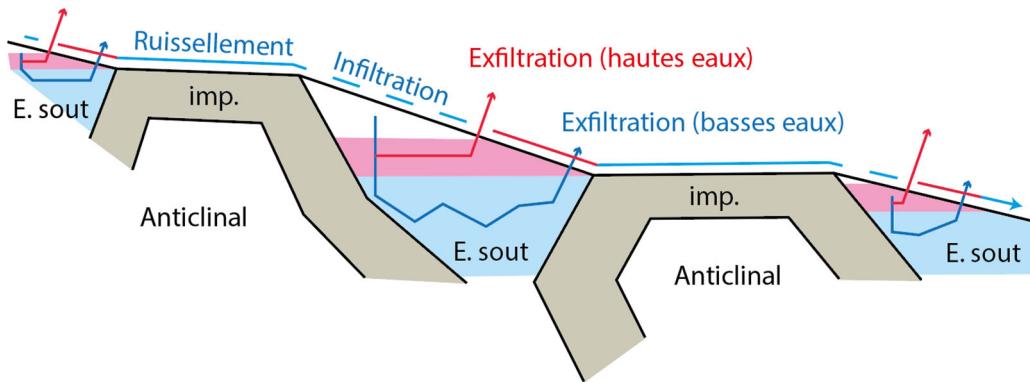


Mandants : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, délégation Besançon
Office fédéral suisse de l'environnement, Berne
Service de l'Environnement de l'Etat de Neuchâtel
Office de l'Environnement du canton du Jura

KARSYS Doubs

Hydrogéologie du bassin du Doubs transfrontalier CH/FR



La Chaux-de-Fonds, le 12.02.2025

Titre :	KARSKY Doubs ; hydrogéologie du bassin du Doubs transfrontalier CH/FR
Auteurs :	Arnauld Malard, Eric Weber, Simon Pettelat, Pierre-Yves Jeannin
1 ^{ère} de couverture :	Fonctionnement schématique des relations nappes-rivières en milieu karstique (cas typique du Jura)
Mandants :	Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, 34 rue de la Corvée, 25000 Besançon. Contact : Thierry Marguet Office fédéral suisse de l'environnement, CH-3003 Berne. Contacts : Daniel Hefti, Marc Schürch, Thierry Arnet Service de l'Energie et de l'Environnement de l'Etat de Neuchâtel, Rue du Tombet 24, CH-2034 Peseux. Contact : Isabelle Butty Office de l'Environnement du canton du Jura, Chemin du Bel'Oiseau 12, CH-2882 Saint-Ursanne. Contact : Jean Fernex
Mots clés :	karst, aquifère, nappe karstique, Doubs transfrontalier, source, zone de sauvegarde, eau souterraine, Jura, Suisse, France.
Remarques :	Le présent rapport a été établi par l'ISSKA, sous sa seule responsabilité, selon les règles de l'art et sur la base des données disponibles. Le contenu, les interprétations et les conclusions qu'il contient n'engagent que son auteur.
En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :	<i>ISSKA (2024) KARSKY Doubs ; hydrogéologie du bassin du Doubs transfrontalier CH/FR. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, rapport non publié. 166 p.</i>

KARsys Doubs

Hydrogéologie du bassin du Doubs transfrontalier CH/FR

Table des matières

Table des matières

1.	Résumé	1
2.	Introduction.....	2
2.1.	Contexte	2
2.2.	Le projet KARsys Doubs CH/FR	3
2.3.	Collaborations.....	4
3.	Généralités hydrogéologiques	5
4.	Approche KARsys de caractérisation hydrogéologique	7
4.1.	Principes et apports.....	7
4.2.	Les étapes	9
5.	Modèles géologiques 3D.....	9
5.1.	Propriétés	9
5.1.1.	Emprise et découpage.....	9
5.1.2.	Principes	11
5.1.3.	Données utilisées	11
5.1.4.	Unités géologiques	11
5.1.5.	Lignes structurales.....	12
5.2.	Application	14
5.2.1.	M1 – St-Ursanne.....	14
5.2.2.	M2 – Saignelégier	15
5.2.3.	M3 – Maîche	16
5.2.4.	M4 – La Chaux-de-Fonds	17
5.2.5.	M5 – Orchamps-Vennes.....	18
5.2.6.	M6 – Le Locle	19
5.2.7.	M7 – Morteau.....	20
5.2.8.	M8 – Maison du Bois	22
5.2.9.	M9 – Pontarlier / Ste-Croix	23
5.2.10.	M10 – Frasne.....	25

5.2.11. M11 – Vallorbe.....	27
5.2.12. M12 – Mouthe / Foncine	28
6. Géométrie des aquifères.....	29
6.1. Généralités	29
6.2. Données utilisées	30
6.3. Modèles de données	31
7. Schéma hydrogéologique Doubs amont aval	33
7.1. Source Doubs → confluence lac de Remoray [940-850 m].....	34
7.2. Confluence lac de Remoray → la Cluse et Mijoux [850 - 843 m]	37
7.3. La Cluse et Mijoux → confluence Drugeon [843 - 800 m].....	40
7.4. Confluence Drugeon → Ville du Pont [800 - 775 m]	42
7.5. Ville du Pont → Côte Brune (aval du défilé d'Entreroches) [775 - 753 m].....	46
7.6. Côte Brune (aval défilé d'Entreroches) → aval lac Brenets / Chaillexon [753 – 751 m].....	48
7.7. Aval lac Brenets / Chaillexon → barrage du Refrain [751 – 610 m].....	50
7.8. Barrage du Refrain → Theusseret [610 – 505 m]	53
7.9. Theusseret → Soubey [505 – 470 m].....	55
7.10. Soubey → seuil St-Ursanne [470 – 435 m]	59
7.11. Seuil St-Ursanne → Brémoncourt [435 – 416 m]	61
8. Bassin d'alimentation hydrogéologique.....	63
9. Evolution récente de l'hydrologie du Doubs.....	65
9.1. Les phénomènes naturels	65
9.1.1. Les glissements / éboulements	65
9.1.2. Les captures souterraines	66
9.2. Artificialisation.....	66
9.2.1. Les barrages	66
9.2.2. Etanchéification et colmatage	67
9.2.3. Drainage et alimentation.....	67
10. Incertitudes et propositions d'investigations	68
10.1. Géologiques.....	68
10.2. Hydrogéologiques	69
10.2.1. Données aux sources	69
10.2.2. Hauteurs de nappes	69
10.2.3. Connexions démontrées par traçage	71
10.2.4. Captures	71
10.3. Hydrologiques	71
11. Perspectives	72
12. Conclusion.....	73
13. Références bibliographiques.....	75

Liste des Figures

Figure 1. Les partenaires financiers (💡), techniques (💡) et autres acteurs institutionnels (💡) du projet KARSYS Doubs CH/FR.	4
Figure 2. Unités stratigraphiques simplifiées du massif du Jura (Bichet and Campy, 2009) et propriétés hydrogéologiques associées. Dans le détail, les unités peuvent significativement varier spatialement (notamment celles du Crétacé et de l’Oxfordien). Des colonnes stratigraphiques propres à chaque région ont été définies. Se reporter aux sections relatives à chaque modèle (§. 4.) et au Tableau 4.	6
Figure 3. De l'amont vers l'aval, la rivière Doubs contribue à l'alimentation et – en même temps – au drainage des différents blocs aquifères (« E. sout ») qui sont isolés entre eux par des structures imperméables sur lesquelles le Doubs coule de manière conservative et peut collecter des écoulements de surface. En fonction des conditions hydrologiques (basses / hautes eaux), la rivière peut ainsi contribuer à alimenter le compartiment aquifère en amont et drainer le même compartiment en aval, à l'approche des zones imperméables avant de continuer sa course vers le prochain compartiment aquifère.	7
Figure 4. Les écoulements souterrains dans les aquifères karstiques s'organisent en fonction de la géométrie des réservoirs (karstifiés considérés comme aquifères et non-karstifiés considérés comme aquiclude), de la structuration des zones vadoises / noyées et de la localisation des exutoires. Abréviations : imp. : aquiclude, Fvv : écoulement vadose vertical, Fvc : écoulement vadose contrôlé par l'aquiclude, Fplf : écoulement phréatique dans la nappe de basse eaux, Fphf : écoulement épiphréatique dans la nappe de hautes eaux.	8
Figure 5. Principes d'extrapolation du gradient hydraulique de la nappe karstique dans l'aquifère (a., b. et c.) et cas d'un aquifère organisé en compartiments (d.), hydrauliquement déconnectés mais organisés en « cascade » (Malard, 2018). Dans ce cas, la ligne de déversement d'un compartiment vers le suivant est appelée « seuil » et dessinée sur les cartes.	8
Figure 6. Aperçu du découpage des modèles géologiques M1 à M12.	10
Figure 7. Principe d'harmonisation des limites entre les modèles géologiques adjacents. Des profils sont établis au niveau du modèle de référence et appliqués aux modèles voisins (typiquement la bordure ouest du modèle M7 est utilisée comme référence pour la bordure est du modèle M8).	11
Figure 8. Principales lignes structurales : chevauchements, rétro-chevauchements et décrochements identifiées et reproduites dans les modèles géologiques 3D M1 à M12. Le numéro fait référence à l'ID du Tableau 9, Annexe A.	13
Figure 9. Log stratigraphique des unités géologiques de la région couverte par le Modèle M1 (Caë, 2016). Le log sert à l'établissement de la colonne stratigraphique du Tableau 2.	14
Figure 10. Aperçu du modèle géologique 3D M1 – St Ursanne. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est correcte.	15
Figure 11. Aperçu du modèle géologique 3D M2 – Saignelégier. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est correcte, sans être abondante.	16
Figure 12. Aperçu du modèle géologique 3D M3 – Maîche. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est très variable. Les profils sont inexistant dans le quart sud-ouest.	17
Figure 13. Aperçu du modèle géologique 3D M4 – La Chaux-de-Fonds. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est correcte.	18
Figure 14. Aperçu du modèle géologique 3D M5 – Orchamps-Vennes. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est faible, et les profils sont globalement mal répartis.	19
Figure 15. Aperçu du modèle géologique 3D M6 – le Locle. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est plus que correcte.	20
Figure 16. Aperçu du modèle géologique 3D M7 – Morteau. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est globalement correcte.	21

Figure 17. Colonne lithostratigraphique représentative du secteur M8. J6, J7 et J8 sont hydrogéologiquement continus. La base du Séquanien (J7) n'est pas marneuse. Ce log sert à l'établissement des unités géologiques représentatives du modèle M8 (Tableau 2).	22
Figure 18. Aperçu du modèle géologique 3D M8 – Maison du Bois. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est faible et les profils sont globalement de mauvaise qualité.	22
Figure 19. Profil géologique NW/SE traversant la montagne du Larmont (Castany et al., 1930). Le chevauchement noté dans le coin NW est en réalité un rétro-chevauchement plongeant dans la direction opposée. Le profil traverse aussi en partie le modèle M9.	23
Figure 20. Profil géologique NW/SE régional traversant toute la chaîne (Sommaruga, 1997). Le segment à l'ouest traverse la vallée du Doubs à hauteur de Maison du Bois, on y voit la trace du chevauchement #CHE_DOUBS (ID 101) et le faible raccourcissement.	23
Figure 21. Log stratigraphiques des terrains Crétacé et Jurassique à l'affleurement en aval de Pontarlier (SMESD, 1994). Dans le secteur de Métabief s'ajoutent aussi 30 m de marnes du Barrémien et 70 m de molasse du Miocène. Ce log sert à l'établissement de la colonne stratigraphique du modèle M9 (Tableau 2).	24
Figure 22. Profil transversal de la plaine de Métabief – secteur Brief rouge (Cornet, 1977).	25
Figure 23. Aperçu du modèle géologique 3D M9 – Pontarlier / Ste-Croix. La trace du décrochement de Pontarlier est visible à l'ouest du modèle. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est correcte, mais ils sont globalement mal distribués.	25
Figure 24. Colonne lithostratigraphique des unités géologiques présentes dans la région du modèle M10. Ce log sert à l'établissement de la colonne stratigraphique du modèle M10 - Frasne.	26
Figure 25. Aperçu du modèle géologique 3D M10 – Frasne. La plaine de Pontarlier se démarque par un large et épais dépôt de formations quaternaires (en gris sur le modèle). La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est faible. Les profils sont de faible profondeur et globalement mal distribués.	27
Figure 26. Aperçu du modèle géologique 3D M11 – Vallorbe. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est correcte, même si le quart nord-ouest du modèle est peu couvert.	28
Figure 27. Aperçu du modèle géologique 3D M12 – Mouthe / Foncine. La trace du décrochement de Mouthe est bien visible à l'est du modèle. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est globalement correcte, sans toutefois être abondante.	29
Figure 28. Localisation des principales sources karstiques, mesures des hauteurs d'eau en forages ou en cavités sont les principales informations utilisées pour la structuration des zones noyées (Malard et al., 2014a).	31
Figure 29. Schéma d'un profil hydraulique d'une rivière en milieu karstique. Une forte pente hydraulique associée à l'absence de dépôts alluvionnaires suggère une forte dynamique d'érosion et donc un niveau de base hydraulique bien plus bas que l'altitude du fond du lit. Une pente faible (proche du gradient hydraulique karstique), associée à des plaines de dépôts suggèrent que le niveau de base est proche de l'altitude de la surface libre du cours d'eau.	31
Figure 30. Principes de représentation des nappes karstiques en 3D et en 2D. La complexité de l'objet et les informations qui y sont associées nécessitent un modèle de données spécifique pour la documentation.	32
Figure 31. Aperçu du tronçon Source Doubs → confluence lac de Remoray	34
Figure 32. Aperçu du tronçon confluence lac de Remoray → la Cluse et Mijoux	37
Figure 33. Localisation des zones de pertes sur le tronçon entre Oye-et-Pallet et le resserrement de la cluse entre la Fontanette et les Rosiers (1 : en aval des Angles, 2 : sous la D437 et 3 : à l'entrée de la cluse). Les marais des Prés Lavaux, supposés être des émergences des aquifères karstiques du Crétacé sont mis en évidence.	39
Figure 34. Aperçu du tronçon La Cluse et Mijoux → confluence Drugeon	40
Figure 35. Aperçu du tronçon Confluence Drugeon → Ville du Pont	42

Figure 36. Aperçu 3D de la géométrie du toit des marnes de l'Aalénien (couche violette) le long de l'anticlinal du Mont Pelé. A cet endroit, le décrochement de Pontarlier conduit à une remontée du bloc est, laissant apparaître le couloir dans le bloc ouest avec un seuil de débordement situé vers 775 m – marqué par la flèche rouge. Aux incertitudes près du modèle géologique – cette cote est tout à fait cohérente avec l'hypothèse d'un débordement vers 755 m qui draine la nappe d'eau souterraine karstique d'Arçon (FNK041) vers la source de la Loue. Un aperçu en coupe projeté est présenté en Figure 37.

43

Figure 37. Organisation supposée des écoulements entre les pertes du Doubs en aval de Pontarlier (secteur « Maison du Bois ») et la Loue. Le fonctionnement de la zone de pertes à Maison du Bois est illustré en Figure 38. Relevons qu'il s'agit ici d'une simplification schématique en deux dimensions synthétisant des écoulements qui se produisent en réalité en trois dimensions. Il ne s'agit en aucun cas d'un profil géologique ou hydrogéologique réel.

44

Figure 38. Principes du phénomène de capture des eaux au niveau des zones de pertes de Maison du Bois (Cabinet Reilé, 2018). Les pertes alimentent la nappe FNK041 dont les écoulements sont dirigés vers la nappe du Jurassique moyen (FNK048) à travers la mise en contact des compartiments aquifères par le décrochement de Pontarlier. Les écoulements sont ensuite dirigés vers le seuil qui se développe sous la Vrine et alimentent la nappe FNK021, elle-même drainée par la source de la Loue (Figure 37).

45

Figure 39. Aperçu du tronçon Ville du Pont → Côte Brune (aval défilé d'Entreroches)

46

Figure 40. Aperçu du tronçon Côte Brune (aval défilé d'Entreroches) → aval lac Brenets / Chaillexon

48

Figure 41. Aperçu du tronçon Aval lac Brenets / Chaillexon → barrage du Refrain

50

Figure 42. Profil géologique transversal supposé au niveau du Saut du Doubs présentant les deux phases de glissement qui ont formé le verrou actuel à l'altitude de 751 m au débouché du lac des Brenets (ISSKA, 2017).

51

Figure 43. Aperçu du tronçon Aval lac Barrage du Refrain → Theusseret

53

Figure 44. Profil géologique transversal au Doubs en aval du barrage du Refrain. Le lit du Doubs passait plus au nord et a été déplacé vers le sud suite au glissement, et s'est retrouvé probablement plus haut altimétriquement qu'avant le glissement (Buxtorf, 1922).

54

Figure 45. Aperçu du tronçon Theusseret → Soubey

55

Figure 46. Géométrie et fonctionnement supposé des nappes FNK039 et FNK066.

56

Figure 47. Aperçu de la structuration géologique et hydrogéologique de la cluse de Goumois et de l'organisation des systèmes hydrogéologiques alimentant les sources du Theusseret, de la Forge et de Blanchefontaine (dessin U. Eichenberger, ISSKA).

57

Figure 48. Aperçu du tronçon Soubey → seuil St-Ursanne

59

Figure 49. Aperçu du tronçon Seuil St-Ursanne → Brémoncourt

61

Figure 50. Bassin d'alimentation hydrogéologique du Doubs transfrontalier.

63

Figure 51. Réponse hydrologique du Doubs aux récents éboulements. **A** : le cours d'eau incise le relief et conduit à la déstabilisation des flancs. **B** : l'éboulement ou le glissement se produit et conduit à la mise en place d'un seuil qui élève le niveau de base hydraulique, à la fois pour le cours d'eau mais aussi pour les aquifères karstiques dont l'exutoire est contrôlé par le cours d'eau. Une retenue d'eau se met en place, les sources continuent à émerger sous le niveau du plan d'eau et d'éventuelles pertes se créent à la base de la retenue – voire à travers la masse éboulée / glissée. **C** : les sédiments comblent progressivement le plan d'eau de l'amont vers l'aval. Les sources maintiennent leurs exutoires à travers les dépôts sédimentaires et les pertes s'intensifient. **D** : le verrou est progressivement érodé, abaissant le niveau du cours d'eau qui entaille les sédiments en amont et découvre les dépôts en bordure (terrasses). La sédimentation progresse vers le verrou et conduit à terme au comblement du plan d'eau. Le niveau de base baisse aussi dans l'aquifère au fur et à mesure de l'incision du verrou.

65

Figure 52. Le lac de Biaufond en juillet 1881, la rive Suisse est à gauche de l'image, la rive française à droite. Une piste carrossable traverse tout le lac de Biaufond jusqu'au barrage du Refrain (Source : Archives du Service des Ponts et chaussées, Neuchâtel, secteur des ouvrages d'art).

67

Figure 53. Bien souvent, la représentativité des données mesurées (débits et hauteurs d'eau) dans les aquifères karstiques ne peut être assurée qu'après comparaison / corrélation avec d'autres données, les relations hydrauliques étant principalement contrôlées par l'organisation géométrique des conduits, leur taille (la plupart du temps inconnue) et la position des exutoires (Malard, 2018).	70
Figure 54. Débits moyens des stations de mesure du Doubs (CH et FR) en fonction de la distance à la source.	71
Figure 55. Symbologie utilisée pour les unités géologiques utilisées dans les modèles visualkarsys.	1
Figure 56. La source de l'Ain, à gauche, en crue en octobre 2008 et à droite, à l'étiage en aout 2018 (source visinand.ch)	20
Figure 57. Profil hydrogéologique NS le long du lit du Dessoubre à hauteur de la source des 3 Pucelles. Les formations du Callovien (« Call. ») sont marneuses, relativement imperméables. La nappe FNK010 est donc majoritairement captive en aval de la source.	21
Figure 58. La représentation des nappes karstiques en plan (gauche) ne reflète pas toujours la complexité en profondeur (droite), surtout dans les secteurs où il y a superposition des compartiments aquifères. M = calcaires aquifères. A. cas d'un synclinal simple, B. cas d'un synclinal chevauché, C. cas d'un synclinal chevauché et rétro-chevauché (Malard et al., 2012).	52
Figure 59. Assemblage des cartes hydrogéologiques M1 à M12 - 1/25'000	53
Figure 60. Légende des cartes hydrogéologiques karstiques 1/25'000.	54
Figure 61. Exemple de structuration / désignation des calques aquifères de la carte hydrogéologique 1/25'000 au format .pdf du modèle M1.	54
Figure 62. Tracés des 14 profils hydrogéologiques transversaux et emprises des modèles géologiques M1 à M12.	60
Figure 63. Modèle de données SIG utilisé pour la documentation des informations hydrogéologiques karstiques.	63
Figure 64. Contenu de la Geodatabase ArcGIS qui contient les géodonnées.	64
Figure 65. Principes de saisie des informations de positionnement relatif des nappes [MNK] par indication de la nappe ou des nappes sus-jacentes dans la colonne « MNK_UP ». La colonne « MNK_ORDER » est renseignée via un script et indique la position « absolue » de la nappe les unes par rapport aux autres. Cas a., les nappes A, B et C se superposent les unes par rapport aux autres ; elles prennent respectivement les positions 1, 2 et 3. Cas b., les nappes A et B se jouxtent et se placent en dessus de C ; elles prennent donc respectivement les positions 1, 1 et 2.	70
Figure 66. Principes d'indexation des positions absolues des nappes.	70
Figure 67. Couche raster des formations aquiclude et isolignes d'altitude de la base de données RASTERS_BASE_AQUIFERE.gdb.	72

Liste des Tableaux

Tableau 1. Emprises spatiales des 12 modèles géologiques dans les systèmes de coordonnées en vigueur en Suisse (EPSG 2056) et en France (EPSG 2154)	10
Tableau 2. Présence et épaisseurs indicatives des unités géologiques par modèle. Les unités encadrées par une ligne rouge sont considérées comme peu perméables (aquiclude locaux ou régionaux). Les épaisseurs respectives des unités peuvent varier considérablement d'un modèle à l'autre, mais elles varient aussi souvent au sein des modèles.	12
Tableau 3. Log stratigraphique simplifié des unités géologiques présentes dans la région du modèle M7. Ce log sert à l'établissement des unités géologiques représentatives du Modèle M7 (Tableau 2).	20
Tableau 4. Propriétés hydrogéologiques des unités géologiques définies pour les modèles M1 à M12. Les unités sont soit « aquifères » (bleu), soit « aquiclude » (brun), soit notées comme « 50/50 » car des variations	

<i>latérales de faciès se produisent sur l'emprise du modèle (typiquement l'Oxfordien supérieur sur les modèles M2 et M3).</i>	30
<i>Tableau 5. Nature des limites du bassin d'alimentation hydrogéologique du Doubs.</i>	64
<i>Tableau 6. Fiabilité des limites du bassin d'alimentation hydrogéologique du Doubs</i>	64
<i>Tableau 7. Incertitudes des modèles géologiques</i>	69
<i>Tableau 8. Gauche : emprises des modèles sur les feuilles 1/50'000 des cartes géologiques FR. Droite : emprise des modèles sur les feuilles 1/25'000 des cartes géologiques CH.</i>	1
<i>Tableau 9. Liste des principales lignes structurales</i>	2
<i>Tableau 10. Sources karstiques en lien direct ou indirect avec le système hydrogéologique du Doubs transfrontalier. Les sources marquées d'un « * » n'ont aucun lien hydrogéologique avec le système hydrogéologique du Doubs transfrontalier.</i>	14
<i>Tableau 11. Liste des stations de mesures des débits du Doubs FR / CH. A l'exception de la station Arçon*, désinstallée en 1985, toutes sont en service courant 2024</i>	15
<i>[Page suivante] Tableau 12. Valeurs de débits mesurées ou estimées des stations de mesures, affluents, sources et pertes qui ponctuent le Doubs d'amont en aval. Source « P » (permanente), « T » (temporaire), « neg » (négligeable).</i>	15
<i>Tableau 13. Description des principales nappes karstiques en relation avec le Doubs transfrontalier ou avec les systèmes hydrogéologiques adjacents (Areuse, Ain, Dessoubre, etc.). Les altitudes de nappe sont données en conditions de basses eaux. Les valeurs entre (...) correspondent aux altitudes mesurées ou supposées en conditions de hautes eaux. Les nappes marquées « * » ne sont pas liées au système hydrogéologique du Doubs transfrontalier.</i>	50
<i>Tableau 14. Commentaires complémentaires aux calques des cartes hydrogéologiques karstiques 1/25'000</i>	57
<i>Tableau 15. Description des géodonnées qui composent le modèle de données des informations relatives aux aquifères karstiques.</i>	62

Liste des Annexes

Annexe A. Géologie
Annexe B. Sources karstiques
Annexe C. Valeurs de débits
Annexe D. Nappes karstiques
Annexe E. Cartes hydrogéologiques karstiques 1/25'000
Annexe F. Doubs : profil hydrogéologique longitudinal
Annexe G. Doubs : profils hydrogéologiques transversaux
Annexe H. Géodonnées & Modèle de données

KARSYS Doubs

Hydrogéologie du bassin du Doubs transfrontalier CH/FR

1. Résumé

Le projet « **KARSYS Doubs CH/FR** » a pour objectif de documenter le fonctionnement hydrogéologique du bassin du Doubs transfrontalier - dont le régime est essentiellement conditionné par la structuration des aquifères karstiques et l'écoulement des eaux souterraines – via l'application d'une approche KARSYS (Jeannin et al., 2013).

Les axes du projet s'articulent autour des points suivants :

- Comprendre et décrire **l'organisation des aquifères karstiques** alimentés par / ou alimentant le Doubs transfrontalier :
 - o Géométrie des aquifères
 - o Localisation des réserves en eau souterraine (zones noyées)
- Comprendre et décrire **l'organisation des écoulements souterrains** alimentés par / ou alimentant le Doubs transfrontalier :
 - o Décrire les systèmes hydrogéologiques des différentes sources karstiques à enjeux.
- Comprendre et décrire le **fonctionnement hydrogéologique** du Doubs transfrontalier
 - o Schéma hydrogéologique
 - o Relations nappe / rivière
- Evaluer les incertitudes et décrire les investigations à envisager pour préciser les informations

Ce projet - officiellement démarré en juillet 2022 - est financé par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, l'Office Fédéral de l'Environnement, le Service de l'Environnement du canton de Neuchâtel et le Service de l'Environnement du canton du Jura.

Dans le cadre de ce projet, des travaux complémentaires ont été réalisés pour le compte de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. Il s'agit notamment :

- De l'élaboration des **cartes du karst 1/50'000** sur l'ensemble du territoire du Doubs transfrontalier (ISSKA, 2023a).
- De la détermination des **zones de sauvegarde** pour 13 Ressources Karstiques Majeures (RKM) identifiées dans le bassin du Doubs transfrontalier (ISSKA, 2024a).

Les travaux ont permis de proposer un **schéma hydrogéologique** du cours d'eau depuis sa source à Mouthe, jusqu'au village de Brémontcourt, décrivant les relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines des aquifères karstiques et proposant ainsi un bassin d'alimentation qui s'étend des deux côtés de la frontière.

93 nappes karstiques des aquifères du Crétacé, Jurassique sup. ou Jurassique moy. ont été décrites dans le bassin hydrogéologique du Doubs et les systèmes aquifères adjacents (Areuse, Suze, Dessoubre, Sorne, etc.) dont certains entretiennent des **relations hydrologiques** ou hydrauliques avec le Doubs (Loue, Ain) et près d'une cinquantaine de systèmes hydrogéologiques en connexion avec le cours d'eau ont été identifiées et partiellement documentées.

L'étude montre que l'hydrologie du Doubs est principalement contrôlée par une succession de pertes et d'apports, les pertes pouvant alimenter d'autres systèmes (captures du cours d'eau ou de ses affluents par l'Ain ou par la Loue, voire par la Saine ou l'Areuse) ou revenir dans le Doubs plus en aval (captures internes au cours d'eau). Ces phénomènes sont en partie **naturels**, en lien avec le rééquilibrage de la rivière suite à son histoire géologique ou aux différents éboulements qui ont perturbé son cours, mais peuvent être en partie **anthropiques**, en lien avec la création des ouvrages d'eau (barrages hydroélectriques, seuils, etc.) qui ont partiellement modifié l'hydrologie naturelle. La compréhension de l'hydrologie du cours d'eau est donc indissociable de l'organisation et du fonctionnement des systèmes aquifères qui se développent le long du cours d'eau ou en marge de celui-ci.

L'étude documente et quantifie aussi les **potentielles réserves / ressources** en eau souterraine sur le bassin transfrontalier (nappes karstiques) qui peuvent être mises à profit pour l'alimentation – que ce soit par forage ou par galerie drainante. Ces nappes offrent très souvent une alternative intéressante aux captages classiques par source (meilleure qualité, contrôle des régimes, possibilité de surexploitation, surfaces de protection moindre, etc.) mais leur exploitation requiert davantage d'investigations. L'échelle de travail du projet ne permet pas d'apporter le degré de connaissance nécessaire au dimensionnement de tels ouvrages mais caractérise déjà les potentialités.

L'étude montre enfin que de nombreuses connaissances, tant géologiques que hydrogéologiques, restent à acquérir pour mieux contraindre l'hydrologie du cours d'eau et envisager, à termes, des mesures efficaces de gestion qui visent les objectifs suivants :

- Assurer les besoins en eau pour les différents usages :
 - o Approvisionnement en eau (potable et agricole),
 - o Hydroélectricité,
 - o Services écologiques,
 - o Activités de loisirs,
- Restaurer et préserver la qualité des eaux,
- Prévenir les risques naturels (inondations, etc.).

Et ce via une concertation transfrontalière sur les sections concernées.

Le développement des activités sur le bassin, les changements climatiques et les phénomènes géologiques de capture sont autant de processus en cours qui, à moyen terme, continueront d'impacter l'hydrologie du cours d'eau.



L'étude se base sur des données et des informations recueillies dans la littérature (documents académiques, rapports techniques, etc.), souvent lacunaires et parcellaires, des principes géologiques et hydrogéologiques et de nombreuses hypothèses qui toutes n'ont pas été vérifiées. Les résultats doivent donc être considérées avec prudence compte tenu des incertitudes géologiques et hydrogéologiques. La documentation proposée dans le cadre de ce projet est donc supposée évolutive et devrait faire l'objet de mise à jour au fur et à mesure de l'acquisition des connaissances.

2. *Introduction*

2.1. *Contexte*

Le Doubs est une **rivière transfrontalière**, alimentée essentiellement par des sources karstiques. Il est aussi infiltrant sur certaines parties de son cours, impliquant une très forte interaction entre la rivière et les circulations souterraines karstiques. La rivière et les eaux souterraines qui y sont associées assurent des services pour divers usages, aussi bien en France qu'en Suisse.

Les **enjeux relatifs à l'eau** (souterraine et surface) et **les priorités de gestion** peuvent différer en fonction des **besoins** (eau potable, eau agricole, hydroélectricité, services écologiques, etc.), des **usages** et des **réglementations**. Ces enjeux ont entraîné la réalisation de nombreuses études / projets actuellement en cours des deux côtés de la frontière. Les usages et les maîtres d'ouvrage sont variés et peuvent entrer en concurrence sur leur propre territoire. Dans cette situation actuelle, acquérir une vue d'ensemble des connaissances, des usages, des priorités de gestion et de préservation de la ressource en eau dans un

contexte de raréfaction de celle-ci et des partenaires concernés présente un intérêt évident pour l'ensemble des gestionnaires ou des acteurs du territoire.

Au travers des projets, passés ou présents, de **nombreuses connaissances ont été acquises** via différentes méthodes et pour différentes applications, mais force est de constater que ces **connaissances ne sont pas capitalisées à l'échelon régional qu'est le Doubs**, rendant ainsi difficiles les politiques d'aménagements ou de gestion, aussi bien de l'amont vers l'aval que de rive droite (CH) à rive gauche (FR).

La distinction entre **eaux souterraines** et **eaux de surface** pose par ailleurs un certain nombre de questions sur le plan de la gestion tant les deux notions sont liées dans le cas du Doubs. Les incidences d'actions de l'une sur l'autre ne sont pas toujours explicitement abordées ni intégrées. Les sujets relatifs à la gestion des assecs (p.ex. 2018), à l'étanchéification du lit du Doubs ou encore à la vidange du lac des Brenets / Chaillexon en sont des exemples.

2.2. Le projet KARSYS Doubs CH/FR

Le projet KARSYS Doubs CH/FR propose donc d'établir une **documentation** explicite, systématique et couvrante des informations hydrogéologiques qui peuvent être utilisées par tous les services / acteurs concernés. Cette étude doit apporter des éléments pratiques pour la gestion des eaux en général – aussi bien de surface que souterraines – sur le bassin transfrontalier du Doubs.

Le site d'étude couvre le **bassin hydrogéologique et hydrologique alimentant la rivière Doubs** entre sa source à **Mouthe** et le village de **Brémoncourt** qui marque la limite aval du **Doubs transfrontalier**, soit une surface de 1200 à 1'600 km². En effet, en aval de Brémoncourt, le Doubs coule intégralement sur le territoire français et sort du périmètre réglementaire franco / suisse.

Les étapes de la documentation sont les suivantes :

- 1) Construire des modèles géologiques 3D sur l'entier du territoire. Les modèles doivent reproduire la structuration des formations calcaires qui composent les aquifères principaux. Ceux-ci s'organisent souvent en « compartiments », séparés les uns des autres par des formations moins perméables dont la géométrie va dépendre des plissements et des cassures tectoniques (chevauchements, décrochements, etc.) ;
- 2) Délimiter les principales zones noyées (« les nappes karstiques ») en fonction de la géométrie des compartiments aquifères et des indices hydrologiques ;
- 3) Interpréter les directions souterraines d'écoulement, sur la base de l'organisation des nappes et des informations complémentaires (traçages, etc.) ;
- 4) Déduire de cette organisation un modèle de fonctionnement du bassin du Doubs et redéfinir les limites de son aire d'alimentation.

En ce qui concerne la ressource et l'approvisionnement en eau, les résultats du projet permettront :

- **De mieux localiser les ressources exploitables dans les zones noyées** (atteignables par forage). En fonction de la résolution des modèles et des incertitudes, ces résultats apportent les premiers éléments de réflexion pour discuter de l'emplacement d'un forage (profondeur,倾inlaison, etc.) en fonction de la cible aquifère identifiée ;
- De donner des **éléments d'information concernant le débit potentiellement exploitable** et la qualité supposée des eaux souterraines ;
- De mieux **caractériser les zones de recharge / décharge** des aquifères karstiques bordant le Doubs, y compris certains des 13 RMAJs¹ identifiés (Idées Eaux, 2013) ;

¹ Les Ressources Karstiques Majeures sont définies comme des systèmes hydrogéologiques stratégiques pour l'alimentation en eau potable. Le travail relatif au 13 RMAJs du bassin transfrontalier du Doubs est traité dans un document séparé remis à l'Agence de l'Eau RMC (ISSKA, 2024a).

- De mieux **protéger les ressources et captages à enjeux** (bassin d'alimentation, zone de protection), y compris sur les **zones de sauvegarde** (ZSE et ZSNEA)² des sites RMAJs identifiés en fonction des croisements d'information pressions / zones de recharge (SDAGE RM, 2021).

En ce qui concerne la planification, les résultats du projet permettront :

- D'évaluer au mieux les **scénarios d'aménagements, de construction** (route, tunnel, etc.) en fonction des paramètres géologiques et hydrogéologiques. Idem pour la géothermie (sondes géothermiques verticales notamment) ;
- De mieux **gérer les activités en surface** (agriculture, infiltration, assainissements collectifs et non collectifs) en fonction de la vulnérabilité des eaux souterraines.

2.3. Collaborations

La Figure 1 présente les différents partenaires et acteurs du projet KARSYS Doubs CH/FR. Le projet compte un partenaire technique principal (ISSKA) qui coordonne le projet et exécute les prestations sur la partie suisse et française, en appui avec le Cabinet Reilé pour ses connaissances régionales sur la partie française. Le projet compte un certain nombre d'acteurs institutionnels qui suivent le déroulement du projet. L'Agence de l'Eau RMC, la DREAL BFC et le Pôle Karst sont régulièrement consultés sur des aspects techniques, stratégiques et ou de communication en lien avec le projet – notamment sur la question des zones de sauvegarde.

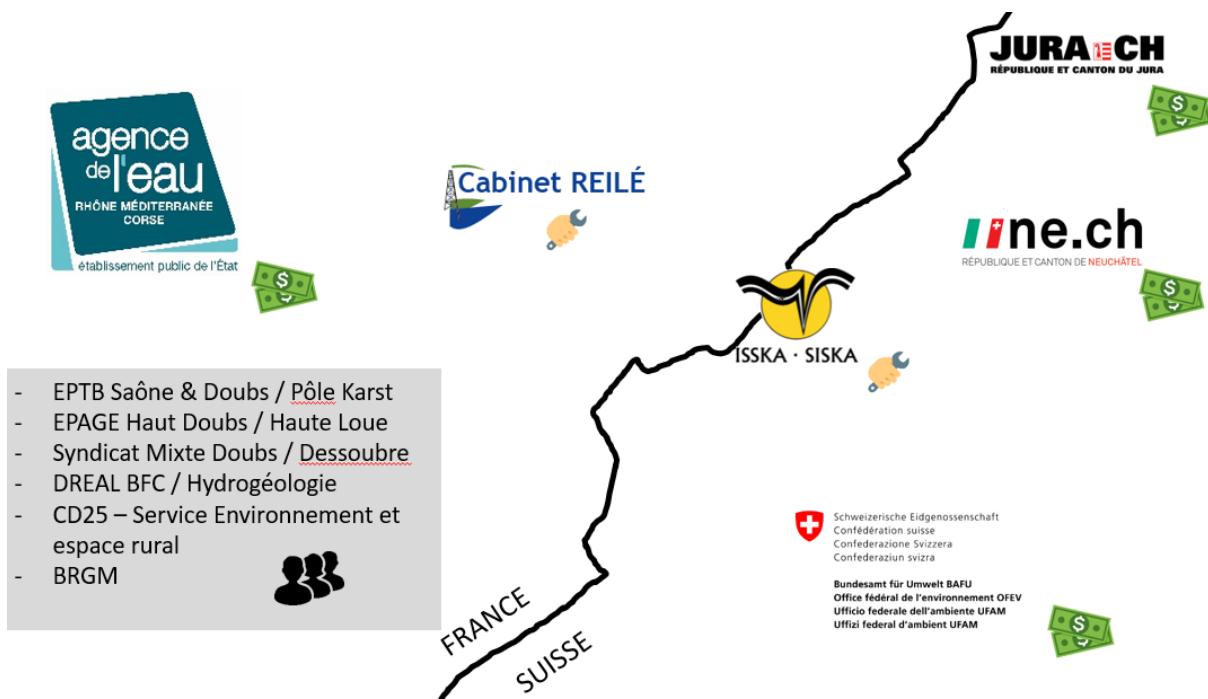


Figure 1. Les partenaires financiers (billets), techniques (clés) et autres acteurs institutionnels (personnes) du projet KARSYS Doubs CH/FR.

² Les Zones de Sauvegarde sont définies comme des sous-zonages des Ressources Karstiques Majeures qui doivent faire l'objet de mesures de protection spécifiques pour la protection des ressources en eau.

3. Généralités hydrogéologiques

L'**hydrogéologie** du massif du Jura est principalement dominée par le karst (Audra, 2010; Burger, 1989; Fournier, 1926; Gretillat, 1996; Mudry, 2009, etc.). En pratique, deux étages aquifères sont considérés de part et d'autre de la frontière comme abritant les réserves et ressources principales en eaux souterraines (cf. Figure 2) :

- L'aquifère karstique du **Jurassique supérieur (sup.)** en France ou « **Malm** » en Suisse. Cet aquifère alimente les sources les plus productives du territoire (Doubs, Dessoubre, Loue, Areuse, Lison, Noiraigue, source Bleue, etc.) et est largement utilisé pour l'alimentation en eau potable, que ce soit par captage des sources (ex : Besançon via la source d'Arcier, les communes de Haute-Loue, etc.) ou par forage (ex : Montbenoit via le puits Cinquin, la Brévine via le puits communal, communes des Franches Montagnes via le puits des Sauges, etc.).
- L'aquifère karstique du **Jurassique moyen (moy.)** en France ou « **Dogger** » en Suisse. Cet aquifère est relativement homogène (à l'exception des lithologies attribuées au Callovien qui peuvent être franchement calcaires ou franchement marneuses selon l'endroit). Il présente des bancs calcaires bien développés, surtout dans les étages du Bathonien et du Bajocien. Cet aquifère est souvent captif et produit une eau de bonne qualité. Il est de plus en plus utilisé pour l'alimentation en eau potable des grandes villes de Franche-Comté (Besançon, Branne, etc.) via des forages profonds. Côté Suisse, l'aquifère du Dogger assure l'essentiel de l'alimentation de la ville de la Chaux-de-Fonds via des galeries de captage (galerie Bossy, captage des Moyats) et des prospections sont en cours du côté de Sainte-Croix.

Deux autres blocs aquifères - secondaires – peuvent aussi être décrits :

- L'aquifère karstique du **Crétacé** (parfois encore subdivisé en 2 étages : **Crétacé inf.** et **Crétacé sup.**, voire davantage). Cet aquifère, hétérogène – car présentant plusieurs interlits marneux entre les bancs calcaires – représente toutefois une ressource importante dans les grands synclinaux : La Chaux-de-Fonds, Morteau, Pontarlier, Mouthe – Métabief, les Verrières, Longevilles-Mont-d'Or, etc. (Castany et al., 1930). Les observations montrent que de nombreuses communes dans la Haute Chaîne captent les horizons calcaires – bien souvent rechargés par la drainance des épaisses formations quaternaires sus-jacentes (Mudry, 2009). A certains endroits, les marnes du Purbeckien qui séparent le Crétacé du Jurassique s'amincissent considérablement – voire disparaissent. C'est le cas notamment vers le sud, dans la haute chaîne. Les aquifères sont alors mis en communication et la plupart des écoulements infiltrés dans les calcaires Crétacé finissent par ressortir dans les sources du Jurassique sup. Avec les changements climatiques, les ressources en eau des aquifères du Crétacé, plus superficielles et moins résilientes que celles des aquifères du Jurassique (sup. ou moy.) sont de plus en plus soumises à des étiages prolongés et ne suffisent plus à assurer les besoins. En outre, la qualité de ces eaux est aussi plus facilement impactée par les activités de surface, obligeant les exploitants à recourir à des traitements de plus en plus couteux.
- L'aquifère karstique des calcaires du **Trias (Jurassique inf.)** – principalement les calcaires du **Muschelkalk**. Cet aquifère n'affleure pas directement dans la zone de la haute chaîne mais se situe proche de la surface au nord de la zone d'étude (Clos du Doubs, Ajoie). L'aquifère du Muschelkalk est peu épais et relativement bien séparé des niveaux supérieurs par les épaisses marnes du Lias. Il est toutefois extrêmement karstifié et son rôle est souvent sous-estimé dans les circulations à grande échelle (Huggenberger et al., 2010; Scheidler et al., 2021). Dans le cadre du projet, cet aquifère profond ne sera pratiquement pas documenté. A noter cependant qu'il peut présenter un potentiel de ressource intéressant, que ce soit pour l'eau potable ou la géothermie (Javey, 1980; Javey et al., 1987).

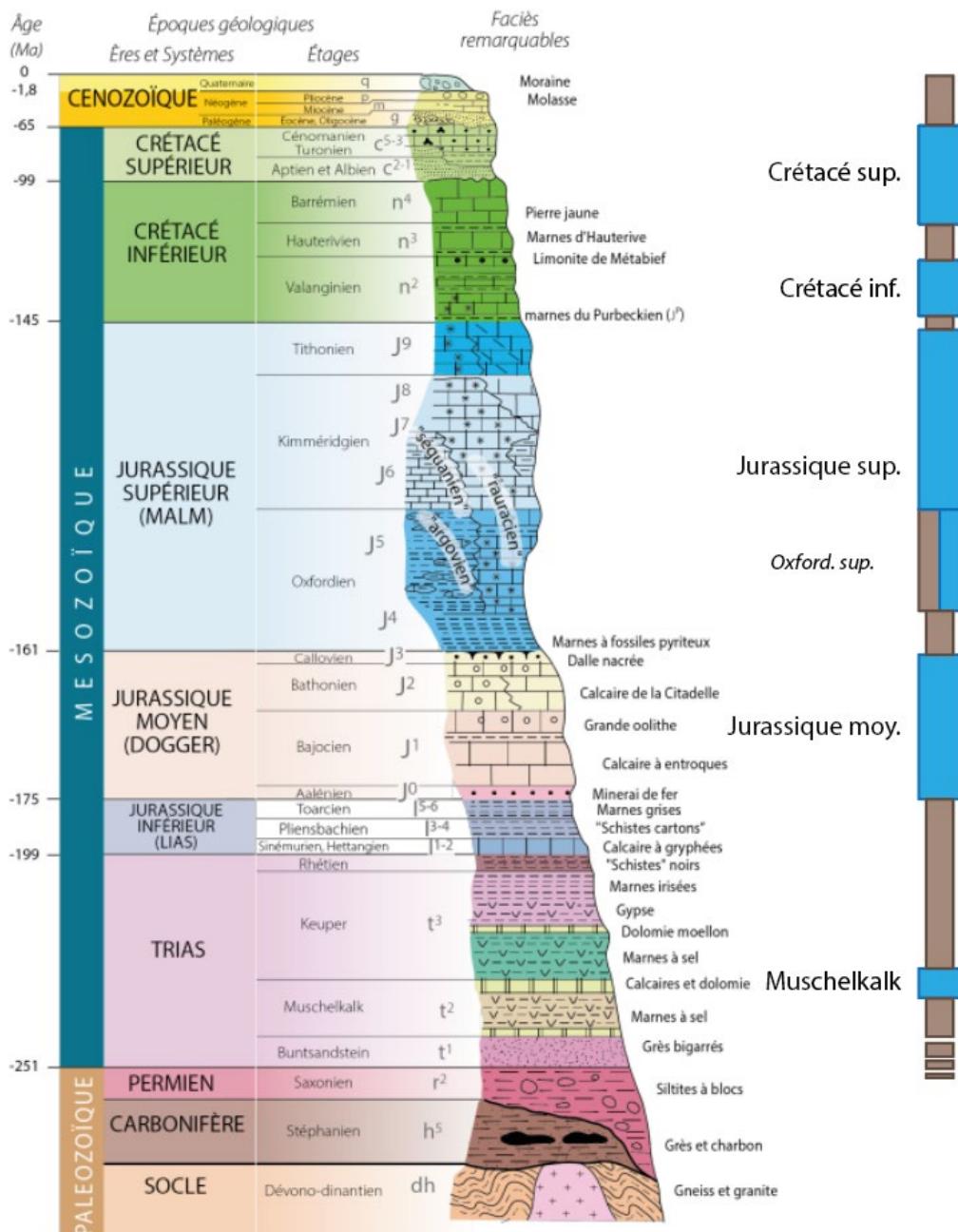


Figure 2. Unités stratigraphiques simplifiées du massif du Jura (Bichet and Campy, 2009) et propriétés hydrogéologiques associées. Dans le détail, les unités peuvent significativement varier spatialement (notamment celles du Crétacé et de l'Oxfordien). Des colonnes stratigraphiques propres à chaque région ont été définies. Se reporter aux sections relatives à chaque modèle (§. 4.) et au Tableau 4.

