

Viaduc des Mercureaux

Étude de la fondation d'un ouvrage d'art exceptionnel au droit d'une faille majeure du faisceau Bisontin

Patrice MAURIN

Ingénieur des Travaux publics de l'État
Chef du bureau d'Études géotechniques
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Autun

RÉSUMÉ

Le projet routier de la voie des Mercureaux, reliant par le sud de Besançon la route nationale 57 (RN 57) à la route nationale 273 (RN 273), comporte un viaduc courbe long de 260 m en sortie de tunnel. La compréhension de la géologie du secteur de Bois de Peu s'est avérée indispensable pour implanter et préciser le mode de fondation des appuis de ce viaduc.

L'analyse géologique du site a montré que la zone de fondation du viaduc était traversée par deux failles. La première est une faille inverse majeure, parallèle au Doubs, avec un rejet de plus de 40 m dans les formations du Séquanien. La seconde faille décroche la première au droit du viaduc. Ces deux failles délimitent quatre compartiments structuraux distincts.

L'analyse géologique et géotechnique du site et du projet a comporté deux étapes principales :

- dans une première étape, la réalisation de sondages destructifs avec mesures de la radioactivité naturelle en forage (RAN) a permis de reconstituer en grande partie la géométrie de trois des compartiments ;
- dans la seconde étape, les moyens d'investigation ont été concentrés pour caractériser le quatrième compartiment, particulièrement fracturé et masqué sous des éboulis. Des sondages carottés de plus de 50 m de profondeur ont été réalisés, avec mesures de RAN et relevés des pendages des couches par caméra numérique.

Enfin, en raison de la complexité du site, l'ensemble des résultats a été synthétisé dans un modèle géométrique tridimensionnel. Un des appuis, initialement implanté dans la zone d'éboulis au voisinage de l'intersection des failles, a été déplacé pour être fondé par puits marocain profond de 25 m à distance suffisante des deux failles.

DOMAINE : *Géotechnique et risques naturels.*

Introduction

Le projet routier de la voie des Mercureaux contourne Besançon par le sud, pour relier la RN 57 à la RN 273. La figure 1 localise le tracé du projet sur un extrait de carte IGN à 1/25 000. Depuis Beure, la voie longe tout d'abord le Doubs, puis monte à flanc de coteaux jusqu'au pied de la falaise située en crête de versant et, enfin, traverse la colline du Bois de Peu en tunnel, pour déboucher dans le vallon des Mercureaux. Côté Doubs, le tube de la voie descendante du tunnel débouche sur un viaduc courbe à six travées d'une longueur totale d'environ 260 m, compris, d'ouest en est, entre les profils P84 et P97 du projet de la voie des Mercureaux. L'étude géotechnique préliminaire de cet ouvrage d'art exceptionnel a été confiée au Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) d'Autun par la Direction départementale de l'Équipement du Doubs, maître d'œuvre du projet.

Le tracé du viaduc des Mercureaux et l'ensemble des reconnaissances géotechniques auxquelles cet article fera référence ont été repérés sur la figure 2. Au sud, l'ensemble du site est dominé par des barres calcaires. Depuis l'extrémité ouest du viaduc (profil P84), le tracé est situé sur une pente abrupte et monte à flanc de coteau pour enjamber un imposant éperon rocheux, entre les profils P91 et P95. Cet éperon se distingue parfaitement dans la topographie locale et forme une avancée dans la pente de la colline que l'on ne retrouve pas au-delà du profil P95. Jusqu'à l'extrémité est du viaduc (profil P97), le tracé se poursuit dans un cône d'éboulis.

Cet article présente le déroulement de l'étude géotechnique des fondations du viaduc des Mercureaux, qui s'est appuyée sur une analyse géologique détaillée du site.

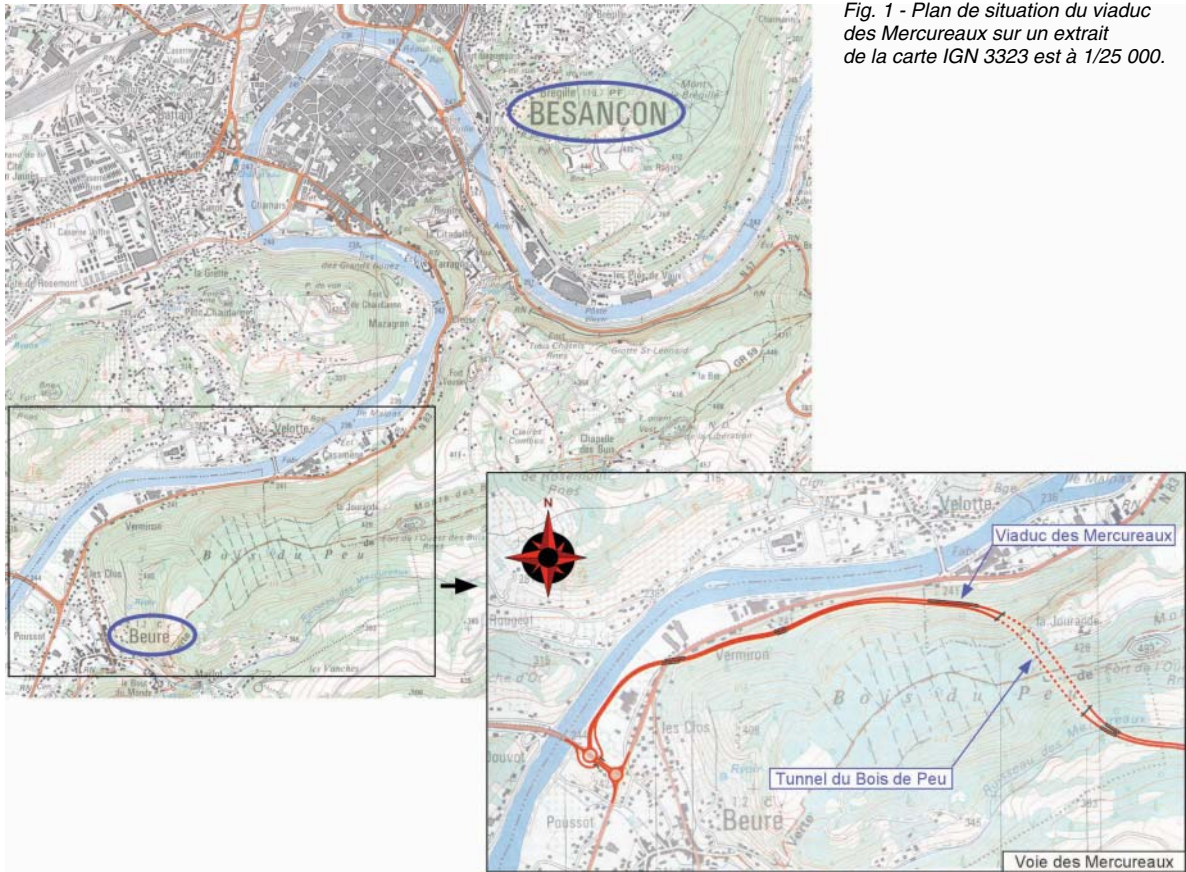


Fig. 1 - Plan de situation du viaduc des Mercureaux sur un extrait de la carte IGN 3323 est à 1/25 000.

