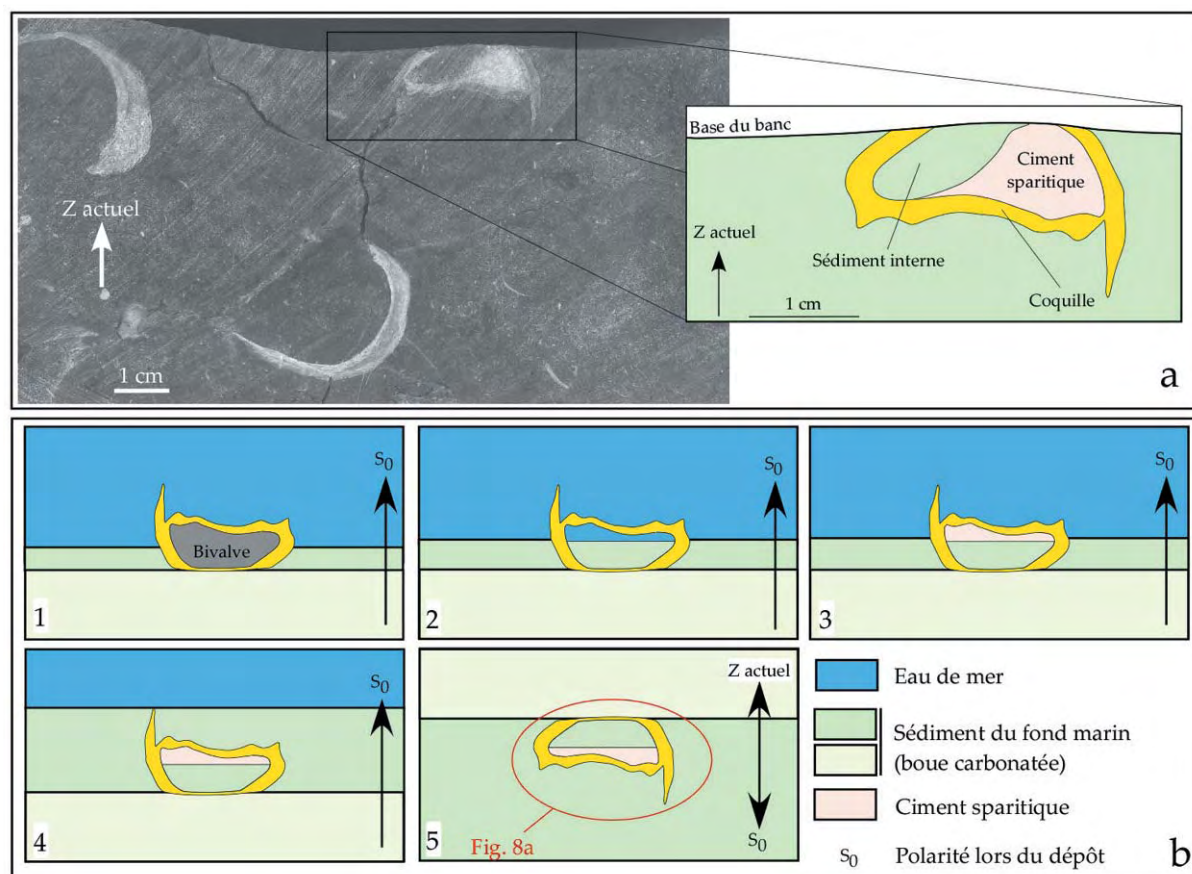


figure 8

Indication de la polarité inverse de la barre sinémurienne entre les profils 139 et 153 par l'observation des remplissages géotropes.

a) Photographie d'une surface sciée.

b) Évolution du banc depuis la sédimentation sinémurienne (stratification originelle S_0) jusqu'à l'inversion tectonique (stade actuel) ;

b1 : le bivalve, en position de vie, repose sur le fond ;

b2 : après la mort de l'organisme, la matière organique est décomposée ; la coquille, vidée, est partiellement remplie par du sédiment interne ;

b3 : quand l'infiltration de sédiment est stoppée, il reste alors une cavité occupée par l'eau de mer, qui permet d'engendrer la cristallisation de cristaux de sparite (cette phase de cimentation peut être plus ou moins rapide selon l'agitation du milieu) ;

b4 : la sédimentation continue et recouvre intégralement la coquille ;

b5 : une phase tectonique renverse la série ; l'analyse du remplissage des coquilles permet de déterminer S_0 .

des remplissages de coquilles de Gryphées par du sédiment interne (**figure 8a**) : l'analyse microscopique de ces coquilles permet d'observer des figures géotropes et de préciser avec certitude S_0 (stratification et polarité au moment de la sédimentation ; **figure 8b**). Il semble alors que cette barre chevauchante constitue le véritable flanc nord de l'anticlinal des Mercureaux.