D'un point de vue hydrogéologique, la rivière Doubs – comme tous les autres cours d'eau – représente la connexion hydrologique entre les différents blocs aquifères (Figure 3) et permet :

- **D'alimenter les compartiments aquifères via des pertes** – localisées ou diffuses – au fond du lit du cours d'eau.
- **De drainer les blocs aquifères via des sources** – ou résurgences – en bordure ou dans le lit du cours d'eau.

Les vitesses d'écoulement étant aussi élevées dans le cours d'eau de surface que dans les drains karstiques souterrains, les mécanismes **d'alimentation** et **de drainage** peuvent être concomitants dans le temps à deux extrémités du compartiment aquifère – selon les conditions hydrologiques (hautes / basses eaux). Ces

phénomènes peuvent être assimilés à des captures « internes », c'est-à-dire des pertes du cours d'eau en amont qui réalimentent le cours d'eau en aval.

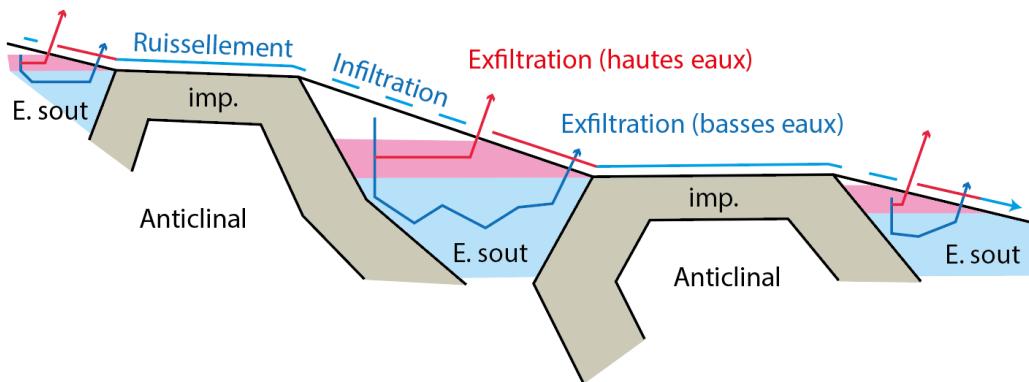


Figure 3. De l'amont vers l'aval, la rivière Doubs contribue à l'alimentation et – en même temps – au drainage des différents blocs aquifères (« E. sout ») qui sont isolés entre eux par des structures imperméables sur lesquelles le Doubs coule de manière conservative et peut collecter des écoulements de surface. En fonction des conditions hydrologiques (basses / hautes eaux), la rivière peut ainsi contribuer à alimenter le compartiment aquifère en amont et drainer le même compartiment en aval, à l'approche des zones imperméables avant de continuer sa course vers le prochain compartiment aquifère.

Dans ces conditions, la caractérisation hydrologique du cours d'eau est indissociable du régime hydrogéologique des eaux souterraines, les deux milieux fonctionnant sur le principe d'équilibre recharge / décharge en fonction des hauteurs d'eau respectives de chacun.

4. Approche KARSYS de caractérisation hydrogéologique

4.1. Principes et apports

L'approche KARSYS (Jeannin et al., 2013) a été développée pour décrire la structuration et le fonctionnement hydrogéologique des aquifères karstiques par l'intermédiaire de modèles conceptuels 3D. L'approche repose (i) sur l'intégration et la combinaison d'un maximum de données et d'informations géologiques, hydrogéologiques, spéléologiques et hydrologiques et (ii) sur une série de principes hydrogéologiques.

D'un point de vue hydrogéologique, on distingue classiquement deux zones dans les formations aquifères karstiques : (i) une **zone non saturée** (« vadose ») dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs centaines de mètres, (ii) une **zone noyée** (« phréatique ») définie par la position des exutoires périennnes (sources ou seuils de débordement souterrain) et par la géométrie de la couche karstifiée. En d'autres termes, la zone phréatique est délimitée par le volume de roche karstifiée situé au-dessous du niveau des exutoires. Dans ce volume, toutes les fissures et cavités contenues dans la roche sont remplies d'eau, mais elles ne représentent que **0.5 à 1% du volume total de la roche**. Souvent, on distingue également (iii) une **zone épiphréatique** (ou zone de battement) qui témoigne des fluctuations de la nappe entre les périodes de basses et de hautes eaux hydrologiques. Dans le Jura, les couches calcaires sont karstifiées, donc aquifères, alors que les couches marneuses sont considérées comme imperméables (ou aquiclades), même si certains horizons calcaires intercalés peuvent être très karstifiés et conduire à la structuration de petits réseaux d'écoulement. Ainsi, la géométrie des différentes couches et la position des exutoires définissent la position et l'extension des zones noyées. Celles-ci sont surmontées par les zones vadouses. La structuration entre zones **vadose** et **phréatique** et la localisation des zones de recharge et d'exutoires conditionnent l'organisation des écoulements souterrains. La Figure 4 (Malard et al., 2013) résume de manière générique la géométrie des écoulements souterrains dans les aquifères karstiques.

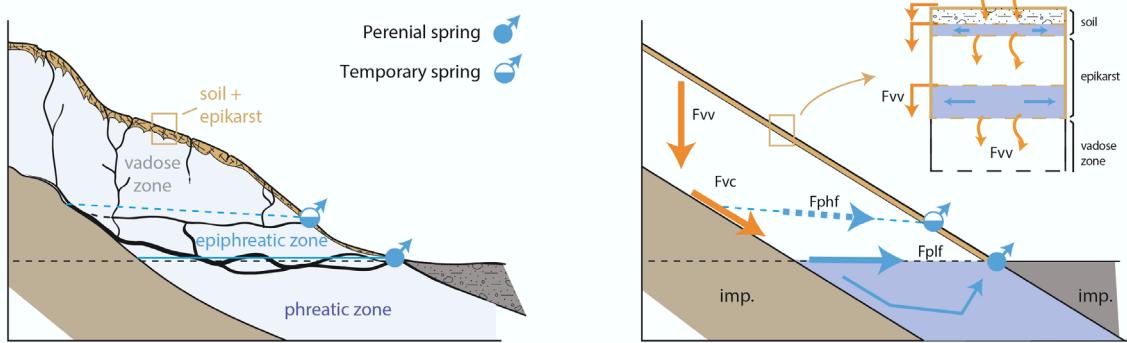


Figure 4. Les écoulements souterrains dans les aquifères karstiques s'organisent en fonction de la géométrie des réservoirs (karstifiés considérés comme aquifères et non-karstifiés considérés comme aquiclades), de la structuration des zones vadoises / noyées et de la localisation des exutoires. Abréviations : imp.: aquiclude, **Fvv**: écoulement vadose vertical, **Fvc**: écoulement vadose contrôlé par l'aquiclude, **Fplf**: écoulement phréatique dans la nappe de basse eaux, **Fphf**: écoulement epiphréatique dans la nappe de hautes eaux.

Les **principes** de documentation des aquifères karstiques du bassin transfrontalier du Doubs sont les suivants :

- Les formations géologiques karstifiées sont considérées comme aquifères. Les marnes et les autres formations non carbonatées sont considérées comme aquiclades, localement ou régionalement, en fonction de leur épaisseur.
- Les sources karstiques pérennes définissent le niveau de base des aquifères karstiques et l'exutoire de la majorité des écoulements.
- En amont des sources karstiques pérennes, le gradient hydraulique de basses eaux (Figure 5) dans la zone noyée (« phréatique ») est si faible qu'il peut être négligé (a.). Si des indications (mesures) existent, le gradient peut être adapté dans la gamme 0 à 0.1 % (b.). Si le gradient excède 0.1% (soit 1 m pour 1000 m), un obstacle hydraulique (seuil géologique, etc.) est supposé rompre la continuité hydraulique de la nappe karstique (c.).

L'application de ces principes en 3D peut aboutir à une forte compartimentation des aquifères qui restent hydrologiquement connectés (relation d'alimentation de l'amont vers l'aval), mais potentiellement déconnectés hydrauliquement (Figure 5, d.).

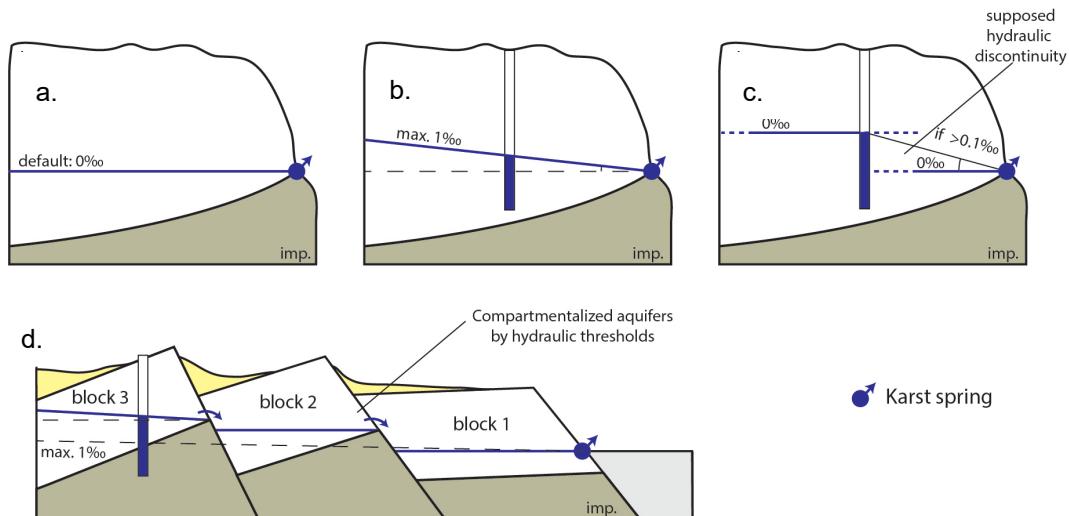


Figure 5. Principes d'extrapolation du gradient hydraulique de la nappe karstique dans l'aquifère (a., b. et c.) et cas d'un aquifère organisé en compartiments (d.), hydrauliquement déconnectés mais organisés en « cascade » (Malard, 2018). Dans ce cas, la ligne de déversement d'un compartiment vers le suivant est appelée « seuil » et dessinée sur les cartes.

4.2. Les étapes

Les **étapes d'application** de l'approche KARSYS sont les suivantes :

- Collecte et mise en forme des informations géologiques, hydrogéologiques, spéléologiques et hydrologiques dans la région du Doubs transfrontalier ;
- Analyse des faciès géologiques et établissement d'une colonne hydrostratigraphique couvrant la région du Doubs transfrontalier ;
- Construction de modèles géologiques 3D reproduisant la géométrie des principaux réservoirs aquifères karstiques (§. 5). Les modèles sont construits sous visualkarsys.com ;
- Analyse et intégration des données et informations hydrologiques dans les modèles géologiques 3D ;
- Extrapolation des zones noyées dans les principaux compartiments aquifères identifiés (§. 6) ;
- Localisation et direction des principaux axes d'écoulement dans les zones non-saturées et saturées des aquifères.

5. Modèles géologiques 3D

5.1. Propriétés

5.1.1. Emprise et découpage

Le territoire à documenter couvre entre 1'200 et 1'600 km², en considérant la section depuis la **source du Doubs** jusqu'en aval de **Brémoncourt**, en fonction des incertitudes liées aux différences entre les limites de bassin topographique et les limites de bassin hydrogéologique.

12 modèles géologiques sont construits sous [visualkarsys](http://visualkarsys.com)³ (M1 à M12). Les caractéristiques des modèles sont détaillées dans le Tableau 1 et en Figure 6. La profondeur de modélisation est fixée à -500 m asl, l'altitude maximale à 2000 m asl. Techniquelement, les modèles sont renseignés en « base », c.à.d. que les données géologiques (points de contact entre les unités géologiques) sont saisies à la base des unités. L'algorithme extrapole ensuite ces données ainsi que les orientations et les inclinaisons saisies pour les pendages afin de modéliser la géométrie 3D des différentes unités. Le principe est le même pour les discontinuités structurales : failles, décrochements, chevauchements, rétro-chevauchements, etc. (cf. §. 5.1.5).

³ visualkarsys.com

Modèles géologiques	X _{min} EPSG2056	X _{min} EPSG2154	Y _{min} EPSG2056	Y _{min} EPSG2154	X _{max} EPSG2056	X _{max} EPSG2154	Y _{max} EPSG2056	Y _{max} EPSG2154	Largeur [m]	Hauteur [m]
M1	2565000	1000244	1240000	6697518	2585000	1019633	1250000	6708617	20000	10000
M2	2565000	1001087	1225000	6682555	2580000	1015207	1240000	6698361	15000	15000
M3	2545000	0981137	1225000	6681431	2565000	1000132	1242000	6699513	20000	17000
M4	2545000	0981699	1215000	6671456	2565000	1001087	1225000	6682555	20000	10000
M5	2525000	0961749	1215000	6670332	2545000	0980856	1230000	6686419	20000	15000
M6	2540000	0977273	1205000	6661200	2555000	0991674	1215000	6672018	15000	10000
M7	2525000	0962592	1200000	6655369	2540000	0976711	1215000	6671175	15000	15000
M8	2512000	0949625	1200000	6654638	2525000	0961692	1216000	6671329	13000	16000
M9	2515000	0953742	1180000	6634857	2530000	0967579	1200000	6655650	15000	20000
M10	2500000	0938780	1180000	6634014	2515000	0952617	1200000	6654807	15000	20000
M11	2505000	0939624	1165000	6619052	2520000	0958729	1180000	6635139	15000	15000
M12	2490000	0929931	1160000	6613502	2505000	0943767	1180000	6634295	15000	20000

Tableau 1. Emprises spatiales des 12 modèles géologiques dans les systèmes de coordonnées en vigueur en Suisse (EPSG 2056⁴) et en France (EPSG 2154⁵)

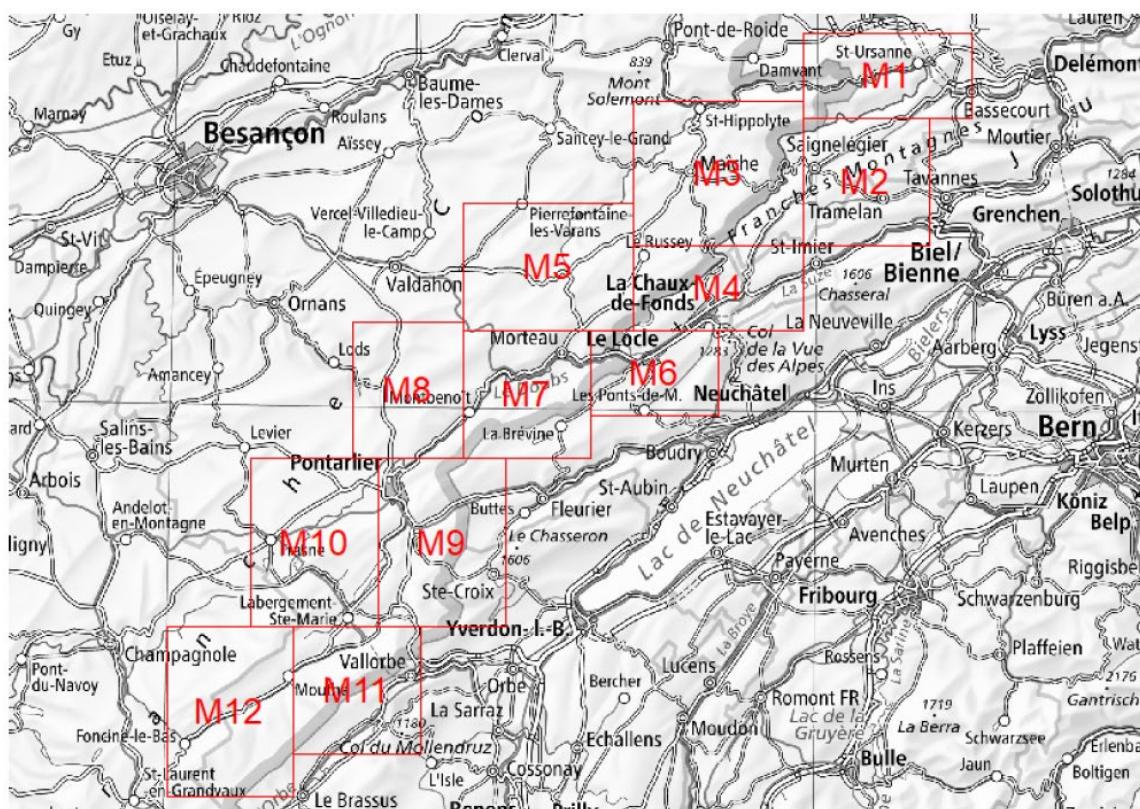


Figure 6. Aperçu du découpage des modèles géologiques M1 à M12.

⁴ Swiss CH1903+ / LV95 – EPSG 2056

⁵ RGF93 / Lambert-93 - France – EPSG 2154

5.1.2. Principes

Les modèles géologiques sont construits séparément et harmonisés au niveau des bordures qu'ils partagent (cf. Figure 7). Les données géologiques (interfaces et pendages) sont saisies sur les cartes géologiques, les profils et dans certains forages. Les modèles sont ensuite calculés avec une résolution de **50 m** selon les axes XY et **8 à 10 m** selon Z (l'altitude)⁶.

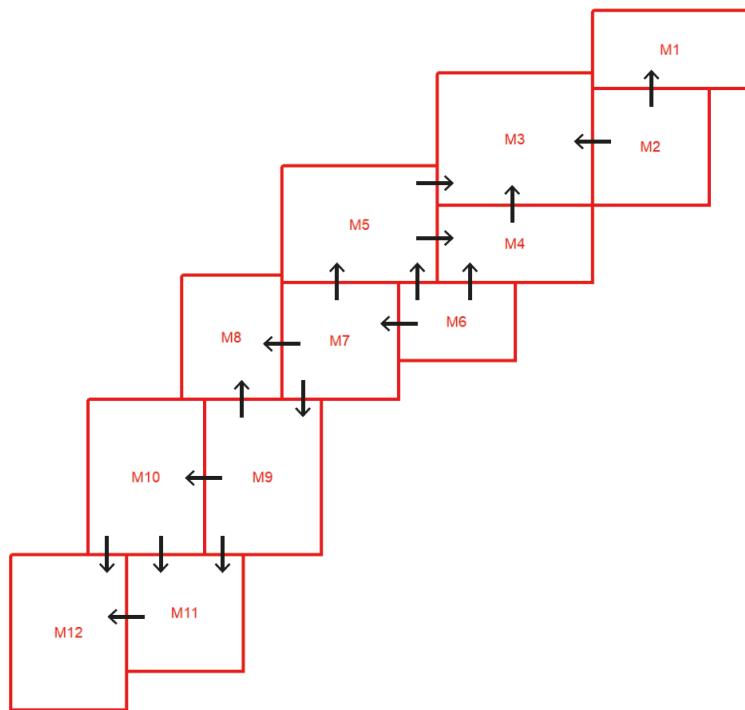


Figure 7. Principe d'harmonisation des limites entre les modèles géologiques adjacents. Des profils sont établis au niveau du modèle de référence et appliqués aux modèles voisins (typiquement la bordure ouest du modèle M7 est utilisée comme référence pour la bordure est du modèle M8).

5.1.3. Données utilisées

Les modèles sont établis en utilisant un modèle numérique de terrain de résolution 25 m. Les informations géographiques suisses et françaises sont tirées respectivement de Swisstopo⁷ et de l'IGN⁸. Les informations géologiques de base suisses et françaises sont tirées respectivement de Swisstopo⁹ et du BRGM¹⁰. Coté France, le travail d'harmonisation des unités lithostratigraphiques des cartes géologiques du Jura et du Doubs (Lagie and Nagel, 2008; Nagel, 2007) est aussi utilisé.

La collecte des données et informations côté Suisse a été réalisée par l'ISSKA. Celle-ci repose sur de nombreux projets et travaux antérieurs, notamment le projet Swisskarst (Malard et al., 2014b). Coté France, la collecte et la mise en forme des données et informations a été réalisée par le cabinet Reilé¹¹.

5.1.4. Unités géologiques

Dans l'optique de pouvoir comparer les formations géologiques sur l'ensemble de la zone d'étude et aussi des deux côtés de la frontière, il est nécessaire de procéder à une homogénéisation et une simplification des piles stratigraphiques. Coté France, le rapport BRGM (Lagie and Nagel, 2008; Nagel, 2007) propose une harmonisation des légendes géologiques pour les départements du Doubs et du Jura. Coté Suisse, la

⁶ La résolution verticale dépend de l'altitude maximale de chacun des modèles. Plus les modèles affichent une altitude maximale élevée (ex : M9, M10, M12), moins la résolution selon Z sera élevée.

⁷ Landeskarte 1:25'000: <https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/maps/national/lk25>

⁸ <https://www.geoportail.gouv.fr/>

⁹ Atlas géologique de la Suisse 1:25'000 : <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geologischer-atlas-der-schweiz-1-25000>

¹⁰ Bd Charm-50 : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/cartes-geologiques-departementales-a-1-50-000-bd-charm-50/>

¹¹ Cabinet Reilé, 7 Rue Paul Dubourg, 25720 Beure, France. Contact : Pascal Reilé, Benoît Reilé et Julien Girardot.

synthèse lithostratigraphique du Jura plissé (par opposition au jura tabulaire) est proposée par Swisstopo dans le cadre de l'harmonisation des unités lithostratigraphiques (projet HARMOS).

Unités \ Modèles	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
Quaternaire (Q.)												
Pliocène (p.)	?								?	?		
Miocène (m.)	?	?	?	?	?	?	?		?	?	?	?
Oligocène (o.)	?										?	?
Eocène (e.)	?											
Cénomanien (c1.)				50	?	50	50	50	50	50	25	25
Aptien-Albien (n5-6.)												?
Barrémien (n4.)				20	?	20	20		50	50	50	50
Hauterivien sup. (n3b)									50	50		
Hauterivien (n3.)			?	25	30	25	25	50	20	20	60	60
Valanginien (n2.)				30	30	30	30	30	40	40	50	50
Purbeckien (n1.)		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Tithonien (j7.)	50	60	80	70	80	80	70	200	200	100	100	
Kimméridgien sup. (j6.)	50	100	120	170	160	170	170	150	200	200	200	200
Kimméridgien inf. (j5c-6aR)		50	20					10				
Séquanien sup. (j5c2-6aC)	50	50	50		10			50				
Séquanien inf. (j5c2-6aM)	30	30	30	30	30	30	30	30	60	60	40	60
Oxfordien sup. (j5c1.)	80	130	130	80	100	80	80	100	30	30	130	40
Oxfordien inf. (j5a-b.)	80	80	80	130	100	130	130	90	200	200	50	80
Callovien (j4.)	25	40	40	30	30	30	30	40	20	20	10	10
Bathonien (j3.)	20	30	35	25	30	25	25	50	80	80	10	10
Bajocien (j2a-b.)	100	140	150	100	130	100	100	100	80	80	80	90
Aalénien (j1.)	150		10	25	10	25	25	25	50	50	10	10
Lias (l.)	150	200	200	100	150	100	100	100			80	80
Trias (t.)	100											

Tableau 2. Présence et épaisseurs indicatives des unités géologiques par modèle. Les unités encadrées par une ligne rouge sont considérées comme peu perméables (aquiclades locaux ou régionaux). Les épaisseurs respectives des unités peuvent varier considérablement d'un modèle à l'autre, mais elles varient aussi souvent au sein des modèles.

5.1.5. Lignes structurales

Les principales discontinuités structurales (chevauchements, rétro-chevauchements, décrochements, etc.) ont été prises en compte et leur continuité respective a été assurée entre les différents projets lorsqu'elles traversent plusieurs projets. Le modèle structural du Jura est inspiré des travaux récents à l'échelle du massif franco-suisse (Affolter and Gratier, 2004; Gruber, 2017; Philippe et al., 1996; Schori, 2021)¹². Le Tableau 9 (Annexe A3) et la Figure 8 listent et présentent l'extension des principales lignes structurales.

¹² A noter que la structuration tectonique du massif du Jura suisse est actuellement revue dans le cadre du projet swisstopo Jura3D (https://geoscience-meeting.ch/sgm2024/wp-content/uploads/abstracts/Kurmann_Eva_08-28-24-02-07-31.pdf)

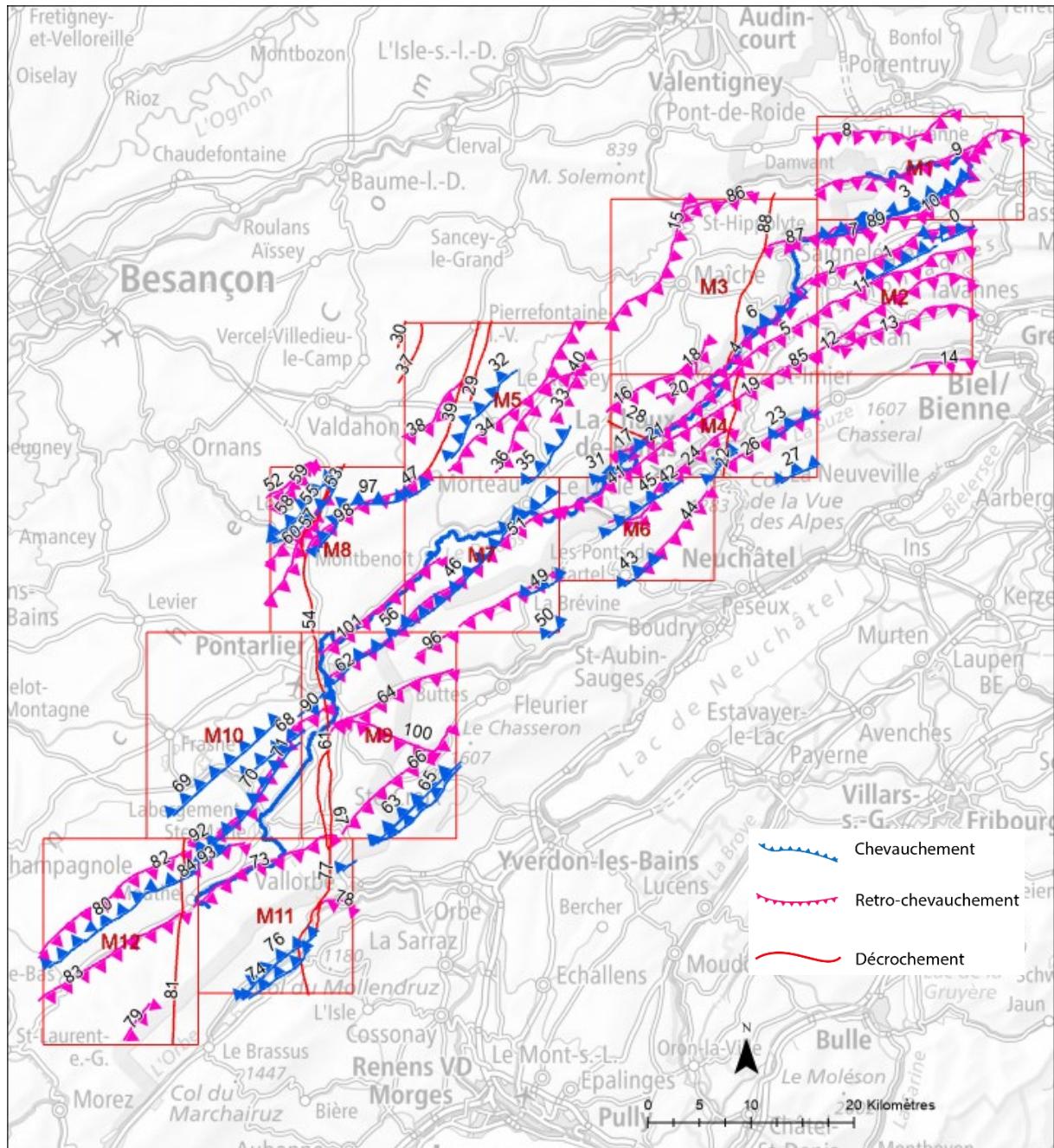


Figure 8. Principales lignes structurales : chevauchements, rétro-chevauchements et décrochements identifiées et reproduites dans les modèles géologiques 3D M1 à M12. Le numéro fait référence à l'ID du Tableau 9, Annexe A.

5.2. Application

Le chapitre décrit les principes généraux et les principaux documents utilisés pour la construction de chacun des 12 modèles géologiques.

5.2.1. M1 – St-Ursanne

[<https://www.visualkarsys.com/vk/project/1092/edit>]

Les documents géologiques de référence sont les suivants : la feuille géologique 1/50'000 0475 (Chauve et al., 1985a) pour la partie française et la feuille 1/25'000 1085 (Laubscher, 1963) pour la partie suisse. Des informations complémentaires sont utilisées (Bossart et al., 2017; Caër, 2016; Diebold, 1960; Geo-Energie Suisse, 2014; Kovács and Jeannin, 2003; Laubscher, 1948, 1963; NAGRA, 1988), notamment les profils géologiques des différents tunnels (tunnel CFF St Ursanne <-> Glovelier, tunnel autoroutier Mont Terri et Mont Russelin). Les données et informations géologiques sur l'emprise du modèle M1 sont assez âgées (à l'exception des travaux de Caër 2016 et de Bossart et al. 2017) mais d'assez bonne qualité en raison de la présence d'ouvrages « profonds » (tunnels). Un log stratigraphique « récent » du secteur est présenté en Figure 9.

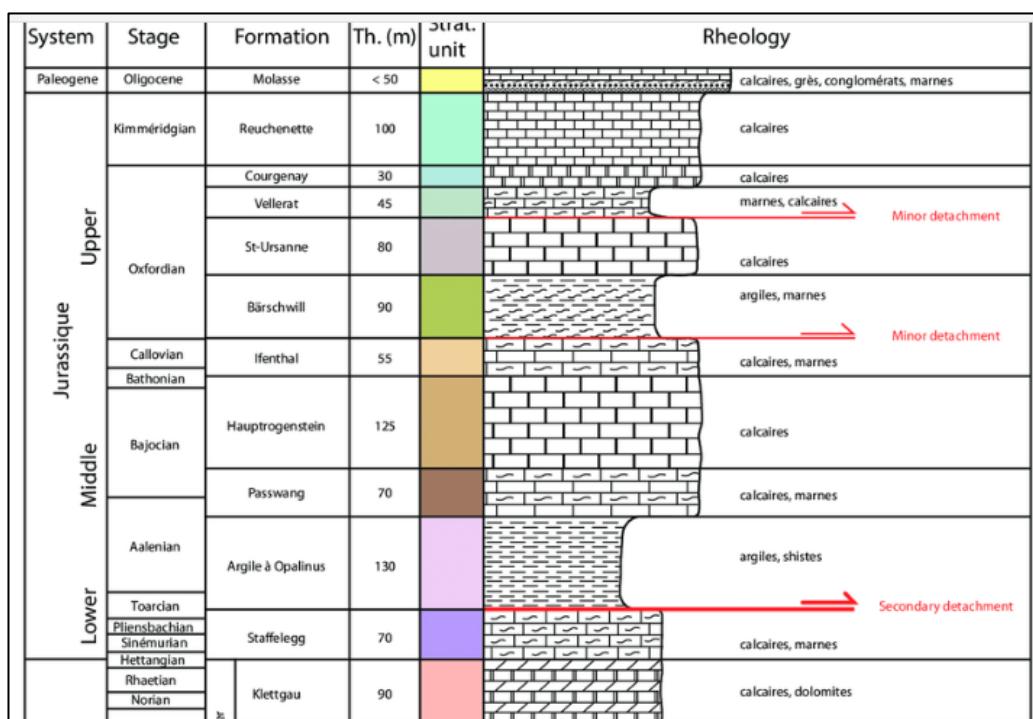


Figure 9. Log stratigraphique des unités géologiques de la région couverte par le Modèle M1 (Caër, 2016). Le log sert à l'établissement de la colonne stratigraphique du Tableau 2.

Les unités Crétacé sont absentes du modèle. Par ailleurs, les formations suivantes : j6aC, j6aM, j6a-b et j6a (Kimméridgien inférieur), j5c-6aCB, j5c-6aMCB (Oxfordien supérieur), j5cC, j5pB et j5b (Oxfordien moyen), cf. Tableau 2, n'intéressent pas directement le bassin du Doubs. Elles ne seront pas spécifiquement prises en compte dans l'établissement des modèles géologiques.

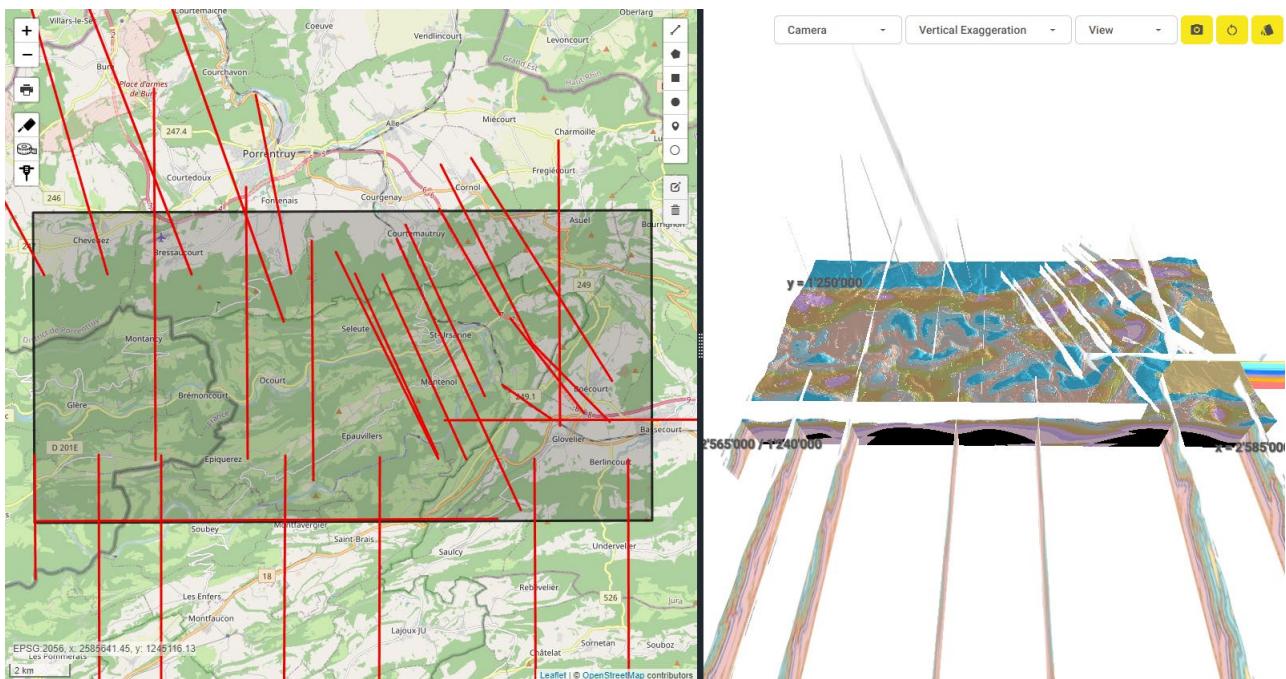


Figure 10. Aperçu du modèle géologique 3D M1 – St Ursanne. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est correcte.

Comparativement aux modèles suivants – qui se développent en direction du sud – l'épaisseur des formations sédimentaires du Jurassique (sup. et moy.) est globalement plus faible. Les désordres structuraux (plis, anticlinaux chevauchés ou rétro-chevauchés, etc.) sont donc de longueurs d'onde plus petites et avec des continuations plus rapidement amorties (pas de grandes failles mais plutôt des relais, etc.).

L'incertitude est donc assez élevée en ce qui concerne la structuration tectonique et le prolongement des géométries en profondeur. La densité de forages profonds dans ce secteur est très faible – notamment le long de la ligne de frontière nationale qui est relativement peu aménagée et urbanisée.

5.2.2. M2 – Saignelégier

[<https://www.visualkarsky.com/vk/project/1093/edit>]

Les documents géologiques de référence sont les suivants : la feuille géologique 1/50'000 0505 (Barlier et al., 1949) pour la partie française et les feuilles 1/25'000 récentes 1104 et 1105 (Aufranc et al., 2016) et 1125 (Aufranc et al., 2017) pour la partie suisse. 6 forages ont été utilisés pour la partie suisse (Bertrand, 1988; MFR, 2004, 2002; Mouchet, 1995; Schindler, 1975). Le log stratigraphique sur le secteur est très proche de celui présenté en Figure 9. Comme pour le modèle M1, les formations calcaires du Crétacé sont absentes sur cette feuille.

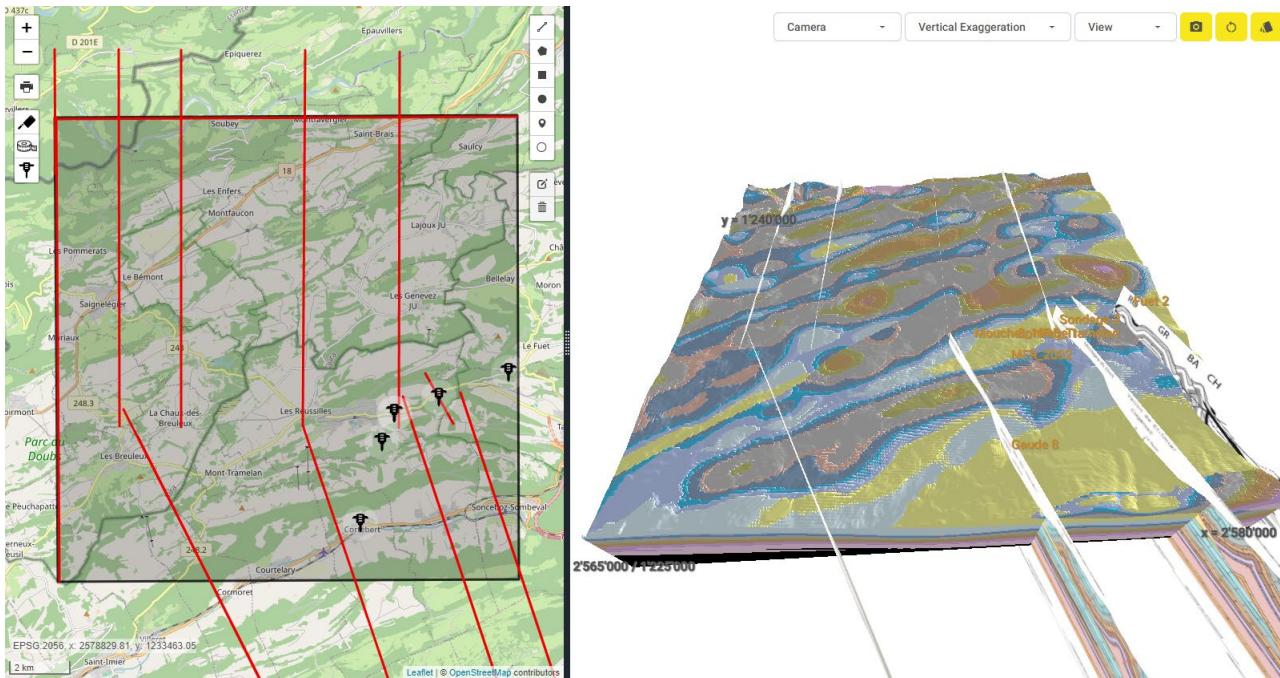


Figure 11. Aperçu du modèle géologique 3D M2 – Saignelégier. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est correcte, sans être abondante.

Les informations géologiques à disposition sur le modèle M2 sont pour la plupart assez récentes (Aufranc et al. 2016 & 2017) mais restent assez éparses - surtout les informations relatives à la structuration tectonique – celle-ci étant assez complexe sur ce secteur. L'incertitude géologique est assez moyenne, elle ne peut pas être considérée comme importante.

5.2.3. M3 – Maîche

[<https://www.visualkarsys.com/vk/project/1094/edit>]

Les documents géologiques de référence sont les suivants : la feuille géologique 1/50'000 0504 (Augier et al., 1950) pour la partie française et les feuilles 1/25'000 1104 et 1105 (Aufranc et al., 2016) et 1124 (Bourquin et al., 1946) pour la partie suisse. Des profils géologiques complémentaires ont été utilisés (Aufranc et al., 2016, p. 20; Bailly, 1979; Basseto, 1958; Bourquin et al., 1946; Duboz, 1979). Dans la partie nord de l'emprise (coté source du Bief de Brand), les formations du Callovien deviennent marneuses.

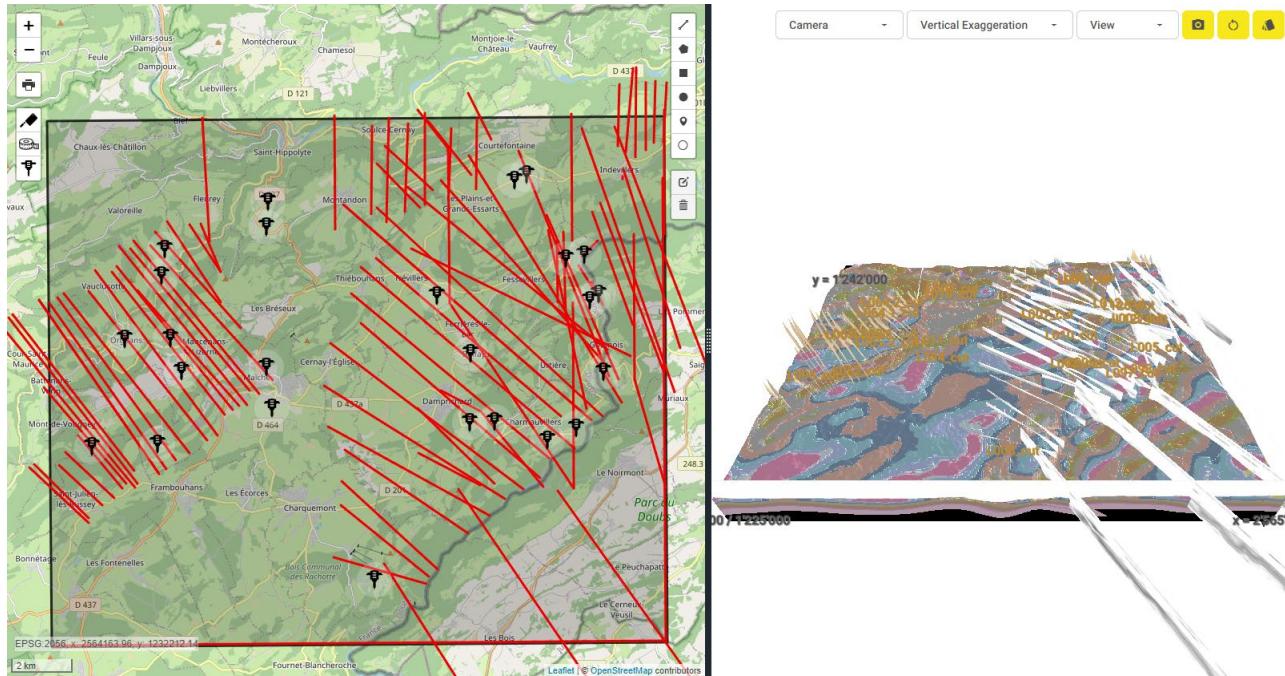


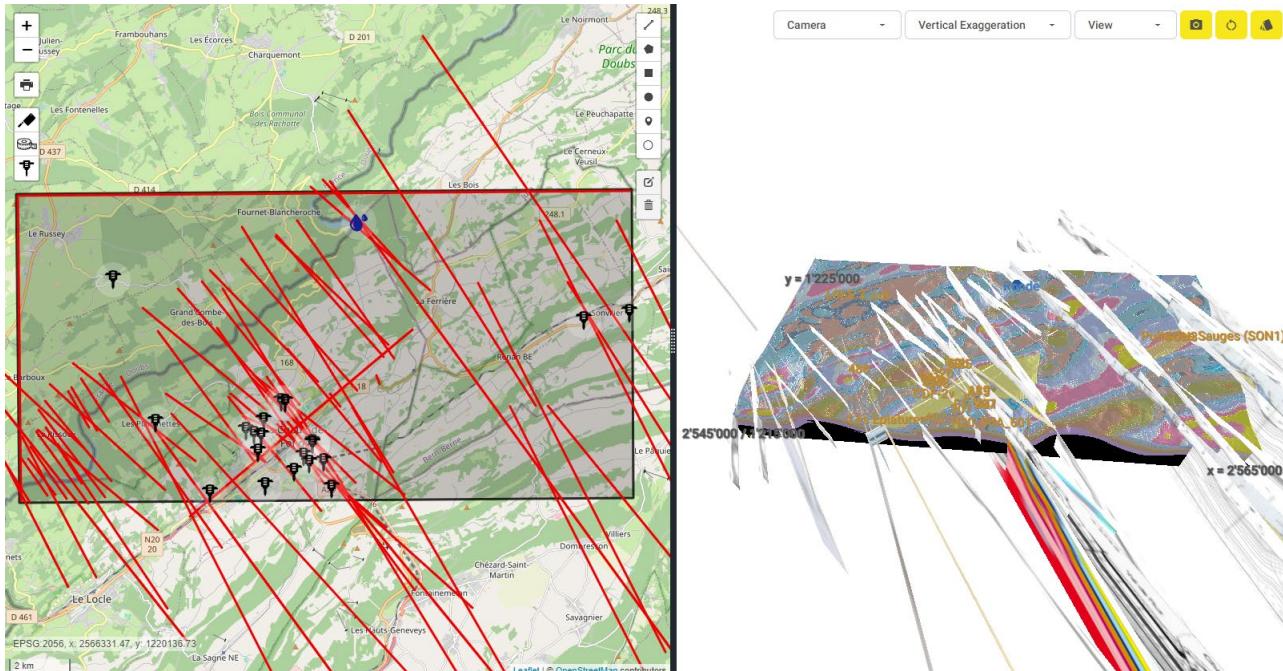
Figure 12. Aperçu du modèle géologique 3D M3 – Maîche. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est très variable. Les profils sont inexistant dans le quart sud-ouest.