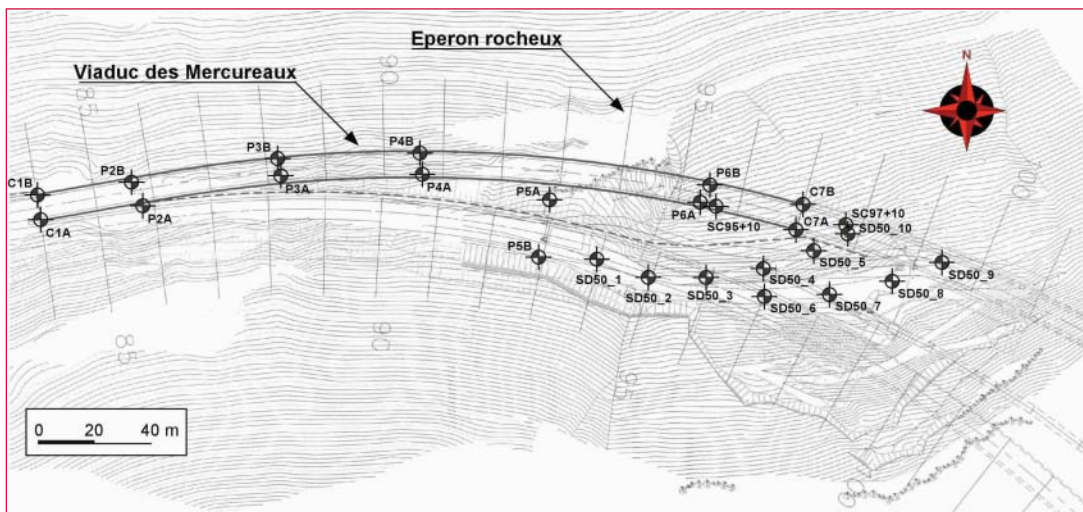


Fig. 2 - Vue en plan du viaduc des Mercureaux et des reconnaissances géotechniques réalisées dans les différentes phases d'étude.

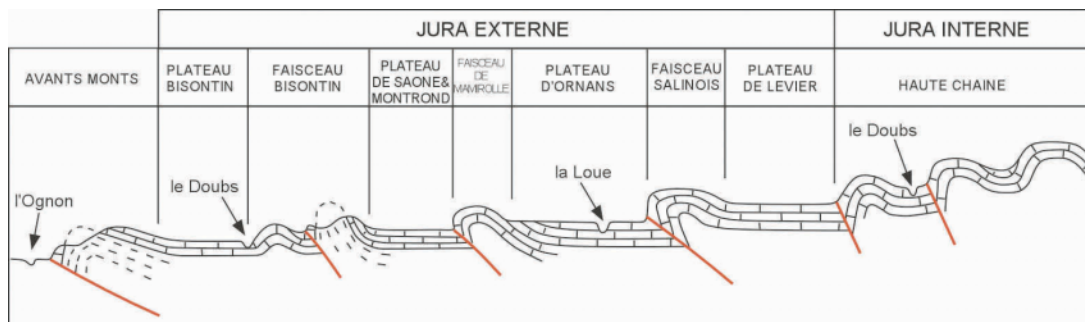


Fig. 3 - Coupe transversale du massif jurassien dans le département du Doubs.

Environnement géologique du viaduc des Mercureaux

Le Doubs est une partie du Jura septentrional, constituée d'une succession de plateaux séparés par des faisceaux plissés orientés NE-SW. Le socle est composé de terrains granitiques et métamorphiques qui formaient la chaîne hercynienne, alors en place à l'ère Primaire.

Au Secondaire, la région se situe en domaine marin suite à une grande phase de transgression. Deux périodes principales peuvent être distinguées, tout d'abord le Trias, qui marque le début de la transgression puis le Jurassique et le Crétacé, qui voient s'affirmer le caractère marin du milieu avec une sédimentation continue.

Enfin, durant le Tertiaire, la région va subir un style tectonique compressif montrant plusieurs phases de surrections, plissements et fracturations, résultant d'une poussée dirigée vers le nord-ouest qui font que les structures actuelles adoptent un axe préférentiel d'orientation NE-SW.

Comme représenté sur la figure 3, d'après le Guide géologique régional du Jura (Chauve, 1975), trois zones principales peuvent être distinguées :

- les Avants Monts et la zone Préjurassienne,
- le Jura externe,
- le Jura interne, constitué de plis parallèles.

La colline du Bois de Peu, où est situé le viaduc des Mercureaux, se trouve dans le Jura externe, à l'intérieur du faisceau Bisontin.

Les terrains qui affleurent côté Doubs appartiennent au flanc sud-est de l'anticlinal de la citadelle de Besançon. Ce flanc d'anticlinal, dont les couches sont inclinées vers le sud-est, est recoupé par une série de failles parallèles à la vallée du Doubs et par des failles perpendiculaires, qui découpent des grands blocs ayant un jeu relatif les uns par rapport aux autres. D'après la carte géologique à 1/50 000 éditée par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), représentée sur la figure 4, le viaduc des Mercureaux se situerait à proximité d'une de ces grandes failles parallèles au Doubs.