Enfin, au niveau du profil 153 (Loc. 6 sur **figure 6**), le talus de la piste de chantier permet d'observer des bancs de calcaires sinémuriens fortement fracturés, avec un pendage de 45 degrés vers le SE, en polarité inverse. Ces calcaires indiquent le passage d'une faille décrochante sénestre (faille de déchirement) qui semble avoir une orientation d'environ N160 (**figure 9**). Il est à noter que le talus de la piste de chantier, à cet endroit, a déjà glissé (voir le talus sur la **figure 9**). Ce phénomène est à rapprocher de la présence concomitante de marnes rhétiennes en position très défavorable (*cf. infra*) et de cet accident qui génère des conditions d'instabilité. Au-delà de cet accident se retrouve une série à polarité normale. L'organisation de ce secteur, avec des variations de pendages et de polarités importantes sur de courtes distances indique une déformation intense correspondant au schéma de faille de déchirement (**figure 10**).

■ Profils 153 à 162

Une fois dépassé le profil 153, on retrouve une organisation « classique » anticlinale. Les niveaux sinémuriens sont en polarité normale, avec un pendage de 0 à 5 degrés, au droit de l'OA7 (*cf. figure 6*). En se dirigeant vers le nord, le pendage des couches augmente très rapidement pour passer de 10 degrés à 45 degrés vers le nord en même temps que l'on descend la pente en direction du ruisseau des Mercureaux (*cf. figure 6*). L'évolution des pendages correspondant à celle de la topographie indique donc un contrôle géomorphologique de ce secteur.

À cet endroit, les talus de chaque côté de la piste de chantier permettent d'observer des marnes schistoïdes en position très défavorable au niveau du profil 156, avec un pendage de 45 degrés vers

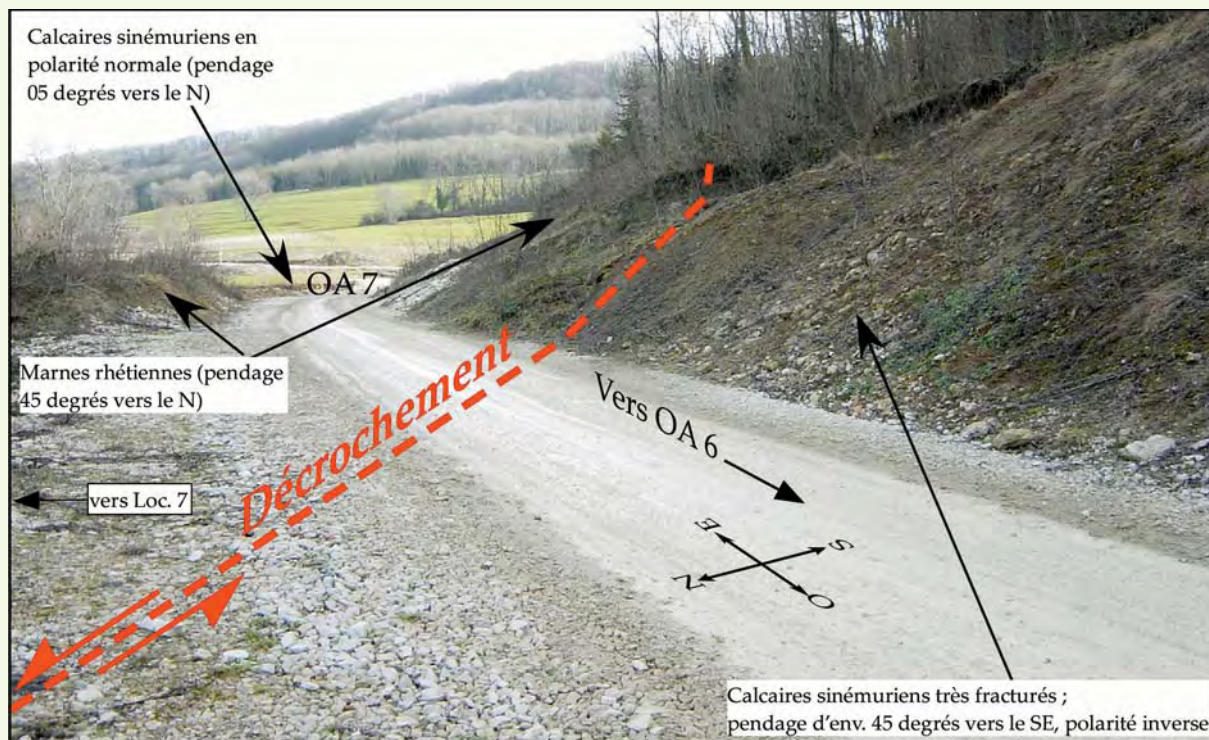
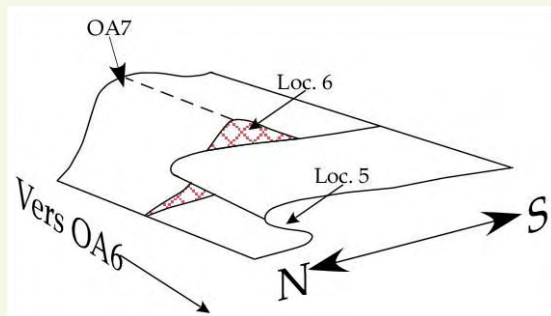


figure 9

Faïlle décrochante sénestre
au profil 153.