En raison de la faible densité d'information dans certaines parties du modèle, et de la complexité tectonique, l'incertitude géologique est relativement élevée. Les informations à disposition sont pour la plupart relativement âgées, peu interprétées en profondeur et surtout incomplètes sur le plan tectonique. Il n'existe pas de forages profonds permettant de recaler certains horizons en profondeur. La structuration géologique à proximité du cours du Doubs est relativement complexe, surtout dans le secteur de la source du Theusseret.

5.2.4. M4 – La Chaux-de-Fonds

[<https://www.visualkarsys.com/vk/project/1095/edit>]

Les documents géologiques de référence sont les suivants : les feuilles 1/50'000 0504 (Augier et al., 1950) et 0505 (Barlier et al., 1949) pour la partie française et les feuilles 1/25'000 1124 (Bourquin et al., 1946), 1143 (Eichenberger et al., 2020) et 1144 (Suter and Lüthi, 1969) pour la partie suisse. A ces cartes géologiques s'ajoutent des études géologiques régionales ou locales (Bell, 1931; Blant et al., 2003; Burger and Schaer, 1996; CGE, 1945; Mages, 1992). 25 forages de plus de 80 m de profondeur ont été introduits et la plupart utilisés pour la modélisation.



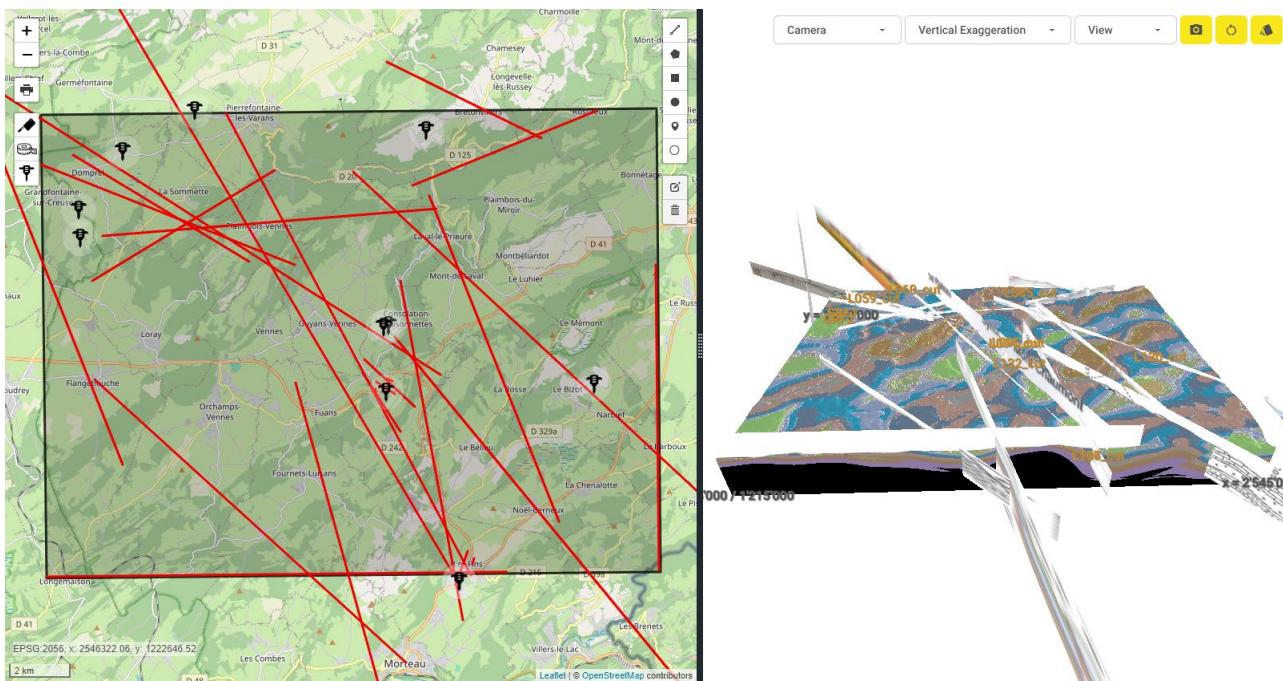


Figure 14. Aperçu du modèle géologique 3D M5 – Orchamps-Vennes. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est faible, et les profils sont globalement mal répartis.

L'incertitude géologique de ce modèle est relativement élevée en raison du manque d'information – à la fois récente et en profondeur. Des incohérences sont aussi observées entre certaines sources de données. Par exemple, le profil MFR 2013 est en contradiction avec la carte géologique (affleurement des calcaires du Jurassique sup. sur le profil alors que la carte mentionne les calcaires du Jurassique inf.).

5.2.6. M6 – Le Locle

[<https://www.visualkarsys.com/vk/project/1097/edit>]

Les documents géologiques de référence sont les suivants : les feuilles géologiques 1/25'000 1143 (Eichenberger et al., 2020) et 1163 (Pasquier et al., 2013) pour la partie suisse et la feuille 1/50'000 0531 (Fallot and Perrodon, 1968) pour la partie française.

Différents profils géologiques ont été utilisés, notamment : les profils Hydrogeos SA pour le tunnel de contournement du Locle (HydroGEOS, 2010, 2009), les profils du CREGE pour l'étude du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN, 2008), les profils de C. Rieben établis pour l'anticlinal de Pouillerel (Rieben, 1983), ceux de Cautru (Cautru, 1974) et ceux de Turberg pour la partie synclinale du Locle (Turberg, 1987). La coupe à grande échelle n°6 de Philippe, peu précise mais cohérente pour le concept tectonique, a aussi été utilisée (Philippe, 1995; Philippe et al., 1996).

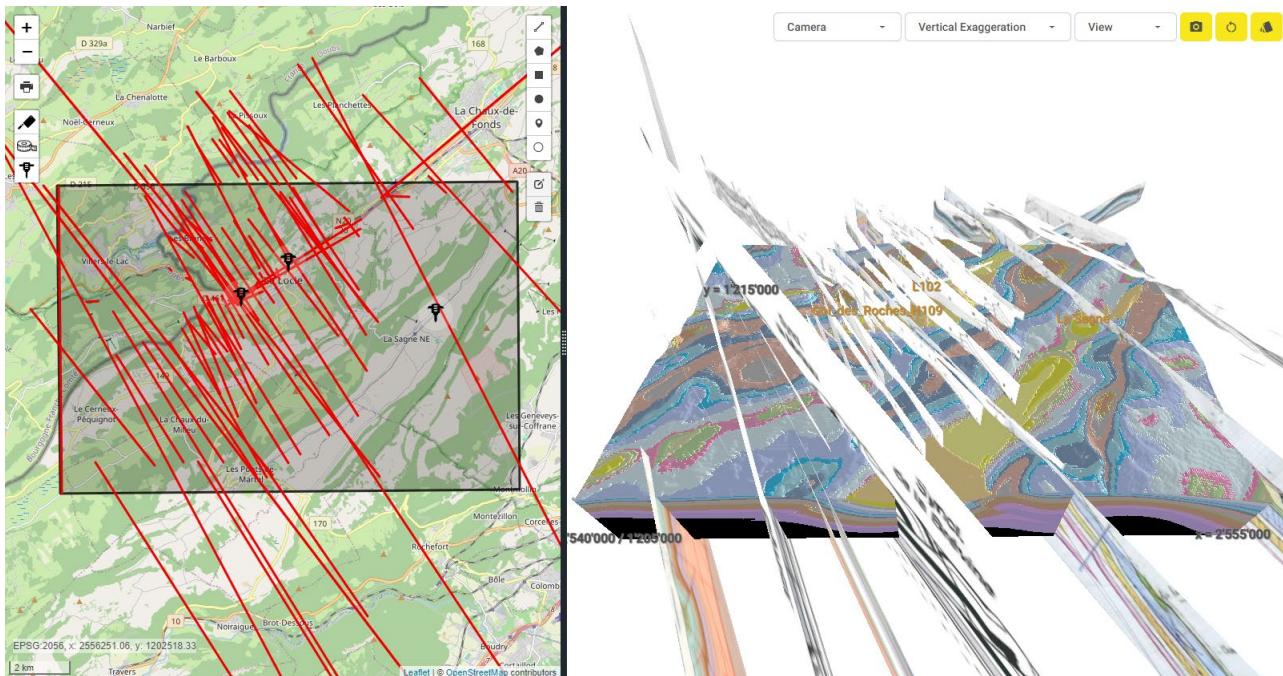


Figure 15. Aperçu du modèle géologique 3D M6 – le Locle. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est plus que correcte.

Le modèle M6 bénéficie de beaucoup d'informations géologiques côté Suisse, dont certaines relativement récentes (Eichenberger et al., 2020) et moins côté France. L'incertitude sur la structuration géologique est donc assez faible en ce qui concerne le bassin du Locle, mais reste élevée le long des Côtes du Doubs.

5.2.7. M7 – Morteau

[<https://www.visualkarsys.com/vk/project/1098/edit>]

Les documents géologiques de référence sont les suivants : les feuilles géologiques 1/25'0000 1143 (Eichenberger et al., 2020), 1162 (Mühlethaler, 1930) et 1163 (Pasquier et al., 2013) pour la partie suisse et la feuille 1/50'000 0531 (Fallot and Perrodon, 1968) pour la partie française.

Des informations géologiques complémentaires ont été intégrées, notamment des profils géologiques (Aubert, 1945; Burger, 1978; Cabinet REILE, 2008; Eichenberger et al., 2020; Forestier and Verez, 1978; Meier, 1999; Muhlethaler, 1931a, 1931b; Pascal, 1976; Pasquier et al., 2013; Philippe, 1995; Rickenbach, 1925; Rime et al., 2019; Sommaruga, 1997; Sommaruga et al., 2017; Wittwer, 1982). Des informations de forages sont aussi extraites de travaux existants (Mouchet, 1995; Schmutz, 2008) et de la BSS.

n4 : Barremien (10 à 20 m)	Marnes jaunes et blanches et calcaires oolithiques au sommet	J7 : Séquanien	J7b : Calcaires compacts J7a : niveau marneux
n3 : Hauterivien (15 à 20 m)	Marnes jaunes et grises à la base et calcaires oolithiques au sommet		
n2: Valanginien (25 à 30 m)	Calcaire oolithiques ou saccharoïdes ferrugineux avec terres d'altérations rouges.	J6 : Rauracien (~30m)	Calcaires clairs compacts à polypiers avec débris d'oursins silicifiés
Jp : Purbeckien (10 à 20m)	Marnes grises ou noirâtres à nodule marno-calcaire	J5: Argovien (100m)	Alternance régulière de bancs maître-cylindre et de minces bancs marneux
J9: Portlandien (70 à 80 m)	Bancs calcaires massifs et épais	J4 : Oxfordien (20 à 30)	Marne bleue plastique dont l'épaisseur est variable
J8 :Kimmeridgien (~150m)	Calcaires beiges compacts au sommet et calcaires grenus avec inter lits marno-calcaire à la base	J3 : Callovien (~ 40m)	Dalle nacrée avec interlits marneux au sommet et marno-calcaire roux à la base

Tableau 3. Log stratigraphique simplifié des unités géologiques présentes dans la région du modèle M7. Ce log sert à l'établissement des unités géologiques représentatives du Modèle M7 (Tableau 2).

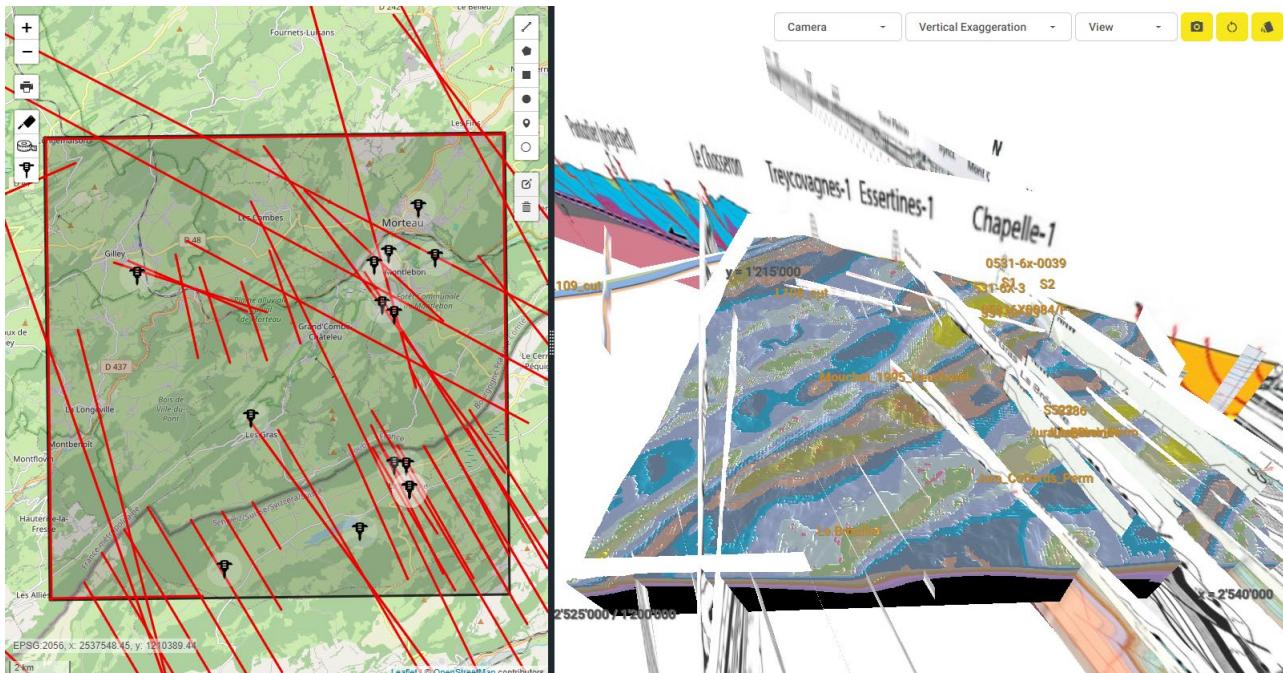


Figure 16. Aperçu du modèle géologique 3D M7 – Morteau. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est globalement correcte.

L'incertitude concerne surtout la structuration tectonique du Val de Morteau qui n'est pas complètement décrite par les informations de la carte géologique 1/50'000. Le Val de Morteau est à priori encadré par un chevauchement au sud (#CHE_POUILLEREL, ID 51) et un rétro-chevauchement au niveau de la bordure nord-ouest (#RETRO_ALLIES, ID 46), cf. Figure 8. Ces structures sont signalées par des travaux récents (Rime et al., 2019; Schori, 2021), mais elles ne sont pas cartographiées dans le détail.

Au nord du modèle, le chevauchement de Consolation (#CHE_CONSOLATION, ID 34) est supposé traverser le vallon au sud de Longemaison. Celui-ci se prolonge sur le modèle M5 et prend la forme d'un décrochement (#DEC_ORCHAMPS_VENNES, ID 39).

5.2.8. M8 – Maison du Bois

[<https://www.visualkarsys.com/vk/project/1099/edit>]

Les documents géologiques de référence sont les suivants : la feuille géologique 1/50'000 0557 (Castany et al., 1930) et les feuilles 1/25'000 1162 (Mühlethaler, 1930) et 1182 (Rigassi and Weidmann, 2011) pour la partie sud du modèle qui s'approche de la frontière suisse. Le modèle s'inspire par ailleurs du modèle géologique 3D réalisé à plus petite échelle par le BRGM dans le cadre du projet NutriKarst. A l'exception des profils à grande échelle (Philippe, 1995; Sommaruga, 1997), les informations géologiques sont très sommaires sur cette emprise. Il existe relativement peu de profils et rares sont les forages qui dépassent 10 m de profondeur. Par ailleurs, les importants dépôts quaternaires et la présence par endroits de terrains molassiques masquent les structures géologiques en profondeur. A noter aussi les différents travaux géologiques le long du Doubs dans le cadre de l'étude des pertes (SMESD, 1994). Quelques profils de détails sont parfois présentés.

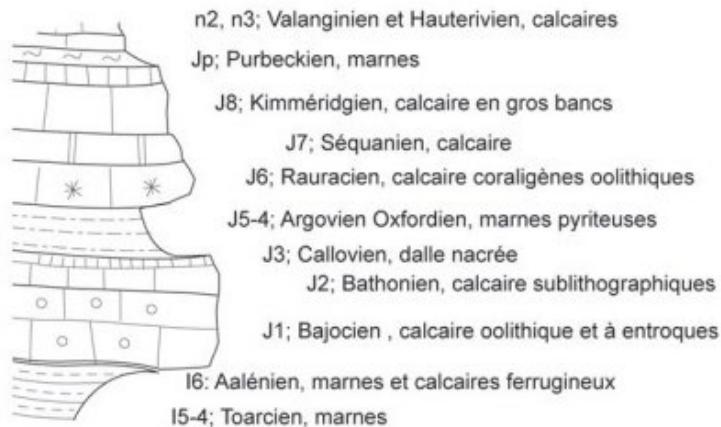


Figure 17. Colonne lithostratigraphique représentative du secteur M8. J6, J7 et J8 sont hydrogéologiquement continus. La base du Séquanien (J7) n'est pas marneuse. Ce log sert à l'établissement des unités géologiques représentatives du modèle M8 (Tableau 2).

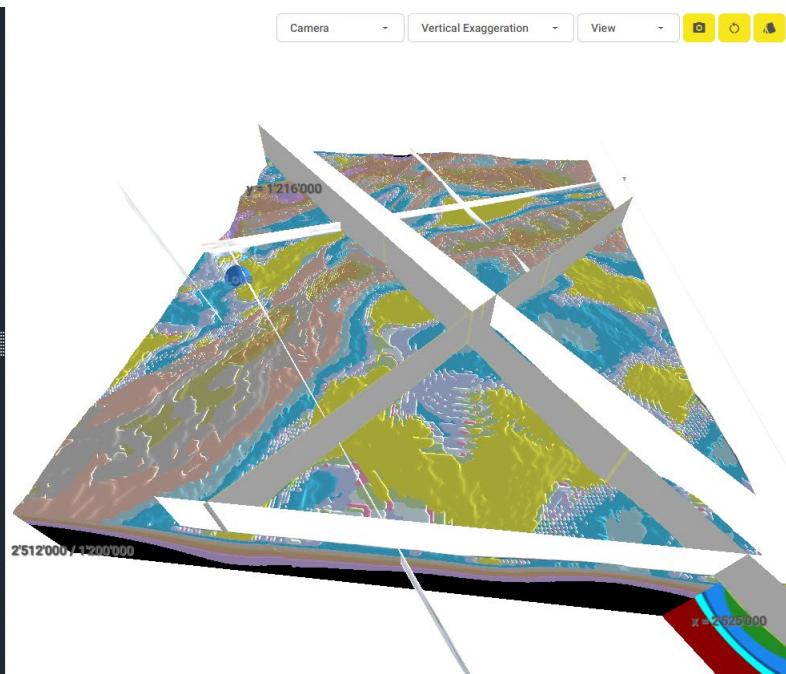
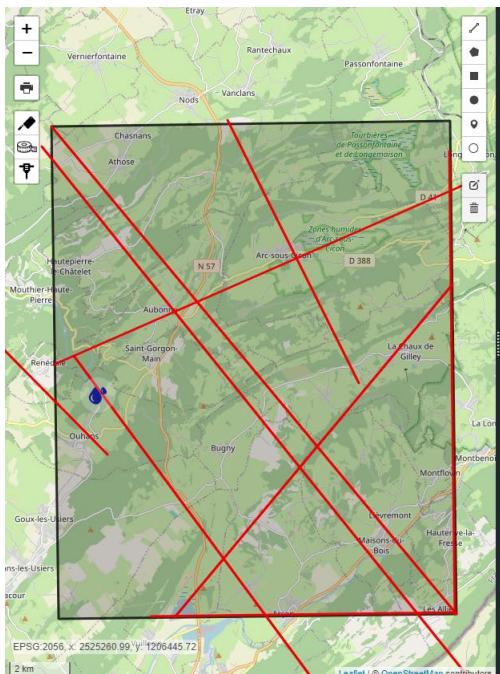


Figure 18. Aperçu du modèle géologique 3D M8 – Maison du Bois. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est faible et les profils sont globalement de mauvaise qualité.

L'incertitude sur le modèle géologique M8 est relativement élevée, surtout le long des discontinuités structurales (inclinaison des accidents, rejets, etc.). Un exemple d'incertitude est donné au coin sud-est du modèle, vers les Alliés (Figure 19). Le chevauchement proposé par Vergerly et Sorel (Castany et al., 1930) semble être en réalité un rétro-chevauchement (#RETRO_ALLIES, ID 46) plongeant vers le nord-ouest. C'est du moins l'hypothèse structurale la plus vraisemblable au regard des connaissances récentes de la tectonique jurassienne.

Par ailleurs, un chevauchement (#CHE_DOUBS, ID 101) considéré comme important est supposé longer le cours du Doubs entre Doubs et Ville-du-Pont. Celui-ci n'apparaît pas sur la carte géologique 1/50'000 (Castany et al., 1930) mais apparaît sur certains documents plus récents (Schori, 2021; Sommaruga, 1997). Selon A. Sommaruga, le raccourcissement n'est à priori pas important le long de cet accident (cf. Figure 20).

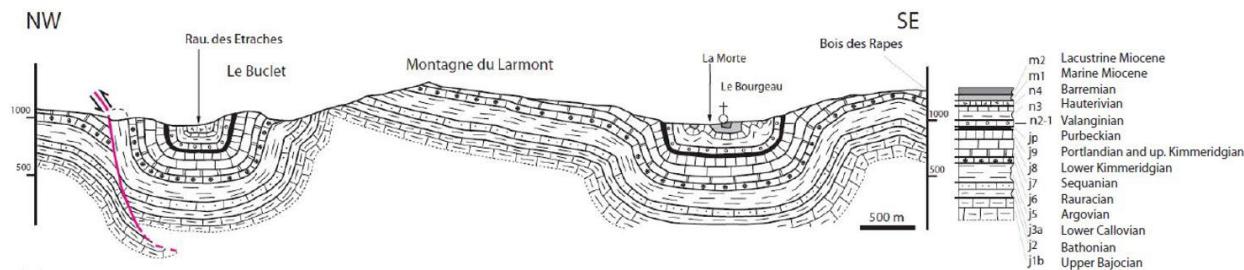


Figure 19. Profil géologique NW/SE traversant la montagne du Larmont (Castany et al., 1930). Le chevauchement noté dans le coin NW est en réalité un rétro-chevauchement plongeant dans la direction opposée. Le profil traverse aussi en partie le modèle M9.

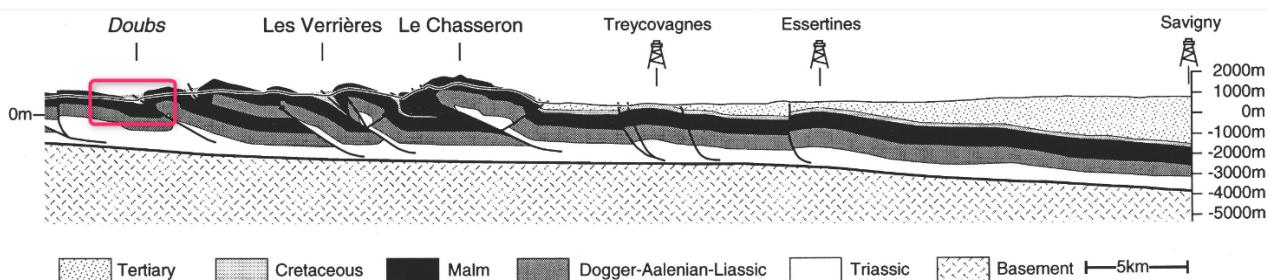


Figure 20. Profil géologique NW/SE régional traversant toute la chaîne (Sommaruga, 1997). Le segment à l'ouest traverse la vallée du Doubs à hauteur de Maison du Bois, on y voit la trace du chevauchement #CHE_DOUBS (ID 101) et le faible raccourcissement.

5.2.9. M9 – Pontarlier / Ste-Croix

[<https://www.visualkarsys.com/vk/project/1100/edit>]

Les documents géologiques de référence sont les suivants : la feuille géologique 1/50'000 0557 (Castany et al., 1930) pour la partie française et les feuilles 1/25'000 1182 (Rigassi and Weidmann, 2011) et 1202 (Aubert, 1963) pour la partie suisse. Le modèle s'inspire aussi du modèle géologique 3D réalisé à plus petite échelle par le BRGM dans le cadre du projet NutriKarst. Des informations complémentaires relatives à la « plaine de Pontarlier » ont pu être reprises de certains travaux (Campy, 1982; Claudon, 1977; Gaubi, 1993; Jeanblanc and Schneider, 1981; Rangheard et al., 1985; Vancon and Gaubi, 1992). Les dépôts quaternaires présentent une épaisseur d'environ 5 m au nord de Pontarlier et de plus de 20 m sous la ville (infos forages BSS).

Dans le secteur de Ste-Croix (Suisse), le modèle reprend les informations et interprétations géologiques réalisées pour le compte de la DGE Vaud dans le cadre du projet de documentation des ressources en eau des aquifères karstiques du Jura vaudois (ISSKA, 2023b).

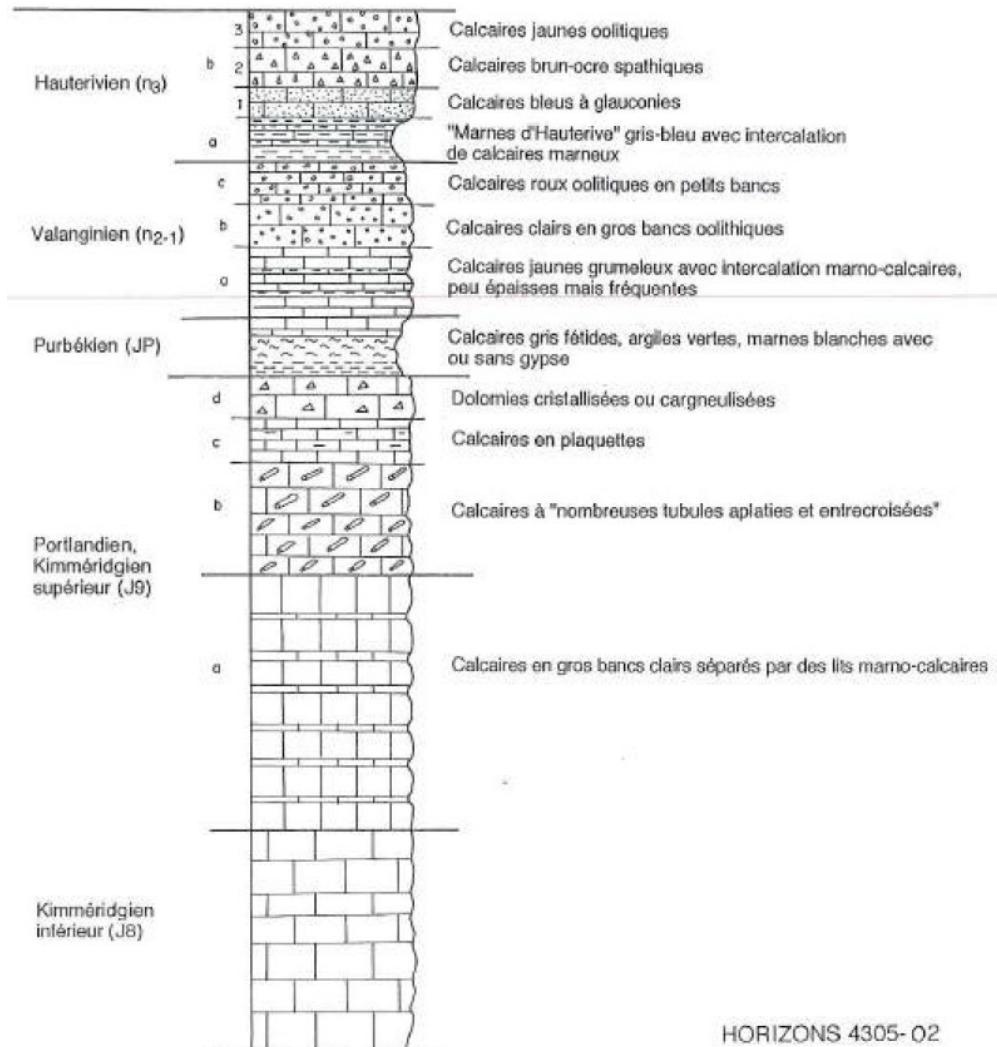


Figure 21. Log stratigraphiques des terrains Crétacé et Jurassique à l'affleurement en aval de Pontarlier (SMESD, 1994). Dans le secteur de Métabief s'ajoutent aussi 30 m de marnes du Barrémien et 70 m de molasse du Miocène. Ce log sert à l'établissement de la colonne stratigraphique du modèle M9 (Tableau 2).

Les unités du Crétacé sup. ne sont pas présentes sur l'emprise. Le Crétacé est surtout représenté par : les calcaires oolitiques (40-50 m) et marnes (10-20 m) de l'Hauterivien (n₃) et les calcaires et calcaires marneux du Valanginien (n₂₋₁). Les unités du Jurassique sup. démarrent avec les calcaires, argiles et marnes du Purbeckien (20 à 25 m) puis l'épaisse série calcaire du Portlandien et Kimméridgien sup. (150 à 200 m) suivie de l'épaisse série calcaire du Kimméridgien inf. (100 m). Viennent ensuite : les calcaires compacts du Séquanien (50 à 60 m), les calcaires du Rauracien (30 m), les calcaires hydrauliques de l'Argovien (150 à 200 m) puis les marnes de l'Oxfordien sensu-stricto (moins de 10 m).

Côté français, on note aussi la présence de molasse (sables du Miocène) dans le synclinal de Métabief (Cornet, 1977; Schardt, 1917; SMESD, 1994). Sous la molasse dont l'épaisseur atteint 50 à 70 m, se développent aussi les marnes du Barrémien (Figure 22).

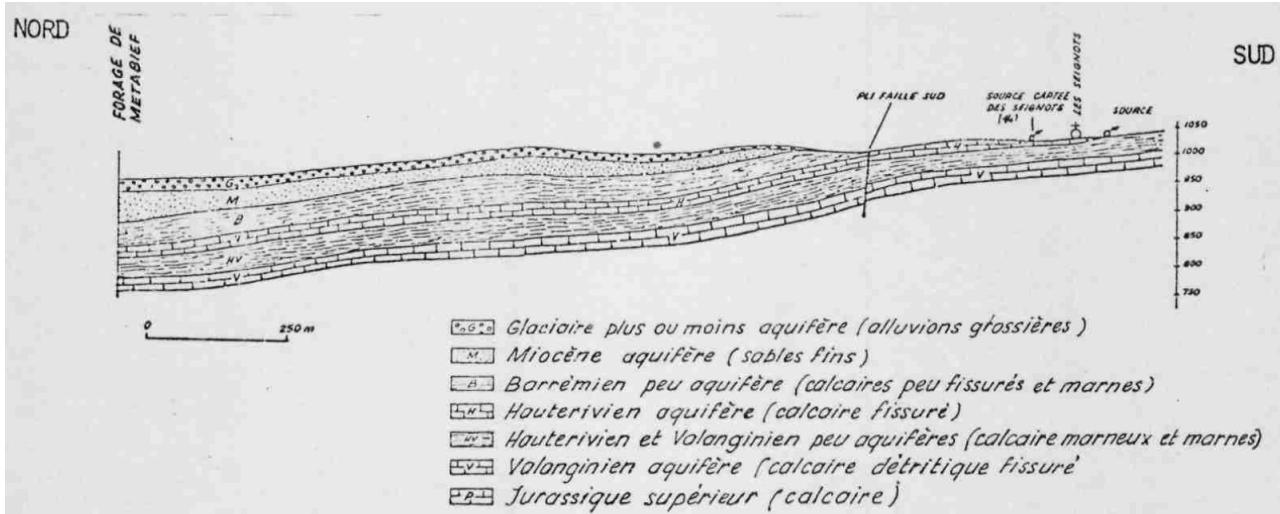


Figure 22. Profil transversal de la plaine de Métabief – secteur Bief rouge (Cornet, 1977).

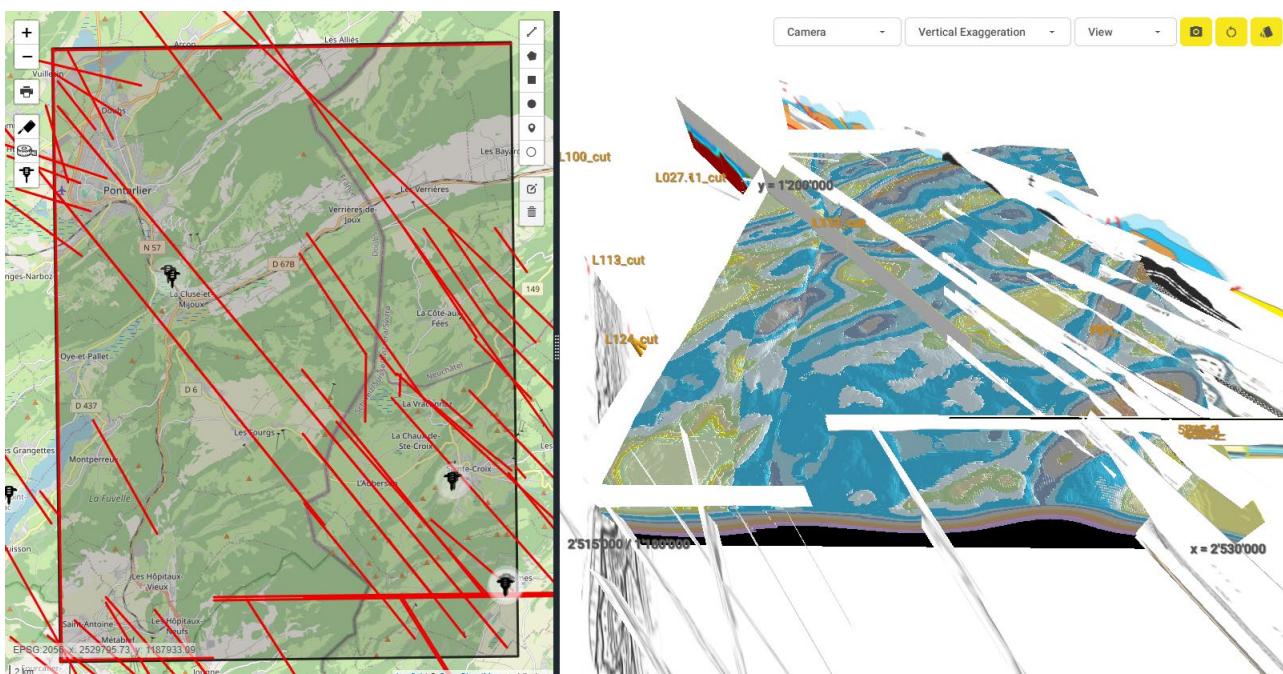


Figure 23. Aperçu du modèle géologique 3D M9 – Pontarlier / Ste-Croix. La trace du décrochement de Pontarlier est visible à l'ouest du modèle. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est correcte, mais ils sont globalement mal distribués.

L'incertitude géologique du modèle est relativement élevée dans le secteur de Pontarlier pour lequel il n'existe que très peu d'informations géologiques pertinentes – notamment en profondeur. Plus au sud, vers Ste Croix, l'incertitude tend à diminuer mais les informations géologiques sur ce secteur restent faibles.

5.2.10. M10 – Frasne

[<https://www.visualkarsys.com/vk/project/1101/edit>]

Les documents géologiques de référence sont pour l'essentiel la feuille géologique 1/50'000 0557 (Castany et al., 1930). Des informations complémentaires sont reprises d'un certain nombre de travaux existants (Campy, 1982; Claudon, 1977; Duraffourg and Palacio, 1981; Javey, 1980; Jeanblanc and Schneider, 1981; Mania et al., 1995; Pointet, 1974). Le modèle s'inspire aussi du modèle géologique 3D réalisé à plus petite échelle par le BRGM dans le cadre du projet NutriKarst. Comme pour l'emprise M8, relativement peu d'informations géologiques sont disponibles sur l'emprise M10, surtout en profondeur. D'après la BSS, le

forage le plus profond de la plaine de Pontarlier ne dépasse pas 73 m – et il reste cantonné aux formations quaternaires. Les informations géologiques sur ce modèle sont relativement anciennes, éparses et peu profondes. Très peu de profils existent et les marques de pendages sur la feuille géologique sont rares. Les données du forage profond du Laveron (2485 m) réalisé à proximité de Mignovillars ont été utilisées pour fixer les horizons profonds (Bitterli, 1973; Javey, 1980).

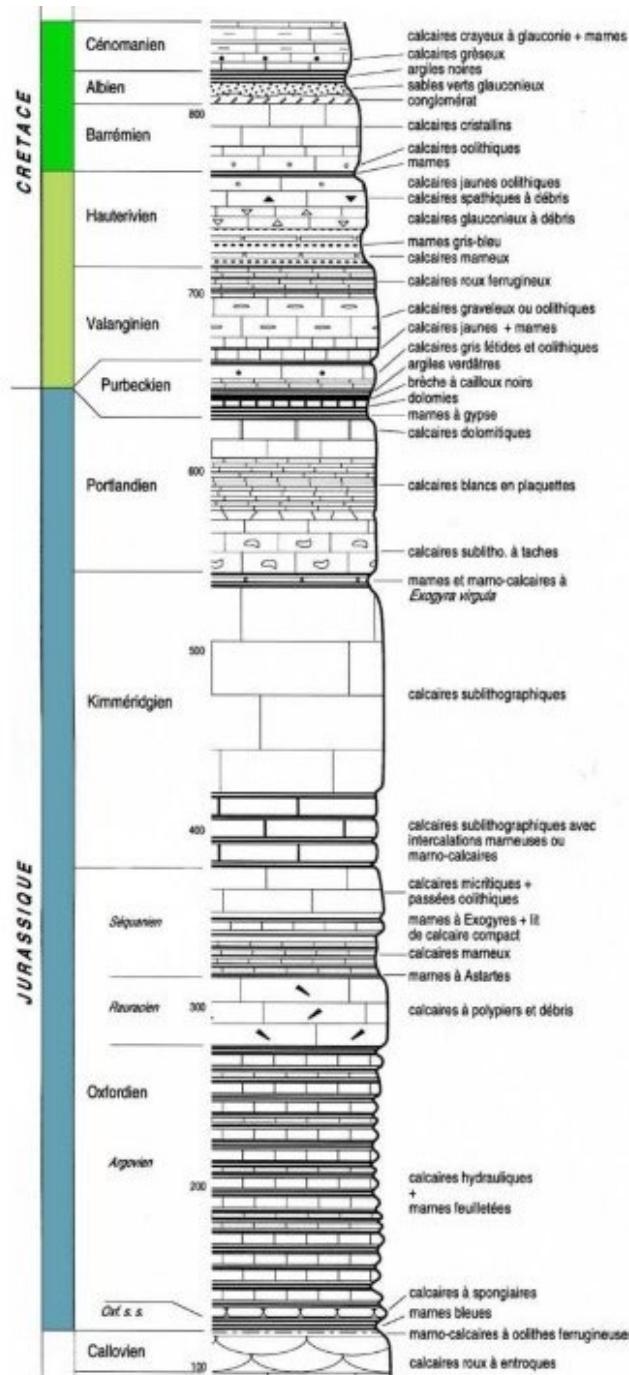


Figure 24. Colonne lithostratigraphique des unités géologiques présentes dans la région du modèle M10. Ce log sert à l'établissement de la colonne stratigraphique du modèle M10 - Frasne.

Les épaisseurs standards pour les formations du Jurassique sup. sur cette emprise sont les suivantes (Castany et al., 1930) : 130 à 170 m pour les calcaires du Portlandien, 50 à 60 m max pour les calcaires du Kimméridgien, 50 à 60 m max pour ceux du Séquanien, 30 m pour ceux du Rauracien et 150 à 200 m pour les marnes de l'Argovien.

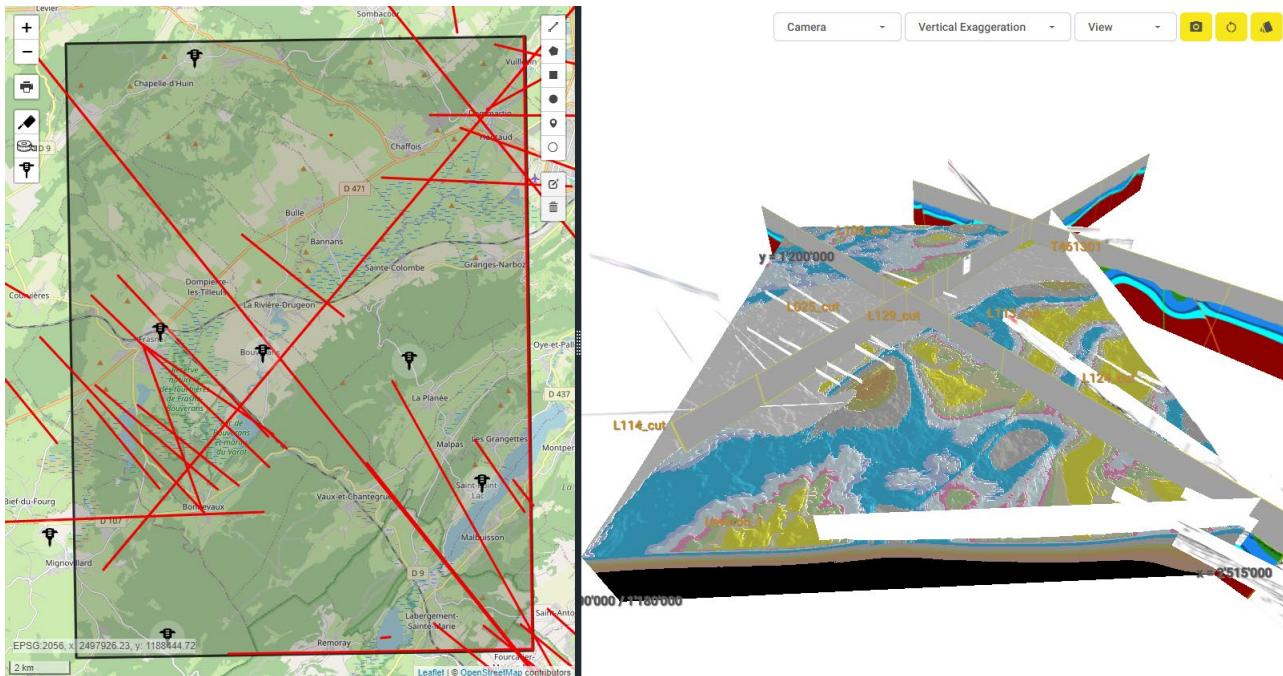


Figure 25. Aperçu du modèle géologique 3D M10 – Frasne. La plaine de Pontarlier se démarque par un large et épais dépôt de formations quaternaires (en gris sur le modèle). La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est faible. Les profils sont de faible profondeur et globalement mal distribués.

L'incertitude est relativement élevée, notamment sous la plaine de Frasne – Pontarlier. La profondeur à laquelle les calcaires du Crétacé et du Jurassique se développent est très incertaine compte tenu de l'importante épaisseur de recouvrement quaternaire. La présence de dépôts tertiaires (molasse) au toit des calcaires du Crétacé ne peut être complètement écartée étant donné qu'on les trouve dans les synclinaux des Verrières et de Morteau. Dans le secteur du lac de Saint Point, les informations géologiques sont peu nombreuses et plutôt anciennes. Les interprétations en profondeur sont donc assez incertaines.

5.2.11. M11 – Vallorbe

[<https://www.visualkarsys.com/vk/project/1102/edit>]

Les documents géologiques de référence sont les suivants : la feuille géologique 1/50'000 0583 (Chauve et al., 1943) pour la partie française et les feuilles 1/25'000 1202 (Aubert, 1963) et 1221 (Aubert, 1941) pour la partie suisse. Des informations géologiques complémentaires sont considérées (Aubert, 1953; Jeanblanc and Schneider, 1981; Nolthenius, 1921; Philippe, 1995). Les modèles géologiques 3D établis pour le projet de documentation des aquifères karstiques du canton de Vaud LGeo-VD (ISSKA, 2023b) ont été réutilisés pour la partie sud.