Au droit de l'ouvrage, les terrains sont constitués de roches sédimentaires du Jurassique supérieur. Cette formation, d'une épaisseur totale d'environ 90 m, est composée de trois séries sédimentaires :

- le Séquanien supérieur, formé de calcaires variés, le plus souvent oolithiques, cryptocristallins ou à pâte fine,

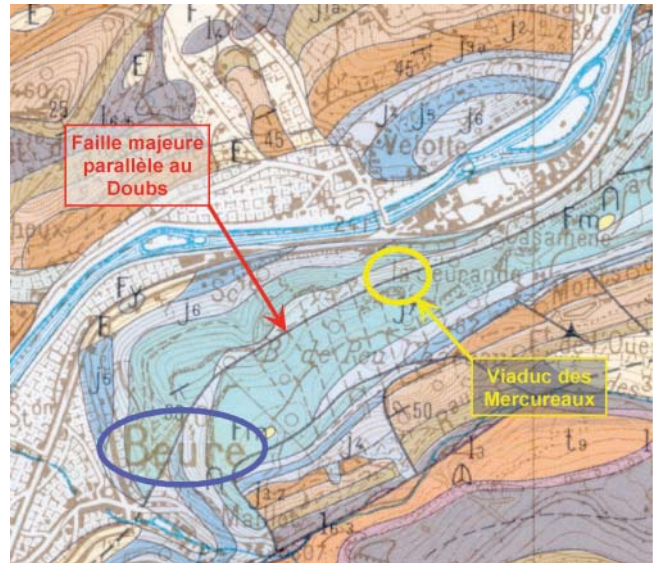


Fig. 4 - Situation du viaduc des Mercureaux sur un agrandissement de la carte géologique du BRGM à 1/50 000.

- le Séquanien moyen, formé d'une alternance de marno-calcaires et de marnes bleues,
- le Séquanien inférieur, formé de calcaires sub-lithographiques assez bien lités.

La figure 5 montre les résultats d'une analyse géologique locale, au voisinage du viaduc. D'est en ouest, le projet traverse les formations suivantes :

- du profil P84 au P91 : marno-calcaires et marnes bleues du Séquanien moyen, puis,
- du profil P91 au P95 : un éperon calcaire du Séquanien supérieur, très fracturé et karstifié et, enfin,
- du profil P95 au P97 : un cône d'éboulis calcaires.

Les levés de terrain ont également montré que la zone de fondation du viaduc était traversée par au moins deux failles. La première faille (F1), parallèle au Doubs, semble correspondre à l'accident géologique majeur indiqué sur la carte géologique du BRGM. La seconde faille (F2) correspondrait à une des failles perpendiculaires, comme expliqué dans l'analyse de la formation du massif en début de ce chapitre. Au sud, à l'amont du tracé, la faille F2 décroche les barres calcaires du Séquanien supérieur avec un jeu dextre. Vers l'est, les deux failles se perdent sous un important cône d'éboulis.

Cette première analyse géologique, basée sur les éléments visibles à l'affleurement, a soulevé deux questions qui devaient être résolues pour pouvoir définir les fondations des appuis de l'ouvrage. Ces questions portent sur l'origine de l'éperon rocheux (1) et la structure géologique sous le cône d'ébou-

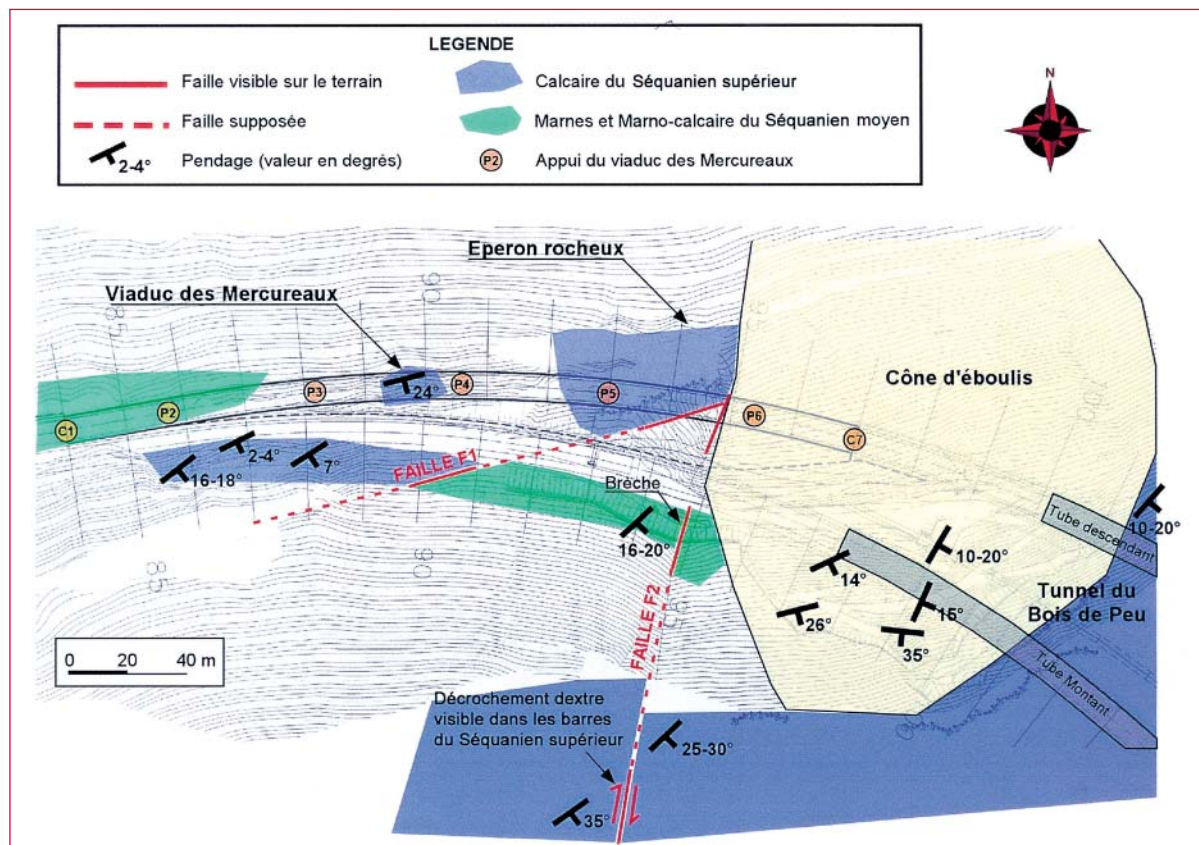


Fig. 5 - Principaux éléments géologiques visibles à l'affleurement à proximité du viaduc des Mercureaux.

lis, résultant du jeu des failles F1 et F2 (2). Ces questions sont explicitées ci-dessous :

- (1) l'origine de l'éperon rocheux présent aux alentours du profil P95 n'a pu être déterminée. Deux hypothèses sont envisageables : il s'agit soit d'un bloc effondré depuis les barres calcaires sus-jacentes, soit d'une partie des calcaires du Séquanien supérieur perturbée par la proximité des deux failles F1 et F2. Si cet éperon n'était pas en place, la faisabilité de l'ouvrage serait remise en question ;
- (2) les deux failles F1 et F2 se perdent sous le cône d'éboulis et aucun indice structural ne permet d'indiquer formellement l'antériorité d'une faille par rapport à l'autre. Par conséquent, la structure géologique du substratum en place sous les formations du cône d'éboulis est totalement imprévisible.