figure 10

Rôle de failles
de déchirement :
représentation de la
géométrie des couches
sinémuriennes de la
figure 9. Adapté de
Dahlström [23].



le nord, c'est-à-dire dans le même sens que la pente naturelle du terrain. D'après une observation sur le terrain, il est très difficile de dater ces marnes. Il était tout d'abord envisagé qu'elles puissent correspondre aux schistes cartons toarciens, c'est-à-dire déposées dans un milieu de talus ou de bassin sous plusieurs centaines de mètres d'eau (cf. **figure 4**). Un âge triasique est cependant révélé par l'analyse détaillée des faciès.

– *Avicula contorta* a été identifié dans des niveaux de grès micacé, attestant d'un âge rhétien.

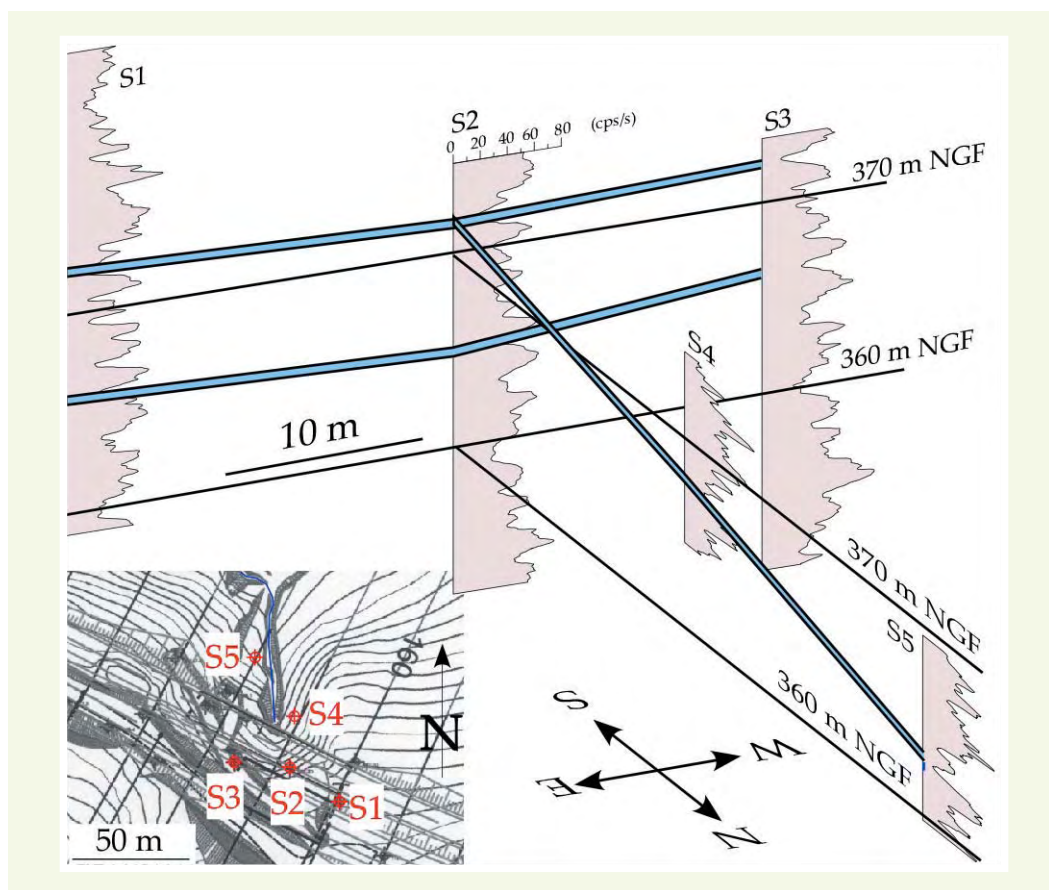
– La présence de niveaux à débris de végétaux et osseux ainsi que de *bone bed* à écailles de poissons atteste d'un environnement de dépôt submersif voire continental.

– Il est possible d'observer des niveaux gréseux, de quelques centimètres d'épaisseur, qui comportent des structures en *micro-tepee*. Ces dernières sont dues à des assèchements et des décollements synsédimentaires de tapis algaires (bombements produits lors de dégazages issus de la dégradation de la matière organique des cyanobactéries) et/ou de niveaux riches en gypse.

Toutes ces observations concordent pour interpréter ces marnes shistoïdes comme des faciès rhétiens émergifs à submersifs, déposés dans un environnement de type sebkha.

figure 11

Corrélations des diagraphies de RAN entre différents sondages de l'OA7. Les logs sont projetés sur un axe correspondant à celui de la voie montante (matérialisé ici par le plan de l'échelle Z).