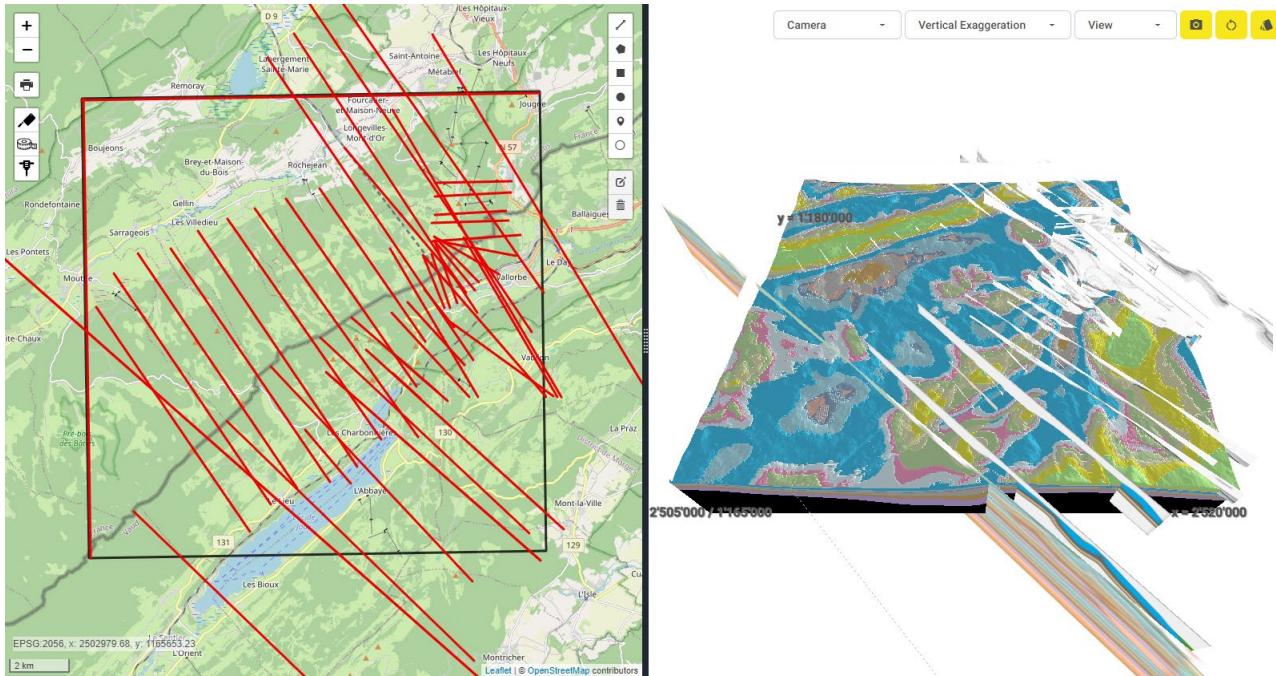


Figure 26. Aperçu du modèle géologique 3D M11 – Vallorbe. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est correcte, même si le quart nord-ouest du modèle est peu couvert.

Les données et informations géologiques, sans être abondantes, sont suffisantes, cohérentes et de bonne qualité pour la construction du modèle, surtout à travers la frontière franco-suisse grâce aux informations du tunnel du Mont d'Or. Coté France, les informations géologiques sont plus rares, notamment en ce qui concerne la structuration du synclinale entre Mouthe et Longevilles Mont d'Or. L'incertitude géologique se concentre donc plutôt au nord de l'emprise qu'au sud.

5.2.12. M12 – Mouthe / Foncine

[<https://www.visualkarsys.com/vk/project/1103/edit>]

Les documents géologiques de référence sont les suivants : les feuilles géologiques 1/50'000 0582 (Guillaume and Guillaume, 1965) et 0583 (Chauve et al., 1943) pour la partie française et la feuille 1/25'000 1221 (Aubert, 1941) pour la partie suisse. Des profils et informations géologiques complémentaires sont considérées (Bichet, 1997a; Caille, 1997; Itty and Vintaer, 1987; Schori, 2021), mais certains sont difficilement exploitables (Jeanblanc and Schneider, 1981; Philippe, 1995).

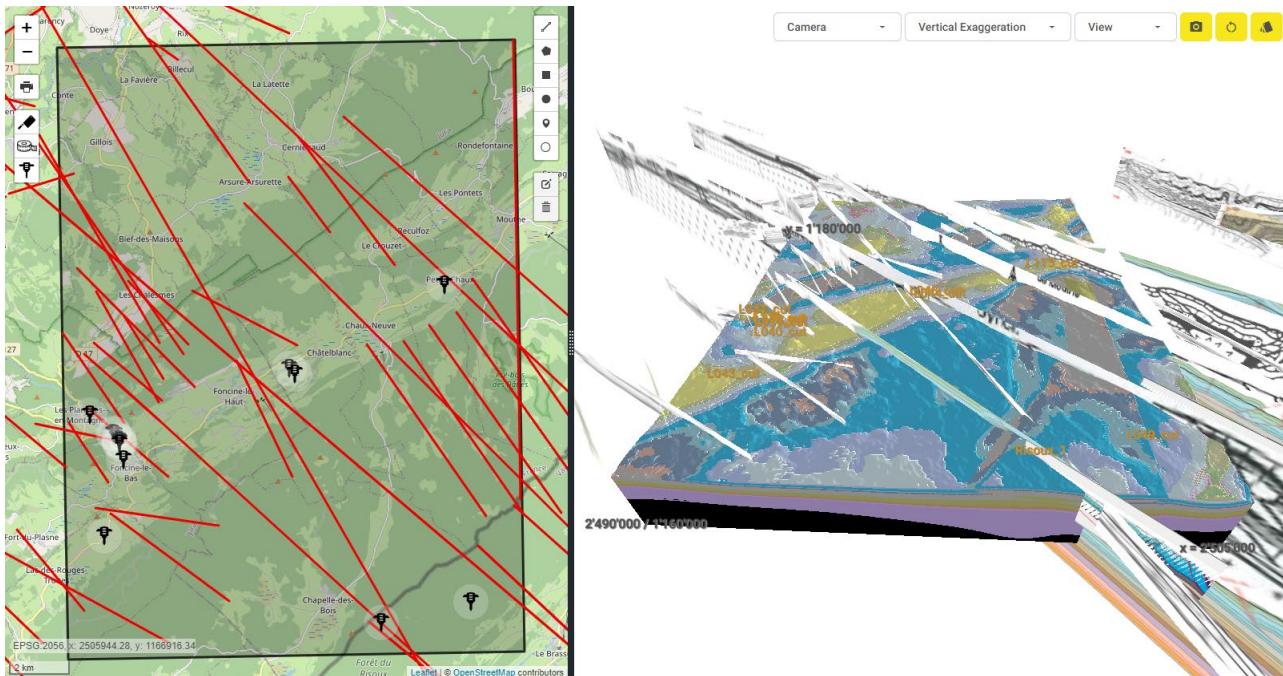


Figure 27. Aperçu du modèle géologique 3D M12 – Mouthe / Foncine. La trace du décrochement de Mouthe est bien visible à l'est du modèle. La densité de profils géologiques utilisés pour établir le modèle est globalement correcte, sans toutefois être abondante.

L'incertitude géologique est assez élevée sur cette emprise. Les informations géologiques sont rares et pour la plupart anciennes et difficiles à replacer correctement dans l'espace. Les interprétations relatives à la structuration tectonique sont assez sommaires – notamment en ce qui concerne le synclinal de Mouthe – Longevilles Mont d'Or.

6. Géométrie des aquifères

6.1. Généralités

Le Tableau 4 présente les propriétés hydrogéologiques retenues pour les différentes unités géologiques formant les modèles M1 à M12. De manière binaire, les unités considérées comme « karstiques » (principalement les calcaires) forment les unités aquifères ; les unités considérées comme « non karstiques » (principalement les marnes et les formations non carbonatées) sont considérées comme aquiclude.

Unités	Code couleur			Modèles										
	R	G	B	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Quaternaire (Q)	240	240	240	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
Miocène (m.)	255	255	157					-			-			
Cénomanien (c1.)	240	255	210	-	-	-	-	-	-	-	-			
Aptien-Albien (n5-6.)	224	255	210	-	-	-	-	-	-	-	-			
Barrémien (n4.)	189	253	155	-	-	-	-		-	-	-			
Hauterivien sup. (n3b)	238	238	77	-	-	-								
Hauterivien (n3.)	227	227	187	-	-	-		-						
Valanginien (n2.)	193	226	171	-	-	-								
Purbeckien (n1.)	248	162	204	-	-									
Tithonien (j7.)	225	246	255											
Kimméridgien sup. (j6.)	194	212	255											
Kimméridgien inf. (j5c-6aR)	68	199	243											
Séquanien sup. (j5c2-6aC)	170	221	238											
Séquanien inf. (j5c2-6aM)	139	167	198									50/50		
Oxfordien sup. (j5c1.)	233	193	180		50/50	50/50								
Oxfordien inf. (j5a-b.)	201	201	201											
Callovien (j4.)	200	201	126	50/50	50/50									
Bathonien (j3.)	218	180	119											
Bajocien (j2.)	216	174	151											
Aalénien (j1.)	227	184	249											
Lias (l.)	203	177	242											
Trias (t.)	255	219	242	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50

Tableau 4. Propriétés hydrogéologiques des unités géologiques définies pour les modèles M1 à M12. Les unités sont soit « aquifères » (bleu), soit « aquiclude » (brun), soit notées comme « 50/50 » car des variations latérales de faciès se produisent sur l'emprise du modèle (typiquement l'Oxfordien supérieur sur les modèles M2 et M3).

Lorsque les informations le permettent, les nappes karstiques des trois principaux aquifères sont documentées : Jurassique moy., Jurassique sup. et Crétacé. En principe le Crétacé pourrait être subdivisé car un premier aquifère peut se développer dans les calcaires du Valanginien et de l'Hauterivien (Crétacé Inf.) et un second dans les calcaires du Barrémien et de l'Urgonien (Crétacé sup.). Dans la présente étude, cette distinction n'est pas réalisée car dans beaucoup de cas elle nécessiterait de réaliser des modèles plus locaux et plus précis.

6.2. Données utilisées

Les données hydrologiques utilisées pour identifier les principales zones noyées sont les suivantes (Figure 28) :

- Les sources karstiques, principalement celles dont le régime hydrologique est permanent. Elles permettent de définir un niveau de base hydraulique « **stable** » à l'endroit de l'émergence. Les sources sont décrites en Annexe B.
- Les hauteurs d'eau mesurées dans les forages, les cavités, etc. En fonction de certains critères relatifs à la mesure (positionnement de la crête, fluctuations, etc.), les hauteurs d'eau apportent des informations directes sur la position du niveau de base hydraulique.
- Tout autre indicateur direct de la présence directe ou indirecte d'une nappe d'eau souterraine (ouvrage enterré, etc.), observation géomorphologique (Figure 29), etc.

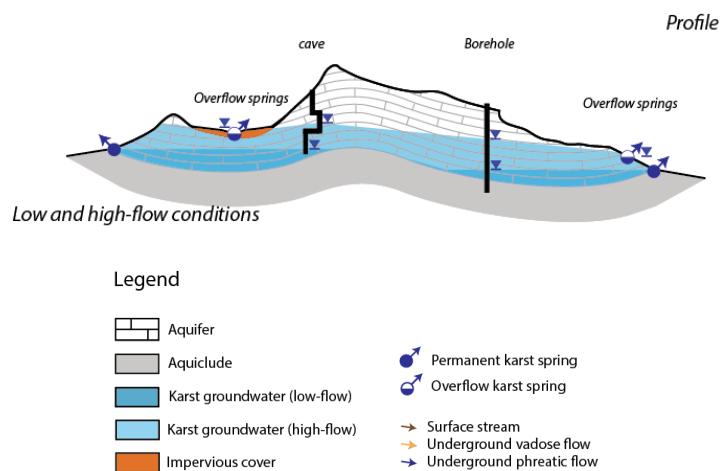


Figure 28. Localisation des principales sources karstiques, mesures des hauteurs d'eau en forages ou en cavités sont les principales informations utilisées pour la structuration des zones noyées (Malard et al., 2014a).

Le profil hydrogéologique longitudinal du Doubs (cf. Annexe C) et les indications relatives aux modalités de dépôts alluvionnaires dans le cours de la rivière – ou de ses affluents - donnent indirectement une indication sur la proximité avec le niveau de base hydraulique (cf. Figure 29).

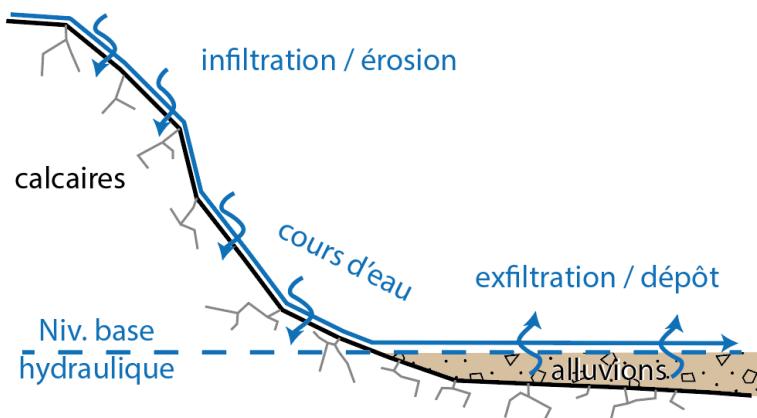


Figure 29. Schéma d'un profil hydraulique d'une rivière en milieu karstique. Une forte pente hydraulique associée à l'absence de dépôts alluvionnaires suggère une forte dynamique d'érosion et donc un niveau de base hydraulique bien plus bas que l'altitude du fond du lit. Une pente faible (proche du gradient hydraulique karstique), associée à des plaines de dépôts suggèrent que le niveau de base est proche de l'altitude de la surface libre du cours d'eau.

6.3. Modèles de données

La géométrie et la description des objets hydrogéologiques (géodonnées) sont basées sur le modèle de données établi pour les informations relatives aux aquifères karstiques dans le cadre de la Loi fédérale sur la GéolInformation¹³ et adapté lors de l'application sur le jura vaudois (ISSKA, 2023b).

Les géodonnées et le modèle de données associé sont décrits en Annexe H. Ce modèle de données permet de décrire et de représenter les objets hydrogéologiques spécifiques aux aquifères karstiques, notamment les nappes karstiques (Figure 30).

¹³ <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2008/388/fr>

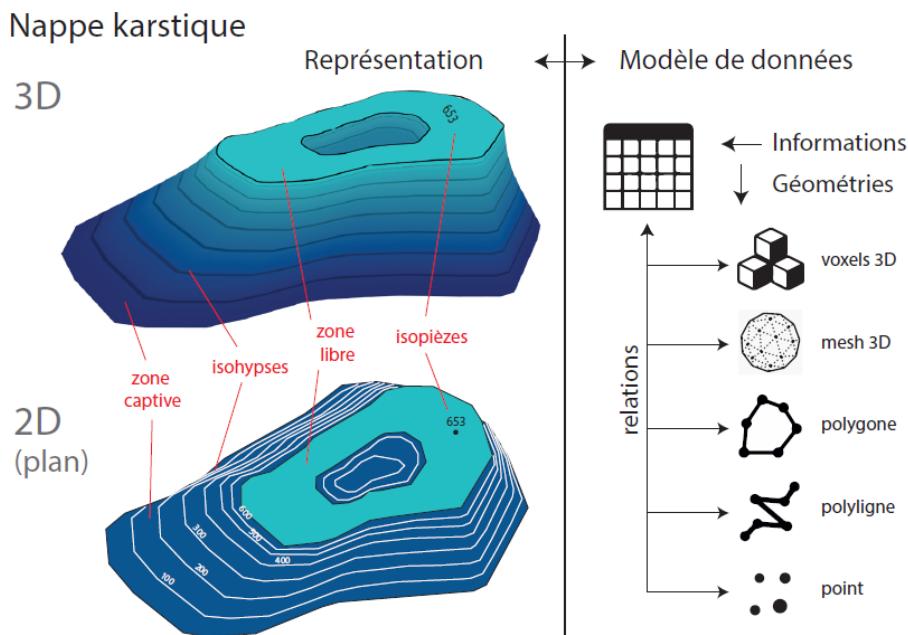


Figure 30. Principes de représentation des nappes karstiques en 3D et en 2D. La complexité de l'objet et les informations qui y sont associées nécessitent un modèle de données spécifique pour la documentation.

Dans le schéma précédent, les isohypses symbolisent la côte (altitude) du toit de la nappe d'eau souterraine dans la zone captive. Les isopièzes symbolisent la côte (altitude) de la hauteur d'eau. Dans la zone libre de la nappe d'eau souterraine, les isohypses équivalent aux isopièzes. Dans la zone captive en revanche, les isohypses diffèrent des isopièzes.

7. Schéma hydrogéologique Doubs amont aval

Les interprétations sur (i) la structuration des blocs aquifères, (ii) le développement des zones noyées et (iii) les circulations entre les différents blocs sont globalement décrites de l'amont vers l'aval sous la forme d'un tableau (Annexe C) qui accompagne la lecture des cartes hydrogéologiques karstiques (Annexe E) et des profils hydrogéologiques longitudinal (Annexe F) et transversaux (Annexe G).

Les nappes accompagnées d'un «*» n'ont pas de relations d'alimentation ou de drainage avec les eaux du Doubs (ex : **FNK002*** nappe de la source de l'Ain).

93 nappes karstiques d'importance régionales ont été documentées, **18** pour les aquifères du Crétacé, **57** pour les aquifères du Jurassique sup. et **18** pour les aquifères du Jurassique moy. La documentation est pratiquement systématique pour les aquifères du Crétacé et du Jurassique sup., en revanche, elle est partielle concernant les aquifères du Jurassique moy., surtout dans la zone du haut Doubs, où ces aquifères sont profonds et peu - voire pas - documentés. De la même manière, les nappes ou portions de nappe supposées peu épaisses (moins de 10-20 m) ne sont pas documentées. En réalité, il existe certainement beaucoup plus de nappes que celles documentées ici, mais on peut supposer qu'elles sont d'importance moindre en termes de réserves et de ressources.

Dans certains cas, lorsque l'information existe (exutoires de trop-plein, mesures en forage, etc.), l'extension des nappes karstiques en conditions de hautes eaux est documentée.

Les 11 sections suivantes décrivent le comportement hydrogéologique du Doubs, par tronçon, depuis sa source à Mouthe jusqu'à Brémoncourt.

L'écoulement du lit aérien du Doubs et sa géomorphologie sont décrites par E. Fournier (Fournier, 1900), puis par A. Buxtorf. (Buxtorf, 1922), ce dernier s'intéressant surtout au tronçon Brenets → Soubey. Des interprétations géomorphologiques du lit du Doubs ont été réalisées plus récemment (Rabin et al., 2015). Elles pointent notamment les « knickpoints » (ruptures de pente) du cours d'eau qui sont liées soit à des ruptures de lithologie, soit à des processus néotectoniques, mais aussi à des processus hydrogéologiques / karstiques et finalement à des ouvrages anthropiques (seuils, barrages, etc.). Le Saut du Doubs n'est pas classé comme rupture structurale – mais plutôt comme « géomorphologique », en lien avec un glissement de terrain¹⁴. Ces ruptures de pente marquent la succession des seuils hydrauliques du Doubs et permettent notamment d'identifier les tronçons infiltrants et exfiltrants. Les schémas écoulements sont proposés sur la base des interprétations hydrogéologiques et comparés aux connexions démontrées par traçages lorsque celles-ci sont disponibles, cohérentes et documentées.

Le profil hydrogéologique de synthèse est présenté en Annexe E. Une série de 14 profils transversaux complètent la lecture, ils sont présentés en Annexe G. Le tableau en Annexe C liste les valeurs de débit hydrologiques du Doubs à hauteur des différentes stations et pour différentes situations hydrologiques. Ces interprétations permettent de tracer et de commenter les limites du bassin d'alimentation hydrogéologique du Doubs (§. 8)

Pour chaque tronçon, le lecteur est invité à consulter les cartes hydrogéologiques karstiques 1/25'000 se rapportant au secteur géographique couvert par le tronçon (cf. Annexe E). Des précisions sur les documents à consulter sont listées pour chacun des tronçons sous l'aperçu géographique. Il est important de prendre connaissance des légendes et consignes de lecture des cartes hydrogéologiques pour la compréhension des descriptions hydrogéologiques des sections suivantes (§ 7.1 à 7.11).

¹⁴ Le verrou formé par le Saut du Doubs est daté à ~12'000 ans avant notre ère.

7.1. Source Doubs → confluence lac de Remoray [940-850 m]

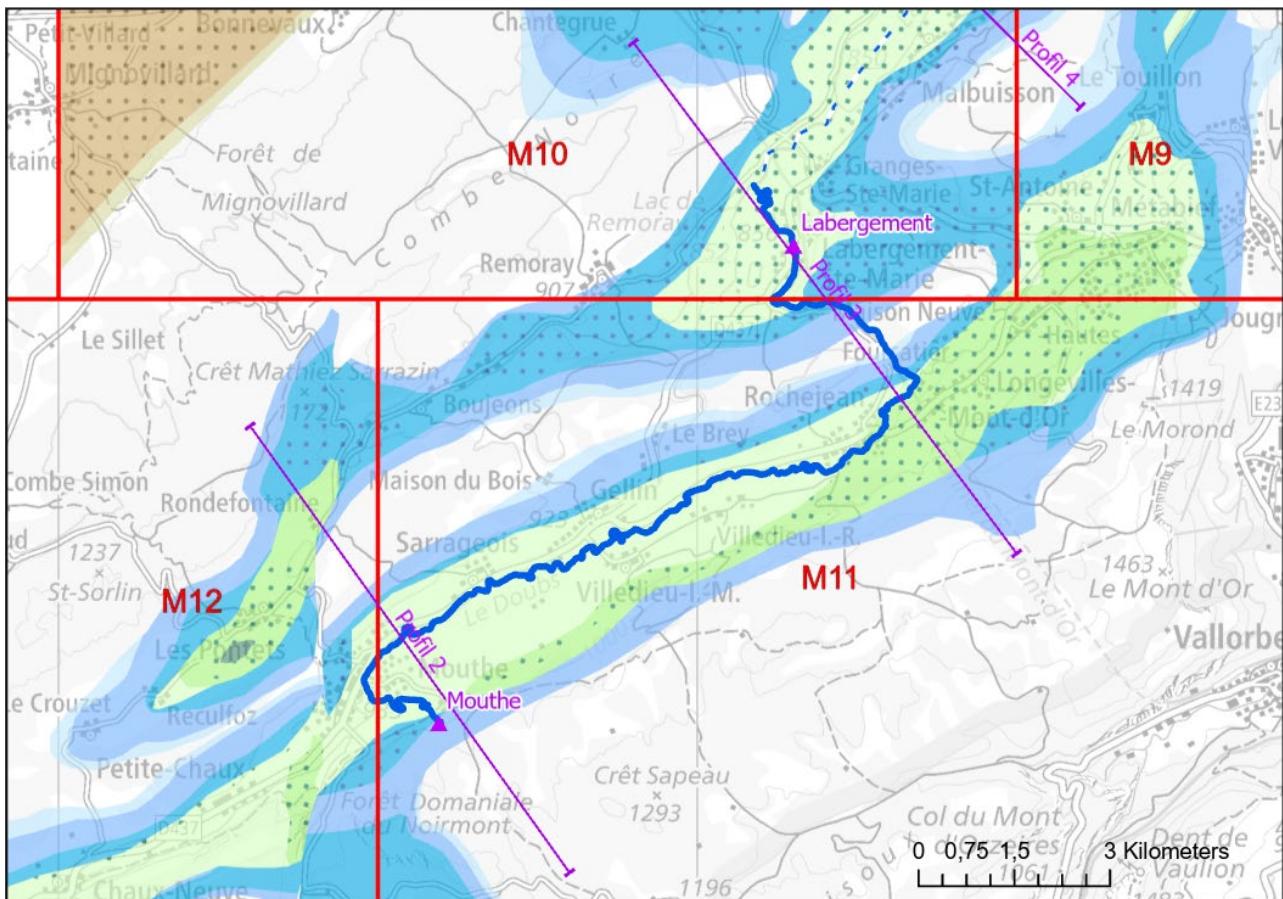


Figure 31. Aperçu du tronçon Source Doubs → confluence lac de Remoray

Se reporter aux documents suivants pour la compréhension du §. 7.1 :

- Annexe E :
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M12_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M11_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M10_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M9_25K_.pdf
- Annexe F : Doubs ; profil hydrogéologique longitudinal
- Annexe G : Doubs ; profils hydrogéologiques transversaux
 - o PROFIL TRANS 1
 - o PROFIL TRANS 2
 - o PROFIL TRANS 3

A partir de Mouthe (935 m), le Doubs se forme par la réunion :

- (i) Du ruisseau du Cébriot (pérenne) : celui-ci est alimenté par diverses sources karstiques de la nappe du Crétacé inf. ([FNK040](#)) : les sources de Grand Git, Champvent, Veuillets et Seignette (non décrites ici) et une part de ruissellement de surface. La tête du ruisseau est située vers 996 m d'altitude, dans les tourbières à l'est de Chaux-Neuve. L'essentiel de l'eau provient de l'aquifère [FNK040](#) du Crétacé et la contribution des aquifères plus profonds est négligeable. L'aquifère du Jurassique sup. est en effet divisé en 2 compartiments : (i) le compartiment sud correspondant au flanc chevauché du Risoux abrite la nappe [FNK019](#) dont les écoulements sont

- supposés atteindre la source du Doubs et (ii) le compartiment nord correspondant à la partie synclinale et au flanc de l'anticinal abrite la nappe [FNK018](#) supposé alimenter la source de la Saine qui alimente l'Ain. → cf. [PROFIL TRANS 1](#).
- (ii) Du ruisseau du Cul de Bief (temporaire), au sud de Mouthe : le ruisseau n'est actif qu'en conditions de hautes eaux, associé au débordement des [sources de trop-plein du Cul de Bief](#), alimentées par les nappes [FNK015](#) et [FNK019](#).
- (iii) Et de la [source du Doubs](#) (alt. 940 m) : celle-ci est principalement alimentée par la nappe [FNK015](#). Les débits de la source sont mesurés (→ station Doubs à Mouthe [[U2002010](#)])

En conditions de basses à moyennes eaux, la majorité du débit est apportée par la [source du Doubs](#). Les débits du Cébriot sont de l'ordre de 0.28 m³/s en moyenne sur l'année, contre 1.87 m³/s pour la [source du Doubs](#).

Le décrochement de Mouthe n'est pas véritablement une barrière hydraulique. Des écoulements en provenance des nappes [FNK018](#) et [FNK019](#) sont supposés traverser le décrochement et contribuer à l'alimentation du cours d'eau via différentes sources (notamment la [source Ceg](#)). Plusieurs traçages en bordure nord et sud du synclinal l'attestent¹⁵. → cf. [PROFIL TRANS 2](#).

En aval de Mouthe, jusqu'à la confluence avec le ruisseau du Bief Rouge¹⁶ (900 m), à hauteur de Longevilles Mont-d'Or, le Doubs traverse principalement des terrains molassiques, non karstiques, mais draine toutefois diverses petites sources de l'aquifère du Crétacé inf. ([FNK040](#)) dont la charge est supposée décroître de 950 m à 900 m d'altitude. → cf. [PROFIL TRANS 3](#). La nappe sous-jacente de l'aquifère du Jurassique sup. ([FNK017](#)) est supposée plus basse en altitude (vers 900 m). Elle ne participe donc pas à l'alimentation du Doubs sur ce tronçon. Le ruisseau du Bief Rouge est un affluent du Doubs. Il est alimenté en amont par les [sources pérennes de la Carré et Clos Bayet](#) (951 - 952 m) et temporaires [de la Creuse](#)¹⁷ (956 m), principalement alimentées par la nappe du jurassique sup. ([FNK017](#)), certainement en conditions de hautes eaux, ainsi que par diverses petites sources drainant la nappe du Crétacé inf. ([FNK040](#)). Le Bief Bleu, un affluent du Bief Rouge près de Métabief, confluence à l'altitude de 935 m. Cet affluent est alimenté par quelques sources mineures le long de sa course ([FNK040](#)). En tête, il est alimenté par les sources de Coudrettes (1040 m d'altitude) qui émergent d'aquifères à priori superficiels dans le bourg des Hôpitaux Vieux.

Ce tronçon est marqué par trois secteurs de pertes qui ne concernent pas directement le cours d'eau, mais plutôt les écoulements souterrains qui l'alimentent :

- (i) Les pertes via le tunnel du Mont-d'Or. Les auteurs s'accordent globalement sur les volumes d'eau drainées vers Vallorbe : entre 70 et 200 L/s (Cornet, 1977), 150 L/s en moyenne (Jeanblanc and Schneider, 1981) et plus récemment entre 69 L/s en étiage et 250 L/s en hautes eaux (Liboz, 2019).
- (ii) Les diffluences observées dans le secteur des Hôpitaux Neufs (à l'est du décrochement de Pontarlier). Les diffluences observées vers les sources côté Suisse (sources de Fontanas, etc.) sont de l'ordre de 50 L/s (Chauve et al., 1986). Plusieurs traçages attestent de cette diffluence¹⁸. Jeanblanc and Schneider, 1981, parlent même d'une capture progressive des écoulements du décrochement par la Jougrena¹⁹, au sud.
- (iii) Les diffluences observées vers les sources de Malbuisson (source Schlumberger, source Bleue, etc.) depuis les secteurs de Métabief, des Hôpitaux -Vieux et du Touillon. Celles-ci sont de l'ordre de 300 L/s (Chauve et al., 1986), mais rejoignent le bassin du Doubs au niveau du lac de Saint-Point.

Un 4^{ème} secteur de perte est supposé à hauteur du Brey, au sud du Lac de Remoray. Le ruisseau du Lhaut peut en théorie capturer une partie de la nappe du jurassique sup. ([FNK017](#)) vers 900 m d'altitude et dévier les écoulements vers le lac de Remoray. Le profil d'incision du cours d'eau remonte en effet en direction du

¹⁵ Traçages DREAL BFC n° D545, D546 et D637

¹⁶ Les débits du Bief Rouge sont mesurés à Longevilles-Mont-d'Or (station U201 5030)

¹⁷ Aussi appelée source du Bief Rouge

¹⁸ Traçages DREAL BFC n° D745 et D746 (les résultats du traçage D746 peuvent toutefois faire l'objet d'une réserve...).

¹⁹ Aussi écrit « Jougrenaz »

synclinal de Mouthe et pourrait à termes capturer une partie une partie du synclinal – d'abord en souterrain et éventuellement ensuite en surface. A termes, le cours du Doubs pourrait même être capturé et drainé directement par le Lhaut.

Entre la confluence avec le ruisseau du Bief Rouge et l'affluent de la Taverne en aval du lac de Remoray, le Doubs traverse la cluse du Mont de la Croix. Le profil hydraulique de la traversée est assez incliné, notamment dans la section aval du barrage situé environ au milieu de la cluse à ~890 m d'altitude, signe que le cours d'eau est perché au-dessus du niveau de base. En effet, la nappe sous-jacente ([FNK020](#)) a un niveau estimé à 860 m. Or, le barrage fixe artificiellement un niveau de la rivière dans la partie haute de la cluse vers 890 m. En aval du barrage, le Doubs est infiltrant jusqu'à l'altitude de 855 m environ. Les infiltrations alimentent la nappe [FNK053](#). Comme la cluse n'entaille pas les formations imperméables à la base des calcaires du Jurassique sup., des sous-écoulements sous le lit du Doubs sont possibles, permettant des échanges directement entre la nappe [FNK017](#) et la nappe [FNK053](#), autrement qu'à travers le Doubs.

A hauteur de Labergement-Ste Marie (→ station Doubs à Labergement-Sainte-Marie [[U201 2010 01](#)]), la somme des débits moyens du Cébriot, du Bief rouge, de la source du Doubs et des [sources de trop-plein du Cul de Bief](#) (environ $0.28 + 0.751 + 1.87 + 0.36 = 3.2 \text{ m}^3/\text{s}$) n'expliquent que les 2/3 du débit moyen mesuré à la station (**4.42 m³/s**, cf. Tableau en Annexe C). Des contributions des nappes du Crétacé – mais aussi certainement des nappes du Quaternaire doivent être envisagées.

7.2. Confluence lac de Remoray → la Cluse et Mijoux [850 - 843 m]

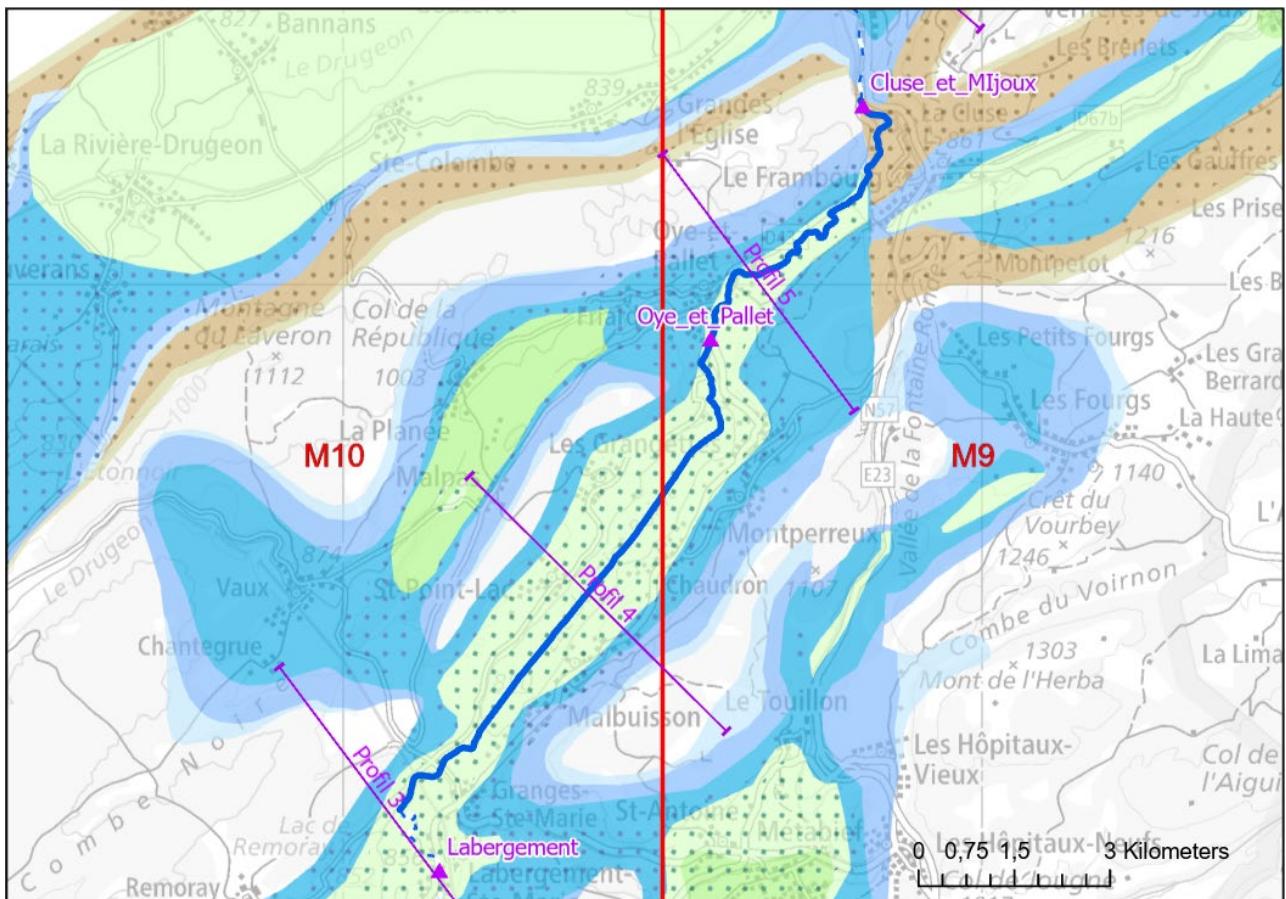


Figure 32. Aperçu du tronçon confluence lac de Remoray → la Cluse et Mijoux

Se reporter aux documents suivants pour la compréhension du §. 7.2 :

- Annexe E :
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M11_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M10_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M9_25K_.pdf
- Annexe F : Doubs ; profil hydrogéologique longitudinal
- Annexe G : Doubs ; profils hydrogéologiques transversaux
 - o PROFIL TRANS 3
 - o PROFIL TRANS 4
 - o PROFIL TRANS 5

En aval de [l'usine hydroélectrique du Fourperet](#), le Doubs circule sur les formations crétacées et les dépôts quaternaires avant d'atteindre la confluence avec l'exutoire du lac de Remoray (le Rondeau, 850 m d'altitude en basses eaux). → cf. **PROFIL TRANS 3**. Il est alimenté par deux aquifères dont les niveaux de base sont à priori fixés par la côte du lac :

- La nappe [FNK043](#) de l'aquifère du Crétacé inf., qui noie toute la plaine entre Labergement-Sainte-Marie et le village de Remoray. Il n'existe à priori pas d'exutoires individualisés de cette nappe. Elle est supposée drainée directement par le lac et le Doubs.
- La nappe [FNK053](#) de l'aquifère du Jurassique sup. qui alimente le Doubs via les [sources Capucin](#) et de [la Drésine](#) (carte M11).

Le lac de Remoray est aussi alimenté par un affluent, « la Drésine », qui draine le vallon depuis l'ouest de Boujeons. La Drésine est alimentée par de petites sources de l'aquifère du Crétacé (notamment les [sources de Boujeons](#), et [celles des Crêts Est et Ouest](#)). Elle draine certainement une partie de la nappe Crétacé des Pontets [FNK054](#). Dans le secteur de Boujeons et des Pontets, la nappe du Jurassique sup. ([FNK052](#) et [FNK053](#)) est plus basse que le fond de vallée. La nappe est certainement aussi alimentée par débordement des nappes Crétacé ([FNK054](#)), ou par des infiltrations en aval, comme c'est le cas au niveau de Rondefontaine. Aucun indice ne permet de considérer le décrochement de Mouthe comme un obstacle hydrogéologique infranchissable. Les eaux souterraines de l'aquifère du Jurassique sup. sont supposées traverser.

A la sortie du lac de Remoray, les eaux sont dirigées dans le Doubs via l'affluent « La Taverne ». Le Doubs circule en continuité hydraulique jusqu'au lac de Saint-Point. Le niveau du lac (850 m) fixe la position du niveau de base sur ce tronçon. → cf. [PROFIL TRANS 4](#). Le lac est naturel, le niveau d'eau est légèrement réhaussée artificiellement mais n'a pas d'impact majeur sur le fonctionnement des aquifères.

Le lac est alimenté par :

- (i) Le Doubs, auquel s'ajoute un affluent en rive gauche, alimenté par la [source de la Clusette](#) et différentes tourbières et un affluent en rive droite, le Blanc Bief, alimenté par de petites sources dont celle de [la Fuvelle](#). La source de la Clusette draine une partie de la nappe du Jurassique sup. qui se développe sous la commune de Vaux-et-Chantegrue ([FNK020](#)) dont l'altitude du niveau de base est aussi autour de 850 m. Les relations entre les nappes [FNK020](#) et [FNK053](#) ne sont pas clairement documentées. La limite entre les deux nappes est arbitraire.
- (ii) Les sources en rive droite ([Schlumberger](#), [source Bleue](#), etc.) émergeant de l'aquifère du Jurassique sup. (nappe [FNK053](#)).
- (iii) Les eaux de l'aquifère du Crétacé inf. (nappe [FNK043](#)) qui ennoient le synclinal dans lequel le lac est logé. L'altitude de la surface libre de la nappe [FNK043](#) est conditionnée par le niveau du lac, lui-même contrôlé par la retenue artificielle.

A la sortie du lac de Saint-Point, le Doubs coule sur les formations crétacées, notamment les marnes et calcaires de l'Hauterivien. Sur cette section, les débits sont mesurés avant l'entrée dans le village d'Oye-et-Pallet (→ Station Doubs à Oye-et-Pallet [[U201 2020](#)]).

Les débits moyens du Doubs mesurés à la station d'Oye-et-Pallet sont de **6.28 m³/s** (cf. Tableau en Annexe C). Le gain sur le tronçon est donc de l'ordre de **+1.86 m³/s** par rapport à la station précédente de Labergement-Sainte-Marie. Or, sur ce tronçon, l'apport des sources connues se limite à celles qui émergent en rive droite du lac St-Point ([source Schlumberger](#), [Grande source](#), [source de la Route du fort](#), [source Bleue](#)) dont le débit moyen cumulé atteint 50 L/s (bien que cette valeur paraisse probablement sous-estimée). Il est en outre difficile d'admettre que ce soit la contribution des affluents (Taverne, Clusette et Blanc Bief) qui assure l'alimentation sur ce tronçon (même si les débits de ces affluents ne sont pas connus). L'existence de sources dans les lacs (Remoray et St-Point) et dans le lit du Doubs - qui pourraient être des exutoires de ces nappes - ne peut pas être écartée.

A la traversée d'Oye-et-Pallet, le Doubs reçoit la contribution de l'affluent du Saut en rive gauche. En aval du village, des pertes dans le lit du Doubs sont mentionnées dans différents ouvrages (dont l'étude Artelia, 2023, §.5.2.2). Ces pertes sont détectables aussi sur les mesures de débit entre Oye-et-Pallet et la Cluse-et-Mijoux en étiage (cf. Tableau en Annexe C). Elles sont estimées à 100 L/s. Les écoulements rejoignent à priori la [source de la Loue](#). → cf. [PROFIL TRANS 5](#).

A l'approche de la Cluse-et-Mijoux, altitude 845 m environ, le Doubs reçoit l'affluent de Fontaine Ronde en rive droite. Cet affluent draine le vallon des Verrières (ruisseau de la Morte), et le ruisseau de Fontaine Ronde, alimenté à l'amont par les [sources Martin](#) et la [source intermittente de Fontaine Ronde](#). La Morte est essentiellement alimentée par des écoulements de surface, mais aussi par débordement de l'aquifère Crétacé inf. (nappe [FNK034](#)). La contribution du ruisseau de Fontaine Ronde est importante si l'on considère les débits de la [source de Fontaine-Ronde](#) (200 L/s), alimentée par la nappe du Crétacé inf. ([FNK057](#)) et ceux des [sources Martin](#) (400 L/s), alimentées par la nappe du Jurassique sup. ([FNK016](#)) et la petite nappe perchée du Crétacé inf. à l'ouest des Fourgs ([FNK056](#)).

Des pertes sont mentionnées au niveau de la confluence entre le ruisseau de Fontaine Ronde et le Doubs. Elles se situent certainement au niveau de la traversée du décrochement de Pontarlier (lieu-dit « les Angles »), ou à peine en aval de la confluence, lorsque le Doubs longe la D437 - section sur laquelle il est en contact avec les calcaires du Jurassique sup. Les eaux infiltrées rejoignent alors l'aquifère du Jurassique sup.

([MNK216](#)), puis certainement l'aquifère du Jurassique moy. ([FNK062](#)) et sont drainées vers la [source de la Loue](#). Plusieurs traçages réalisés au niveau du Frambourg et à hauteur de la Cluse l'attestent²⁰.

Sur l'ensemble du tronçon entre Oye-et-Pallet et le resserrement de la cluse entre la Fontanette et les Rosiers, le Doubs est globalement exfiltrant et alimenté par le débordement de la nappe du Crétacé inf. ([FNK043](#)). Les marais des Prés Lavaux sont certainement des exutoires de cet aquifère. Les sections infiltrantes seraient donc localisées : (i) en aval du quartier « les Angles » (alt. 850 m) : infiltration du ruisseau de Fontaine Ronde essentiellement, (ii) en aval de la confluence, sous la D437 (alt. 843 m), et (iii) à l'entrée de la Cluse (altitude 843 m). La localisation de ces zones de pertes est portée sur la carte en Figure 33.