Poursuite de l'analyse géologique parallèlement à l'étude des fondations

Afin d'approfondir la connaissance géologique du site du viaduc des Mercureaux et d'apprécier les propriétés mécaniques des terrains, un sondage destructif et un sondage pressiométrique, pro-

fonds de 15 m, avec mesures de la radioactivité naturelle en forage (RAN) furent réalisés au droit de chaque appui.

Dans ces terrains carbonatés, les mesures de RAN dans les forages au droit de la culée C1 et des piles P2, P3 et P4 ont pu aisément être reliées entre elles, conduisant à la construction du profil en long de la figure 6. La figure 7 illustre plus en détail l'identification des niveaux repères à l'aide des logs de RAN. L'identification de niveaux repères a permis de remonter dans la série normale du Séquanien moyen jusqu'au Séquanien supérieur, d'identifier les principaux marqueurs connus de cette série et de déterminer le pendage apparent des couches.

Par contre, au-delà du profil P95, au droit des piles P5, P6 et de la culée C7, aucune continuité géologique n'a pu être mise en évidence par analyse des mesures de RAN.

Possibilité de sollicitation de l'éperon rocheux

Dans l'ébauche de projet d'ouvrage d'art, la pile P5 devait être fondée sur l'éperon calcaire situé entre les profils P91 et P95 (cf. fig. 2). Comme expliqué

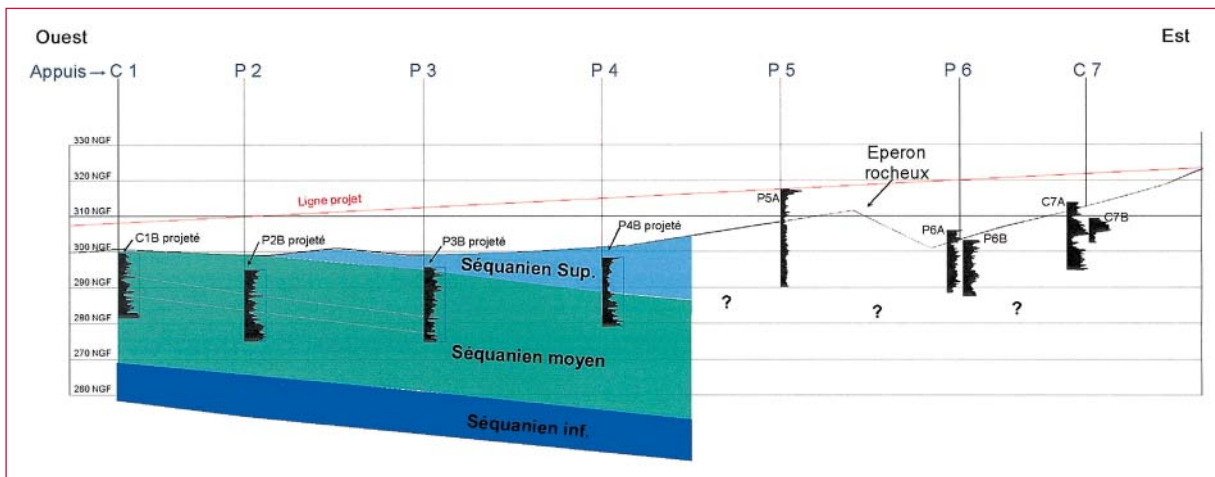


Fig. 6 - Apport des mesures de RAN dans la réalisation du profil en long géologique entre les appuis C1 et P4.

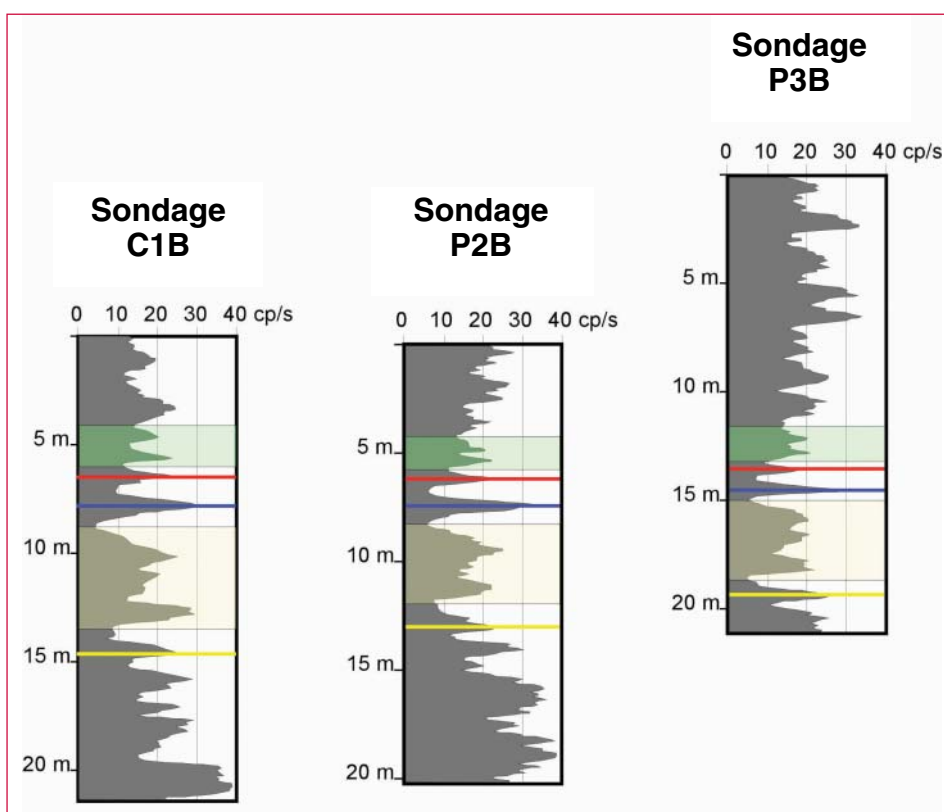


Fig. 7 - Exemples de corrélation entre les enregistrements de RAN des sondages C1B, P2B et P3B.

précédemment, les observations sur le terrain n'avaient pas permis de déterminer si cet éperon était en place, condition impérative pour fonder une pile d'un ouvrage exceptionnel.