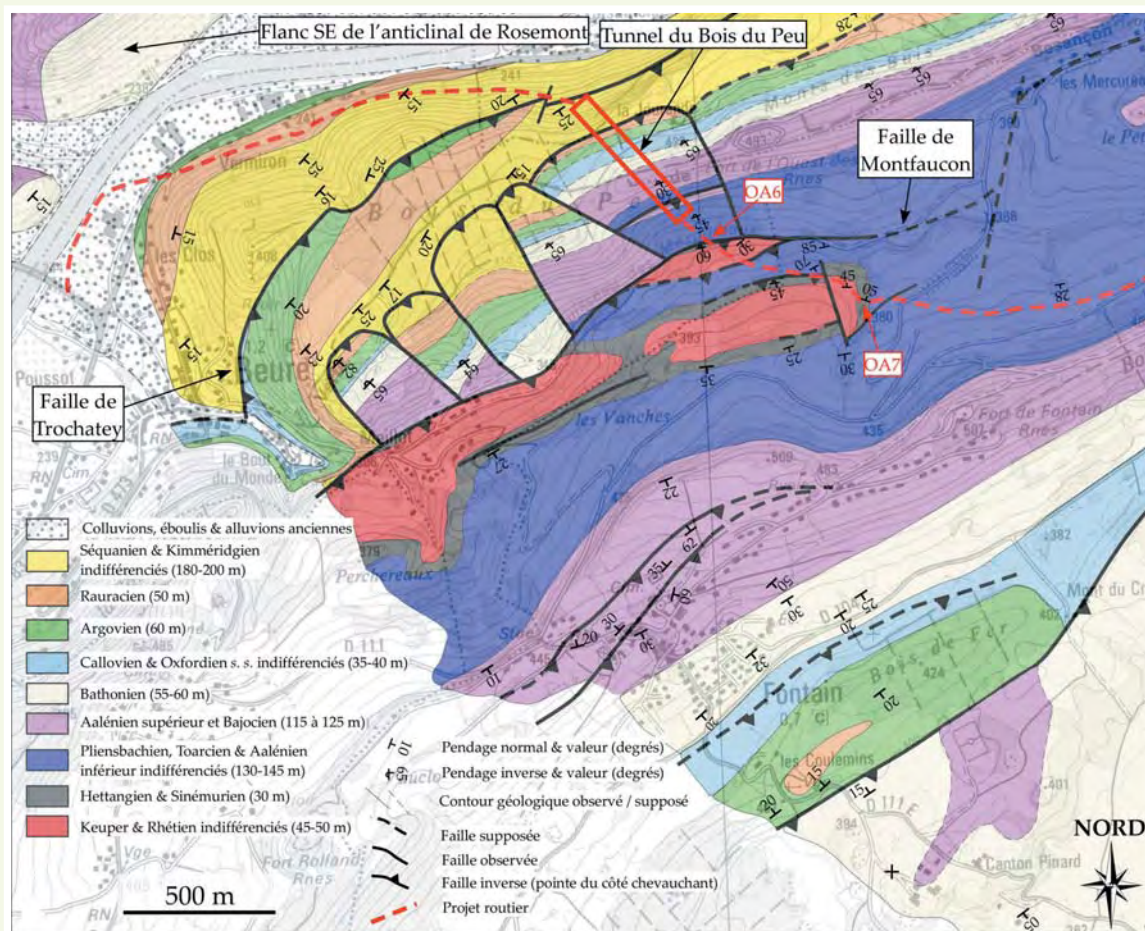
Au droit de l'OA7, l'analyse morphologique du secteur, avec le passage d'un petit ruisseau, pouvait laisser croire à la présence d'un accident aligné avec le thalweg actuel (cf. [figure 6](#)). Les campagnes d'investigations géotechniques permettent de disposer de diagraphies de RAN sur plusieurs sondages. Leur implantation est matérialisée sur la [figure 11](#). L'analyse des logs permet de corrélérer l'ensemble des sondages entre eux ([figure 11](#)) : il existe une continuité stratigraphique de part et d'autre du ruisseau. Les pendages observés sont d'environ 15 degrés en direction du nord-est, ce qui est entièrement concordant avec les observations de surface à cet endroit. Il n'y a donc pas ici d'accident de type faille qui induirait un décalage des séries de chaque côté du ruisseau. Néanmoins, une étude par photo-interprétation réalisée par le LRPC de Lyon [24] indique la possibilité d'une montée de fontis au niveau du passage du ruisseau. Ce fontis est à rapprocher de la présence des marnes à évaporites du Keuper, situées à faible profondeur (le Trias a été identifié à 25 m de profondeur au niveau de l'OA7 et les évaporites à 40 m ; coupes de sondages d'après Valfort [25, 26]). Ces niveaux de gypse pourraient éventuellement provoquer des soucis de stabilité (montées de fontis).