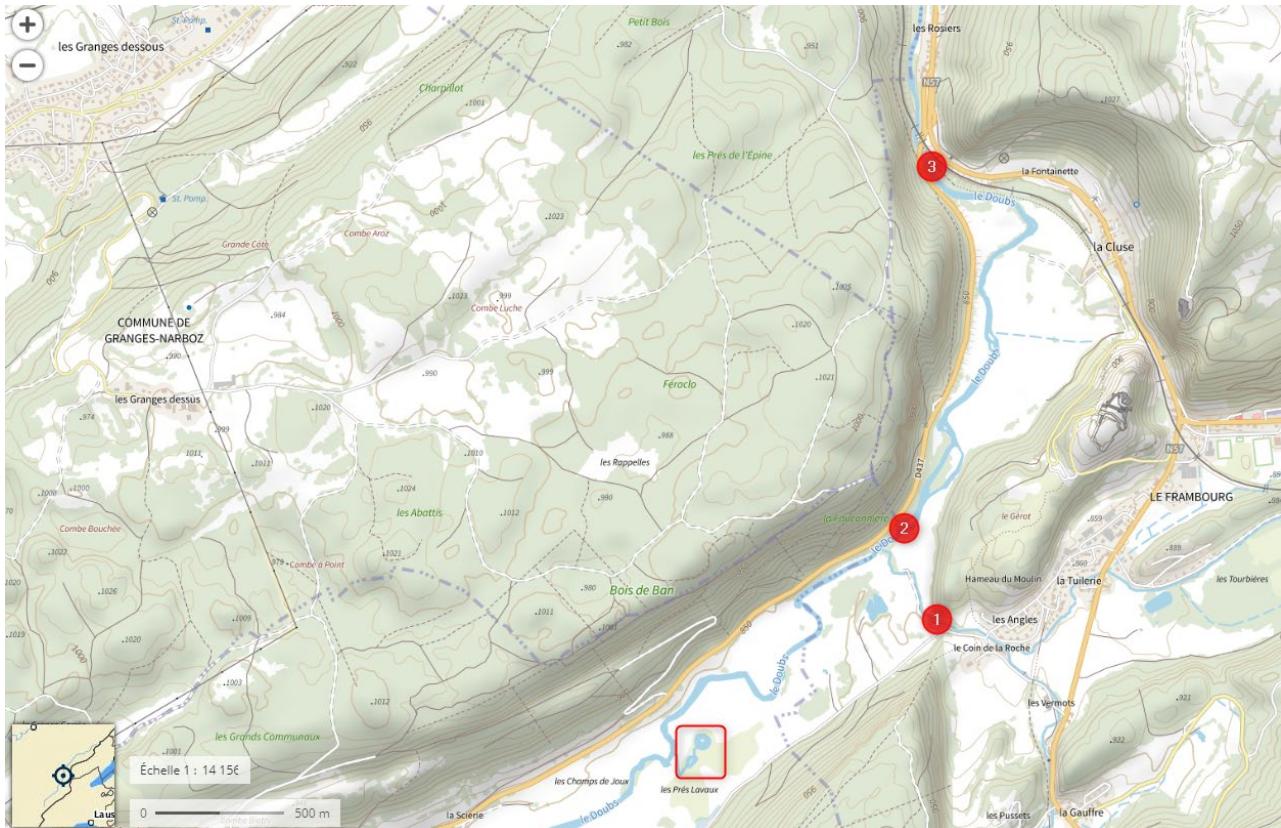


Figure 33. Localisation des zones de pertes sur le tronçon entre Oye-et-Pallet et le resserrement de la cluse entre la Fontanette et les Rosiers (1 : en aval des Angles, 2 : sous la D437 et 3 : à l'entrée de la cluse). Les marais des Prés Lavaux, supposés être des émergences des aquifères karstiques du Crétacé sont mis en évidence.

D'après la littérature, les pertes entre Oye-et-Pallet et Pontarlier sont en moyenne de 300 L/s (Colin et al., 1995) pourraient atteindre 2 m³/s au maximum. Elles ne semblent toutefois pas augmenter au-delà d'un débit de 10 m³/s mesuré pour le Doubs à La Cluse et Mijoux.

Les débits du cours d'eau sont mesurés à l'entrée de la cluse (→ Station Doubs à la Cluse-et-Mijoux, Pontarlier amont [[U202 2010 01](#)]). Le débit moyen est de **7.72 m³/s**, soit un gain strict de **+1.44 m³/s** par rapport à la station d'Oye-et-Pallet en amont, ou **+1.54 m³/s** en considérant les pertes (100 L/s). L'apport des sources Martin et Fontaine Ronde contribuent pour 0.6 m³/s et les alimentations apportées par le cours de la Morte peuvent être estimées à 50 L/s (Cabinet Reilé, 2009)²¹, soit un total de 0.65 m³/s environ. Les 900 L/s restant sont donc apportés par le ruisseau du Saut (estimé autour de 500 L/s) et les diverses sources crétacées émergeant en chapelet entre Oye-et-Pallet la Cluse et Mijoux.

²⁰ Traçages DREAL BFC n° D1005 et D823.

²¹ Le rapport de 2009 indique un débit de 10 L/s en conditions de basses eaux. Par extrapolation, un débit moyen de l'ordre de 50 L/s - au minimum - peut être suggéré.

7.3. La Cluse et Mijoux → confluence Drugeon [843 - 800 m]

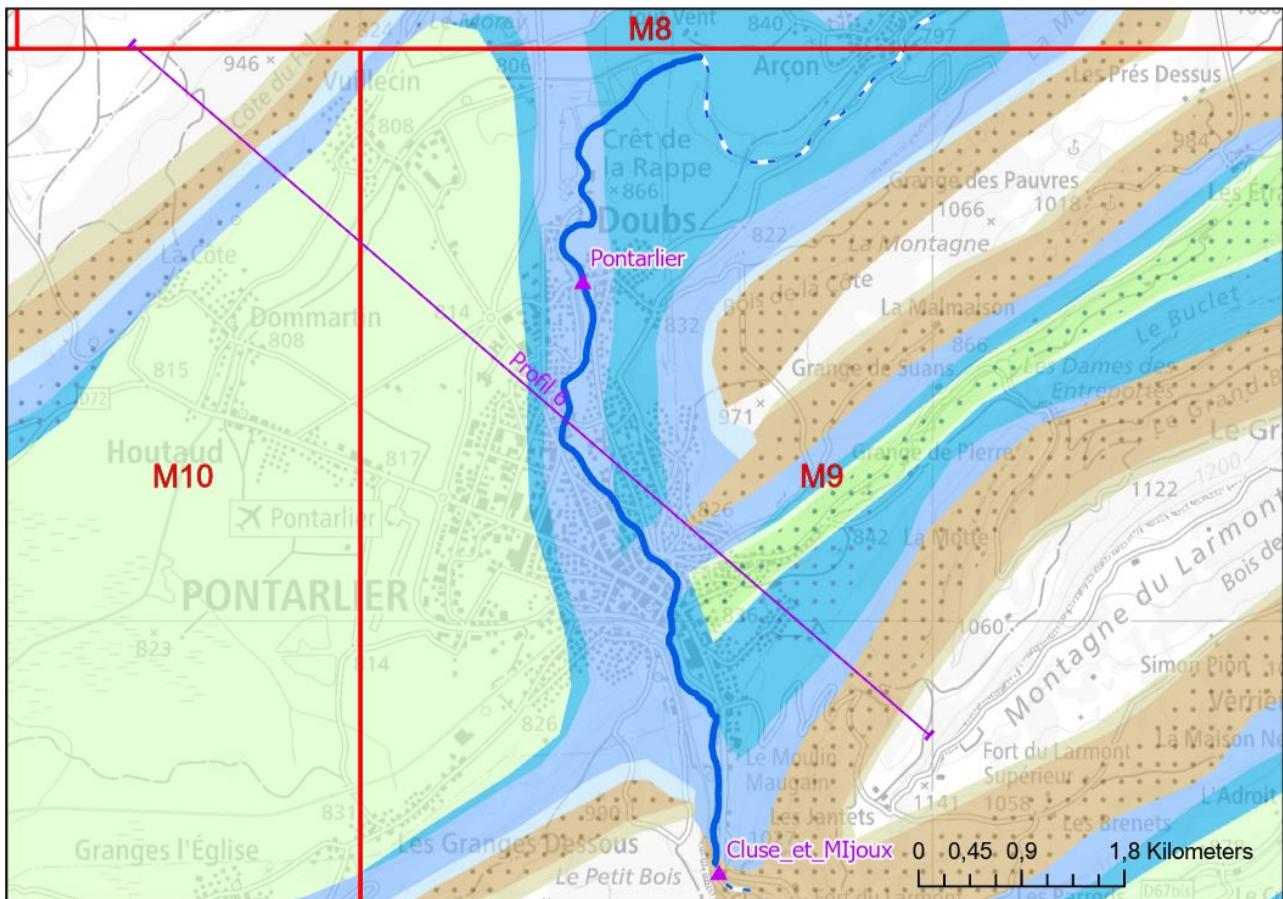


Figure 34. Aperçu du tronçon La Cluse et Mijoux → confluence Drugeon

Se reporter aux documents suivants pour la compréhension du §. 7.3 :

- Annexe E :
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M9_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M8_25K_.pdf
- Annexe F : Doubs ; profil hydrogéologique longitudinal
- Annexe G : Doubs ; profils hydrogéologiques transversaux
 - o PROFIL TRANS 6

Le tronçon entre la Cluse et l'entrée dans le bourg de Pontarlier est un tronçon infiltrant. Les pertes sont diffuses, et certaines concentrées (pertes de l'usine Vandel Aîné et Cie²², etc.). Les pertes en étiage entre Cluse et la station Doubs sont de l'ordre de quelques dizaines de litres par seconde. Elles pourraient s'élever à 2 m³/s en conditions de hautes eaux (rapport Artelia, 2023, fig. 8)²³. Le rapport de la DIREN (Colin et al., 1995) fait aussi mention de pertes de l'ordre de 1 m³/s entre Pontarlier centre et le village de Doubs – bien en amont d'Arçon. Par ailleurs, ils confirment que le débit des pertes reste toujours inférieur à 3 m³/s (même en période de hautes eaux).

²² Localisation des pertes Vandel Aîné et Cie : 955686 / 6649582 (EPSG 2154) et 2517784 / 1194625 (EPSG 2056), alt. ~829 m.

²³ Colin et al. (1995) font état de pertes de plus de 300 L/s entre la sortie du lac de Saint-Point et Pontarlier (sans compter l'apport du ruisseau de Fontaine Ronde). Les pertes sur ce tronçon ne sont donc pas négligeables.

A l'entrée de Pontarlier, en rive droite, le Doubs recueille la contribution du ruisseau des Lavaux (alt. 825 m environ). Celui-ci est alimenté par les ruissellements de surface et les sources issues de l'aquifère du Crétacé inf. (nappe [FNK045](#)). La nappe alimente vraisemblablement des petites sources le long du Lavaux. Elle alimente probablement (par débordement ou par drainance) les nappes des aquifères sous-jacents : [FNK051](#) (Jurassique sup.) et [FNK061](#) (Jurassique moy.). Ces deux dernières nappes sont aussi certainement alimentées par des infiltrations du ruisseau des Entreportes au niveau de la cluse des « Dames d'Entreportes ».

Entre Pontarlier et la confluence avec le Drugeon, le Doubs circule sur des dépôts quaternaires. Des pertes sur ce tronçon semblent moins envisageables, mais elles ne doivent toutefois pas être exclues. A l'inverse, sur ce tronçon, le Doubs draine certainement les nappes superficielles des formations quaternaires de la Plaine de Pontarlier²⁴. Les débits sont mesurés à la station de Pontarlier (→ Station Doubs à Doubs [[U202 2020 01](#)]).

Sous la plaine de Pontarlier, trois nappes karstiques peuvent être individualisées : la nappe de l'aquifère du Crétacé inf. ([FNK044](#)), du Jurassique sup. ([FNK042](#)) et Jurassique moy. ([FNK063](#)). → cf. [PROFIL TRANS 6](#).

Sur ce tronçon, le gain de débit est négatif par rapport à la station amont de la Cluse et Mijoux : $7.69 - 7.72 = -0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ (cf. Tableau en Annexe C), et ce malgré l'apport du ruisseau des Lavaux (vallée des Allié) dont on ne connaît malheureusement pas les débits²⁵ et l'apport des nappes quaternaires. Les pertes sur ce tronçon sont donc importantes, et elles ne sont à priori pas compensées par les apports...

²⁴ Cf. piézomètre BSS001MCYE entre Houtaud et Pontarlier. Les niveaux mesurés dans la nappe des formations de sable et gravier quaternaires qui accompagnent le cours du Drugeon oscillent entre 806 et 810 m.

²⁵ D'après les informations du SDAGE, le ruisseau des Lavaux est pratiquement à sec à l'étiage.

7.4. Confluence Drugeon → Ville du Pont [800 - 775 m]

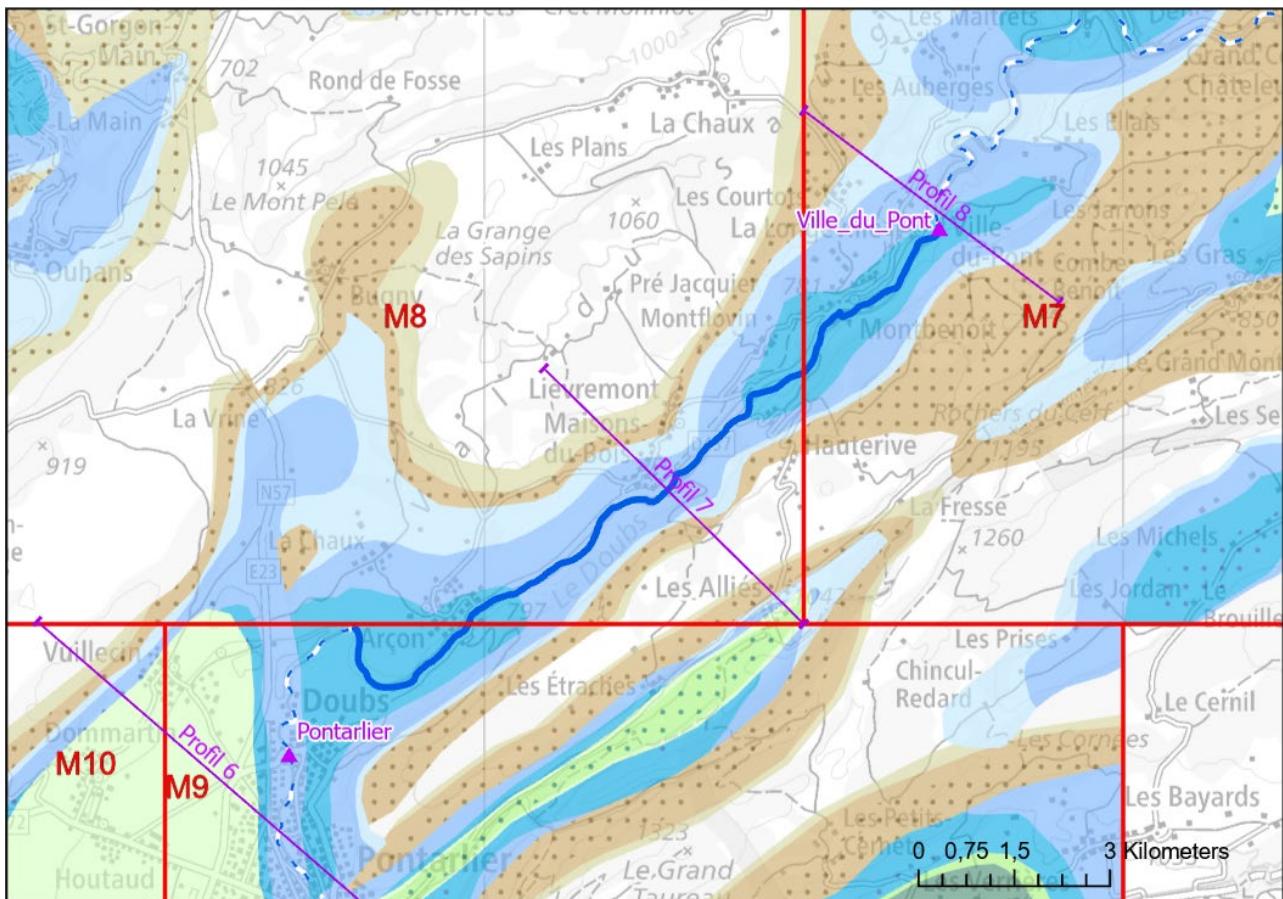


Figure 35. Aperçu du tronçon Confluence Drugeon → Ville du Pont

Se reporter aux documents suivants pour la compréhension du §. 7.4 :

- Annexe E :
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M10_25K_.pdf (pour le Drugeon)
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M9_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M8_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M7_25K_.pdf
- Annexe F : Doubs ; profil hydrogéologique longitudinal
- Annexe G : Doubs ; profils hydrogéologiques transversaux
 - o PROFIL TRANS 7
 - o PROFIL TRANS 8

Au niveau de la confluence, le Doubs reçoit la rivière Drugeon. Cette dernière prend sa source dans les tourbières de [Vaux-et-Chantegrue](#) (voir carte hydrogéologique M10). Ces tourbières sont principalement alimentées par débordement de l'aquifère du Crétacé inf. (nappe [FNK046](#)) et d'autres nappes, plus petites et non documentées. Le niveau de base vers Vaux-et-Chantegrue se situe autour de 860 m d'altitude. En aval du village, le Drugeon est aussi alimenté par un certain nombre de sources émergeant de l'aquifère du Jurassique sup (nappe [FNK020](#)), notamment les sources [Martinet](#) et [Combe Levier](#). Le lit du Drugeon est donc globalement exfiltrant sur ce tronçon. Au sud-est, la limite avec la nappe [FNK053](#) reste incertaine. La ligne de partage est vraisemblablement alignée sur le rétro-chevauchement de #RETRO_CHARGEBIN (cf. Figure 8).

Au nord-est de Vaux-et-Chantegrue, à hauteur du lieu-dit « Saint-Cyr », la nappe [FNK020](#) se déverse par-dessus l'anticlinal et alimente la nappe [FNK042](#) (Jurassique sup.). Sur ce tronçon de 3 km entre Saint-Cyr et Bonnevaux, le Drugeon est infiltrant. Les pertes sont estimées à 100 L/s en moyenne vers Bonnevaux. Les écoulements sont dirigés vers la [source de l'Ain](#), située 15 km plus au sud-est. A la station de [Vuillecin](#) [[U203 5020 03](#)], au nord de Pontarlier, les pertes cumulées du Drugeon atteignent en moyenne 200 L/s mais d'autres rapports font état de pertes atteignant presque 1 m³/s sur le seul secteur de Bonnevaux (CLE, 2015). Il s'agit surtout des écoulements perdus en aval direct de Bonnevaux, particulièrement dans « [l'Entonnoir](#) ». Outre les ruissements directs et les apports des nappes des formations quaternaires, le tronçon qui traverse le plateau de Frasne est certainement aussi alimenté par le débordement de l'aquifère du Crétacé inf. (nappe [FNK044](#)), alors qu'en profondeur, les écoulements des nappes du Jurassique sup. ([FNK042](#)) et moy. ([FNK063](#)) pourraient en théorie être partiellement drainées vers la [source de l'Ain](#).

Entre la confluence avec le Drugeon et Arçon (carte hydrogéologique M9), le Doubs circule sur les formations quaternaires qui recouvrent des lambeaux de formations marno-calcaires du Crétacé. Les infiltrations sur ce tronçon sont à priori assez faibles. Les débits du Doubs ont été mesurés à Arçon entre 1982 et 1985 (→ station Doubs à Arçon [[U210 2020 01](#)]) mais la station ne semble plus opérationnelle. Les débits sont donc donnés à titre indicatif – ils peuvent difficilement être comparés avec les stations actuellement en service.

Sur le tronçon entre Arçon et Maison du Bois (carte hydrogéologique M8), le lit du Doubs est infiltrant sur les formations calcaires du Jurassique sup. Les infiltrations alimentent la nappe [FNK041](#) (alt. 755 m) et sont drainés vers la [source de la Loue](#) (Figure 38). La nappe sous-jacente de l'aquifère du Jurassique moy. ([FNK048](#)) est vraisemblablement drainée aussi en direction de la [source de la Loue](#). → cf. [PROFIL TRANS 7](#).

Les écoulements des nappes [FNK041](#) et [FNK048](#) sont dirigés vers la [source de la Loue](#) via le seuil de débordement identifié Figure 36. Le modèle géologique montre en effet que le point de fuite de l'aquifère du Jurassique sup. se produit quelque part le long du décrochement de Pontarlier – entre Doubs et la Vrine. Les écoulements passent vraisemblablement du compartiment du Jurassique sup. ([FNK041](#)) vers celui du Jurassique moy. ([FNK048](#)) et traversent l'anticlinal du Mont Pelé dans le prolongement du couloir de déformation (compartiment ouest) en « débordant » par-dessus les formations des marnes de l'Aalénien. En effet, un seuil vers 775 m est identifié dans le modèle géologique (cf. Figure 36), ce qui – aux incertitudes près – peut être assimilé au seuil recherché à l'altitude de 755 m.

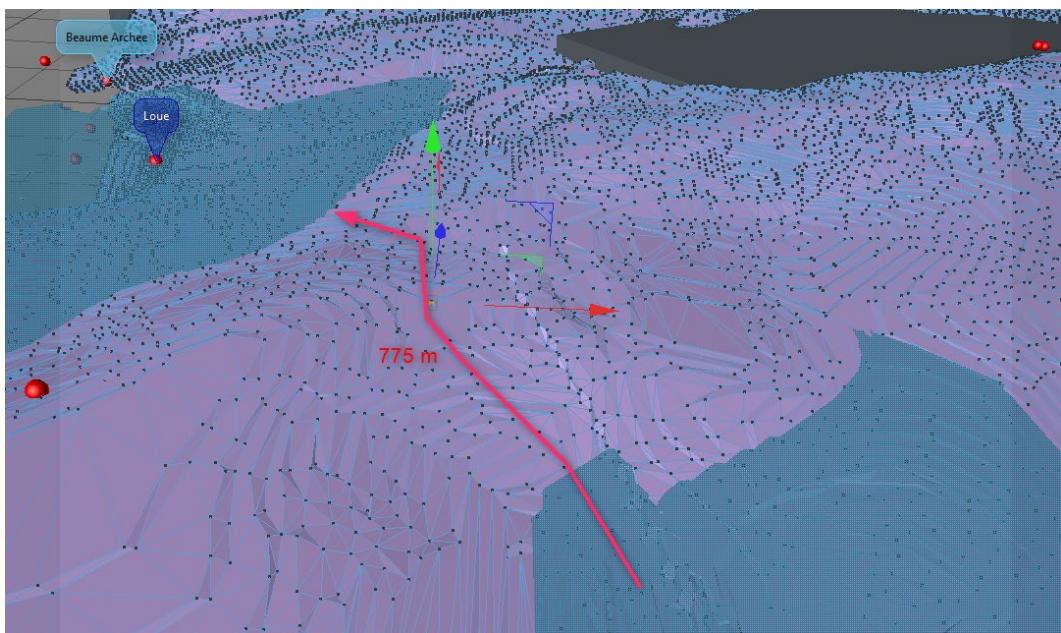


Figure 36. Aperçu 3D de la géométrie du toit des marnes de l'Aalénien (couche violette) le long de l'anticlinal du Mont Pelé. A cet endroit, le décrochement de Pontarlier conduit à une remontée du bloc est, laissant apparaître le couloir dans le bloc ouest avec un seuil de débordement situé vers 775 m – marqué par la flèche rouge. Aux incertitudes près du modèle géologique – cette cote est tout à fait cohérente avec l'hypothèse d'un débordement vers 755 m qui draine la nappe d'eau souterraine karstique d'Arçon (FNK041) vers la source de la Loue. Un aperçu en coupe projeté est présenté en Figure 37.

Cette hypothèse reprend les interprétations faites par (Chauve et al., 1995; Metetal and Mudry, 1996) qui identifient le couloir mais supposent un débordement par-dessus les marnes argoviennes. Or le point bas au toit des marnes argoviennes est situé à 845 m d'altitude – ce qui n'est pas compatible avec les niveaux d'eau supposés sous le lit du Doubs entre Pontarlier et [Maison du Bois](#). Il est donc nécessaire d'envisager un passage dans l'aquifère du Jurassique moy. ([FNK048](#)), pour permettre aux eaux de fuite alimenter la nappe du Jurassique sup. ([FNK021](#)) avant d'être évacuées par la [source de la Loue](#) qui fixe le niveau de base vers 535 m d'altitude. Le schéma hydrogéologique suivant (Figure 37) donne un aperçu de l'organisation des écoulements depuis les zones de pertes du Doubs en aval de Pontarlier et la [source de la Loue](#).

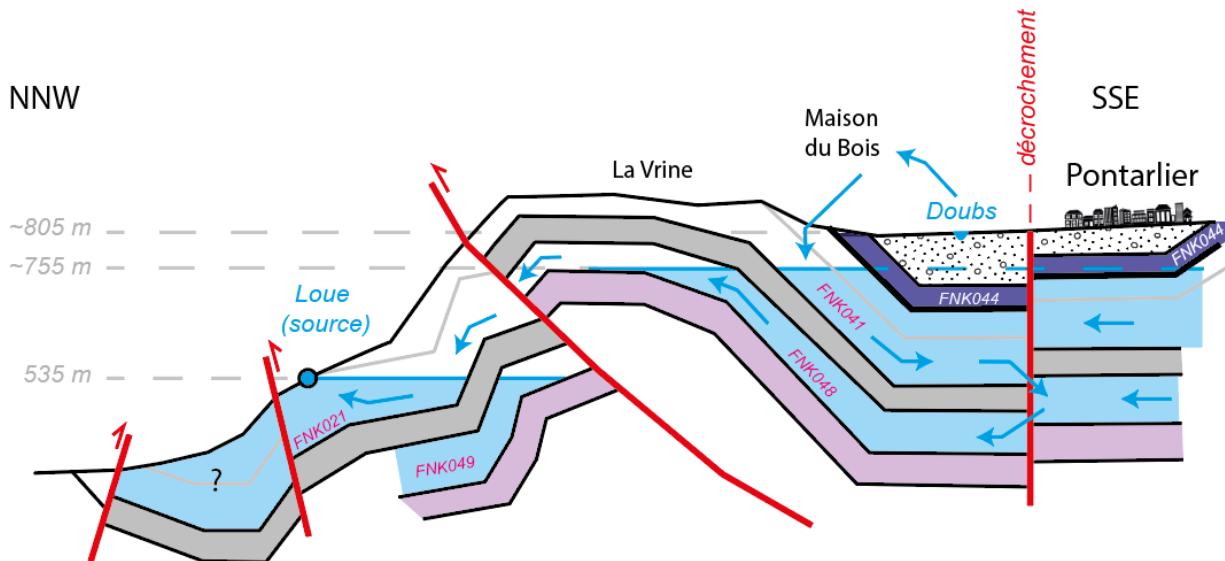


Figure 37. Organisation supposée des écoulements entre les pertes du Doubs en aval de Pontarlier (secteur « [Maison du Bois](#) ») et la Loue. Le fonctionnement de la zone de pertes à [Maison du Bois](#) est illustré en Figure 38. Relevons qu'il s'agit ici d'une simplification schématique en deux dimensions synthétisant des écoulements qui se produisent en réalité en trois dimensions. Il ne s'agit en aucun cas d'un profil géologique ou hydrogéologique réel.

En aval de la [source de la Loue](#), le profil altimétrique du cours d'eau présente une pente très forte et un profil majoritairement en incision, signe que le cours d'eau peut en théorie se réinfiltrer et alimenter la nappe [FNK022](#) (Jurassique sup.), drainée par la [source du Pontet](#) vers 420 m d'altitude. La nappe [FNK022](#) est aussi alimentée par le secteur [d'Arc-sous-Cicon](#), situé 8 km à l'est de la source du Pontet. Les infiltrations dans le bassin d'Arc-sous-Cicon alimentent en effet une nappe perchée de l'aquifère du Jurassique sup. ([FNK023](#)) qui alimente la nappe du Pontet ([FNK022](#)) par déversement au niveau d'un seuil identifié vers 735 m d'altitude. Directement sous Arc-sous-Cicon, une nappe est aussi identifiée dans l'aquifère du Crétacé inf. ([FNK047](#)) à la cote libre de 820 m. Les écoulements de cette nappe « superficielle » s'infiltrent dans les calcaires du Jurassique sup. et alimentent la nappe [FNK023](#). Une troisième nappe ([FNK068](#)) est supposée se développer dans les calcaires du Jurassique moy. Elle « déborde » à l'ouest, via un seuil supposé à l'altitude de 450 m environ.

Plus en aval le long de la Loue (hors périmètre d'étude), à hauteur de Mouthier H^{te} Pierre, le niveau de base de la Loue est fixé vers 390 m sur la base des sources et siphons de la Baume Archée, baume du Rocher et Tuyau de Poële. Plus en aval encore, à hauteur de Lods, le niveau de base est fixé par l'émergence du Gouron qui sourd dans le lit de la Loue, entre Lods et Mouthier à l'altitude de 369 m. D'autres émergences à des altitudes comparables jalonnent la Loue sur cette section (résurgence du Bief Poutot, résurgence de la Grande Beaume, etc.). Ces sources n'ont toutefois pas fait l'objet d'une documentation spécifique car hors emprise, en revanche les seuils avaient déjà été identifiés par le passé et attribués à des niveaux de sources karstiques (Rabin et al., 2015).

Sur ce tronçon entre Arçon et Maison du Bois (alt. 790 m), les pertes du Doubs ont été évaluées dans les années 1990²⁶ entre 2 et 2.5 m³/s, sans jamais excéder 3 m³/s (Chauve et al., 1986; Metetal and Mudry, 1996)²⁷. A partir d'un débit de 20 m³/s pour le Doubs mesuré à la confluence Doubs-Drugeon, il semblerait que les pertes n'augmentent plus significativement.

En conditions de basses à très basses eaux, les pertes conduisent à l'assèchement du Doubs qui peut atteindre une distance de 8 km en aval de Maison du Bois²⁸.

Entre Maison du Bois et [Ville du Pont](#), le Doubs circule alternativement sur les formations calcaires du Crétacé inf. ou du Jurassique sup. Le tronçon est infiltrant et les eaux infiltrées alimentent l'aquifère du Jurassique sup. (nappe [FNK024](#)) et sont drainées en direction des sources du défilé d'Entreroches : [sources de la Colombière](#), [du Pont du Diable](#) et de [Remonot](#) (Figure 38). → cf. [PROFIL TRANS 08](#).

Les débits du Doubs sont mesurés à Ville-du-Pont (→ Station Doubs à Ville-du-Pont [[U210 2010](#)]). Sur ce tronçon, le gain de débit est de **+2.55 m³/s** par rapport à la station précédente de Doubs (cf. Tableau en Annexe C). Ce gain est faible en comparaison avec les apports du Drugeon sur cette section (**+3.21 m³/s**). Les pertes moyennes sont donc de l'ordre de **0.66 m³/s** au minimum.

A noter que lorsque le débit du Doubs est de 1.8 m³/s à la station d'Oye-et-Pallet [[U201 2020](#)], 100 à 150 L/s sont encore mesurés à Ville du Pont.

En conditions de hautes eaux, la nappe [FNK024](#) est supposée se mettre en charge jusqu'à l'altitude de 780 m - minimum - comme en atteste l'activation de la source perchée et temporaire de la [Corchère](#) (GIPEK, 2004). Les mises en charge enregistrées dans le piézomètre du Gros Foyard, situé pratiquement dans le lit du cours d'eau à l'altitude de 790 m remontent jusqu'en surface. A ce stade et au vu des courbes de mise en charge, il semblerait que ces mises en charge soient davantage liées à une limite des capacités d'infiltration localement plutôt qu'à une remontée de la nappe [FNK024](#), mais cet aspect doit encore être évalué.

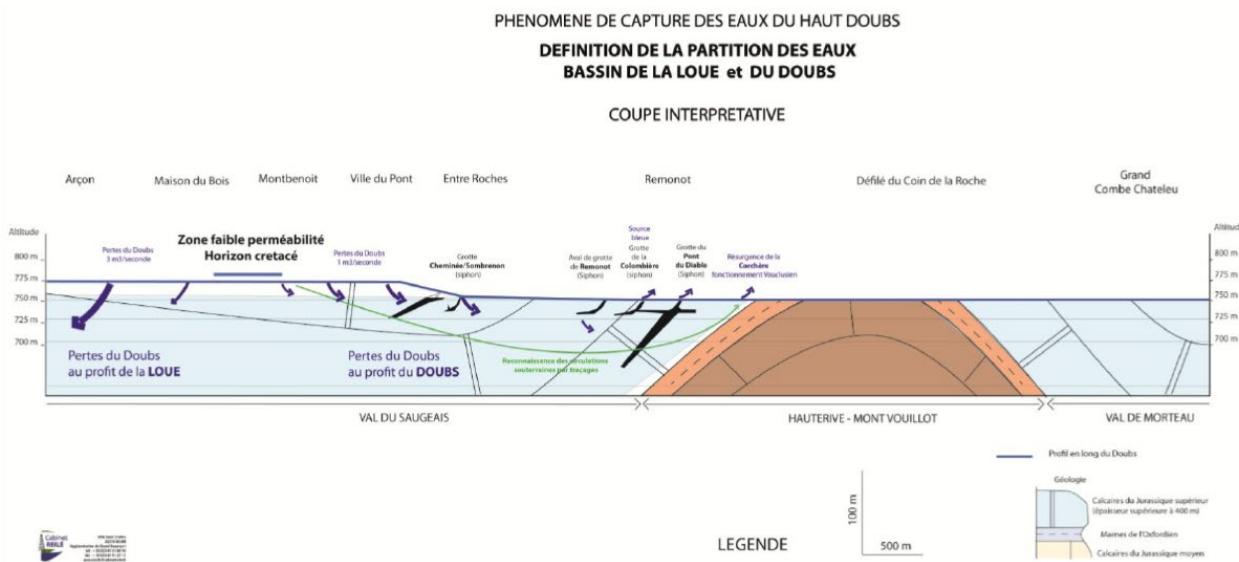


Figure 38. *Principes du phénomène de capture des eaux au niveau des zones de pertes de Maison du Bois (Cabinet Reilé, 2018). Les pertes alimentent la nappe FNK041 dont les écoulements sont dirigés vers la nappe du Jurassique moy. (FNK048) à travers la mise en contact des compartiments aquifères par le décrochement de Pontarlier. Les écoulements sont ensuite dirigés vers le seuil qui se développe sous la Vrine et alimentent la nappe FNK021, elle-même drainée par la source de la Loue (Figure 37).*

²⁶ A L'exception du rapport LGSA (Chauve et al., 1995) qui propose une interprétation hydrogéologique des écoulements vers la Loue, la plupart des études (SMESD, 1995, 1994) se cantonne à l'identification et l'explication des zones de pertes.

²⁷ Les auteurs mentionnent qu'un tiers du débit d'étiage de la source de la Loue est apporté par les pertes du Doubs.

²⁸ Il semblerait que depuis 1994, le régime des pertes change et tend à diminuer jusqu'en 2016 (pertes quasi totales avant 1993). A partir de 2017 les pertes redeviennent presque totales. Un évènement hydrologique a certainement conduit à une modification du régime des pertes entre 2016-2017 (décolmatage, etc.).

7.5. Ville du Pont → Côte Brune (aval du défilé d'Entreroches) [775 - 753 m]

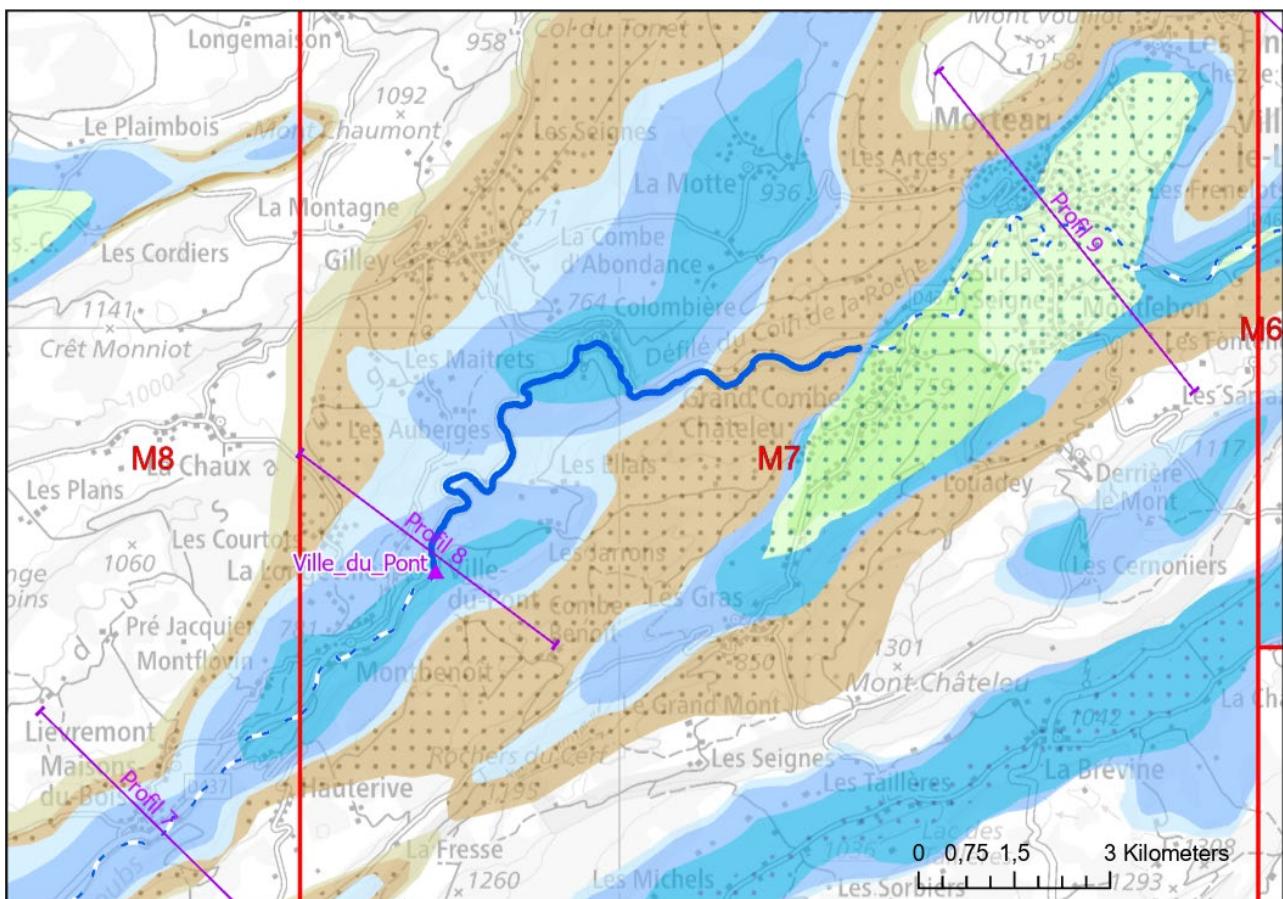


Figure 39. Aperçu du tronçon Ville du Pont → Côte Brune (aval défilé d'Entreroches)

Se reporter aux documents suivants pour la compréhension du §. 7.5 :

- Annexe E :
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M7_25K_.pdf
 - Annexe F : Doubs ; profil hydrogéologique longitudinal
 - Annexe G : Doubs ; profils hydrogéologiques transversaux
 - o PROFIL TRANS 8

En aval de Ville du Pont (alt. 775 m), le Doubs circule de nouveau sur les calcaires du Jurassique sup. → cf. **PROFIL TRANS 08**. Le cours d'eau est infiltrant jusqu'en aval de la [Colombière](#), où commence la zone d'émergence des sources pérennes de [la Colombière](#) et [du Pont du Diable](#) et des sources temporaires de [Remonot](#) et de [la Corchère](#)²⁹ (alt. 754-755 m) – section à partir de laquelle le Doubs n'est jamais à sec. Ces sources sont alimentées par la nappe de l'aquifère du Jurassique sup. du plateau de Gilley ([FNK024](#)), à l'exception de la source de [la Corchère](#) dont une partie de l'alimentation peut être apportée par la nappe de l'aquifère du Jurassique moy. ([FNK048](#)). Ces sources restituent les eaux infiltrées entre Ville du Pont et [Colombière](#).

En aval de la source de la Corchère, le Doubs incise les formations du Jurassique moy. qui forment le cœur anticlinal de Hauterive – Mont Vouillot (Figure 38). A cet endroit, la nappe des calcaires du Jurassique moy. (FNK048) est à priori libre et peut contribuer à alimenter ou drainer le cours d'eau selon les niveaux

²⁹ Source « inférieure » de la Corchère

hydrologiques. La nappe [FNK048](#) redevient captive peu avant le resserrement de Côte Brune (entrée dans le Val de Morteau).

Sur cette section, les débits du Doubs ne sont pas mesurés en aval de Ville-du-Pont. Les incertitudes sont donc assez élevées concernant les apports des eaux souterraines via les différentes sources mentionnées.

7.6. Côte Brune (aval défilé d'Entreroches) → aval lac Brenets / Chaillexon [753 – 751 m]

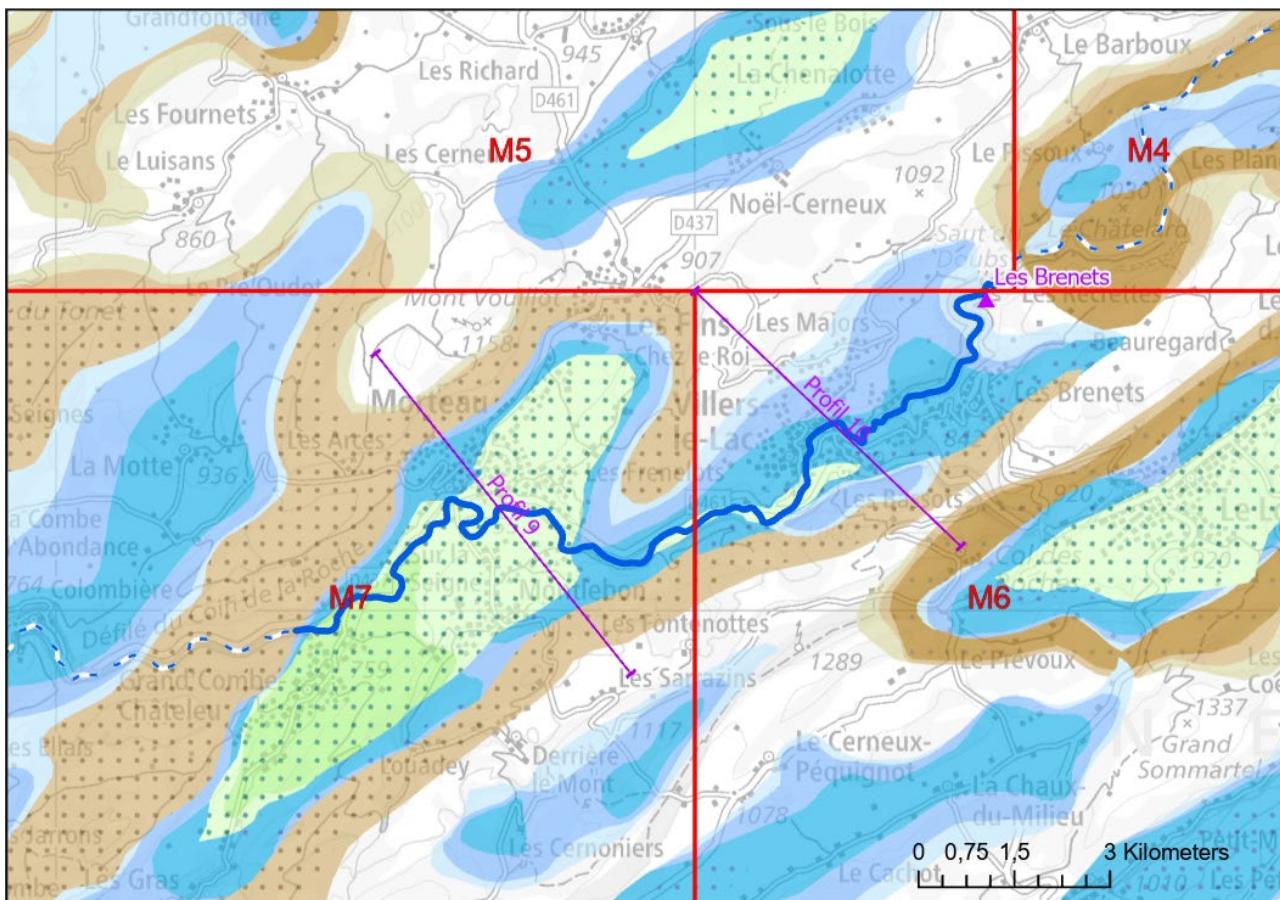


Figure 40. Aperçu du tronçon Côte Brune (aval défilé d'Entreroches) → aval lac Brenets / Chaillexon

Se reporter aux documents suivants pour la compréhension du §. 0 :

- Annexe E :
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M7_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M6_25K_.pdf
- Annexe F : Doubs ; profil hydrogéologique longitudinal
- Annexe G : Doubs ; profils hydrogéologiques transversaux
 - o PROFIL TRANS 9
 - o PROFIL TRANS 10

Au passage de Côte Brune (alt. 753 m), le Doubs incise de nouveau les formations calcaires du Jurassique sup., sur quelques centaines de mètres avant d'entrer dans le Val de Morteau. Sur cette section, le cours d'eau est à priori exfiltrant, alimenté par la nappe [FNK036](#), via la [source inférieure du Moulinot](#) (alt. 753 m). Les sources notées de « Côte Brune » et du « Pré des Araignées » ne sont pas documentées.

En aval, le Doubs reçoit l'alimentation de quelques affluents en rive droite, dont celui du Chataignat, qui tire une partie de son alimentation des [sources de Derrière le Mont](#), elle-même alimentées par un aquifère perché dans les formations calcaires du Jurassique sup. (nappe [FNK006](#)). Les débits du Chataignat ne sont pas mesurés.

Le Doubs traverse ensuite la zone urbaine de Morteau, où il circule à la fois sur les dépôts quaternaires et les formations du Crétacé. Le cours d'eau reçoit certainement les contributions des nappes quaternaires et Crétacé ([FNK035](#)). → cf. [PROFIL TRANS 9](#).

En aval de la zone urbaine de Morteau, le Doubs traverse le champ captant de **Moulin Bournez** et les zones sourcières de **Malcombe**. Cette section est exfiltrante (nappe [FNK036](#)). Le cours d'eau circule ensuite sur les formations marno-calcaires Crétacé avant d'entrer dans le lac des Brenets / Chaillexon. Sur cette section, le Doubs reste exfiltrant, et est alimenté par la nappe [FNK007](#), qui est la continuité de la nappe [FNK036](#), mais aussi par les petites nappes du Crétacé inf. ([FNK055](#)). Il reçoit aussi la contribution de la **source de l'Abri sous Roche**, en rive gauche. → cf. **PROFIL TRANS 10**.

Dans le lac des Brenets / Chaillexon, le niveau de base est imposé par le verrou rocheux en amont du Saut du Doubs (751 m). Ce niveau de base est relatif, dans le sens où le verrou présente des fuites qui conduisent à une vidange partielle du lac en étiage. Le verrou à 751 m fixe donc un niveau de base hydraulique pour une durée d'environ 200 jours par an. A l'étiage, le niveau du lac atteint peut descendre à 737 m, fixant ainsi un niveau de base 14 m plus bas (nappe [FNK007](#)).