L'existence d'un accident géologique majeur (la faille F1) à proximité du tracé pouvait expliquer la présence de cet éperon rocheux. En effet, cet éperon calcaire, stratigraphiquement, doit appartenir au Séquanien supérieur, mais les formations observées à l'amont de l'éperon sont des marnocalcaires du Séquanien moyen. La série stratigraphique étant normale dans cette partie de la colline

du Bois de Peu, le jeu de la faille F1 pouvait expliquer ce doublement de série.

Cependant, cette hypothèse devrait être vérifiée, d'autant plus que les relevés de pendage des couches constituant l'éperon manquaient de cohérence avec le pendage général des formations du site. Alors que depuis la culée C1 jusqu'à l'appui P4, le pendage des couches était relativement constant (15 degrés), les pendages relevés en falaise nord de l'éperon changeaient progressivement, de N150-15 degrés au profil 91 à N150-5 degrés au profil P95.

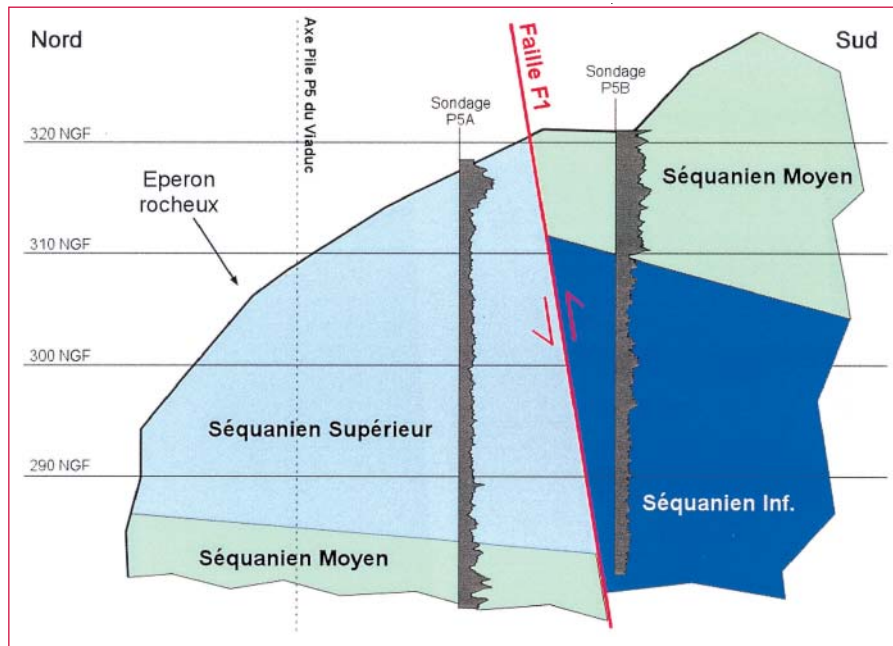


Fig. 8 - Coupe géologique au droit de la pile P5 du viaduc des Mercureaux.

Pour évaluer le rôle de la faille F1, et éventuellement préciser le jeu de cette faille, des sondages destructifs complémentaires, profonds de 50 m, avec mesures de RAN ont été réalisés au droit de l'éperon rocheux, perpendiculairement au tracé du viaduc. Comme le montre la figure 8, sous les calcaires de l'éperon rocheux, le sondage destructif P5A a rencontré des marnes, dont les enregistrements de RAN correspondaient parfaitement aux enregistrements observés en d'autres points du tracé, dans les marnes présentes à la jonction Séquanien supérieur – Séquanien moyen.

À l'amont de l'éperon, le sondage P5B a rencontré, sous les marno-calcaires et marnes du Séquanien moyen, du calcaire identifié au Séquanien inférieur par analogie avec les enregistrements de RAN effectués dans cette formation en d'autres points du tracé. Apparemment, le sondage n'a pas recoupé la faille F1. Cette faille est donc sub-verticale.

En conclusion, la faille F1 est donc une faille inverse majeure parallèle au Doubs, présentant un rejet de plus de 40 m. Cet accident semble effectivement correspondre à l'accident géologique identifié sur la carte géologique du BRGM à 1/50 000. La faille F1 permet d'expliquer la présence des marno-calcaires et des marnes du Séquanien moyen à l'amont des calcaires du Séquanien supérieur.

Les mesures de RAN ont permis de suivre la stratigraphie locale entre la culée C1 et la pile P5. Par conséquent, il est possible d'affirmer que l'éperon rocheux est en place. Avec des précautions parti-

culières, en raison de la forte fracturation de l'éperon calcaire et de la proximité de la faille F1, fonder un appui du viaduc des Mercureaux au droit de ce compartiment rocheux est envisageable.

Fondation de l'ouvrage au-delà de l'intersection des failles

Dans le sens des profils croissants, au-delà de l'éperon calcaire, le tracé de la faille majeure F1 se perd sous le cône d'éboulis. Comme présenté sur la figure 5, une seconde faille (F2) intercepte la faille F1 à l'extrémité de l'éperon. Une attention particulière doit donc être portée à la structure géologique du substratum sous le cône d'éboulis pour positionner avec précision les fondations de la pile P6 et de la culée C7. Notamment, le mécanisme tectonique du secteur et la chronologie d'apparition des failles F1 et F2 doivent être déterminés.

Les forages destructifs avec enregistrements de RAN réalisés au droit de la culée C1 et des piles P2, P3, P4 et P5 ayant permis de recalculer la géologie de la partie ouest de l'ouvrage et de préciser l'origine de l'éperon rocheux, la même technique d'investigation fut tentée pour la partie est. Dans le cône d'éboulis situé au-delà de l'intersection des deux failles, dix sondages destructifs profonds de 50 m avec des mesures de RAN furent réalisés en amont et au droit du tracé.

Bien que le matériel utilisé soit parfaitement adapté à la réalisation de forages de cette profondeur dans ces terrains (sondeuse lourde), de nom-

breuses difficultés de foration ont eu lieu sur la plupart des sondages. Malgré un tubage important, les sondages ont souvent été réalisés en « aveugle » par les sondeurs, en raison de pertes totales de fluide d'injection (air ou boue) et d'absence de remontées de *cuttings*.