DISCUSSION

Les observations et analyses effectuées pour ce travail permettent de faire évoluer les connaissances sur la géologie du secteur. Ceci est en grande partie dû aux nombreuses études géotechniques qui ont été nécessaires pour le choix du tracé et le dimensionnement des ouvrages [44, 19-22, 24-28]. En effet, devant la pauvreté des affleurements (site essentiellement marneux, végétation importante, couverture d'altération systématiquement présente), seules les informations apportées par les forages et les travaux de terrassement permettent de disposer de données géologiques fiables.

Une carte géologique interprétative du secteur Beure-Fontain-Vallon des Mercureaux qui recoupe l'ensemble du faisceau bisontin au niveau de Beure ([figure 12a](#)) est nouvellement proposée. Celle-ci diffère légèrement de la carte établie par Dreyfuss et Kuntz [8], en raison de la quantité d'informations nouvelles recueillies lors de l'étude de ce tracé. Il est maintenant possible de préciser la

polarité des couches ainsi que la position et l'orientation des accidents pour l'ensemble du vallon. L'analyse de cette carte, plaquée sur un modèle numérique de terrain (MNT), met en évidence une très bonne corrélation entre la morphologie du secteur et les différentes unités géologiques repérées (figure 12b).



a
b

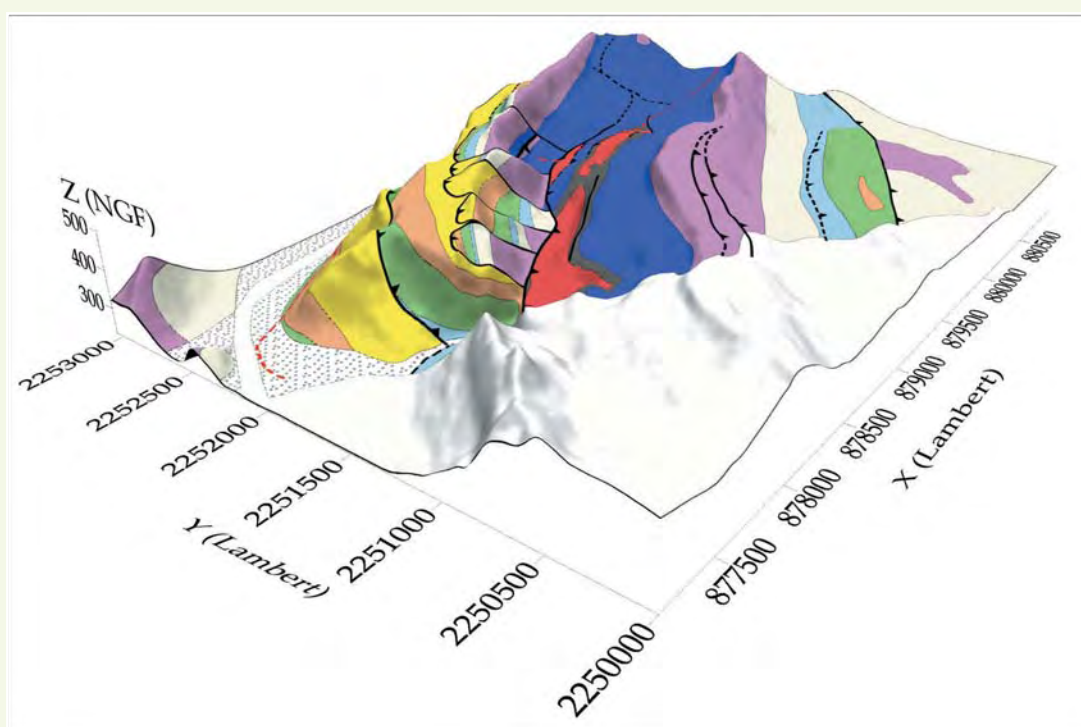
figure 12

Carte géologique de la région Beure-Fontain-Vallon des Mercureaux.

a) carte géologique interprétative.

b) Carte géologique interprétative plaquée sur le modèle numérique de terrain (MNT) de la région bisontine : les différents accidents et les grandes unités structurales se corrélaient très bien avec la morphologie.