La section amont du lac est exfiltrante et reçoit l'alimentation des sources sous lacustres : principalement la **source de l'Arvoux**, mais aussi d'autres sources secondaires (GIPEK, 2004; ISSKA, 2023c). Cette section s'étend jusqu'à la grotte de la Toffière. La section aval du lac est principalement infiltrante. Les infiltrations s'opèrent à travers les calcaires du Jurassique sup. qui bordent la rive et rejoignent le cours du Doubs en aval du saut. En conditions de hautes eaux, la source temporaire de la Toffière marque la hauteur d'eau dans l'aquifère du Jurassique sup. (nappe [FNK007](#)).

La **source de l'Arvoux** tirait et tire encore une partie significative de son alimentation depuis le bassin du Locle. En effet, les eaux des aquifères Crétacé (nappe [MNK225](#)) et d'une partie des aquifères sous-jacent du Jurassique sup. (nappe [MNK034](#)) et moy. ([MNK226](#)). Il est assez certain que l'alimentation des aquifères du Jurassique sup. et moy. a diminué au cours du XX^{ème} siècle en raison de la déviation des eaux du Bief du Locle. Celui-ci alimentait en effet la perte des Moulins Souterrains du Col-des-Roches (Jeannin and Wenger, 2013). Le débit alimentant la perte pouvait alors atteindre 2 à 5 m³/s. Il est aujourd'hui dévié dans la conduite de la Rançonnière qui déverse les eaux dans le cours d'eau du même nom qui se jette directement dans le lac des Brenets / Chaillexon. Il est donc probable que le régime des sources sous-lacustres ait significativement diminué depuis cette époque.

Les débits du Doubs sont mesurés à la sortie du lac des Brenets (→ Station Doubs - Sortie du lac des Brenets [\[2247\]](#)). Les débits moyens à cette station sont de l'ordre de **18.21 m³/s**. Ils sont légèrement sous-estimés en raison des sous-écoulements (pertes dans le lac) qui by-passent la station de mesure. Les pertes dans le lac sont de l'ordre de ~500 L/s mais peuvent être probablement plus élevées en conditions de hautes eaux (ISSKA, 2023c).

Le gain sur ce tronçon et le précédent (§. 7.5) est donc au minimum de **+7.97 m³/s** (**+/- 0.5 m³/s**), principalement grâce aux contributions (i) des sources du défilé d'Entreroches, (ii) des sources et des cours d'eau du Val de Morteau (Théverot et Chataignat) et (iii) des sources sous-lacustres (notamment **la source de l'Arvoux**). En l'absence de mesures de débits aux sources et aux cours d'eau, il est impossible de discréteriser plus précisément le gain de débit sur ce tronçon.

7.7. Aval lac Brenets / Chaillexon → barrage du Refrain [751 – 610 m]

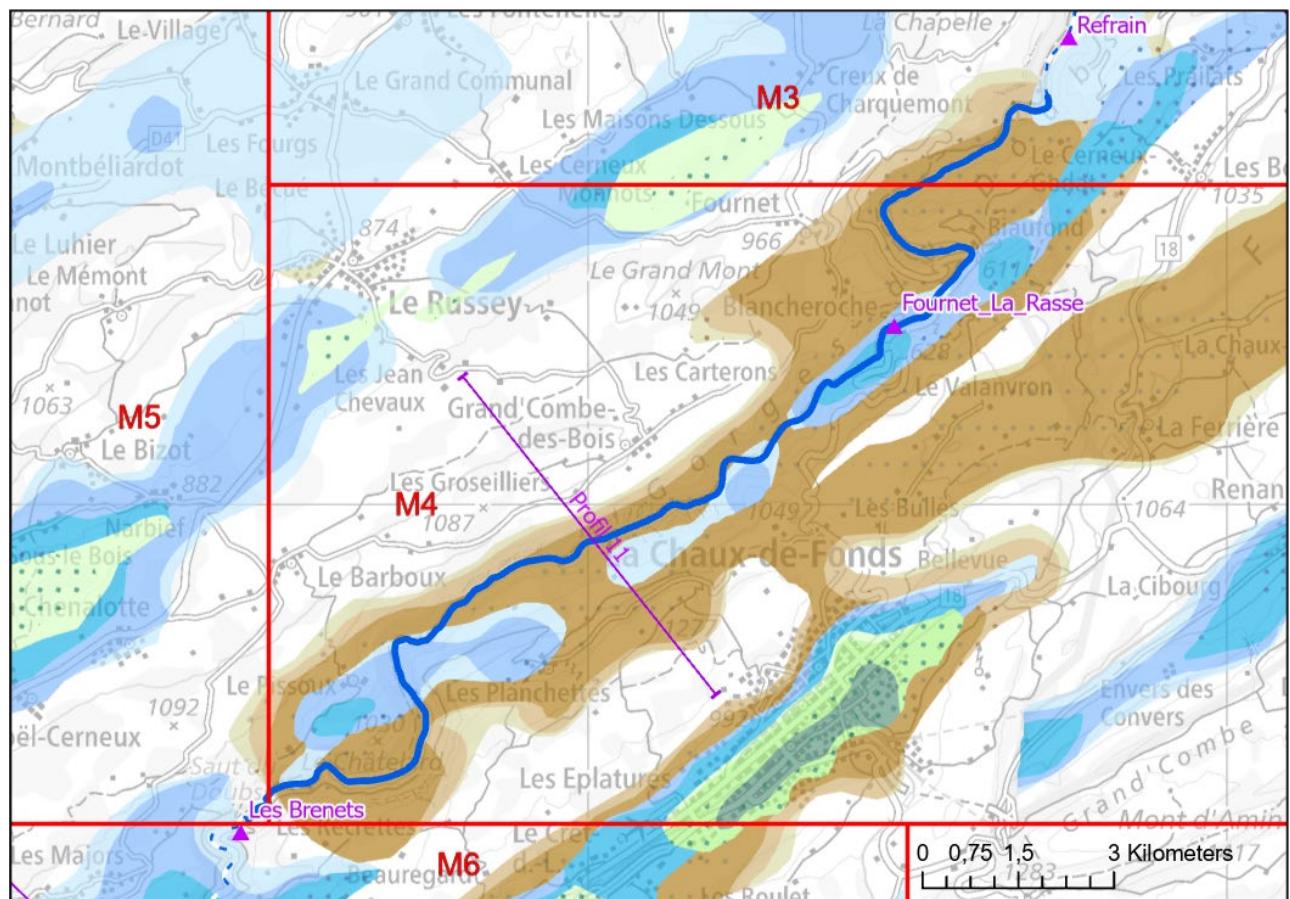


Figure 41. Aperçu du tronçon Aval lac Brenets / Chaillexon → barrage du Refrain

Se reporter aux documents suivants pour la compréhension du §. 7.7 :

- Annexe E :
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M5_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M4_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M3_25K_.pdf
- Annexe F : Doubs ; profil hydrogéologique longitudinal
- Annexe G : Doubs ; profils hydrogéologiques transversaux
 - o PROFIL TRANS 11

⚠ Il est important de noter que dans ce secteur, le détail de la compréhension des différentes nappes et de leurs interactions est très complexe. Seul le modèle 3D permet de visualiser correctement la structuration des aquifères et l'organisation des écoulements. Les cartes hydrogéologiques 1/25'000 et le PROFIL TRANS 11 donnent un aperçu schématique.

Directement en aval du lac des Brenets / Chaillexon, le Doubs, lorsqu'il coule, circule sur les formations calcaires glissées qui ont barré la vallée, formé le lac et le [Saut du Doubs](#) (cf. §. 9.1.1). Dans le détail, le saut s'est formé suite à deux glissements successifs des parois calcaires dominant le cours du Doubs à cet endroit (Buxtorf, 1922). La Figure 42 illustre la chronologie supposée de la mise en place du Saut du Doubs.

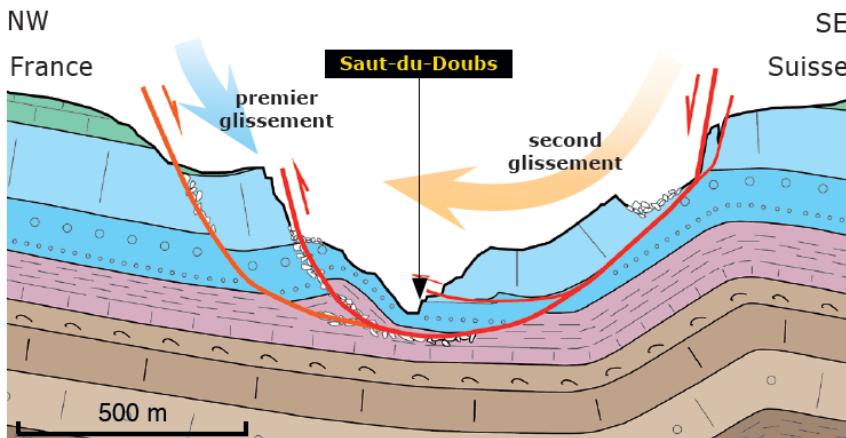


Figure 42. Profil géologique transversal supposé au niveau du Saut du Doubs présentant les deux phases de glissement qui ont formé le verrou actuel à l'altitude de 751 m au débouché du lac des Brenets (ISSKA, 2017).

Sur cette section, le cours d'eau est infiltrant. Les eaux infiltrées s'ajoutent à celles du lac et ressortent pour la plupart au pied du saut, où le cours d'eau rejoint le [lac de Moron](#). Ce lac artificiel se développe au sommet d'une structure anticlinale (l'anticinal des Planchettes) dont le cœur est majoritairement formée par les marnes argoviennes qui laissent place par endroit aux calcaires sous-jacents du Bathonien (Burger and Persoz, 1983). Le niveau d'eau du lac est maintenu par le barrage du Châtelot à 716 m en conditions de moyennes à hautes eaux. En étiage, le niveau d'eau descend jusqu'à la côte 696.5 m. Sur ce tronçon, les conditions hydrogéologiques naturelles ont été largement modifiées : (i) en raison de l'éboulement du saut du Doubs et (ii) par la construction du barrage du Châtelot.

Sur ce tronçon, le Doubs reçoit l'alimentation de plusieurs sources, qui ne sont autres que des venues d'eau liées aux pertes du lac des Brenets / Chaillexon en amont (Hapka et al., 2018), la plus significative étant la [source des Moulins du Diable](#) qui émerge en rive gauche du Doubs (Jurassique sup.). Elle n'est visible qu'à l'étiage, lorsque le lac descend sous la côte 710 m. Plus en aval, en rive droite, les [sources de Moron](#) contribuent aussi à l'alimentation du lac, en basses et hautes eaux. Ces sources ne sont à priori pas liées à des pertes depuis le lac des Brenets / Chaillexon – mais à des infiltrations en amont sur le plateau.

Au milieu du lac, des infiltrations sont possibles dans le cœur de l'anticinal. Elles peuvent en théorie alimenter la nappe [FNK014](#) (Jurassique moy.) qui se développe en bordure du Doubs, à l'altitude de ~650 m et qui alimentent en aval les [sources de la Verrerie](#) et [de la Rasse](#).

En aval du barrage, le lit du cours d'eau présente toujours un profil d'incision, pratiquement jusqu'à la [centrale hydroélectrique](#) du Châtelot. Sur cette section, si le Doubs est supposé plutôt infiltrant, il est toutefois alimenté par plusieurs sources, dont la [résurgence Chez Némorin](#), en rive gauche, à l'altitude de 650 m environ. Une partie de ses sources - dont celles de [Chez Némorin](#) - peuvent être liées à des pertes en amont du cours d'eau, soit dans les lacs de Moron et des Brenets / Chaillexon, soit entre les deux lacs. En effet, des infiltrations ou captures en rive gauche du Doubs avant de pénétrer dans le lac de Moron ne doivent pas être exclues. Les conditions géologiques seraient en effet propices à une capture des écoulements à l'ouest direct du lac de Moron. Ceux-ci alimenteraient la nappe [MNK213](#) (Jurassique sup.).

La continuité aval de la nappe [MNK213](#) est incertaine. En aval de la [résurgence Chez Némorin](#), le Doubs reste à priori infiltrant, jusqu'à la centrale hydroélectrique du Châtelot (620 m). En aval, le profil altimétrique du Doubs (pente hydraulique) est plus équilibré, plus large et les dépôts en bordure semblent montrer que le lit de la rivière est proche du niveau de base. Celui-ci est contrôlé par le [seuil de la Rasse](#) (alt. ~620 m). Sur ce tronçon, le Doubs est alimenté par les sources permanentes de la [Verrerie](#) et de la [Rasse](#) et par d'autres sources plus secondaires. Celles-ci émergent de l'aquifère du Jurassique sup. (nappes [MNK212](#) et [MNK211](#)) mais dont une partie de l'alimentation provient de l'aquifère du Jurassique moy., notamment via la nappe [FNK014](#), qui reçoit elle-même une partie de son alimentation depuis le synclinal de la Chaux-de-Fonds (nappe du Crétacé [MNK224](#), du Jurassique sup. [MNK034](#) et du Jurassique moy. [MNK226](#)). Ces nappes sont alimentées par la recharge locale sur le bassin de la Chaux-de-Fonds, ainsi que par les eaux de consommation qui sont importées depuis le bassin de l'Areuse (débit moyen entre 80 et 100 L/s), traitées à la station d'épuration et réinfiltrées dans la [combe du Valandon](#) (Gogniat et al., 1996a). Toujours sur ce tronçon, la nappe du Jurassique moy. [FNK013](#) se développe, captive sous le cours d'eau, mais à une cote identique de 650 m environ. Peu d'information existe sur cette nappe. → cf. [PROFIL TRANS 11](#).

En aval du seuil de la Rasse, le Doubs est globalement infiltrant sur quelques centaines de mètres avant de pénétrer dans le [lac de Biaufond](#). Sur ce tronçon, et jusqu'au [barrage du Refrain](#), le niveau de base

hydraulique du cours d'eau est artificiellement contrôlé par la côte du barrage (~610 m). Le Doubs reçoit l'alimentation de la source de la Ronde en rive droite - au débouché de la combe du Valanvron. La source est majoritairement alimentée par l'aquifère du Jurassique sup. Elle draine l'écaillle chevauchée, pratiquement jusqu'au Noirmont (MNK211). En effet, à l'est du Noirmont, sous les Emibois, les informations apportées par les sondes géothermiques³⁰ montrent une épaisseur de zone non saturée de plus de 200 m. Les formations du Callovien (aquifère du Jurassique moy.) sont en partie désaturées jusqu'à l'altitude de 760 m environ. Plus en profondeur, il n'existe aucune information.

La source de la Ronde est l'exutoire aval de la nappe MNK211 avant que le Doubs ne traverse l'anticlinal de Biaufond, section sur laquelle le lit est imperméable du fait de l'affleurement des marnes argoviennes.

Sur ce tronçon, les débits sont mesurés au lieu-dit « Fournet-Blancheroche » (→ Station Fournet-Blancheroche, la Rasse [U211 2010 01]). La station se situe entre la station hydroélectrique du Châtelot et la prise d'eau de l'usine du Refrain. Les débits moyens sont de **28.7 m³/s**, soit un gain de **+10.49 m³/s** par rapport à la station précédente de sortie du lac des Brenets [2247]. En l'absence d'affluents, l'essentiel des contributions provient des sources karstiques (sources connues des **Moulin du Diable**, **Moron**, **Chez Némorin** et **Verrerie** et autres sources non identifiées). Les débits connus de ces sources sont toutefois bien plus faibles sur ce tronçon (~**0.5 m³/s** en moyenne), ce qui suggère trois hypothèses :

- a. **Les débits évalués des sources connues sur ce tronçon sont largement sous-estimés** : c'est certainement le cas, mais l'écart de débit est trop important pour imputer l'ensemble des contributions aux seules sources karstiques connues.
- b. **Le tronçon est très exfiltrant et de nombreuses émergences, assez diffuses le long de lit de la rivière ne sont pas documentés** : c'est certainement le cas, car de nombreuses arrivées d'eau sont supposées dans le lit du cours d'eau entre l'aval du barrage du Châtelot et le seuil de la Rasse, voire en amont du lac du Châtelot. Par ailleurs, les sous-écoulements sous la station de mesure précédente Doubs – sortie du lac des Brenets [2247], ne sont comptabilisés qu'à hauteur de cette station. Rappelons que la station de sortie du lac des Brenets [2247] sous-estime vraisemblablement les débits (~500 L/s) car elle ne comptabilise pas les sous-écoulements qui filtrent à travers le seuil du Saut du Doubs.
- c. **La station surestime les débits mesurés** : c'est probable car les débits moyens mesurés à cette station sont supérieurs à la station aval de la Goule - Le Noirmont [2370] de plus de 2 m³/s, alors que des arrivées d'eau importantes contribuent au débit du cours d'eau et qu'aucune zone de pertes significatives n'est relevée entre les deux stations.

Les 3 hypothèses proposées ci-dessus sont possibles et coexistent certainement pour expliquer l'écart entre les débits mesurés et les arrivées d'eau connues sur ce tronçon. Ce tronçon est largement exfiltrant, et compte à priori de nombreuses émergences diffuses dans le lit de la rivière, ce qui est partiellement attesté par le relevé thermique de l'été 2023 (Caudron and Marteau, 2024) dans le secteur de la Rasse, bien que celui-ci ne couvre pas tout le tronçon.

³⁰ <https://www.geocad1.vd.ch/index.php?lang=FR&view=sondage&mode=rapport&id=25300>

7.8. Barrage du Refrain → Theusseret [610 – 505 m]

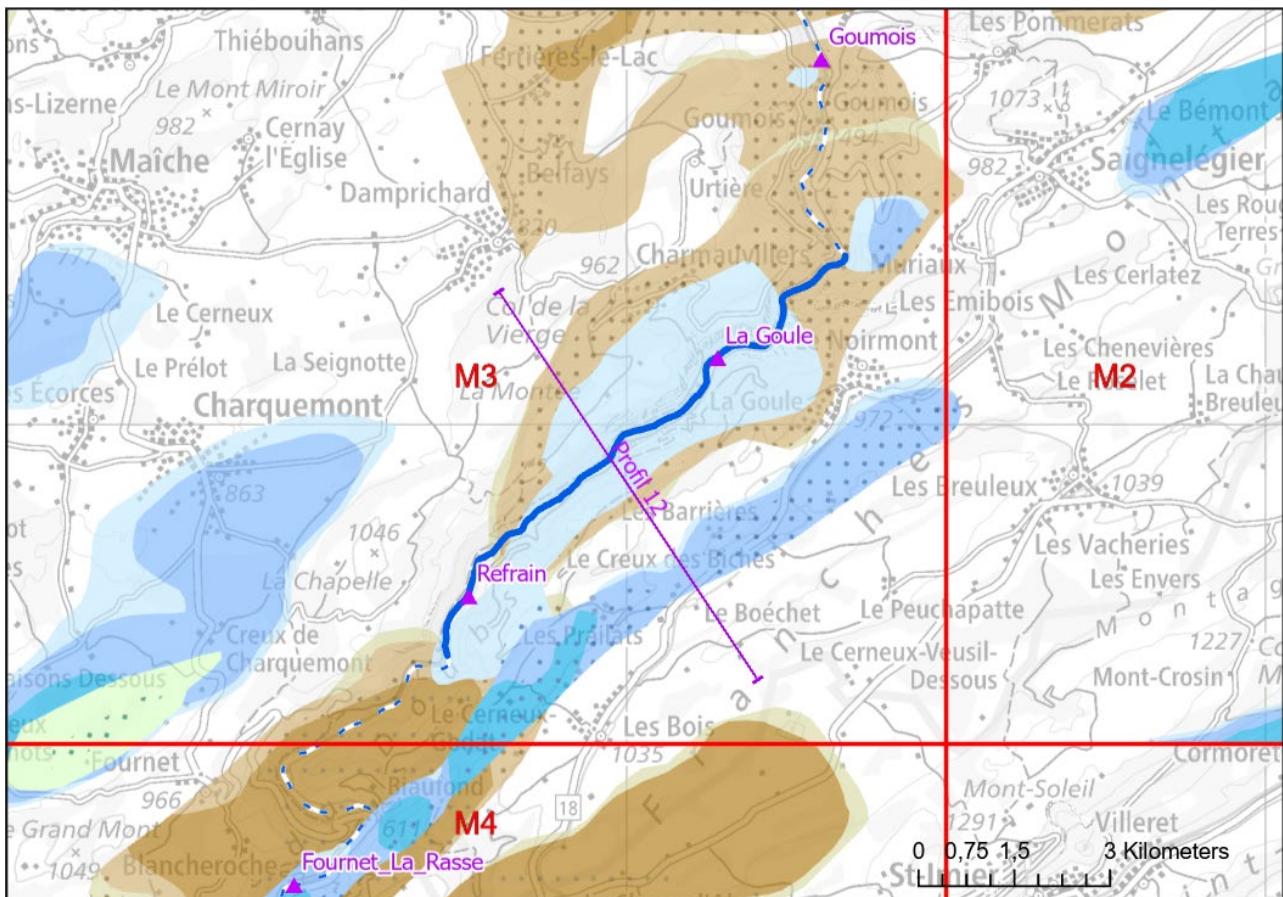


Figure 43. Aperçu du tronçon Aval lac Barrage du Refrain → Theusseret

Se reporter aux documents suivants pour la compréhension du §. 7.8 :

- Annexe E :
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M3_25K_.pdf
- Annexe F : Doubs ; profil hydrogéologique longitudinal
- Annexe G : Doubs ; profils hydrogéologiques transversaux
 - o PROFIL TRANS 12

En aval du barrage du Refrain, sur quelques kilomètres, le Doubs circule sur les calcaires du Rauracien (Jurassique sup.), voire probablement aussi sur les marnes argoviennes. Il montre de nouveau un profil d'incision, suggérant que le cours d'eau est principalement infiltrant, jusqu'à la hauteur de la [centrale hydroélectrique du Refrain](#) (alt. 545 m). Le cours d'eau présente un fort dénivélé sur ce tronçon, résultant selon Buxtorf (1922) d'un glissement depuis le flanc nord (coté France) qui aurait déplacé le lit du Doubs vers le sud-est (Figure 44). Les infiltrations alimentent certainement la nappe [MNK214](#) (Jurassique sup.) en aval, la nappe sous-jacente des calcaires du Jurassique moy. ([FNK013](#)) étant à priori captive.

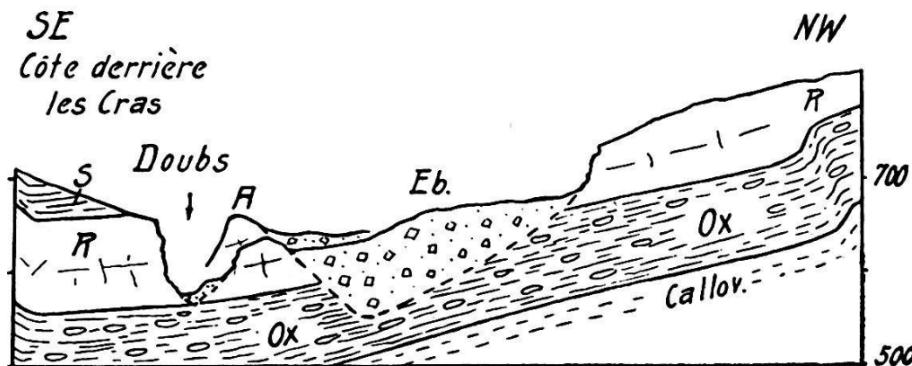


Figure 44. Profil géologique transversal au Doubs en aval du barrage du Refrain. Le lit du Doubs passait plus au nord et a été déplacé vers le sud suite au glissement, et s'est retrouvé probablement plus haut altimétriquement qu'avant le glissement (Buxtorf, 1922).

En aval de la centrale hydroélectrique du Refrain, le niveau de base hydraulique du Doubs est d'abord contrôlé par le seuil artificiel, situé ~5 km en aval, [des Moulins en ruine](#)³¹ (alt. 539 m) puis au seuil lié au [barrage de la Goule](#) (alt. 535 m). Ce seuil a d'abord une origine géologique, en lien avec l'éboulement de la paroi en rive gauche qui s'est produit en 1536 (Buxtorf, 1922). Le lit du Doubs a été déplacé en rive droite (versant SE) et altimétriquement plus haut. La création de ce verrou et la surélévation du cours d'eau ont conduit à la création d'un petit lac étroit ainsi qu'aux dépôts alluvionnaires qui remblaient partiellement le lac à hauteur de la Bouège.

Sur cette section de plusieurs kilomètres, le Doubs est accompagné par la nappe [MNK214](#) avec laquelle les modalités d'alimentation et de drainage restent incertaines. En amont (alt. > 535 m), des infiltrations dans le lit du Doubs doivent contribuer à l'alimentation de la nappe, qui les restituent plus en aval dans le cours d'eau – certainement à hauteur de la retenue. → cf. [PROFIL TRANS 12](#). Aucune source majeure n'est cependant observée sur ce tronçon.

En aval du seuil de la Goule, le cours d'eau montre de nouveau un profil d'incision jusqu'à [l'usine hydroélectrique](#) (alt. 510 m). Le Doubs reçoit une contribution en rive gauche par la source du [Bief d'Etoz](#). Cette dernière ne contribue pas significativement au débit du Doubs car son débit est relativement faible. Par ailleurs, cette source est supposée être principalement la résurgence de captures du Doubs en amont du barrage de la Goule (Buxtorf, 1922). C'est potentiellement aussi le cas pour d'autres sources de ce secteur.

En aval de la centrale, le niveau de base hydraulique du cours d'eau est artificiellement contrôlé par le [seuil du Theusseret](#) (alt. 505 m). Sur ce tronçon d'environ 5 km, le lit du cours d'eau entaille la base des calcaires rauraciens. La nappe [MNK214](#) accompagne encore le Doubs sur ce tronçon, mais sa prolongation en aval n'est pas certaine du fait de l'amincissement de l'aquifère. Des pertes sont possibles dans la partie amont et des résurgences sont envisageables dans la partie aval, soit directement dans le lit du Doubs ou en bordure. Actuellement les exutoires de cette nappe ne sont pas connus car peu de sources sont véritablement documentées sur ce tronçon. Sur la carte hydrogéologique 1/100'000 de la Suisse (Hauber and Pfirter, 1992), des petites sources karstiques sont notées en rive gauche sur les deux derniers kilomètres avant le seuil de la Goule. Ces sources pourraient être vérifiées et documentées.

Sur ce tronçon, les débits sont mesurés à la station de la Goule - Le Noirmont [2370]. Les débits moyens sont de **26.47 m³/s**. Ils sont inférieurs de **2.23 m³/s** aux débits mesurés à la station précédente de Fournet-Blancheroche, et ce malgré la contribution de plusieurs sources (sources de la [Rasse](#), de la [Ronde](#) et du [Bief d'Etoz](#)) estimée à **+1 m³/s**. Ce tronçon n'étant à priori pas infiltrant, il est assez improbable qu'une telle quantité d'eau se soit infiltrée entre les deux stations... Une incertitude sur la mesure des débits est plus probable. Cette incertitude peut aussi bien concerner la station amont de Fournet-Blancheroche (l'hypothèse de la surestimation des débits est déjà mentionnée plus haut) que la station de la Goule - Le Noirmont qui peut sous-estimer une partie des débits, notamment les sous-écoulements sous le seuil... Le relevé thermique de l'été 2023 (Caudron and Marteau, 2024) suggère effectivement des arrivées d'eau « froide » - à priori souterraine – en aval direct du seuil. Celles-ci peuvent correspondre aux captures mentionnées plus haut.

A noter que sur ce tronçon, les débits de la station du Refrain sont à priori disponibles mais nécessitent un travail considérable de compilation et de traitement. L'incertitude sur ces mesures doit par ailleurs être évaluée.

³¹ Noté « Pont de l'Ulysse » sur la carte IGN 1/25'000

7.9. Theusseret → Soubey [505 – 470 m]

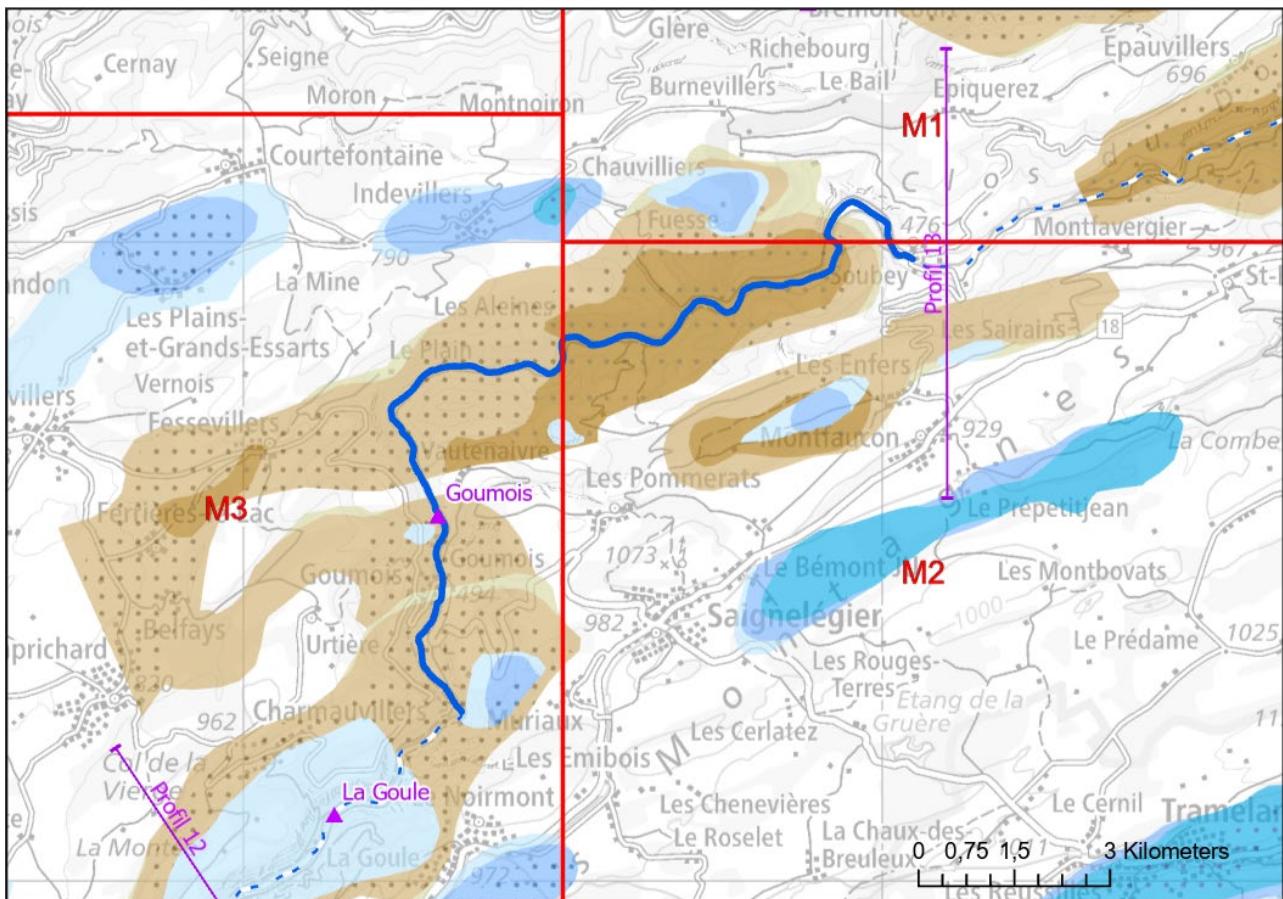


Figure 45. Aperçu du tronçon Theusseret → Soubey

Se reporter aux documents suivants pour la compréhension du §. 7.9 :

- Annexe E :
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M3_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M2_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M1_25K_.pdf
- Annexe F : Doubs ; profil hydrogéologique longitudinal
- Annexe G : Doubs ; profils hydrogéologiques transversaux
 - o PROFIL TRANS 13

En aval du le barrage de la Goule (505 m), le niveau du Doubs est rapidement contrôlé par l'émergence du Theusseret en rive droite, à l'altitude de 500 m. L'émergence est favorisée par la remontée des marnes argoviennes avant la traversée de la [cluse de Goumois](#). La source – qui se compose de plusieurs exutoires – est principalement alimentée par l'aquifère du Jurassique sup., via la petite nappe [MNK221](#), elle-même à priori alimentée par la nappe perchée de Saignelégier ([MNK220](#), carte hydrogéologique M2). Des relations avec l'aquifère du Jurassique moy. sont possibles (Rieben, 2000), mais encore mal documentées. En effet, seuls les travaux de prospection en eau souterraine dans les Franches Montagnes et la réalisation des forages profonds FM1 et FM2 à [Muriaux](#) (Hessenauer et al., 2001; MFR, 1997) apportent des informations sur ce secteur. Elles indiquent notamment :

- Une désaturation des formations du Jurassique sup. ; seules les formations du Jurassique moy. sont noyées. La présence de nappes significatives dans les formations du Jurassique sup. est par extension peu probable.

- Une épaisseur non saturée totale de l'ordre de 300 m sous Muriaux (nappe vers 650 m dans FM2 et vers 560 m dans FM1).

En aval du Theusseret, le Doubs traverse la cluse de Goumois. Le premier kilomètre en aval direct de la source présente un profil hydraulique très raide entre 500 m et 492 m d'altitude. Le tronçon semble infiltrant (calcaires et marnes du Jurassique sup.). A la hauteur du lieu-dit « [Sous le Château](#) », le profil s'aplanit vers 490 m d'altitude. Le Doubs entaille les formations calcaires du Jurassique moy. Ce tronçon nommé « [Les Pesses](#) » est exfiltrant ; des émergences sont en théorie possibles dans le lit du Doubs depuis la nappe du Jurassique moy. [FNK012](#). Plusieurs sources auraient été observées et inventoriées dans le secteur (GIPEK, 2004), mais jamais vraiment retrouvées (source du Fahys, source du Pateu, etc.). Le cours d'eau présente un profil aplani et des dépôts alluviaux, signe qu'il est probablement proche du niveau de base hydraulique.

En aval de Goumois, le profil du Doubs s'aplanit significativement. Le niveau de base est tout d'abord contrôlé par le [seuil géologique des marnes de Bärschwil](#) (Oxford.) qui se dresse en aval de la [Forge](#) (alt. 485 m). Le Doubs reçoit la contribution de la [galerie drainante de la Forge](#), qui tire son alimentation de l'aquifère du Jurassique sup. (petite nappe [FNK066](#)). La nappe et l'émergence sont tous deux perchés au-dessus du Doubs et ne constituent pas ici un niveau de base hydraulique. Sous les formations marneuses de l'Oxfordien, une nappe captive se développe dans l'aquifère du Jurassique moy. [FNK039](#). Les relations de cette nappe avec le Doubs sont encore incertaines, mais des émergences pourraient en théorie se développer en aval de la cluse, vers [Gourgouton](#). Cette nappe est vraisemblablement celle qui alimente le forage des Planches aux Veaux³² (DREAL BFC, 2017).

Le schéma suivant (Figure 46) donne un aperçu de l'organisation structurale supposée des nappes (GIPEK, 2004) : et [FNK066](#). En conditions de hautes eaux, les mises en charge de la nappe [FNK066](#) activent la [source temporaire du Bief Paroux](#).

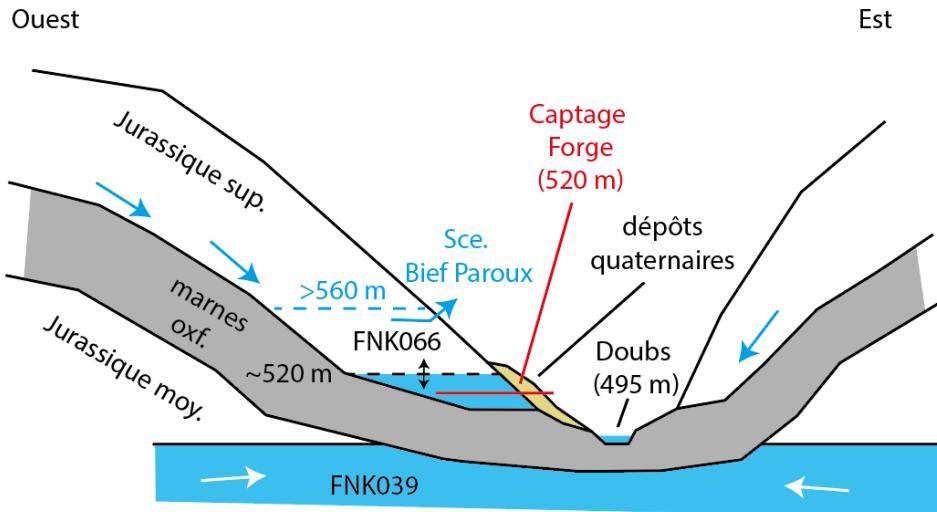


Figure 46.
Géométrie et
fonctionnement
supposé des
nappes [FNK039](#) et
[FNK066](#).

En aval de la Forge, le Doubs incise la cluse de Gourgouton où affleurent les calcaires du Jurassique moy. (Bathonien et Bajocien). Ce tronçon présente un lit large, un profil aplani et quelques dépôts en terrasses qui suggèrent que le cours d'eau est proche du niveau de base hydraulique et donc le tronçon exfiltrant. Les informations sont toutefois lacunaires pour le confirmer, notamment la présence de sources. Deux hypothèses peuvent être avancées :

- Si le tronçon est exfiltrant, il est alimenté par une nappe du Jurassique moy. (probablement la continuité de la nappe [FNK039](#)) et les venues d'eau émergent dans le lit du Doubs ou à travers les terrasses de dépôts.

³² Forage réalisé en 2012 au bord de la route d'accès au Moulin du Plain, à 495 m d'altitude, 1200 m en amont de la source de Blanchefontaine (commune de Goumois). Le forage a atteint 245 m de profondeur mais réduit à 166 m suite à un effondrement. Les venues d'eau sont situées vers 150 m de profondeur. Les débits d'exploitation prévus sont de l'ordre de 120 m³/h.

- (ii) Si le tronçon est infiltrant, les infiltrations alimenteraient alors l'aquifère du Jurassique moy. Dans ce cas, les circulations souterraines pourraient être dirigées vers la [source du Bief de Brand](#) en rive droite du Dessoubre, à ~390 m d'altitude ! Ces circulations - si elles sont avérées - sont probablement modestes. La diffluence du traçage D977 sur la commune Les Plains-et-Grands-Essarts semblent aussi témoigner du fait que le bassin d'alimentation de la [source du Bief de Brand](#) « empiète » ou capture progressivement celui des sources qui alimentent le Doubs en rive gauche.

A ce stade, l'option (i) semble à priori plus probable que l'option (ii) mais devra faire l'objet d'investigations pour être étudiée plus en détail.

Le Doubs reçoit aussi la contribution du ruisseau de Vautenaivre en rive droite, alimenté en amont par un aquifère perché dans les calcaires du Jurassique sup., sous le [château de Cugny](#) (nappe FNK067). Les débits du ruisseau ne sont pas documentés, mais celui-ci est supposé pérenne d'après la carte 1/25'000.

En aval du « Trou de Gourgouton », le Doubs incise de nouveau les formations calcaires du Jurassique sup., principalement les calcaires rauraciens et les marnes de l'xfordien. Le niveau de base est contrôlé par la [source de Blanchefontaine](#), qui émerge en rive gauche et qui fixe le niveau de la nappe FNK038 (Jurassique moy.). En effet, si la source émerge des calcaires du Jurassique sup., la nappe se développe principalement dans l'aquifère du Jurassique moy.

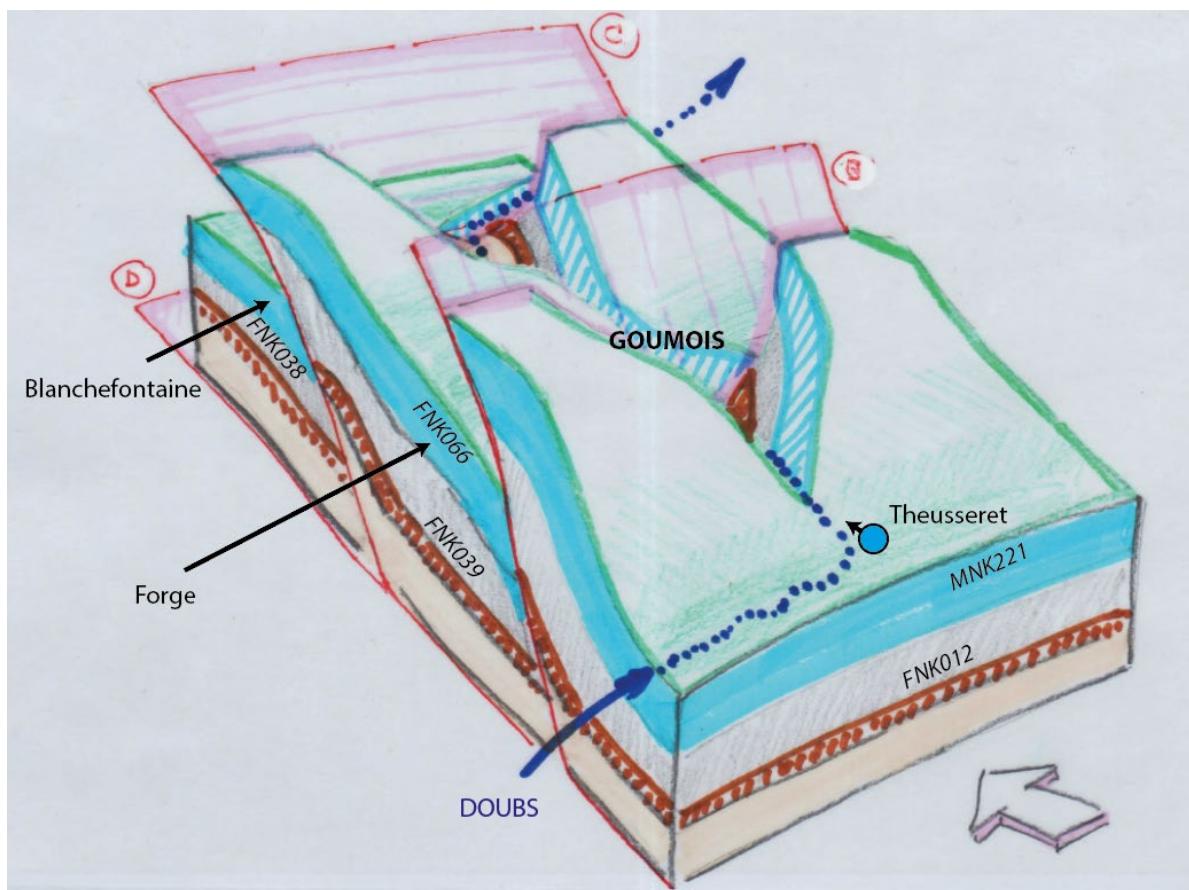


Figure 47. Aperçu de la structuration géologique et hydrogéologique de la cluse de Goumois et de l'organisation des systèmes hydrogéologiques alimentant les sources du Theusseret, de la Forge et de Blanchefontaine (dessin U. Eichenberger, ISSKA).

En aval de la source, le Doubs continue d'inciser les calcaires du Rauracien, toujours proche de la limite avec les marnes de l'xfordien. Sur ce tronçon, le niveau du Doubs est d'abord contrôlé par le [seuil du Moulin du Plain](#) (alt. 486 m environ), puis par celui de [Moulin Jeannotat](#) (alt. 483 m environ). L'existence d'une nappe dans l'aquifère du Jurassique sup. est difficile à confirmer étant donné la faible épaisseur des calcaires entre le Doubs et les marnes de l'xfordien. En revanche, une importante nappe captive se développe sous le

Doubs, dans les calcaires du Jurassique moy. ([FNK038](#)). Peu de sources sont toutefois observées sur ce tronçon qui s'étend jusqu'au Moulin Jeannotat – mais beaucoup sont supposées.

En aval du Moulin Jeannotat, le Doubs reçoit la contribution du [Bief de Fuesse](#), en rive gauche, à l'altitude de 481 m environ. Le ruisseau est alimenté en amont par les sources du Bief de Fuesse et de Fontaine Jeule (voir carte hydrogéologique M1, en bas à gauche). Ces deux sources sont alimentées par l'aquifère du Jurassique sup. d'Indevillers, respectivement par les petites nappes [FNK028](#) et [FNK029](#). D'après les photographies aériennes, le débit de cet affluent dépasse plusieurs dizaines de litres par seconde en conditions de basses à moyennes eaux.

A l'approche de Soubey, les formations calcaires du Jurassique moy. sont de plus en plus affleurantes et le cours d'eau les entaille pratiquement jusqu'à l'étage du Bajocien. → cf. [PROFIL TRANS 13](#). La nappe [FNK038](#) est supposée s'amincir considérablement jusqu'à disparaître. Passée la Cote de l'Omène, où le Doubs forme une boucle remarquable, le cours d'eau commence à entailler les marnes du Lias à l'endroit même où il traverse Soubey (alt. 470 m). Sur ce tronçon, le profil hydraulique du Doubs est très aplani et ne semble pas être contrôlé par un seuil géologique.

Sur ce tronçon, les débits sont mesurés à hauteur de Goumois (→ Station Goumois [[U212 2010 01](#)]). La station affiche un débit moyen de **28.9 m³/s**, soit un gain de débit de **+2.43 m³/s** par rapport à la station précédente de la Goule - Le Noirmont [[2370](#)]. Les contributions connues en eau souterraine sur ce tronçon sont apportées par les sources [du Theusseret](#), [de la Forge](#) et [du Bief Paroux](#) qui totalisent plus de 1.1 m³/s en moyenne (probablement autour de ~1.5 m³/s). La station de Goumois n'étant pas situé sur un seuil lié à un glissement, il est vraisemblable de penser que les sous-écoulements sont mineurs et donc que la station mesure correctement les débits. Des arrivées d'eau diffuses dans le lit du cours d'eau sont donc très probables et partiellement attestées par le relevé thermique de l'été 2023 (Caudron and Marteau, 2024) qui suggère manifestement des arrivées d'eau (i) entre le seuil de la Goule et celui du Theusseret, et (ii) dans la cluse en amont direct de Goumois (lieu-dit « les Presses ») comme supposé plus haut.