L'interprétation des enregistrements de RAN de ces sondages destructifs s'est avérée très délicate, voire impossible. Seuls deux sondages à proximité de la culée C7 présentaient des corrélations franches. Parfois, une analyse plus fine des enregistrements de RAN semblait montrer des parties de quelques mètres analogues entre sondages.

Une hypothèse fut alors émise : la majorité des sondages a été réalisée dans une zone broyée, à proximité d'une faille pouvant correspondre au décrochement de la faille F1 par la faille F2. Considérant l'emplacement des sondages, la faille F2 aurait ainsi décroché la faille F1 avec un jeu dextre. Ce jeu coïnciderait effectivement au jeu visible dans les barres calcaires du Séquanien supérieur qui surplombent le projet (*cf.* la carte des affleurements, fig. 5).

Selon cette hypothèse, le scénario tectonique du secteur, illustré par les schémas de la figure 9,

pourrait être le suivant. Dans un premier temps, la faille F1 a coupé le massif en deux, provoquant un effondrement du compartiment nord, le plus proche du Doubs (étape (II)). Dans une seconde étape, la faille F2, à décrochement dextre, a coupé les deux compartiments existants (étape (III)), organisant ainsi le massif en quatre compartiments structuraux distincts. Trois compartiments ont été identifiés, le quatrième est masqué sous le cône d'éboulis (compartiment b1).

La figure 10 montre la position des compartiments structuraux et des failles dans une vue en plan au voisinage de l'ouvrage. À ce stade de l'étude, il fut décidé, en accord avec le Bureau d'études Structures, la Division Ouvrages d'art du Centre d'études techniques de l'Équipement (CETE) de Lyon, de déplacer la pile P6 et la culée C7. La pile fut déplacée vers l'est pour l'éloigner de l'éperon rocheux et du point de rencontre des deux failles. La culée C7 fut également déplacée vers l'est, au-delà du passage de la faille F1bis.

Afin de vérifier cette hypothèse sur la structure géologique du site et d'identifier le quatrième compartiment structural masqué sous les éboulis

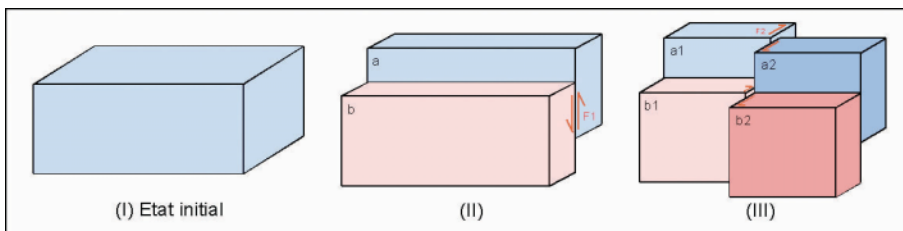


Fig. 9 - Schéma simplifié des mouvements tectoniques au droit du projet.

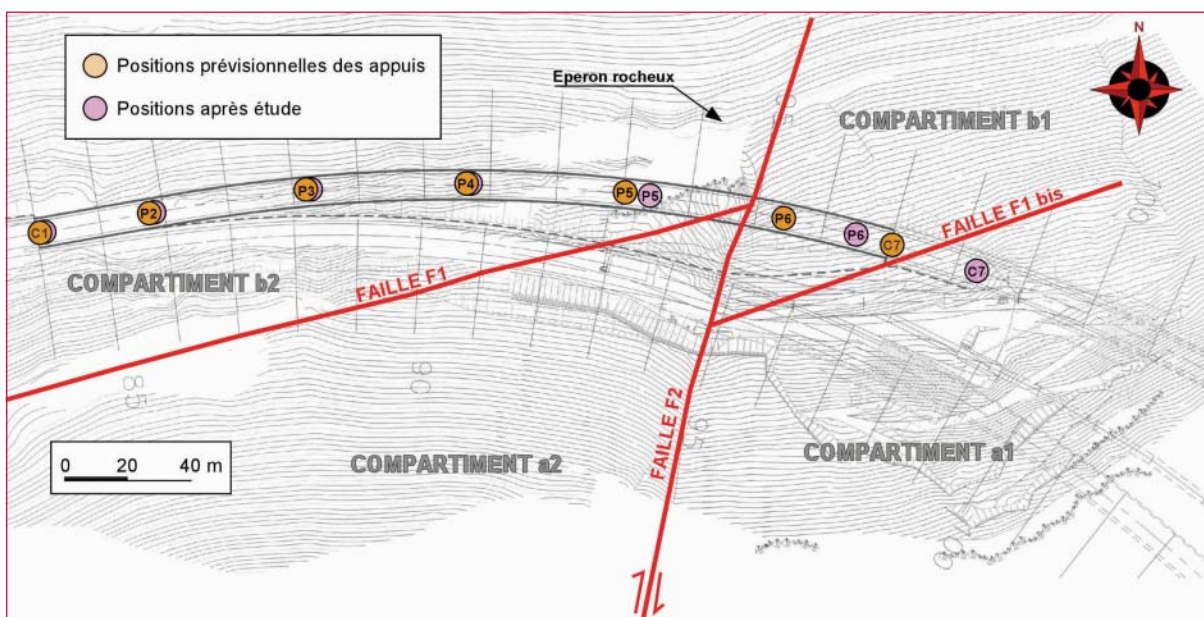


Fig. 10 - Vue en plan des quatre compartiments structuraux et des nouveaux emplacements des appuis de l'ouvrage.

(b1 sur la figure 9), deux sondages carottés profonds furent réalisés, avec mesures de RAN et reconnaissance par caméra numérique. L'objet de cette visualisation du forage était de déterminer les pendages réels des couches sous les éboulis. L'acquisition des images numériques a été réalisée par la société COLAS CAMERA.

Le premier sondage carotté (SC95 + 10) fut implanté au droit de l'emplacement initial de la pile P6, le second (SC97 + 10) environ dix mètres plus à l'est de la position initiale de la culée C7, car il était escompté qu'un déplacement vers l'est de la pile P6 et de la culée C7 conduirait à une amélioration des conditions géotechniques de fondation de ces appuis.

Les carottes et l'analyse par caméra numérique ont montré que le sondage SC95 + 10 avait recoupé sur toute sa hauteur (49 m) une importante zone broyée autour d'un plan de faille confirmant bien la présence de la faille F2 dans cette partie du tracé, délimitant l'éperon rocheux. L'analyse des résultats du sondage SC97 + 10, profond de 65 m, a permis d'identifier la nature lithologique du substratum en place présent sous les éboulis.