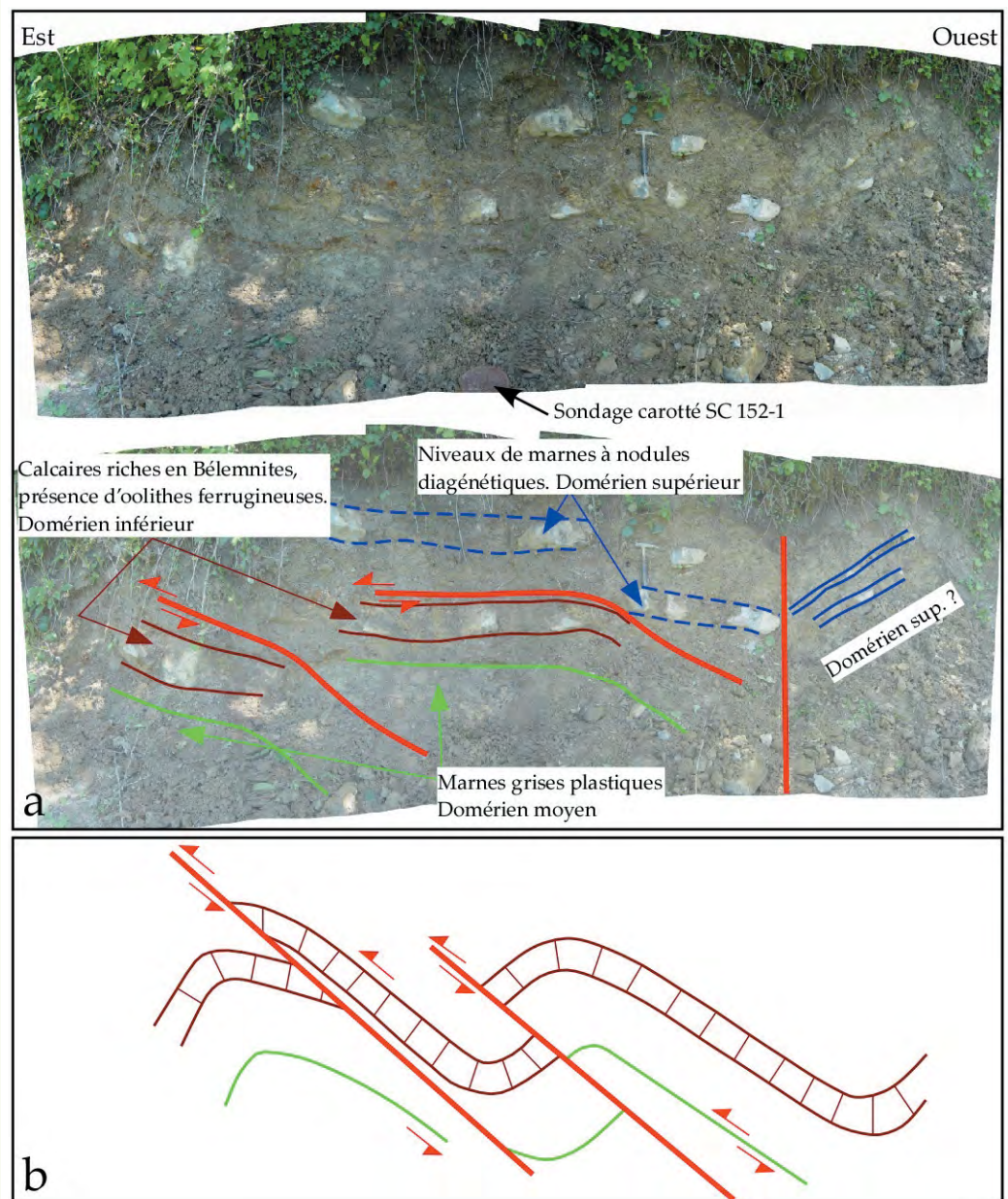
Les données topographiques proviennent de l'IGN.



D'un point de vue structural, la définition d'un duplex majoritairement triasique, isolé au sein de formations liasiques, au niveau de la faille de Montfaucon (au droit de l'OA6, **figures 6 et 12**) n'est pas compatible avec une interprétation dynamique en tant que faille-pli [**15, 16**]. *A contrario*, cette géométrie classique des contextes de chevauchement s'inscrit pleinement dans un cadre d'une tectonique de décollement. Cette idée est renforcée par l'observation, au profil 152 (**figure 13** ; Loc. 7 sur **figure 6**), de phénomènes de redoublements de série du banc de calcaire à Bélemnites carixien, qui définissent des géométries en « micro-duplex ». On retrouve, au même endroit, des géométries identiques dans un forage, à 8 m de profondeur (sondage carotté SC152-4 [**20**]). Les directions relevées à l'affleurement indiquent une poussée du matériel vers l'est et/ou le nord-est. Suite à cette observation, il est très probable que des glissements banc sur banc (selon les joints de stratification) se sont produits, laissant paraître des amincissements ou des sur-épaississements des séries rencontrées dans l'ensemble du vallon, et plus particulièrement dans cette bande liasique. Ceci rend aussi difficile l'établissement d'un log stratigraphique aux épaisseurs contrôlées. Ces observations à l'échelle de l'affleurement, couplées à l'identification de failles de déchirement (failles qui séparent les écaïles du Bois du Peu, cf. **figure 12** ; failles au sein du vallon, cf. **figures 6, 9, 10**) plaident pour

figure 13

Redoublement de séries par glissements banc-sur-banc ; l'échelle est fournie par le marteau.
a) Redoublements de série (calcaire carixien) au profil 152, en contrebas du talus nord de la piste.
*b) Évolution des glissements couche sur couche en configuration chevauchante ; vue en coupe adaptée de Dahlström [**23**].*



une mise en place du faisceau bisontin selon une dynamique de décollement sans implication du socle, au contraire de l'avis de Glangeaud [15, 16]. Récemment, Bièvre et Mercier [17] proposent, à l'aide de modélisations cinématiques fondées sur des principes de décollement et d'équilibrage des coupes, une actualisation du schéma de mise en place du faisceau bisontin dans la région de Beure. Ce travail permettra de disposer d'un schéma tectonique à jour lors des travaux de percement du tunnel du Bois du Peu. Des travaux de modélisation semblables, en accord avec le principe d'équilibrage des coupes, ont déjà été menés dans d'autres faisceaux du Jura [6, 29].