7.10. Soubey → seuil St-Ursanne [470 – 435 m]

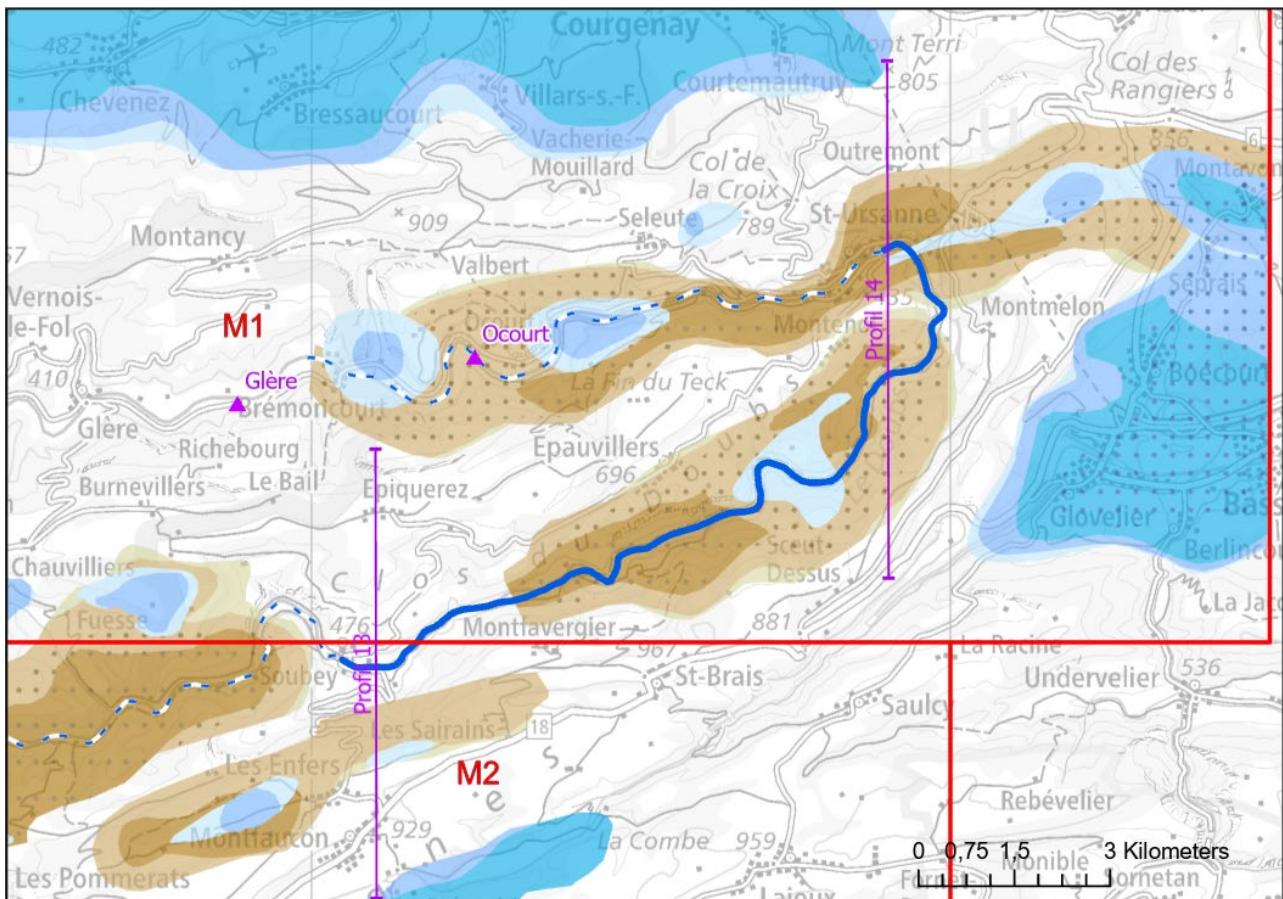


Figure 48. Aperçu du tronçon Soubey → seuil St-Ursanne

Se reporter aux documents suivants pour la compréhension du §. 0 :

- Annexe E :
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M2_25K_.pdf
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M1_25K_.pdf
- Annexe F : Doubs ; profil hydrogéologique longitudinal
- Annexe G : Doubs ; profils hydrogéologiques transversaux
 - o PROFIL TRANS 13
 - o PROFIL TRANS 14

A [Soubey](#) (alt. 470 m), le lit du cours d'eau est proche des marnes imperméables du Lias. Par endroit, il est même possible que les marnes du Keuper (Jurassique inf.) soient entaillées. Le tronçon est vraisemblablement imperméable. → cf. [PROFIL TRANS 13](#).

En aval du village, le Doubs reçoit la contribution du ruisseau des [Moulins de Soubey](#) en rive droite. Celui-ci est alimenté par trois zones de sources (les sources de [Soubey](#) ou des [Moulins de Soubey](#)) qui sont alimentées par les aquifères du Jurassique moy. (nappe [MNK218](#)) et du Jurassique sup. (petite nappe perchée [MNK223](#)). Ces deux nappes se développent dans une petite structurelle synclinale, située sous les Enfers et plus ou moins parallèle au cours d'eau. Les apports du ruisseau ne sont pas connus.

Entre la [Boverie](#) (470 m) et le [Pré du Lods](#) (460 m), le Doubs réentaille les calcaires du Jurassique moy. A cet endroit le cours d'eau est perché par rapport à la nappe souterraine [MNK219](#) qui remplit, plus à l'est, le synclinal de [Châtillon](#). Ce tronçon correspond à une zone d'anciens seuils liés à une série d'éboulements des rives du Doubs (Aufranc et al., 2016; Rollier, 1893). Un premier éboulement / affaissement, en face des

Moulins de Soubey, s'est produit en rive gauche et a déplacé le lit du cours d'eau vers le sud-est. Un second éboulement, depuis la rive sud (« les Roches Brisées »), a conduit à un déplacement du cours d'eau vers le nord-ouest. Cette dynamique est récente, le dernier évènement remontant à mars 2001. Ce tronçon du Doubs est majoritairement infiltrant sur une longueur de 1.3 km environ. En aval, le lit du cours d'eau circule principalement sur les marnes de l'Oxfordien, sans échanges significatifs avec les aquifères karstiques.

A l'approche de la [boucle de Tariche](#), le Doubs incise de nouveau le bas des formations calcaires du Jurassique sup. (formation de St-Ursanne). Bien que cette couche calcaire ne soit pas épaisse à cet endroit, une petite nappe ([MNK217](#)) peut potentiellement se développer. Le niveau de base est ici fixé vers 448 m.

Rabin et al. (2015) identifient une rupture de pente du lit du Doubs dans la boucle. Celle-ci n'est pas significative (<1 m), mais marque certainement un seuil hydraulique pour le cours en amont. A partir de ce tronçon, on peut supposer que la continuité hydraulique du Doubs n'est plus interrompue jusqu'au [seuil de St-Ursanne](#) (alt. 435 m).

En aval de la boucle, la nappe [MNK217](#) s'amincit jusqu'à disparaître. Le Doubs circule essentiellement sur les marnes Oxfordiennes jusqu'à la cluse (anticlinale) en aval de Montmelon où il réincise les calcaires du Jurassique moy., marquant certainement ici la zone d'émergence de la nappe [MNK219](#). Les sources ne sont cependant pas connues et doivent probablement émerger en chapelet dans le lit du Doubs.

A l'est du cours d'eau, le sommet des marnes oxfordiennes au pied des falaises de [l'anticlinal du Mont Russelin](#) marque la ligne de partage des eaux. A l'est démarre en effet le bassin de Delémont qui abrite la nappe [MNK210](#) (Jurassique sup.), progressivement captive sous les formations molassiques, et certainement aussi une nappe dans les formations calcaires du Jurassique moy. Celle-ci n'a pas été documentée dans le cadre de cette étude.

La cluse de Montmelon ([La Lomène](#)) est considérée comme un obstacle hydraulique séparant la nappe [MNK219](#) au sud de la nappe [FNK037](#) au nord. Une différence de charge de l'ordre de 10 m est supposée exister entre les deux nappes, mais dans la réalité elles pourraient aussi être en contact, le niveau de base du Doubs étant contrôlé artificiellement par le seuil situé à l'entrée de St-Ursanne (alt. 435 m), le niveau hydrogéologique de la nappe [FNK037](#) a certainement pu être modifié par cet ouvrage.

Sur l'ensemble du tronçon, des circulations à travers l'anticlinal du Clos-du-Doubs semblent peu probables. Les marnes imperméables du Lias forment une barrière continue dépassant tout le long les 500 m d'altitude. L'essentiel des eaux est canalisée le long de l'axe du Doubs en direction de St-Ursanne, au moins jusqu'à La Lomène.

En revanche, sur le tronçon entre la sortie de la cluse de Montmelon et l'entrée dans St-Ursanne, des captures de l'eau du Doubs sont possibles en rive gauche, en aval direct de La Lomène. Les eaux potentiellement infiltrées rejoignent la nappe [FNK037](#) et sont ensuite ramenées vers le Doubs à la hauteur du [Tillot](#) (alt. ~432 m). Des sources sont en effet mentionnées en rive gauche sur la carte hydrogéologique 1/100'000 de la Suisse (Hauber and Pfirter, 1992). Cette capture potentielle est favorisée par la mise en charge du Doubs en amont du seuil de St-Ursanne et conduit les eaux à by-passé simplement la boucle de St-Ursanne. A noter que le profil en long du Doubs (Annexe F) montre une succession de ruptures de pente lors de la traversée de St-Ursanne (Rabin et al., 2015), favorisant l'hypothèse selon laquelle il est partiellement infiltrant sur ce tronçon (capture par l'aquifère du Jurassique moy.).

A l'entrée de St-Ursanne, le Doubs entaille les calcaires du Rauracien sur une centaine de mètres. Ceux-ci ne sont pas épais mais se prolongent à l'est sous la forme d'un synclinal qui s'étend au moins jusqu'à [Montayon](#). Ces calcaires abritent vraisemblablement une nappe ([MNK215](#)), dont l'existence devrait être vérifiée, mais qui théoriquement peut drainer une partie significative des eaux de la Montagne de [Develier-Dessus](#). Les traçages réalisés en 1995 depuis les galeries des mines de Chaux (Buser and Paupe, 2021) et le vallon du Maran montrent en effet un drainage des eaux souterraines vers les sources des Tuffières, vraisemblablement des petites sources karstiques de l'aquifère du Jurassique sup., en bordure de la route cantonale, mais aussi vers les puits de captage de Champs Fallat. Ces puits étaient supposés capter la nappe « alluviale » en rive droite du Doubs, l'eau étant destinée à l'alimentation du Clos-du-Doubs. Ce traçage démontre que la nappe alluviale à cet endroit est assez directement alimentée par les eaux souterraines des aquifères karstiques, prouvant par la même l'existence de la nappe [MNK215](#).

Sur cette section, les débits du Doubs ne sont pas mesurés, mais ils sont supposés augmenter, d'au moins quelques centaines de litres par seconde, avec la contribution de plusieurs affluents (ruisseaux de Vautenaivre et Bief de Fuesse) et de sources karstiques (sources de [Blanchefontaine](#) et de [Soubey](#)). A l'exception de la capture supposée à l'entrée de Sainte-Ursanne, l'ensemble du tronçon est exfiltrant.

7.11. Seuil St-Ursanne → Brémoncourt [435 – 416 m]

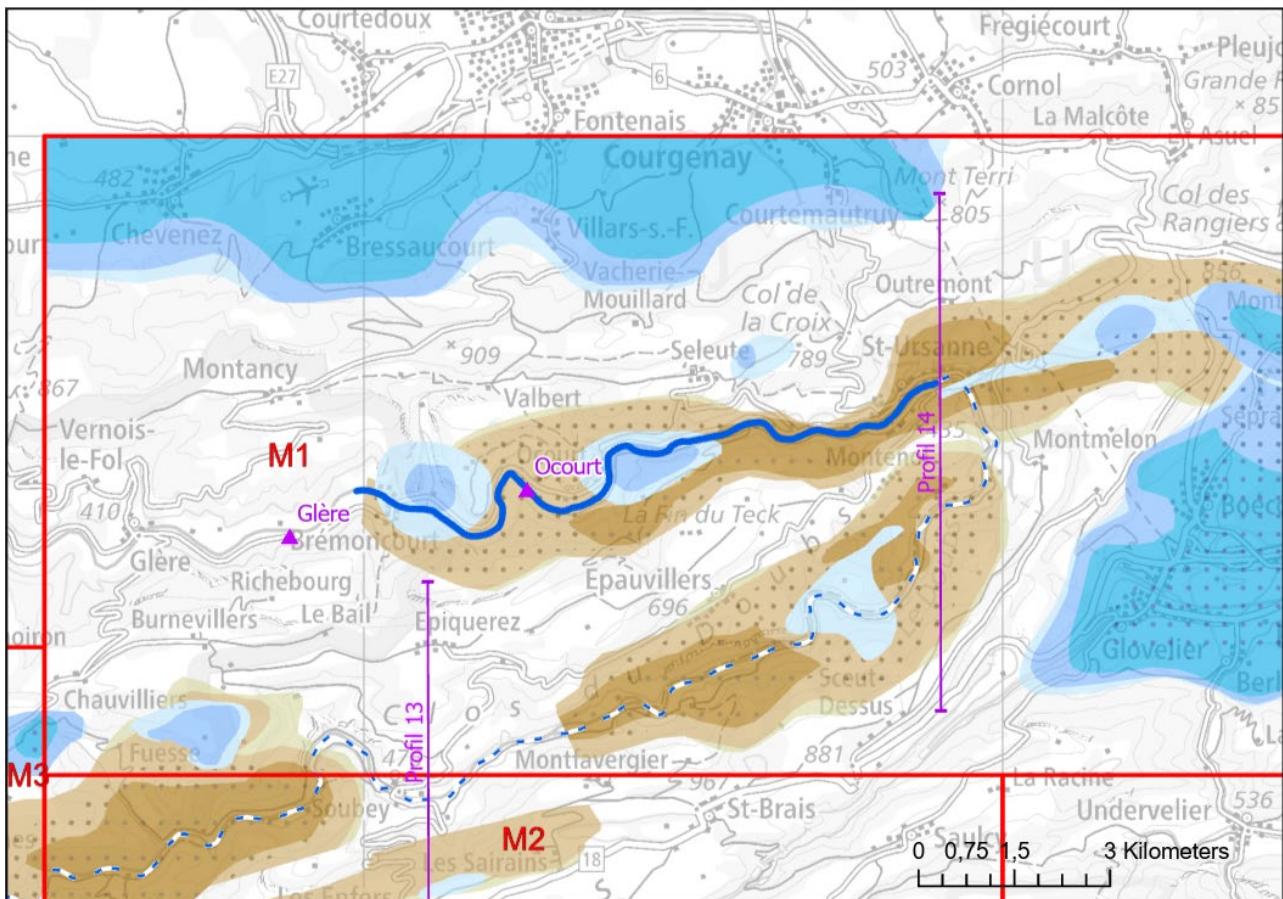


Figure 49. Aperçu du tronçon Seuil St-Ursanne → Brémoncourt

Se reporter aux documents suivants pour la compréhension du §. 7.11 :

- Annexe E :
 - o CARTE_HYDROGEOLOGIQUE_M1_25K_.pdf
- Annexe F : Doubs ; profil hydrogéologique longitudinal
- Annexe G : Doubs ; profils hydrogéologiques transversaux
 - o PROFIL TRANS 14

En aval du [seuil de St-Ursanne](#), la nappe [MNK215](#) (jurassique sup.) est supposée s'amincir significativement et disparaître en raison de l'amincissement des calcaires en direction de l'ouest. En effet, sur ce tronçon, qui prend la forme d'un synclinal, le cours d'eau entaille majoritairement les marnes de l'xfordien, puis les calcaires du Jurassique moy. → cf. [PROFIL TRANS 14](#). Ces calcaires abritent la nappe [FNK037](#), majoritairement captive sous les marnes de l'xfordien, qui se développe le long du Doubs. Celle-ci est supposée en équilibre hydraulique avec le cours d'eau qu'elle alimente via diverses petites sources inconnues.

A la sortie de St-Ursanne, le niveau du Doubs est contrôlé par le [seuil du canal de Bellefontaine](#) (alt. 430 m), situé ~4 km en aval de la ville. Plus en aval, il est contrôlé par le [seuil du Moulin du Doubs](#), au hameau de Pontoye (alt. 423 m). En aval de Pontoye, le cours du Doubs n'est ponctué d'aucun obstacle hydraulique jusqu'à Brémoncourt (alt. 416 m). Un contrôle hydraulique par [le barrage de Vauffrey](#) (alt. 410 m), situé pratiquement 10 km en aval de [Brémoncourt](#) ne peut cependant pas être exclu.

Jusqu'à Brémoncourt, le Doubs est supposé alterner entre des tronçons infiltrants et des tronçons exfiltrants, alimentant et à son tour étant alimenté par la (ou les) nappe(s) du Jurassique moy. ([FNK037](#)) qui se développe(nt) en « cascades » le long du cours d'eau. Des petites nappes karstiques dans les calcaires du

Jurassique sup. peuvent potentiellement se développer le long du cours d'eau (ex : [FNK025](#) et [FNK026](#)). Celles-ci sont majoritairement libres et peu épaisses globalement (quelques mètres à dizaines de mètres au maximum). Dans le secteur de Brémontcourt, la [source du Fresnois](#) atteste de la présence d'une nappe dans les calcaires du Jurassique sup. – potentiellement [FNK026](#). La source est cependant bien plus haute que l'altitude supposée de la surface libre de la nappe... Seules des informations complémentaires pourront apporter des éléments de réponse.

Au nord, l'anticinal de la Roche d'Or (Caë, 2016, cf. modèle M1) marque la ligne de partage des eaux entre le bassin du Doubs et le bassin de l'Allaine, au nord, qui draine le plateau de Porrentruy. Sous le plateau, la nappe [MNK041](#), majoritairement libre, se développe dans les calcaires du Jurassique sup. Les calcaires sous-jacents du Jurassique moy. sont aussi supposés abriter une nappe, mais celle-ci n'a pas été documentée dans le cadre de ce projet.

Sur ce tronçon, les débits sont mesurés à la station d'Ocourt (→ Station Ocourt [[2210](#)]). Les débits moyens sont de **32.62 m³/s**, soit un gain de **+6.15 m³/s** par rapport à la station de la Goule, et **+3.72 m³/s** par rapport à celle de Goumois. Les arrivées d'eau connues et totalisées sur ce tronçon sont les affluents de Vautenaivre et du Bief de Fuesse (quelques centaines de litres par seconde au maximum) et les sources de Blanchemain et de Soubey, dont les débits sont de l'ordre de quelques dizaines à centaines de litres par seconde au maximum. Le gain de débit mesuré suppose donc l'existence d'émergences diffuses (ou localisées mais non reconnues) dans le lit du cours d'eau qui cumulent un débit de presque 3 m³/s depuis le village de Goumois.

Environ 4 km plus en aval, la station de Glère (→ Station Glère [Courclavon] [[U214 2010 01](#)]) affiche des débits cohérents (32.7 m³/s) avec ceux de la station d'Ocourt, ce qui est un argument pour penser que les débits à Ocourt sont correctement mesurés.

8. Bassin d'alimentation hydrogéologique

Cette section présente les principes retenus pour la délimitation du bassin d'alimentation du Doubs ; un bassin d'alimentation étant défini comme : « l'ensemble des surfaces pour lesquelles la totalité ou une partie de la recharge contribue à l'alimentation d'une source ou d'une section de cours d'eau ». Ces principes sont repris de la méthode de délimitation des bassins d'alimentation des systèmes d'écoulement en milieux karstiques (Malard et al., 2015).

La Figure 50 montre l'extension des limites du bassin d'alimentation dont la surface est estimée à environ 1273 km². Les limites sont localement reprises sur les cartes hydrogéologiques 1/25'000 (Annexe E).

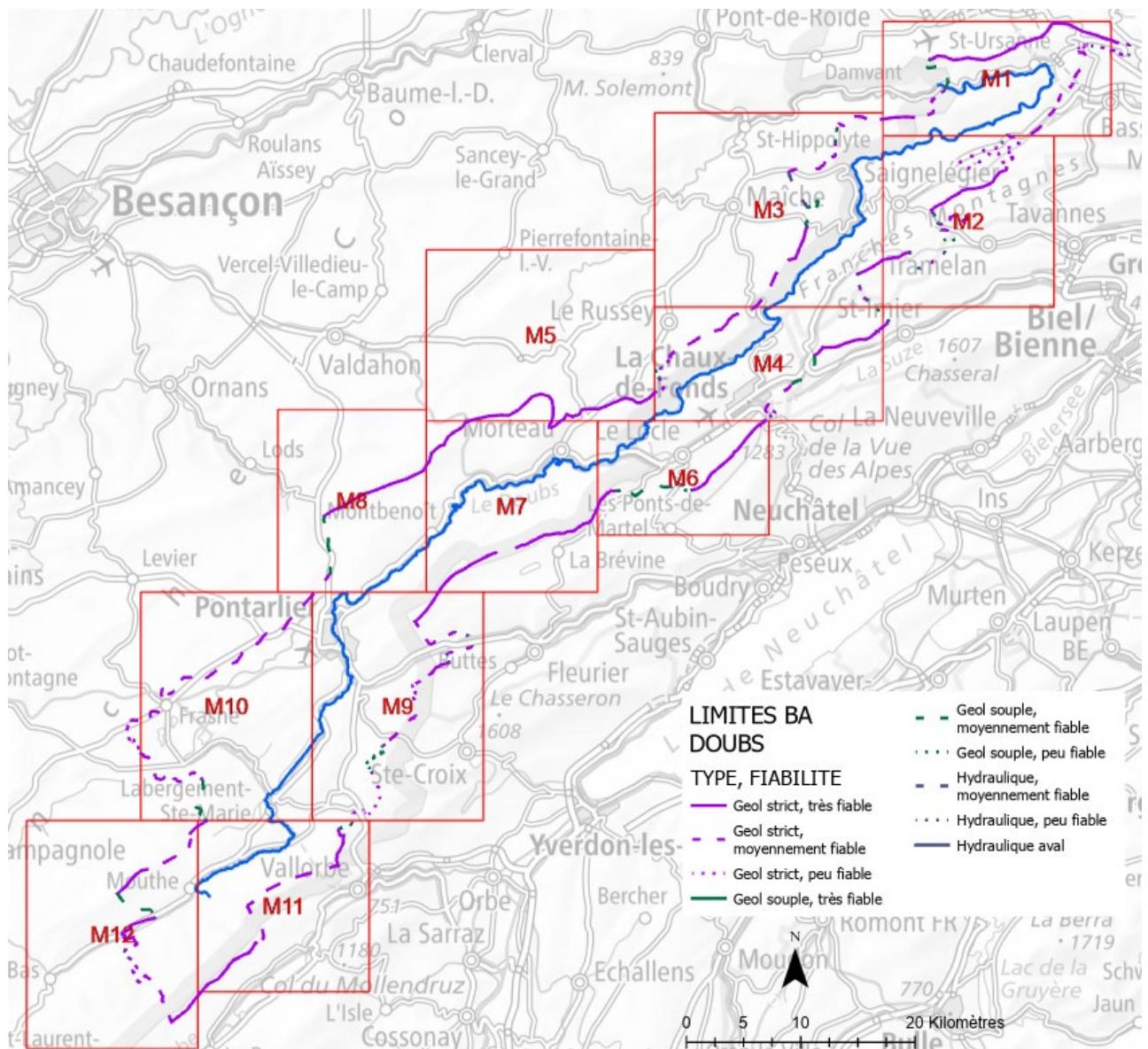


Figure 50. Bassin d'alimentation hydrogéologique du Doubs transfrontalier.

Le Tableau 5 détaille la nature des limites qui caractérisent le bassin d'alimentation hydrogéologique du Doubs. Chaque limite se voit aussi attribuer un index de fiabilité (Tableau 6).

LIMITE_TYP	Description	Signification
1	Limite géologique stricte	<p>La ligne de partage des eaux est marquée par une limite géologique (lithologique, tectonique, etc.).</p> <p>Cette limite est normalement stricte et n'est pas supposée changer en fonction des conditions hydrologiques.</p> <p>La limite peut aussi être topographique dans le contexte de roches affleurantes imperméables.</p>
2	Limite géologique souple	<p>La ligne de partage des eaux est marquée par une limite géologique (lithologique, tectonique, etc.).</p> <p>Cette limite est conditionnée par les fluctuations de la zone noyée. Elle peut se déplacer en fonction des conditions hydrologiques.</p>
3	Limite hydraulique	<p>La ligne de partage des eaux est marquée par une crête hydraulique traversant une zone noyée.</p> <p>Cette limite est conditionnée par les fluctuations de la zone noyée. Elle peut se déplacer en fonction des conditions hydrologiques.</p>
4	Limite hydraulique aval	Limite hydraulique aval
-9999	Indéterminé	Indéterminé

Tableau 5. Nature des limites du bassin d'alimentation hydrogéologique du Doubs.

FIABILITE	Description
1	Très fiable
2	Moyennement fiable
3	Peu fiable
-9999	Indéterminé

Tableau 6. Fiabilité des limites du bassin d'alimentation hydrogéologique du Doubs

A la lecture de la carte, le périmètre du bassin est de l'ordre de **372.5 km**. **136 km** sont considérés comme limite « fiable » (**36.5%**), **196 km** comme limite « moyennement fiable » (**53%**) et **40.5 km** comme limite « peu fiable » (**10.5%**). Seules 1/3 des limites du bassin d'alimentation sont donc véritablement fiables, les autres limites étant soit (i) incertaines en raison des informations disponibles, soit (ii) fluctuantes en fonction des conditions hydrologiques.

9. Evolution récente de l'hydrologie du Doubs

9.1. Les phénomènes naturels

Les phénomènes naturels liés à l'érosion, à la sédimentation et/ou à la karstification modifient sans cesse le profil du cours d'eau et son hydrologie. Par rapport à l'enfoncement du Doubs dans le paysage qui a pris quelques millions d'années, ces phénomènes sont souvent « rapides » (milliers d'années), voire soudains pour les glissements / éboulements (jours ou semaines). Tous conduisent à des modifications tout aussi rapides de l'hydrologie du cours d'eau.

9.1.1. Les glissements / éboulements

Le lit « naturel » du Doubs a vu son profil modifié par les récents éboulements ou glissements qui se sont produits après la dernière glaciation (Bichet, 1997b; Buxtorf, 1922) : Saut du Doubs, Refrain, Soubeys, etc. Ces éboulements ont souvent conduit à la création de seuils hydrauliques qui ont réhaussé localement le niveau de base du Doubs de quelques mètres à dizaines de mètres, créant ainsi des lacs en amont, ennoyant dans la foulée les compartiments aquifères traversés par le cours d'eau et modifiant ainsi leur dynamique / régime d'origine. Avec le temps, les lacs se remplissent progressivement de sédiments de l'amont vers l'aval et les seuils, +- compacts sont érodés, abaissant de nouveau le niveau de base du cours d'eau. Les terrasses alluvionnaires sont alors découvertes et le cours d'eau réentaille les sédiments précédemment déposés. La Figure 51 illustre le processus. Dans certains cas, des sources karstiques ont pu se retrouver immergées car situées en amont direct de l'éboulement (cas de la [source de l'Arvoix](#) par exemple). Selon leur régime, ces sources ont pu maintenir un exutoire sous-lacustre actif en empêchant le comblement par les sédiments. Dans d'autres cas, il est possible que l'exutoire se soit déplacé – le plus vraisemblablement en amont. La création de ces retenues et les mises en charge qui l'accompagne ont aussi - dans certains cas - contribué à l'apparition de pertes au fond du lac et de sources en aval de l'éboulement qui restituent les eaux infiltrées (cas des sources en aval du Saut du Doubs et de la source du Bief d'Etoz en aval de la Goule).

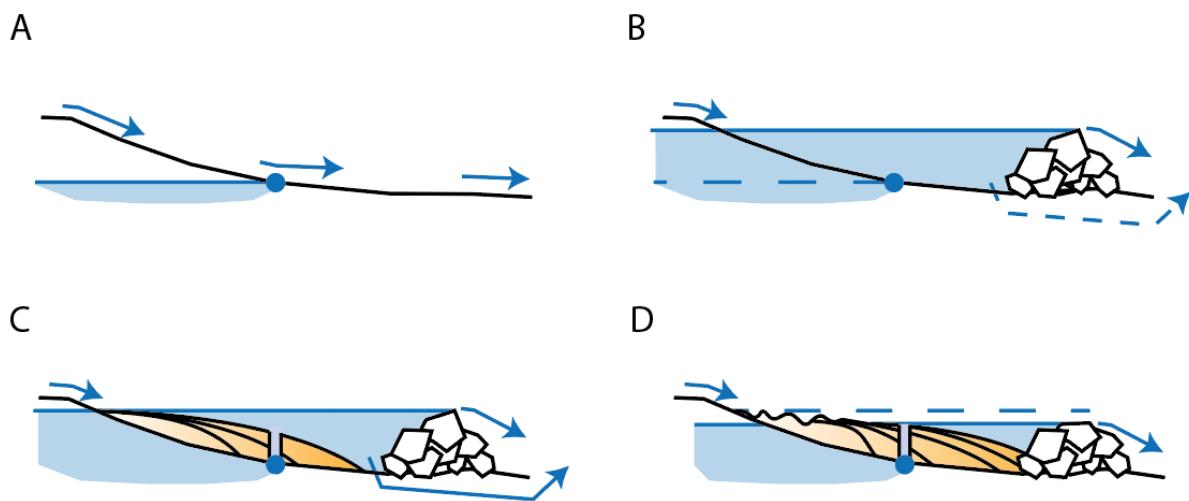


Figure 51. Réponse hydrologique du Doubs aux récents éboulements. A : le cours d'eau incise le relief et conduit à la déstabilisation des flancs. B : l'éboulement ou le glissement se produit et conduit à la mise en place d'un seuil qui élève le niveau de base hydraulique, à la fois pour le cours d'eau mais aussi pour les aquifères karstiques dont l'exutoire est contrôlé par le cours d'eau. Une retenue d'eau se met en place, les sources continuent à émerger sous le niveau du plan d'eau et d'éventuelles pertes se créent à la base de la retenue – voire à travers la masse éboulée / glissée. C : les sédiments comblent progressivement le plan d'eau de l'amont vers l'aval. Les sources maintiennent leurs exutoires à travers les dépôts sédimentaires et les pertes s'intensifient. D : le verrou est progressivement érodé, abaissant le niveau du cours d'eau qui entaille les sédiments en amont et découvre les dépôts en bordure (terrasses). La sédimentation progresse vers le verrou et conduit à terme au comblement du plan d'eau. Le niveau de base baisse aussi dans l'aquifère au fur et à mesure de l'incision du verrou.

L'occurrence de ces phénomènes de glissement / éboulement modifie en permanence le profil hydraulique du cours d'eau, et déplace les zones de dépôts et d'incision. En réponse à ces changements, le comportement hydrogéologique des aquifères (hauteurs d'eau, circulations, etc.) s'adaptent logiquement, à une vitesse comparable.

9.1.2. Les captures souterraines

Les observations montrent que le cours du Doubs ou certains de ses affluents sont jalonnés de pertes concentrées ou diffuses au profit d'autres cours d'eau plus bas en altitude (cf. Annexe C). La plupart sont mises en évidence ou confirmées par des traçages. Ces phénomènes avérés de capture concernent notamment :

- Le Doubs entre Oye-et-Pallet et Maison-du-Bois : les pertes sont dirigées vers la Loue,
- Le Drugeon entre Vaux et Bonnevaux, les pertes sont dirigées vers l'Ain,
- Région des Hôpitaux-Vieux et Hôpitaux-Neufs : les pertes sont dirigées vers la Jougrena.

D'autres phénomènes de capture sont supposés (différences de traçages) mais non avérées :

- Synclinal de Chaux-Neuve à Mouthe : capture progressive par la Saine ?
- Cluse de Goumois : capture progressive par le Bief de Brand ?
- Synclinal des Verrières : capture progressive de la Morte par l'Areuse ?

A ces captures naturelles s'ajoutent aussi la capture « artificielle » des eaux par le tunnel ferroviaire du Mont-d'Or qui détourne une partie de l'alimentation du Doubs au profit de l'Orbe. Hydrogéologiquement, le cours du Doubs au-dessus de 500 m d'altitude est progressivement capturé par des systèmes hydrogéologiques qui drainent les eaux vers d'autres bassins. Dans un premier temps, ces captures s'opèrent à travers le réseau d'écoulement karstique (capture partielle) et dans un second temps, elles remontent en surface au niveau du cours d'eau (capture complète).

On peut supposer que les éboulements et glissements fréquents qui affectent le cours du Doubs et qui conduisent à maintenir un niveau de base élevé ralentissent l'incision et sont donc propices aux phénomènes de captures en faveur d'autres cours d'eau.

9.2. Artificialisation

Les aménagements réalisés le long du cours d'eau (barrages, étanchéification, galeries, etc.) ont fortement modifié le régime « naturel » du cours d'eau, qui lui-même est déjà naturellement en cours de modification par les captures souterraines. A ces changements s'ajoutent aussi les changements climatiques qui affectent directement l'hydrologie du cours d'eau.

9.2.1. Les barrages

Sur la base des observations précédentes, le régime « aérien » du Doubs montre une tendance naturelle à la baisse au profit du régime « souterrain » et en faveur des autres cours d'eau avant la construction des barrages. L'image d'archive Figure 52 semble en effet montrer que le Doubs est à sec à hauteur de Biaufond lors de l'été 1881. Si l'été 1881 est bien considéré comme un été « sec » d'après les archives, on observe néanmoins qu'une piste « carrossable » traverse le Doubs à gué. La profondeur des sillons et les marques sur la piste suggèrent que le lit du Doubs est régulièrement traversable – même en dehors des périodes de sécheresse. La végétation montre par ailleurs que le cours d'eau s'est retiré déjà depuis plusieurs semaines. Même si la présence d'une conduite sous la piste ne doit pas être écartée (on peut éventuellement en deviner une dans le coin en bas à gauche de l'image), ces informations montrent que le Doubs présentait par le passé un régime beaucoup plus temporaire, avec des tronçons régulièrement à sec – ou presque – comme ici à Biaufond.

La construction successive des barrages de la Goule (1893), du Refrain (1909) puis du Châtelot (1953) à des fins hydroélectriques a renforcé le stockage des eaux de surface (mais aussi probablement souterrain dans les aquifères bordant les retenues) et a permis de maintenir un régime plus pérenne en aval de ces ouvrages sur toute la durée du 20^{ème} siècle. En ce qui concerne la section amont, le régime du Doubs est en partie contrôlé par le barrage du lac de Saint Point construit en 1906 et réhaussé sur la 2^{nde} moitié du 20^{ème} siècle.

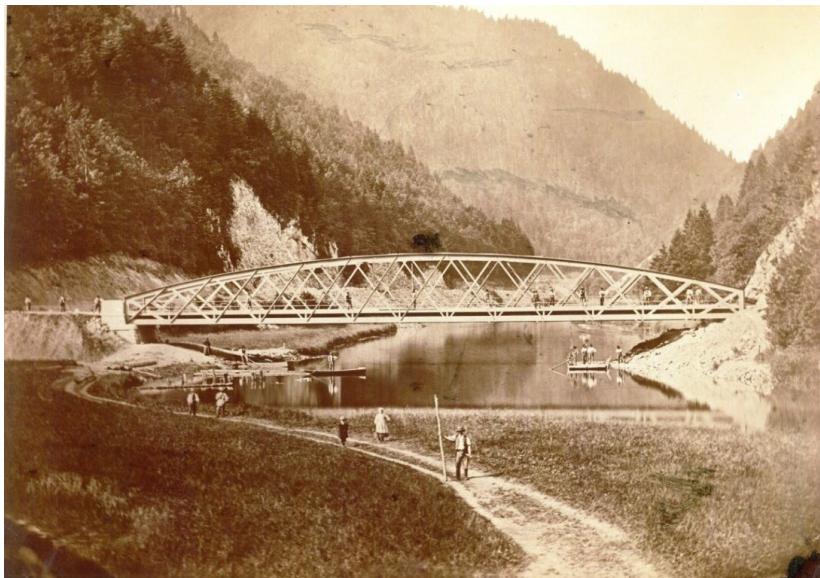


Figure 52. Le lac de Biaufond en juillet 1881, la rive Suisse est à gauche de l'image, la rive française à droite. Une piste carrossable traverse tout le lac de Biaufond jusqu'au barrage du Refrain (Source : Archives du Service des Ponts et chaussées, Neuchâtel, secteur des ouvrages d'art).

9.2.2. Etanchéification et colmatage

Aux aménagements précédents s'ajoutent les opérations d'étanchéification ou colmatage des « pertes » du Doubs, entre Arçon et Maison du Bois (Reilé, 2020), mais aussi celles repérées au fond du lac de Chaillexon / Brenets dans les années 2000 (C. Rognon, communication personnelle).

Ces aménagements ont surtout eu pour effet de modifier le régime d'étiage du cours d'eau, en limitant les pertes. Les observations montrent cependant que ces aménagements ont souvent un effet « limité » dans le temps, les pertes se déplaçant après quelques années.

9.2.3. Drainage et alimentation

A la faveur d'aménagements réalisés non pas le long du cours d'eau, mais en marge, des modifications hydrologiques directes ou indirectes ont pu être observées sur le Doubs :

- Le **drainage** des venues d'eau recoupées par le tunnel ferroviaire du Mont-d'Or (Fournier, 1926) au profit de l'Orbe, CH (cf. § 7.1.).
- L'**apport** des eaux traitées et réinfiltrées depuis la ville de la Chaux-de-Fonds. En effet, la ville est alimentée par des captages d'eau souterraine localisée dans la vallée de l'Areuse : les captages de Bossy et des Moyats (Bossy and Zwahlen, 2004; Burger, 1986; Schardt, 1909) fournissent en moyenne entre 60 et 100 L/s d'eau souterraine qui sont consommés à la Chaux-de-Fonds, puis traités à la STEP et enfin réinfiltrés dans la combe du Valanvron dont les écoulements rejoignent le Doubs, via notamment les sources de la Rasse et de la Verrerie (cf. Tableau 10).

10. *Incertitudes et propositions d'investigations*

Ce travail propose une première synthèse du fonctionnement hydrogéologique du Doubs transfrontalier sur la base des données et connaissances disponibles en 2024. Il pointe par ailleurs tout au long du processus, les différentes lacunes ou incertitudes géologiques et hydrogéologiques qui permettraient d'affiner la compréhension du fonctionnement des systèmes hydrogéologiques en lien avec le Doubs transfrontalier, mais aussi et surtout en fonction des enjeux en cours et à venir sur les ressources en eau : quantité, disponibilité, qualité, énergie, service écologique, patrimoine, etc.

Les sections suivantes détaillent les principales incertitudes et proposent éventuellement des investigations sur ces secteurs cibles lorsque nécessaires.

10.1. Géologiques

Le Figure 8 suivant liste les incertitudes relatives aux modèles géologiques.

Modèles	Incertitude
M1 – St-Ursanne	Le modèle est globalement conforme aux informations géologiques, en quantité suffisante, relativement récentes et peu contradictoires. Le modèle comporte cependant de nombreuses unités de faible épaisseur, difficiles à modéliser à l'échelle du 1/25'000.
M2 – Saignelégier	Le modèle est globalement conforme aux informations géologiques, en quantité suffisante, relativement récentes et peu contradictoires. Les informations en profondeur sont toutefois peu vérifiées en l'absence d'ouvrages profonds dans ce secteur (tunnels, etc.)
M3 – Maîche	Le modèle est globalement fiable dans le secteur du Doubs et du Dessoubre. En revanche sous le plateau de Maîche, les informations géologiques sont peu abondantes, souvent datées et relativement contradictoires. Le secteur sous le plateau de Maîche (Charquemont, Damprichard, etc.) devra faire l'objet d'investigations en profondeur pour améliorer la cohérence du modèle.
M4 – La-Chaux-de-Fonds	Le modèle est globalement conforme aux informations géologiques, en quantité suffisante, relativement récentes et peu contradictoires coté Suisse. A l'ouest, coté France, sous le Russey, la densité de données et d'informations est beaucoup plus lacunaire. Les informations sont souvent datées et contradictoires. Des investigations géologiques en profondeur sont nécessaires pour améliorer la cohérence du modèle.
M5 – Orchamps-Vennes	Le modèle est acceptable dans le secteur du Dessoubre, mais les incertitudes augmentent significativement vers l'est (Montbéliardot, le Bélieu), en direction du Russey, avec la raréfaction des informations géologiques en profondeur. Des investigations géologiques en profondeur à l'est sont donc nécessaires pour améliorer la cohérence du modèle.
M6 – Le Locle	Le modèle est globalement conforme aux informations géologiques, en quantité suffisante, relativement récentes et peu contradictoires. De nombreuses études et investigations ayant été réalisées dans ce secteur ces dernières années.
M7 – Morteau	Le modèle est globalement acceptable, mais les informations en profondeur sont pratiquement inexistantes. La structuration tectonique du chevauchement sous l'anticlinal des Alliés devra faire l'objet d'une vérification.
M8 – Maison du Bois	La fiabilité du modèle est discutable en raison de la faible densité d'informations et de leur cohérence. Des investigations géologiques dans ce secteur, surtout structurales, sont plus que nécessaires.
M9 – Pontarlier / Ste-Croix	La fiabilité du modèle est acceptable mais la structuration tectonique des principaux chevauchements et rétro chevauchements mériterait d'être vérifiée. Il existe des informations relativement récentes sur le secteur, mais aussi beaucoup d'informations contradictoires.
M10 – Frasne	La fiabilité du modèle est acceptable au sud et à l'est. A l'ouest, la densité des informations est faible et il manque surtout des informations en profondeur. Le modèle mériterait d'être revu dans la partie ouest.

M11 – Vallorbe	Le modèle est globalement fiable, surtout en raison de la présence du tunnel du Mont d'Or, mais les nouvelles informations structurales (projet Jura3D) risquent d'entrainer des modifications d'interprétation.
M12 – Mouthe / Foncine	Le modèle est globalement fiable, mais sa cohérence pourrait être améliorée à l'ouest (en direction de la Saine) et coté nord (vers l'Ain). Comme pour M11, les nouvelles informations structurales (projet Jura3D) risquent d'entrainer des modifications d'interprétation.

Tableau 7. *Incertitudes des modèles géologiques*

10.2. Hydrogéologiques

Les données hydrogéologiques sont majoritairement de trois types : (i) localisation, caractérisation des sources (permanente, temporaires) et mesures de débits, (ii) hauteurs d'eau dans compartiments aquifères (nappes), en conditions de basses et de hautes eaux, et (iii) les circulations démontrées par traçage.

10.2.1. Données aux sources

L'étude a montré que les informations relatives aux sources sont relativement lacunaires, que ce soit le positionnement, le régime (Annexe B) et les débits (Annexe C). Des investigations sont nécessaires pour vérifier et compléter au maximum ces informations :

- Vérification du positionnement et description : comme indiqué au §. 6.2, le positionnement précis des sources karstiques est essentiel car il permet de fixer assez précisément les hauteurs d'eau des nappes karstiques. L'altitude précise des exutoires, au mètre près, est une donnée indispensable qui doit figurer dans l'inventaire des sources.
- Caractérisation du régime (pérenne, temporaire) : de nombreuses sources ou groupes de sources présentent souvent plusieurs exutoires étagés. Les exutoires inférieurs étant généralement des exutoires pérennes, les exutoires intermédiaires et supérieurs étant souvent des émergences temporaires qui s'activent au fur et à mesure de la mise en charge des eaux souterraines dans l'aquifère. Ces informations doivent aussi figurer sur l'inventaire des sources.
- Mesure de débit (jaugeage à différentes périodes de l'année) : moins de 50% des sources figurant dans l'inventaire possède des mesures de débits (débits minimum, moyens ou maximum). Ces informations de débits, lorsqu'elles existent, sont souvent peu documentées. Ainsi, il est souvent difficile de savoir si les débits annoncés sont des débits d'exploitation (prélèvements), ou si ce sont les débits totaux d'un ou de plusieurs exutoires...

Le modèle de données qui structure l'inventaire des points d'eau (sources et forages) devrait être révisé afin d'intégrer des informations utiles à l'hydrogéologue : type d'aquifère, activité (pérenne, temporaire), altitude, gamme de débits, etc. ainsi qu'un lien plus explicite avec les connexions démontrées par traçage (cf. §. 10.2.3). En effet, le positionnement et la nomenclature des points d'eau ne sont pas exactement les mêmes selon les deux inventaires de données, ce qui peut facilement conduire à des incertitudes importantes sur l'interprétation.

10.2.2. Hauteurs de nappes

Les hauteurs de nappe sont pour la plupart évaluées indirectement grâce aux altitudes des sources karstiques pérennes et temporaires. Il n'existe que peu de mesures directes, que ce soit en forage ou en grotte, qui soient directement exploitables. Les raisons sont souvent les suivantes :

- Absence de mesures « piézométriques » dans les forages. Les forages de reconnaissance ne font souvent l'objet que d'une unique mesure piézométrique en fin de chantier, sans garantie que les niveaux d'eau soient véritablement représentatifs de la nappe... Un certain nombre de forage ne font souvent même pas l'objet de mesures.