L'analyse des images numériques dans le sondage SC97 + 10 a montré que, sous 13,60 m d'éboulis, se trouve jusqu'à 23,30 m de profondeur une formation de « transition » constituée de calcaires en alternance avec des niveaux marneux, au sein desquels ont été repérés des plans de cisaillement matérialisés par des stries présentant des angles importants par rapport à l'horizontale. Cette formation, qualifiée de « brèche gravitaire », semble correspondre à un paquet de couches non en place, fauchées ou glissées, depuis le haut du cône d'éboulis.

Sous cette « brèche gravitaire », les niveaux de marno-calcaires et marnes bleues du Séquanien moyen en place ont été rencontrés jusqu'à 57,35 m, profondeur à partir de laquelle le sondage a atteint les formations calcaires sub-lithographiques du Séquanien inférieur. La limite inférieure de ces calcaires n'a pas été atteinte par le sondage, interrompu à 65 m. Les épaisseurs des différentes couches rencontrées dans ce sondage sont conformes aux épaisseurs données dans la littérature (Chauve, 1975 ; notice de la carte géologique du BRGM à 1/50 000).

La profondeur à laquelle a été rencontré le calcaire du Séquanien inférieur confirme l'hypothèse émise sur la tectonique de la colline du Bois de Peu au voisinage du viaduc des Mercureaux. En effet, le rejet observé à l'affleurement entre les compartiments a1 et a2 coïncide avec le rejet entre les compartiments b1 et b2, déterminé par la loca-

lisation du toit du Séquanien inférieur. Les quatre compartiments structuraux, délimités par les deux failles F1 et F2, ont été identifiés et localisés.

Définition des appuis basée sur un modèle géologique tridimensionnel

Comme indiqué sur la figure 10, l'implantation des appuis P6 et C7 du viaduc a été optimisée pour éloigner les fondations des zones faillées. Compte tenu des difficultés à représenter le profil géotechnique du site dans des vues en plan, un modèle géologique tridimensionnel, basé sur les observations de terrain et les travaux de reconnaissance, a été constitué par la société EOSYS. Ce modèle, représenté sur la figure 11, a permis d'affiner les niveaux d'appuis des fondations et d'orienter les campagnes de reconnaissance ultérieures, nécessaires au dimensionnement en phase de projet.

Le franchissement par le viaduc d'un éperon rocheux, de deux failles et d'un cône d'éboulis conduit à employer différents systèmes de fondation, adaptés aux différentes conditions géotechniques. Entre la culée C1 (profil 84) et la pile P4 (profil 90 + 15 m), les terrains rencontrés sont des marno-calcaires et des marnes du Séquanien moyen. Ces appuis seront fondés sur des semelles superficielles réalisables sans difficulté.

Entre les profils 91 et 95, se trouve l'éperon calcaire du Séquanien supérieur, en contact avec les formations marneuses du Séquanien moyen par l'intermédiaire de la faille F1, sub-verticale, légèrement oblique par rapport à l'axe de la colline du Bois de Peu. Considérant l'importante fracturation sub-verticale du calcaire, la présence de karsts et la proximité de la falaise, les efforts devront être reportés en profondeur, dans les marno-calcaires et marnes du Séquanien moyen, situés sous la base de l'éperon calcaire. Pour réaliser l'appui de la pile P5, les fondations seront de type puits marocain ou barrettes rectangulaires d'environ 20 m de profondeur. Aucune injection de l'éperon ne devra être effectuée pour ne pas créer de barrière étanche pouvant induire des poussées hydrauliques à l'arrière de l'éperon, par mise en charge du plan de faille.

Au-delà du profil 95, il sera nécessaire de traverser la couche d'éboulis, puis les couches marneuses glissées ou fauchées et de fonder les appuis de la pile P6 et de la culée C7 dans les marno-calcaires et marnes du Séquanien moyen en place. Par conséquent, les fondations de ces appuis seront de type puits marocain d'environ 25 m de profondeur.