Il apparaît de plus que le flanc nord de l'anticlinal des Mercureaux ne se situe pas au niveau du ruisseau des Mercureaux, mais à la base de la barre sinémurienne en polarité inverse (cf. **figure 8**). Sans révolutionner la géologie locale, cette observation montre l'importance des déformations latérales différentielles (accommodation de la déformation) le long de l'axe de la structure anticlinale. Ces déformations se font à la faveur de failles décrochantes de déchirement (cf. **figures 6, 9, 10**). Observées de façon concomitante avec des micro-chevauchements (glissement banc sur banc, micro-duplex ; **figure 12**) et des marnes schistoïdes en position défavorable (pendage dans le même sens que la pente), ces structures renforcent l'idée d'instabilité potentielle de ce secteur.

Des pendages défavorables, principalement entre les profils 152 et 157, pourraient poser des problèmes de stabilité pour le tracé. Ce dernier recoupe de plus deux zones où du gypse est identifié en profondeur (du profil 134 à 140 ; puis du profil 152 à 160).

CONCLUSIONS

Les reconnaissances géotechniques menées pour l'étude des ouvrages d'art OA6 et OA7 et le tracé entre ces deux ouvrages, associées à un travail de terrain et de laboratoire, permettent de définir de façon détaillée la géologie complexe du vallon des Mercureaux. La carte géologique proposée apporte des informations nouvelles quant à l'organisation du vallon des Mercureaux, de même qu'elle permet d'établir un modèle tectonique à jour de mise en place du faisceau bisontin. Ce travail, mené à l'aide des outils de la géologie fondamentale, constitue une aide précieuse à la construction d'un modèle géotechnique fiable, tant pour le tracé que pour les ouvrages d'art et le tunnel du Bois du Peu.

La connaissance de la géologie régionale, c'est-à-dire à l'échelle de la mise en place du faisceau bisontin, est une étape indispensable pour interpréter de façon fiable les observations effectuées à l'affleurement, et donc à l'échelle de l'ouvrage de génie civil. Ce travail souligne la nécessité d'avoir recours à plusieurs approches lorsque les conditions géologiques sont difficiles, de même que d'appréhender la géologie à plusieurs échelles afin d'extraire le maximum d'informations nécessaires à l'implantation des infrastructures.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie très sincèrement le Professeur Roland Wernli (Université de Genève) pour la détermination des microfaciès et microfossiles rhétiens et toarciens. Les remerciements vont ensuite au Dr Stéphane Jorry (Université de Genève), pour les informations fournies sur les dépôts en micro-tepee. Merci à M. Pierre Azémard (LRPC Aix-en-Provence), pour les très instructives discussions sur les méthodes géophysiques en général, et sur la RAN en particulier pour ce travail. L'auteur tient aussi à remercier M. Jean Lebrun, géologue de la DDE25, pour les sorties sur le terrain et les discussions sur la géologie bisontine. Finalement, l'auteur remercie M. Jean-Pierre Rajot (ENTPE Vaulx-en-Velin) et le Dr Stéphane Jorry pour l'aide apportée à la rédaction de cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **CHAUVÉ P.**, *Jura*, Guides géologiques régionaux, Masson, Paris, **1975**, 216 pages.
- 2 **HINDLE H., BESSON O., BURKHARD M.**, "A model of displacement and strain for arc-shaped mountain belts applied to the Jura arc", *Journal of Structural Geology*, **22**, **2000**, pp. 1285-1296.
- 3 **TSCHANZ X.**, Analyse de la déformation du Jura central entre Neuchâtel (Suisse) et Besançon (France), *Eclogae Geologicae Helveticae*, **83**, n° 3, **1990**, pp. 543-558.
- 4 **LACOMBE O., ANGELIER J.**, Évolution tectonique du Jura externe au Cénozoïque et perturbations de contraintes dans la Zone Transformante Rhin-Saône, *C. R. Académie des Sciences de Paris*, **317**, série II, **1993**, pp. 1113-1120.
- 5 **HOMBERG C., ANGELIER J., BERGERAT F., LACOMBE O.**, Nouvelles données tectoniques dans le Jura externe : apport des paléocontraintes, *C. R. Académie des Sciences de Paris*, **318**, série II, **1994**, pp. 1371-1377.
- 6 **MARTIN J., MERCIER E.**, Héritage distensif et structuration chevauchante dans une chaîne de couverture : apport de l'équilibrage par modélisation géométrique dans le Jura nord-occidental, *Bulletin de la société géologique de France*, **167**, **1996**, pp. 101-110 (erratum p. 194).
- 7 **GEHRING A. U., KELLER P., HELLER F.**, "Paleomagnetism and tectonics of the Jura arcuate mountain belt in France and Switzerland", *Tectonophysics*, **186**, **1991**, pp. 269-278.
- 8 **DREYFUSS M., KUNTZ G.**, *Besançon*, in Carte géologique de la France au 1/50 000, BRGM ed., **1968**.
- 9 **BLAISON J., BONTE A., CONTINI D., MAILLARD C., MOUTERDE R.**, Le Lias inférieur et le Carixien du Jura bisontin (1^{re} partie : études stratigraphiques) – Révision de la coupe de Miserey-Salines (Doubs), *Ann. Sci. Univ. Besançon*, 3^e série, fasc. **18**, **1973**, pp. 313-339.
- 10 **CONTINI D., MARTIN J.**, *Liaison RN57-BD Ouest. – Étude stratigraphique, commentaire géologique*, document DDE 25, **1987**.
- 11 **MEYER M., MEISTER C., WERNLI R.**, Stratigraphie du Lias de Champfromier (Ain), *Géologie de la France*, **1**, **2000**, pp. 47-57.
- 12 **CHAPPELLIER D.**, *Diagraphies aquifères*, Cours online de géophysique, Univ. Lausanne et IFP, **2001**, 127 pages. (<http://www-ig.unil.ch/cours/>)
- 13 **CRIPPS A. C., McCANN D. M.**, The use of natural gamma log in engineering geological investigations, *Engineering Geol.*, **55**, **2000**, pp. 313-324.
- 14 **MAURIN P.**, Viaduc des Mercureaux : étude de la fondation d'un ouvrage d'art exceptionnel au droit d'une faille majeure du Faisceau Bisontin, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **233**, **2001**, pp. 77-86.
- 15 **GLANGEAUD L.**, Le rôle des failles dans la structure du Jura externe (pincées, failles-plis et gouttières), *Bulletin de la société d'histoire naturelle du DOUBS*, **51**, **1944**, pp. 17-33.
- 16 **GLANGEAUD L.**, Réunion extraordinaire dans le Jura franco-suisse, *Bulletin de la société géologique de France*, **6** (I), **1951**, pp. 763-872.
- 17 **BIÈVRE G., MERCIER E.**, Les écaillés du Bois du Peu (Jura externe) : retour sur la notion de faille-pli, *Bulletin de la société géologique de France*, en préparation.
- 18 **GUTTIEREZ T.**, *Étude cartographique du secteur Beure-Fontain*, Mémoire de Maîtrise de Géol. Appliquée, Université Franche-Comté, Besançon, **2000**.
- 19 **BOUGUET P., BIÈVRE G.**, *Tunnel du Bois du Peu : étude géologique du sondage SCH2000, synthèse géologique de la tête vallon (Doubs)*, Rapport du CETU, janvier **2001**.
- 20 **ROCHE A.-L., BIÈVRE G.**, *Voie des Mercureaux, rocade sud de Besançon, section entre OA6 et OA7 : étude géotechnique de niveau projet*, Rapport LR Autun n° 14 941, **2005**.
- 21 **VALFORT S.**, *Voie des Mercureaux OA6-1 voie montante : étude géotechnique de phase APS*, Rapport LR Autun n° 10 204 D1, **1999**.
- 22 **VALFORT S.**, *Voie des Mercureaux OA6-2 : étude géotechnique de phase EPOA – Rapport LR Autun n° 15 551*, **2003**.
- 23 **DAHLSTRÖM C. D. A.**, Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains, *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, **18**, n° 3, **1970**, 332-406.
- 24 **POTHÉRAT P.**, *Contournement de Besançon, Voie des Mercureaux : étude structurale par photo-interprétation appliquée à la recherche d'indices de cavités souterraines*, Rapport LR Lyon n° H/36403, février **2004**.
- 25 **VALFORT S.**, *Voie des Mercureaux OA6-2 voie descendante : étude géotechnique préliminaire*, Rapport LR Autun n° 10 204 D2, **2001**.
- 26 **VALFORT S.**, *Voie des Mercureaux OA7 : étude géotechnique de phase projet*, Rapport LR Autun n° 17 203, **2005**.
- 27 **AUTUN L.R.**, Besançon – *Voie des Mercureaux*, Rapport d'étude géotechnique du LR Autun, n° 94/4839B, **1994**.
- 28 **VALFORT S.**, *Voie des Mercureaux OA7-1 et OA7-2 : étude géotechnique de phase avant-projet*, Rapport LR Autun n° 10 204, **2000**.
- 29 **MEYER M.**, Structure du « diapir » de Champfromier (Jura, Ain, France), *Eclogae Geologicae Helveticae*, **93**, **2000**, pp. 221-229.