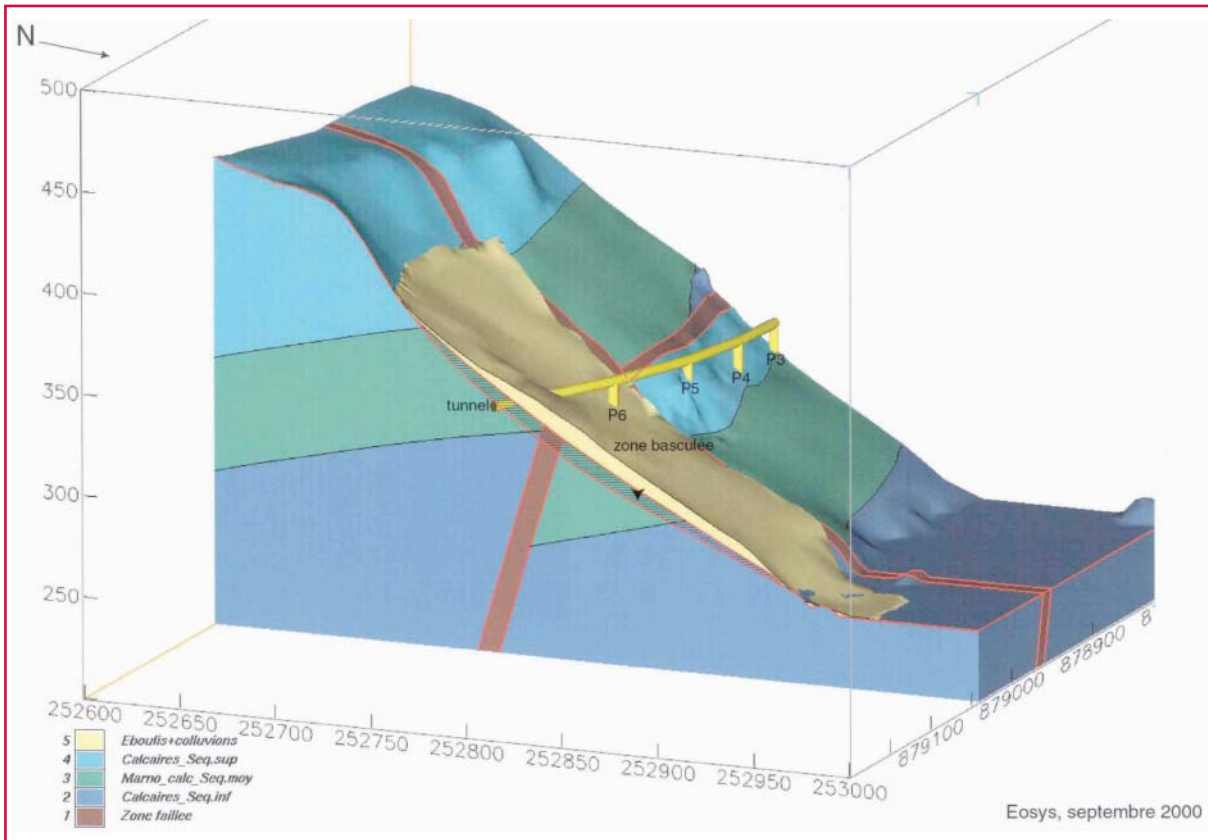


Fig. 11 - Modèle géologique tridimensionnel du secteur du viaduc des Mercureaux (Document EOSYS).

Conclusion

L'étude géologique menée dans le cadre de l'étude des fondations du viaduc des Mercureaux a montré que le projet allait être réalisé dans un site très perturbé, où les conditions géotechniques étaient essentiellement liées à la géologie locale du faisceau Bisontin.

Une analyse de terrain approfondie a montré que le tracé du viaduc des Mercureaux recoupait deux failles, dont une correspondait à un accident majeur du faisceau Bisontin, un éperon rocheux disloqué et un cône d'éboulis.

Dans ces terrains carbonatés, les principaux marqueurs de la série du Jurassique supérieur ont été identifiés par l'analyse des enregistrements de radioactivité en forage. L'identification de ces marqueurs a permis de préciser les conditions géologiques au droit de la culée C1 et des piles P2 à P5, information essentielle pour définir les fondations d'un viaduc exceptionnel dans un versant accidenté.

Deux sondages carottés profonds ont dû être réalisés dans le cône d'éboulis, au-delà de l'appui P5.

Une analyse des pendages et de la lithologie des formations rencontrées dans ces forages, basée sur des relevés par caméra numérique, a permis d'expliquer le jeu des failles dans cette zone de la colline du Bois de Peu et de préciser ainsi les conditions géologiques au voisinage des deux derniers appuis du viaduc, la pile P6 et la culée C7.

Enfin, compte tenu des difficultés à représenter la géologie du site dans des vues en plan, un modèle géologique tridimensionnel, basé sur les observations de terrain et les travaux de reconnaissance, a été réalisé.

L'implantation, le type et le niveau de fondation de chaque appui de l'ouvrage ont été définis en fonction des contraintes induites par la géologie du site. La culée C1 et les piles P2 à P4 pourront être fondées sur semelles superficielles, sans crainte d'induire de mouvement dans le versant. La fondation de la pile P5 devra traverser l'éperon rocheux, en place dans la série géologique, mais trop disloqué pour supporter une fondation. La pile P6 et la culée C7, situées dans le cône d'éboulis, ont dû être déplacées, pour être fondées par puits marocains à distance des failles.

Les références bibliographiques mentionnées ci-dessous ont essentiellement servi à la compréhension du site géologique.

BAILLY C., *Étude géologique de la vallée du Doubs et de ses abords à l'est de Saint-Hippolyte (Doubs)*, Thèse présentée à la faculté de Besançon, 1979.

CAILLEUX M., *Étude des diagraphies instantanées en forage*, Rapport de recherche, LCPC, 1986.

Pr. CHAUVE, *Guide géologique régional du Jura*, Édition Masson, 1975, 216 pages.

CRIPPS A.C., Mc CANN D.M., The use of the natural gamma log in engineering geological investigations, *Engineering Geology*, **55**, 2000, pp. 313-324.

DOMON M., *Essai de carte géomorphologique appliquée à la carte de Besançon*, Thèse présentée à la faculté de Besançon, 1970.

HOMBERG C., ANGELIER J., BERGERAT F., LACOMBE O., *Nouvelles données tectoniques dans le Jura externe : apport des paléocontraintes*, Compte

rendu de l'Académie des Sciences, t. 318, série II, 1994, pp. 1371-1377.

LACOMBE O., ANGELIER J., *Évolution tectonique du Jura externe au Cénozoïque et perturbations de contraintes dans la zone transformante Rhin-Saône*, Compte rendu de l'Académie des Sciences, t. 317, série II, 1993, pp. 1113-1120.

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*, **1**, 1996, pp. 101-110.

PERRIN D., CHORVOT G., BRUGGER C., BRUN R., CORDIER R., DECREUX B., HALLIEZ D., LAURENT P., LÉILLOT J.-F., MOTTE D., NICOD L., TISSOT T., *Inventaire spéléologique du Doubs*, Tome II, Comité départemental de spéléologie du Doubs, 1988, 332 pages.

TSCHANZ X., *Analyse de la déformation du Jura central entre Neuchâtel (Suisse) et Besançon (France)*, *Belogae geol. Helv.*, 1990, pp. 543-558.

ABSTRACT

The Mercureaux Viaduct : Study of the foundation of large bridge built across a major fault lying in the Besançon fault system

P. Maurin

The road project along the Mercureaux route, which connects National Highway (RN) 57 with RN 273 in the south of the city of Besançon (eastern France), includes a 260-m long curved viaduct at the exit of a tunnel. An in-depth understanding of the geology of this sector (called "Le Bois de Peu") has proved vital to establishing both the location and type of foundation system for the viaduct.

A geological analysis of the site revealed that the foundation zone was crossed by two faults : the first is a major inverse fault, running parallel to the Doubs River, with a throw of over 40 m in the Séquanien rock formations. The second is out of alignment from the first at the location of the viaduct. The two faults together create four distinct structural compartments.

The combined geological and geotechnical analyses of both the site and project included two main steps :

- In the first step, a series of destructive borings was performed. Measurements of natural radioactivity in the boreholes led to the definition of the geology of three of the four compartments.
- The second step focused the investigation on characterizing the fourth compartment, which was highly-fractured underneath rock debris. Core sampling, 50-m deep, were performed in conjunction with natural radioactivity measurements and the use of a digital camera in the boreholes to define the orientation of rock fractures.

Finally, due to the site's complexity, all results obtained were run through a 3D synthesis model. As a result of this study, one of the structural supports (initially located in the rock debris zone near the intersection of the two faults) was moved to a sufficient distance from both faults and a foundation on a 25-meter deep shaft was set up.