- Les grottes / gouffres présentent souvent des parties noyées qui peuvent être représentatives des nappes karstiques. Mais compte tenu des incertitudes de positionnement et des lacunes de mesures de ces zones noyées, une grande partie de ces informations ne peut être utilisée.

Les hauteurs d'eau des 93 nappes karstiques sont donc pour la plupart indicatives. Moins d'une dizaine d'entre elles présente par ailleurs des informations sur les conditions en hautes eaux. Pour chacune des nappes dont l'altitude du contour est notée comme « incertaine », il est recommandé de vérifier les hauteurs d'eau, par l'intermédiaire :

- Des forages (sondages, puits, et autres ouvrages artificiels profonds) encore accessibles et documentés dans le périmètre d'extension de la nappe.
- Des grottes et autres phénomènes karstiques offrant potentiellement un regard direct sur la nappe.

Dans tous les cas, les niveaux mesurés ne pourront être considérés représentatifs de la nappe qu'après une période prolongée de mesures, car les variations de niveaux d'eau sont souvent au moins aussi essentielles que les valeurs absolues prises de manière ponctuelle. Bien souvent, seul le croisement des mesures (corrélations entre débits aux sources et hauteurs d'eau, corrélations entre hauteurs d'eau en grottes et en forages, etc.) permet de valider qu'il s'agit du même système hydrogéologique qui est mesuré (cf. Figure 53).

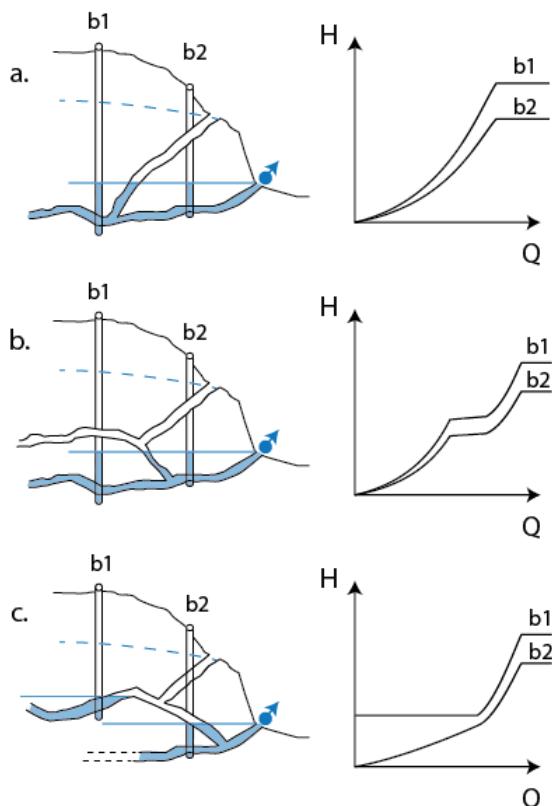


Figure 53. Bien souvent, la représentativité des données mesurées (débits et hauteurs d'eau) dans les aquifères karstiques ne peut être assurée qu'après comparaison / corrélation avec d'autres données, les relations hydrauliques étant principalement contrôlées par l'organisation géométrique des conduits, leur taille (la plupart du temps inconnue) et la position des exutoires (Malard, 2018).

Ainsi, les hauteurs d'eau des principales nappes karstiques du bassin du Doubs ([FNK017](#), [FNK053](#), [FNK042](#), [FNK041](#), [FNK024](#), [FNK038](#), [MNK219](#), etc.) ont toutes été supposées en l'absence de mesures directes. D'autres ([FNK009](#), [FNK011](#), [FNK050](#), etc.) ont même été estimées en l'absence de toutes mesures hydrogéologiques directes ou indirectes. Leur position / extension est uniquement supposée sur des arguments géologiques et des principes.

La région de Frasne - Pontarlier manque cruellement de données hydrogéologiques permettant de contraindre directement les hauteurs d'eau des différents compartiments aquifères jurassique et crétacé. Ce secteur est pourtant à la charnière entre le bassin de l'Ain, de la Loue et du Doubs et représente une réserve d'eau souterraine non négligeable (aquifères Jurassique sup. et moy.). Cette lacune d'information conduit à une assez grande divergence d'interprétation quant au contexte hydrogéologique sous le plateau de Pontarlier (cf. par exemple l'interprétation BRGM dans le cadre du projet NutriKarst, Charlier et al., 2024, p. 174).

10.2.3. Connexions démontrées par traçage

Les connexions démontrées par traçage (base de données ISSKA et base de données DREAL BFC³³) sont des informations essentielles pour la compréhension des écoulements. Lors de l'application de l'approche KARSYS, ces informations sont utilisées pour valider les hypothèses.

Il est cependant essentiel de mentionner que les bases de données de traçage hydrogéologique affichent un certain nombre de connexions douteuses, très incertaines, voire complètement irréalistes, et que rares sont les bases de données qui permettent de nuancer la qualité des connexions.

La base de données DREAL BFC comporte un certain nombre de connexions de type « peu fiable » qu'il semble essentiel de documenter afin de pouvoir distinguer les connexions réellement démontrées de celles plus incertaines. Il est recommandé de procéder à une revue exhaustive de la base de données des traçages hydrogéologiques dans ce sens³⁴.

10.2.4. Captures

Comme énoncé au §. 9.1.2, le cours du Doubs et/ou une partie de ses alimentations sont par endroit progressivement capturés au profit d'autres cours d'eau (La Loue, l'Ain, la Saine, etc.). La nature et surtout les modalités de ces captures restent encore peu documentées (notamment pour l'Ain, mais aussi pour la Saine ou la Jougnena). Les modalités de captures seraient toutefois nécessaires à étudier afin de mieux comprendre le comportement hydrologique du cours d'eau et de ses affluents (le Drugeon, la Morte, etc.). Etendre les modèles KARSYS aux systèmes de la Loue, de l'Ain, de la Saine, du Dessoubre dans son entier (Bief-de-Brand) permettrait d'amener des éléments de réponse plus étayés sur les modalités de captures.

Des traçages hydrogéologiques en des points précis et pour des conditions hydrogéologiques données permettraient ensuite de valider ces modalités.

10.3. Hydrologiques

Les données hydrologiques concernent essentiellement les débits du Doubs à différentes sections de son cours, et de ses affluents.

L'analyse des stations FR / CH (Annexe C) montre une relative cohérence entre les mesures des différentes stations, même si certaines stations **sous-estiment** (Doubs – sortie du lac des Brenets [2247], Goule - Le Noirmont [2370]) ou **surestiment** (Fournet-Blancheroche, la Rasse [U211 2010 01]) vraisemblablement les débits.

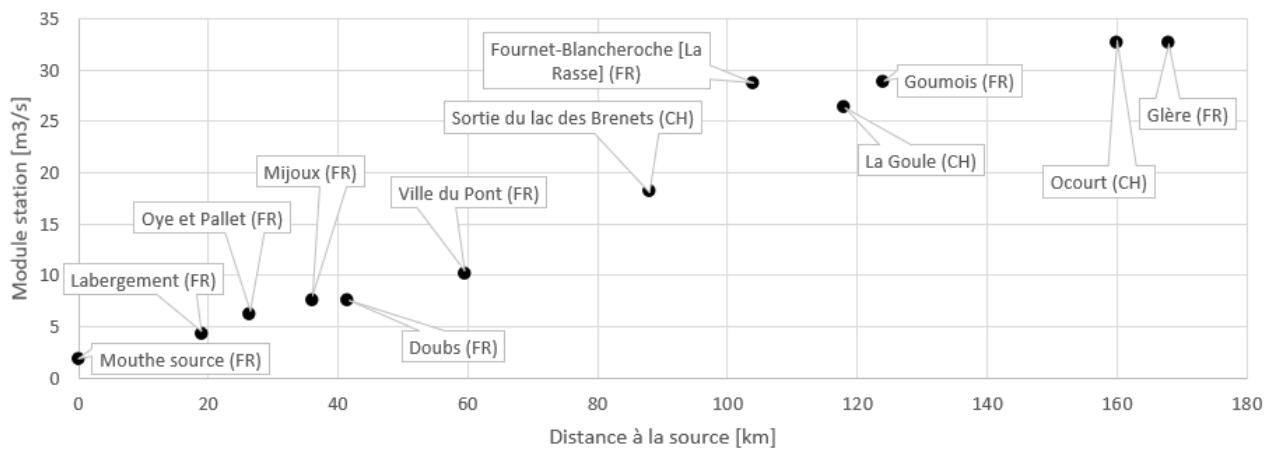


Figure 54. Débits moyens des stations de mesure du Doubs (CH et FR) en fonction de la distance à la source.

³³ <https://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/inventaire-des-circulations-souterraines-reconnues-a9851.html?lang=fr>

³⁴ Selon la Dreal, les essais de traçage récemment renseignés sont distingués selon leur fiabilité

Une analyse croisée des mesures entre les différentes stations permettrait de mieux cerner ces **incertitudes de mesures** (incertitudes sur toute la période hydrologique ou uniquement en conditions de hautes, resp. basses eaux) ou de mieux corrélérer ces mesures à des processus hydrogéologiques (arrivées d'eau significatives lors de certaines conditions, etc.). L'étude d'Artelia de 2023 (Artelia, 2023) et celle à venir (2024-2025) devraient apporter certains éléments de réponse sur ces mesures et éventuellement les périodes de représentativité. Les incertitudes peuvent résulter de la qualité / calibration des dispositifs de mesure, mais aussi simplement des phénomènes de sous-écoulement. Des études récentes réalisées en Suisse ont en effet montré que les mesures de débit d'étiage étaient largement sous-estimées pour la plupart des sources karstiques et cours d'eau de surface en milieu karstique, d'un facteur 2, voire davantage (ISSKA, 2020a, 2020b). Les deux raisons qui expliquent cette incertitude sont : (i) le sous-écoulement sous les stations de mesure qui devient significatif et (ii) le profil non adapté des seuils des stations pour les faibles mesures de débits.

En raison de la longue distance qui sépare les stations Doubs à Ville-du-Pont [[U210 2010](#)] et Doubs - Sortie du lac des Brenets [[2247](#)] et du gain de débit entre les deux stations (+7.97 m³/s), il serait intéressant d'équiper une station supplémentaire. Celle-ci pourrait être installée vers Villers le Lac, avant l'entrée dans le lac de Chaillexon / Brenets. Cette station permettrait de distinguer l'importance des venues d'eau entre les émergences du défilé d'Entreroches (ainsi que les affluents de surface du Val de Morteau) et les émergences du lac. Cette station pourrait être installée même temporairement sur un cycle hydrologique. Le constat est le même entre les stations Doubs - Sortie du lac des Brenets [[2247](#)] et Fournet-Blancheroche, la Rasse [[U211 2010 01](#)], car le gain de débit est aussi très important et relativement inexpliqué sur ce long tronçon. Il semble toutefois difficile d'installer une station supplémentaire sur ce tronçon car peu de sites semblent s'y prêter.

En complément des mesures de débit, une campagne de relevé thermique du cours d'eau sur le modèle de celle opérée en 2023 (Caudron and Marteau, 2024) pourrait être réitérée pour valider les tronçons à émergence diffuse. Ce relevé devrait être réalisé dans des conditions hydrologiques et météorologiques spécifiques :

- i. Survol par nuit (ou avant le lever du jour) en conditions hivernales (froid sec) après plusieurs jours sans pluie. Ces conditions devraient permettre de localiser des zones d'émergence dans le lit du Doubs ;
- ii. Survol par nuit (ou avant le lever du jour) en conditions d'étiage prononcé, typiquement avant le début de l'automne. Ces conditions devraient permettre aussi de localiser des zones d'émergence dans le lit du Doubs.

Idéalement les deux survols sont recommandés afin de croiser les informations.

11. Perspectives

L'approche KARSYS appliquée dans le cadre de ce travail est une **approche évolutive et itérative**. Toute nouvelle donnée ou information acquise dans le futur peut être intégrée dans les différents modèles (géologiques, hydrogéologiques) pour **mettre à jour** les interprétations.

Dans cette démarche, il est essentiel que les produits de la documentation soient **disséminés** le plus largement possible et que des mises à jour soient envisagées en fonction des acquisitions de nouvelles connaissances.

Afin de faire vivre ces informations et de les proposer à un public large – que ce soit par l'ISSKA ou par un tiers – il est nécessaire de réfléchir aux moyens à mettre en place pour garantir l'archivage et l'accessibilité à ces informations, de manière unique, des deux côtés de la frontière.

Dans cet objectif, l'ISSKA suggère la mise en place d'une **plateforme / géoportail transfrontalier**, qui permettrait la **mise en commun de certaines informations hydrogéologiques** d'intérêt transfrontalier (par exemple les circulations souterraines démontrées par traçage hydrogéologique, les captages, les réseaux de mesure, etc.).

De ce fait, les informations complémentaires et les mises à jour pourraient être **accessibles par tous**, ce qui garantirait ainsi une certaine cohérence des informations et des interprétations, indispensables à toute gestion intégrée.

Les conditions de mise à disposition de ces informations doivent être validées par chacune des parties sur son territoire. Une vulgarisation (simplification) des informations sera à priori nécessaire avant diffusion vers un public large.

La plateforme ou géoportail permettrait aussi de mieux concerter et de favoriser les **synergies** localement, pour des enjeux spécifiques (exemple des études en cours concernant la dynamique d'assèchement du lac des Brenets / Chaillexon, le renouvellement des concessions des barrages hydroélectriques, etc.).

12. Conclusion

Le projet KARSYS Doubs CH/FR a permis de dresser une **synthèse hydrogéologique du Doubs transfrontalier** entre sa source et le village de Brémoncourt par application de l'approche **KARSYS**. Les résultats du projet apportent une compréhension globale de la structuration des **aquifères karstiques** qui entretiennent des relations hydrogéologiques avec le cours d'eau (alimentation, drainage) et des modalités de ces relations. Ils offrent pour la première fois sur le bassin – indépendamment des frontières administratives - une cartographie de **89 nappes karstiques** (zones noyées) des **3 principaux compartiments aquifères** (Crétacé, Jurassique sup. et Jurassique moy.), principales réserves / ressources en eau souterraine de la région et la direction des principaux écoulements souterrains. Un schéma hydrologique/hydrogéologique fonctionnel de l'amont vers l'aval est ainsi proposé. Il présente les principales **zones d'infiltration** (pertes du Doubs vers le sous-sol) et **d'exfiltration** (alimentation du Doubs par les eaux souterraines) à travers la description des principaux **systèmes d'écoulement** côté Suisse et France qui interagissent avec le cours d'eau. Une **cinquantaine de systèmes d'écoulements hydrogéologiques** ont été identifiés de part et d'autre de la frontière administrative et partiellement documentés.

Les résultats du projet KARSYS Doubs CH/FR sont proposés sous la forme (i) de modèles géologiques 3D disponibles sur visualkarsys.com, (ii) de données vectorielles SIG, (iii) de cartes au format .pdf et (iv) de rapports et de notes écrites qui tous composent un ensemble cohérent pour lequel il convient de conserver la structure.

En complément à cette synthèse, des focus plus complets sont proposés côté français sur les bassins des **Ressources Karstiques Majeures** (RKM), identifiées comme des ressources stratégiques actuelles ou futures pour l'alimentation en eau potable qui doivent faire l'objet d'une gestion / protection particulière via la délimitation de **zones de sauvegarde**.

Cette synthèse régionale met aussi en évidence un certain nombre de **lacunes** en termes de données et d'informations, que ce soit sur le plan **géologique** ou **structurale** mais aussi sur le plan **hydrologique** et **hydrogéologique**, et ce des deux côtés de la frontière. A ces lacunes s'ajoutent aussi certaines informations contradictoires avec lesquelles il faut composer, à défaut de pouvoir être toutes vérifiées.

Cette synthèse doit donc être consultée et considérée comme un **travail évolutif** qu'il conviendra de mettre à jour au fur et à mesure des investigations complémentaires ou à l'occasion d'autres études qui apporteront des informations sur les secteurs et/ou les paramètres qui font défaut. La question de **la mise à jour de ces informations** et de leur **accessibilité** doit donc se poser dès à présent afin de garantir la meilleure pérennité possible à ce travail.

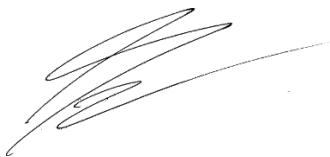
A ce stade, les résultats de l'étude montrent que le bassin hydrogéologique transfrontalier du Doubs est **capturé** à différents endroits par celui d'autres cours d'eau : la Loue, l'Ain, la Jougrena, mais aussi probablement l'Areuse, la Saine et potentiellement le Dessoubre. Le régime hydrologique du Doubs est donc passablement conditionné par ces captures qui se produisent surtout dans la partie amont du bassin (alt. > 500 m). Une petite partie de son alimentation est en outre **drainée** via le tunnel ferroviaire du Mont d'Or et alimente maintenant l'Orbe (CH). Dans la partie aval, en revanche, le Doubs **reçoit d'importantes contributions d'eau souterraine**, souvent méconnues, mais qui représentent des ressources potentiellement intéressantes.

Les travaux **d'étanchéification**, de **colmatage**, de construction des barrages, de rehaussement de lac, de drainage (tunnels du Mont-d'Or) ou de rejets (eau de la ville de la Chaux-de-Fonds prélevées dans l'Areuse et réinfiltrées vers le Doubs) sont autant de facteurs qui ont entraîné des modifications du régime hydrologique du cours d'eau, avec des effets qui ont pu se compenser avec le temps.

La **modélisation de l'hydrologie actuelle** du cours d'eau est donc relativement complexe, car elle dépend non seulement des conditions naturelles (captures, retenues d'éboulement), des conditions hydrauliques dans

les différents aquifères (alimentation par les exutoires de trop-plein des sources karstiques), mais aussi des différents aménagements existants (barrages, drainages, rejets, etc.). A termes, il sera toutefois nécessaire et intéressants de disposer d'un modèle de recharge distribué le long du cours d'eau afin d'améliorer la gestion des eaux et d'évaluer l'impact d'aménagements (travaux de colmatage, nouveaux prélèvements, etc.) à courts termes ou à moyens ternes avec la perspective des changements climatiques.

La Chaux-de-Fonds, le 12 févr. 2025



Dr. Arnauld Malard
Hydrogéologue



Dr. Pierre-Yves Jeannin
Hydrogéologue

13. Références bibliographiques

Des ressources documentaires sont accessibles sur le site ORISK³⁵.

- Affolter, T., Gratier, J.-P., 2004. Map view retrodeformation of an arcuate fold-and-thrust belt: The Jura case. *J. Geophys. Res.* 109, B03404. <https://doi.org/10.1029/2002JB002270>
- AQUARIUS, Aquabug, PhycoEco, 2012. Bassin du Doubs Neuchâtelois. Diagnostic pluridisciplinaire des eaux de surface. Rapport principal. Département de la gestion du territoire.
- Artelia, 2023. Le changement climatique et ses effets sur les ressources en eau à l'échelle de l'EPAGE et du SAGE Haut-Doubs Haute-Loue en vue d'une stratégie d'adaptation. Etude prospective. Rapport de phase 1. (No. 8 77 7608 – V1). Artelia, 93400 Saint-Ouen-sur-Seine.
- Aubert, D., 1963. 1202 Orbe, in: Suisse, C.G. (Ed.), *Atlas Géologique de La Suisse 1/25000 Notice Explicative*. p. 20.
- Aubert, D., 1953. La tectonique du Mont d'Or (Jura vaudois) et le décrochement de Vallorbe-Pontarlier. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 46/2, 175–186.
- Aubert, D., 1945. Les pertes du lac Brenet (vallée de Joux). *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles* 63, 453–462.
- Aubert, D., 1941. 1221 Le Sentier, in: *Atlas Géologique de La Suisse 1/25000 Notice Explicative*. Commission Géologique Suisse, p. 25.
- Audra, P., 2010. Grottes et karsts de France, in: *Karstologia Mémoires*. Association Française de Karstologie, p. 360.
- Aufranc, J., Jordan, P., Piquerez, A., Hofmann, B., Andres, B., Burkhalter, R., 2017. 1125 Chasseral, in: Kommission, S.G. (Ed.), *Geologischer Atlas Der Schweiz 1/25 000. Erläuterungen*. p. 163.
- Aufranc, J., Jordan, P., Piquerez, A., Kälin, D., Burkhalter, R., 2016. 1105 Bellelay (avec partie de 1104 Saignelégier), in: *Atlas Géologique de La Suisse 1/25'000, Notice Explicative*.
- Augier, C., Barlier, J., Biens, P., Castelo Branco, F., Derumaux, F., Guillemot, J., Guvenc, T., Jean, F., Melières, F., Pierron, J.M., Rouxel, R., Weber, R., 1950. *Carte géologique de la France 1/50 000 [504], Maîche* (avec notice expl.).
- Bailly, C., 1979. Étude géologique de la vallée du Doubs et de ses abords à l'est de Saint-Hippolyte (Doubs) (PhD Thesis). Ph. D thesis defended at the University of Besançon.
- Barlier, J., Basseto, D., Bauer, J., Guillemot, J., Souffès-Desprè, A., Vernhes, P., 1949. *Carte géologique de la France 1/50 000 [505], Damprichard* (avec notice expl.).
- Basseto, D., 1958. Etude géologique dans le Jura du Doubs.
- Bell, E., 1931. *Monographie de la vallée du Doubs entre les Brenets et Biaufond*. Imprimerie Paul Attinger SA.
- Bertrand, C., Mudry, J., 2010. Le karst franc-comtois. *Bull. Soc. Hist. Nat. Doubs* 93, 71–80.
- Bertrand, J., 1988. Campagne de sondages profonds. Région de Tramelan. Données pour la protection et la gestion de l'eau souterraine du canton de Berne. Direction des transports, de l'énergie et des eaux du canton de Berne.
- Bichet, V., 1997a. Etude hydrogéologique globale du Jura karstique dans le département du Jura (Etude hydrogéologique). Jura.
- Bichet, V., 1997b. Impact des contraintes environnementales sur la production sédimentaire d'un bassin versant jurassien au cours du postglaciaire: Le système limnologique de Chaillelon (Doubs-France) (PhD thesis). Université de Bourgogne.
- Bichet, V., Campy, M., 2009. *Montagnes du jura, géologie et paysages*. Besançon, Néo éditions.
- Bitterli, P., 1973. Erdölgeologische Forschungen im Jura. *Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und - Ingenieure* 39, 13–28.
- Blant, M., Tullii-Bolle, M.-P., Blant, D., Jeannin, P.-Y., Jacquat, M., Skartsounis, D., Musy-Ramseyer, S., Burri, P., Montandon, P.-E., Rod, J., Georgen, M., Charrière, E., 2003. Point(s) d'eau. Direction des affaires culturelles de la ville de La Chaux-de-Fonds.
- Bossart, P., Bernier, F., Birkholzer, J., Bruggeman, C., Connolly, P., Dewonck, S., Fukaya, M., Herfort, M., Jensen, M., Matray, J.-M., Mayor, J.C., Moeri, A., Oyama, T., Schuster, K., Shigeta, N., Vietor, T., Wieczorek, K., 2017. *Mont Terri rock laboratory*, 20

³⁵ Observatoire du Risque Inondation, de la Sécheresse et du Karst (<https://orisk-bfc.fr/>)

- years of research: introduction, site characteristics and overview of experiments. Swiss J Geosci 110, 3–22. <https://doi.org/10.1007/s00015-016-0236-1>
- Bossy, F., Zwahlen, F., 2004. Réhabilitation de la galerie des Moyats - conditions hydrogéologiques et hydrochimie des eaux captées aux Moyats et dans la galerie Bossy. CHYN, Neuchâtel, Suisse.
- Both, J., Bulle, J., Cassedanne, J., Chauve, M., Colas, G., Dreyfuss, M., Grandjacquet, C., Sainton, C., Ziegler, M., 1930. Carte géologique de la France 1/50 000 [530], Ornans (avec notice expl.).
- Bourquin, P., Suster, H., Buxtorf, A., 1946. 114 Biaufond 115 Les Bois 116 La Ferrière 117 St-Imier avec parties limitrophes des feuilles 83 Le Locle et 130 La Chaux-de-Fonds et le versant français de la vallée du Doubs, in: Kummerly & Frey S. A., Edition géographique, B. (Ed.), Atlas Géologique de La Suisse 1/25 000. Notice Explicative. Commission Géologique de la soc. helv. des sciences naturelles, p. 62.
- Burger, A., 1989. Etude des ressources en eaux souterraines des calcaires tertiaires, crétacés et jurassiques du synclinal du Locle. Services industriels, Le Locle, Suisse.
- Burger, A., 1986. L'hydrogéologie dans les gorges de l'Areuse.
- Burger, A., 1978. Etude géologique et hydrogéologique en vue de la réalisation d'un ouvrage de captage d'eau potable dans le synclinal de la Brévine. Université de Neuchâtel.
- Burger, A., 1959. Hydrogéologie du bassin de l'Areuse. Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel.
- Burger, A., Persoz, F., 1983. Barrage du Châtelot - Examen géologique des rives et versants du Lac de Moron et du barrage. Institut de géologie, Université de Neuchâtel.
- Burger, A., Schaer, J.-P., 1996. La vallée du Locle - Oasis jurassienne, in: Attinger, E.G. (Ed.), Cahier de l'Institut Neuchâtelais. p. 246.
- Buser, M., Paupe, N., 2021. Les fours à chaux de Saint-Ursanne. Une mine d'histoires, Société jurassienne d'émulation. ed. Alphil.
- Buxtorf, A., 1922. Das Längenprofil des schweizerisch-französischen Doubs zwischen dem Lac des Brenets und Soubey. Eclogae geol. Helv. 16, 5, 527–537.
- Cabinet Reilé, 2018. Campagnes de reconnaissance des pertes du Doubs par traçages. Cabinet REILE, 7, rue P. Dubourg, Villa St-Charles - 25 720 BEURE.
- Cabinet Reilé, 2009. Pollution aux Hydrocarbures des eaux de la MORTE – Bassin du Doubs. Commune de VERRIERES DE JOUX. Expertise par Multi-traçage. Cabinet REILE, 7, rue P. Dubourg, Villa St-Charles - 25 720 BEURE.
- Cabinet REILE, 2008. Déclaration au titre de la loi sur l'eau_Commune de Morteau, forage de reconnaissance et recherche de nouvelle ressource en eau. Morteau.
- Cabinet Reilé, 2005. Etude des pertes du cours de la Reverotte. Prospections géophysiques par polarisation spontanée. Jaugeages. Interprétation du phénomène karstique / Propositions d'aménagements. PHASE A.
- Caë, T., 2016. Interprétation structurale et équilibre mécanique : La calcul à la rupture appliqué aux chaînes d'avant-pays. Cas du Jura. Université de Cergy-Pontoise.
- Caille, C., 1997. Etude globale du Jura karstique. Sciences Environnement.
- Campy, M., 1982. Le Quaternaire franc-comtois. Essai chronologique et paléoclimatique. Université de Franche-Comté.
- Castany, G., Chauve, P., Dreyfuss, M., François, S., Glangeaud, L., Tricart, J., 1930. Carte géologique de la France 1/50 000 [557], Pontarlier (avec notice expl.).
- Caudron, A., Marteau, B., 2024. Cartographie thermique par infra-rouge thermique aéroporté (IRTA) du Doubs moyen et amont, du Dessoubre et du Cusancin. Scimabio Interface, 74200 Thonon-les-Bains, France.
- Cautru, J.P., 1974. Géologie du souterrain du Col des Roches. BRGM.
- CGE, 1945. Aménagement de la chute du Châtelot, Doubs franco-suisse - carte géologique 1/10'000. Compagnie Générale d'Electricité - Distribution d'Energie, Services Techniques.
- Charlier, J.-B., Ladouche, B., Vallet, A., Idoux, A., Allanic, C., Bailly-Comte, V., Benoît, S., Le Mesnil, M., Selles, A., 2024. NUTRI-Karst – Echanges karst-rivière et fonctionnement hydrogéologique des aquifères du bassin de la Loue. Rapport final de la Tâche 2 (No. BRGM/RP-73496-FR). BRGM Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
- Chauve, P., Choulot, S., Cornu, S., Rollet, M., Schmidt, S., 1995. Études géologiques dans le secteur Doubs-Loue à l'aval de Pontarlier - Cartographie géologique et structurale - Rapport LGSA, inédit. LGSA.
- Chauve, P., Dreyfuss, M., Guillaume, S., Tricart, J., 1943. Carte géologique de la France 1/50 000 [583], Mouthe (avec notice expl.).
- Chauve, P., Jacquemin, P., Mania, J., 1986. Représentation des écoulements en milieu karstique de zone plissée: exemple des hauts

- bassins du Doubs et de la Loue. Bull. Soc. géol. France 8, 645–652.
- Chauve, P., Martin, J., Bailly, C., 1985a. Notice explicative de la feuille Delle à 1/50 000, in: Carte Géologique de La France à 1/50 000. BRGM, p. 33.
- Chauve, P., Martin, J., Bailly, C., 1985b. Carte géologique de la France 1/50 000 [475], Delle (avec notice expl.). Éditions B.R.G.M. -B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX- FRANCE.
- Claudon, G., 1977. Etude hydrogéologique de la plaine de Pontarlier. Thèse Université de Franche-Comté.
- CLE, 2015. Plan de gestion de la ressource en eau sur le sous-bassin versant du Haut-Doubs (adopté par la Commission Locale de l'Eau Haut-Doubs Haute-Loue le 6 nov. 2015).
- Colin, E., Mettetal, J.P., Martin, D., Ruotolo, J.M., Pourcelot, M., Moustache, A., 1995. Étude du système hydrologique Doubs-Loue (Pertes du Doubs - Sources de la Loue). DIREN Franche-Comté.
- Cornet, J., 1979. Pollution de la source du Bies de Brand à Saint-Hippolyte (25). Mission d'expertise affaire Guinchard (No. 79- SGN-186- FRC). BRGM - Service Géologique National.
- Cornet, J., 1977. Etude hydrogéologique préliminaire documentaire et d'orientation en vue du renforcement de l'alimentation en eau potable des communes du Mont-d'Or (25) (No. 77 SGN 388 JAL). BRGM Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
- Cornet, J., Putallaz, J., 1979. Étude de la qualité et de la vulnérabilité des sources captées pour l'alimentation en eau potable de la haute vallée du Doubs entre Morteau et Goumois (No. 79 SGN 010 FRC). Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM), Service géologique régional Franche-Comté.
- De Bosset, C., 1965. Recherches hydrogéologiques - Sondages profonds 1963-1965.
- Diebold, P., 1960. Geologie des Gebietes von Siegfriedblatt Ocourt, Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz. Commission Géologique Suisse, Bern.
- DREAL BFC, 2017. Avis de l'Autorité Environnementale relatif au projet de forage des "Planches aux Veaux" sur la commune de Goumois (Doubs). Avis BFC-2017-1210.
- Duboz, P., 1979. Étude géologique de la région de Damprichard et de Goumois (Doubs) (PhD Thesis).
- Duraffourg, M., Palacio, P., 1981. Etude géologique, géophysique, géotechnique et hydrogéologique du synclinal de Frasne-Bonnevaux (Doubs). Franche-Comté, Besançon.
- eaufrance, 2013a. Ressource karstique majeure pour l'alimentation en eau potable (AEP), N°31. Source Martin, Doubs.
- eaufrance, 2013b. Ressource karstique majeure pour l'alimentation en eau potable (AEP), N°24. Source du Moulin Bournez et puits Cinquin, Doubs.
- eaufrance, 2013c. Ressource karstique majeure pour l'alimentation en eau potable (AEP), N°35. Source de la Saine, Jura.
- Eichenberger, U., Aufranc, J., Pietra, L., Pictet, A., Gogniat, S., 2020. 1143 Le Locle, in: Atlas Géologique de La Suisse 1/25000. Notice. Swissstopo.
- Falconnet, J.-L., Gautier, A., Guillemin, Y., Masson, J.-P., Rouault, J.-Y., Simonin, G., Valero, L., Vergon, J.-P., 1991. Le Dessoubre - Délimitation et caractéristiques du bassin d'alimentation - Etude des apports, charges véhiculées et sources de pollution - Influences sur les édifices biologiques. Conseil Général du Doubs.
- Fallot, P., Perrodon, A., 1968. Carte géologique de la France 1/50 000 [531], Morteau (avec notice expl.), in: BRGM (Ed.), BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières. BRGM.
- Flury, F., Allemand, R., Lachat, R., 1991. Recherche d'eau par forages dans l'aquifère profond du Malm à Delémont. Résultats de la phase d'exploration. Gaz-Eaux-Eaux usées 12, 841–849.
- Forestier, G., Verez, C., 1978. Etude de la fracturation du plateau d'Ornans (doubs). Université de Franche-Comté.
- Fournier, E., 1926. Les eaux souterraines. Sources, résurgences, exurgences et nappes aquifères, Imprimerie de l'Est. ed, Explorations souterraines et Recherches hydrologiques en Franche-Comté. Besançon.
- Fournier, E., 1900. Les réseaux hydrographiques du Doubs et de la Loue dans leurs rapports avec la structure géologique. Annales de Géographie 219–228.
- François, S., Glangeaud, L., Lienhardt, G., Lienhardt, M.-J., 1957. Résultats de la campagne de recherches hydrogéologiques dans la région de Métabief (Doubs) (No. BRGM/BRGG-A1269). BRGM Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
- Gauby, E., 1993. Hydrodynamique, transport de polluants et modélisation en milieu fluvio-glaciaire

(application à la nappe alluviale de la plaine de Pontarlier-Doubs) (Docteur de l'université de Franche-Comté, spécialité : Sciences de la Terre). Franche-Comté, Besançon.

Geo-Energie Suisse, 2014. Projet pilote de géothermie profonde Haute-Sorne - rapport technique. Geo-Energie Suisse SA, Reitergasse 11, 8004 Zurich.

Gigon, R., Wenger, R., 1986. Inventaire spéléologique de la Suisse, Tome II, Canton du Jura. Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften, Porrentruy.

GIPEK, 2004. Inventaire spéléologique du Doubs, tome 4, partie du sud-est (haute chaîne).

GIPEK, 1996. Inventaire spéléologique du Doubs, tome 3 - Partie Centre, GIPEK, Gouplement pour l'Inventaire, la Protection et l'Etude du Karst. ed.

Gogniat, S., Montandon, P.E., Miserez, J.J., 1996a. Estimation de l'influence des rejets de la STEP de La Chaux-de-Fonds sur quelques sources des Côtes du Doubs (Haut Jura neuchâtelois, Suisse). Bulletin d'Hydrogéologie 15, 63–77.

Gogniat, S., Montandon, P.E., Miserez, J.J., 1996b. Jaugeage de la source karstique de la Rasse (Haut Jura neuchâtelois, Suisse). Bulletin d'Hydrogéologie.

Gretillat, P.A., 1996. Aquifères karstiques et poreux de l'Ajoie (JU, Suisse). Eléments pour la carte hydrogéologique au 1:25'000. Université de Neuchâtel, Neuchâtel / Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel.

Gruber, M., 2017. Structural Investigations of the Western Swiss Molasse Basin – From 2D Seismic Interpretation to a 3D Geological. Université de Fribourg, Département des Géosciences.

Guillaume, S., Guillaume, A., 1965. Carte géologique de la France 1/50 000 [582], Champagnole (avec notice expl.).

Guillaume, S., Guillaume, A., Glangeaud, L., Olive, P., 1968. Carte géologique de la France 1/50 000 [605], Morez-Bois d'Amont (avec notice expl.).

Hapka, R., Ballmer, R.A., Blant, D., De Giampietro, M., Grossier, J., Hänni, B., Ligier, N., Raguin, C., 2018. Les sources franco-suisses dans les lacs des Brenets et de Moron. Cavernes 16–31.

Hauber, L., Pfrinter, U., 1992. Hydrogeologische Karte der Schweiz. Biel / Bienne, in: Kommission, S.G. (Ed.), Hydrogeologische Karte Der Schweiz 1:100'000. Erläuterungen. Schweizerische Geotechnische Kommission, ETH-Zentrum, 8092 Zürich, p. 83.

Hessenauer, M., Rieben, C., Flury, F., 2001. Prospection d'eau souterraine par forages

profonds à Muriaux (Canton du Jura). Bulletin de Géologie Appliquée 6, 147–164.

Huggenberger, P., Epting, J., Affolter, A., Zechner, E., 2010. Concepts for transboundary groundwater management in a region of extensive groundwater use and numerous contaminated sites, in: Proceedings of the International Conference "Transboundary Aquifers: Challenges and New Directions" (ISARM2010), Paris. Paris, France, p. 6 p.

HydroGEOS, 2010. H20 - Le Col des Roches - Bas du Reymond. Reconnaissances géologiques, hydrogéologiques et géotechniques par forages carottés, essais in-situ et en laboratoire. Service des Ponts et Chaussées, Neuchâtel.

HydroGEOS, 2009. H20 - Col des Roches - bas du Reymond. Etude de tracés par approche géologique, hydrogéologique et géotechnique. Département de la gestion du territoire, service des Ponts et Chaussées du canton de Neuchâtel.

Idées Eaux, 2013. Identification des ressources karstiques majeures pour l'alimentation en eau potable en vue de leur protection sur une partie du massif du Jura, Volume 3. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.

ISSKA, 2024a. KARSYS Doubs. Ressources karstiques majeures. Délimitation des zones de sauvegarde. Rapport méthodologique. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, 2300 La Chaux-de-Fonds, Neuchâtel, Suisse.

ISSKA, 2024b. Captage hydroélectrique de l'Areuse souterraine. Etape 1: Synthèse des données existantes (Rapport d'étude à l'attention du Groupe-E SA).

ISSKA, 2024c. N20 - évitement Le Locle (NE). Modèle KarstALEA de prévision des risques liés au karst [mise à jour avril 2024]. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, 2300 La Chaux-de-Fonds, Neuchâtel, Suisse.

ISSKA, 2023a. KARSYS Doubs transfrontalier (CH/FR). Cartes Karst & Cartes épaisseur couverture 1/50'000. Note technique. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, 2300 La Chaux-de-Fonds, Neuchâtel, Suisse.

ISSKA, 2023b. LGEO / Resource eau souterraine Karst. Jura vaudois. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, 2300 La Chaux-de-Fonds, Neuchâtel, Suisse.

ISSKA, 2023c. Lac des Brenets (NE) Inventaire des connaissances hydrogéologiques. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, 2300 La Chaux-de-Fonds, Neuchâtel, Suisse.

ISSKA, 2020a. Indicateurs du volume des réserves d'eau souterraines dans les systèmes

karstiques suisses en situation d'étiage. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, 2300 La Chaux-de-Fonds, Neuchâtel, Suisse.

ISSKA, 2020b. Indicateurs de sécheresse des systèmes karstiques. Application au Jura suisse. Rapport d'étude. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, 2300 La Chaux-de-Fonds, Neuchâtel, Suisse.

ISSKA, 2018. Evaluation de l'impact potentiel du viaduc de l'A16 Transjurane sur le fonctionnement hydraulique de l'estavelle du Creugenat.

ISSKA, 2017. Au fil du Doubs. Guide d'excursion des Brenets à Saint-Ursanne. ISSKA.

ISSKA, 2012a. Synthèse hydrogéologique des systèmes karstiques du canton de Berne.

ISSKA, 2012b. Etude hydrogéologique (approche KARSYS) en vue du suivi des décharges de La Chaux-de-Fonds. SENE - Service de l'énergie et de l'environnement, Neuchâtel.

ISSKA, 2010. Captage hydroélectrique de l'Areuse souterraine : Etude de faisabilité. Synthèse et analyses critiques des données existantes.

Itty, J., Vintaer, J., 1987. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Haut bassin de l'Ain (Troisième cycle en géologie appliquée). Franche-Comté, Besançon.

Javey, C., 1980. Possibilités géothermiques en Franche-Comté. Réservoirs souterrains profonds au nord d'une ligne Dôle - Morteau. 1ère partie: Géologie des réservoirs profonds (No. BRGM / 80 SGN 619 FRC). Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM), Service géologique régional Franche-Comté.

Javey, C., Scanvic, J.Y., Dufond, L., Perron, P., 1987. Inventaire des aquifères semi-profonds de Franche-Comté pour une utilisation énergétique (No. 87 SGN 021 FRC). Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM).

Jeanblanc, A., Schneider, G., 1981. Etude géologique et hydrogéologique du Risoux. Mont d'Or. Thèse de 3ème cycle. Université de Besançon.

Jeannin, P.Y., Eichenberger, U., Sinreich, M., Vouillamoz, J., Malard, A., Weber, E., 2013. KARSYS: a pragmatic approach to karst hydrogeological system conceptualisation. Assessment of groundwater reserves and resources in Switzerland. *Environmental Earth Sciences* 69(3), 999–1013.

Jeannin, P.-Y., Malard, A., 2020. Captage du puits de La Brévine (NE): évaluation de la ressource et des zones de protection. Rapport d'étude. ISSKA, Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, La Chaux-de-Fonds, Suisse, La Chaux-de-Fonds.

Jeannin, P.Y., Wenger, R., 2013. Les Moulins du Col-des-Roches, une grotte au destin exceptionnel. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie et Moulins souterrains du Col-des-Roches.

Jonac, R., 1974. Contribution à l'étude climatologique, hydrologique et hydrogéologique du bassin de l'Ain (01) (No. 74 SGN 058 JAL). Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM), Service géologique régional Jura-Alpes.

Kiraly, L., 1973. Notice et carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel, in: Bulletin de La Société Neuchâteloise de Sciences Naturelles. Institut de Géologie, Université de Neuchâtel, Centre d'Hydrogéologie, p. 20.

Kiraly, L., Morel, G., 1976. Etude de la régularisation de l'Areuse par modèle mathématique. Bulletin du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel 1, 19–36.

Kovács, A., Jeannin, P.Y., 2003. Hydrogeological overview of the bure plateau, ajoie, switzerland. *Eclogae geol. Helv.* 96, 367–379.

Lagie, B., Nagel, J.L., 2008. Carte géologique harmonisée du département du Doubs. Notice technique. Rapport final BRGM/RP-55929-FR (manual No. BRGM/RP-55929-FR).

Laubscher, H., 1948. Geologie des Gebietes von Siegfriedblatt St-Ursanne. Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz, Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz N.F. 92, 61.

Laubscher, H.P., 1963. 1085 St-Ursanne, in: der schweiz. naturforsch. gesellschaft, S.G.K. organ (Ed.), *Geologischer Atlas Der Schweiz 1/25 000. Erläuterungen*, p. 27.

Liboz, S., 2019. Prospection d'une nouvelle ressource en eau potable dans le Tunnel du Mont d'Or. Compte-rendu des tests de production de longue durée de novembre 2018 à mai 2019 (No. 2018-236). Sciences Environnement - Agence de Besançon.

Mages, J.F., 1993. Etude géologique et hydrogéologique de la région de la Chaux-de-Fonds - la Ronde - Le Valanvron. Action COST-65, projet N°3.1 (rapport non publié).

Mages, J.F., 1992. Action COST 65 - projet no 3.1 la ronde: Présentation géologique et hydrogéologique de la région de la Chaux-de-Fonds - la Ronde - Valanvron. Bureau J.F. Mages Géologues-Hydrogéologues Conseils.

Malard, A., 2018. Hydrogeological characterization of karst aquifers in Switzerland using a pragmatic approach. University of Neuchâtel.

Malard, A., Jeannin, P.Y., 2022. Inferring karst conduits organization from the use of hydraulic

models; application to the Beuchire-Creugenat flow-system (JU, Switzerland), in: Proceedings of the 18th International Congress of Speleology, Savoie Mont-Blanc, France, July 2022.

Malard, A., Jeannin, P.Y., Sinreich, M., Weber, E., Vouillamoz, J., Eichenberger, U., 2014a. Praxisorientierter Ansatz zur kartographischen Darstellung von Karst-Grundwasserressourcen - Erfahrungen aus dem SWISSKARST-Projekt. Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 19(4), 237–249.

Malard, A., Jeannin, P.Y., Vouillamoz, J., Weber, E., 2015. An integrated approach for catchment delineation and conduit-network modeling in karst aquifers: application to a site in the Swiss tabular Jura. Hydrogeology Journal 23(7), 1341–1357.

Malard, A., Jeannin, P.Y., Vouillamoz, J., Weber, E., 2013. Documenting swiss karst aquifers using KARSYS approach - examples of recent applications, in: Proceeding of the 16th International Congress of Speleology, July 21st to 28th 2013, Brno, Czech Republic - Volume 2. pp. 360–365.

Malard, A., Jeannin, P.Y., Weber, E., Vouillamoz, J., 2014b. Assessing karst aquifers in switzerland: The 2010/2013 swisskarst project, in: al., G.L. et (Ed.), Engineering Geology for Society and Territory - Volume 3, River Basins, Reservoir Sedimentation and Water Resources. Springer International Publishing Switzerland 2014, pp. 569–572.

Malard, A., Vouillamoz, J., Weber, E., Jeannin, P.Y., 2012. Swisskarst Project – toward a sustainable management of karst water in Switzerland. Application to the Bernese Jura, in: Actes Du 13e Congrès National de Spéléologie, Muotathal, Suisse. 29 Sept Au 01 Oct 2012. pp. 215–219.

Mania, J., Chauve, P., Elyès, G., Klein, D., Chambaudet, A., 1995. The radon anomalies into the karstic system of the Haut-Doubs-country (Franche-Comté, France). Environmental Geochemistry and Health 16 (1994), 305–315.

Mathon, C., 2000. Mine de lignite de Grand-Denis, commune de Flangebouche (Doubs). Visite de la galerie du site A1 accessible depuis la colonie "Gai Soleil" (No. BRGM/RP-50048-FR). Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM).

Meier, N., 1999. Etude sédimentologique et cartographie de la vallée de la Brévine. Institut de Géologie - Université de Neuchâtel.

Merle, A., 1905. Les Gîtes minéraux et métallifères et les eaux minérales du département du Doubs. Typographie et Lithographie Jacquin, Besançon.

Mettetal, J.P., Mudry, J., 1996. Le karst de la Loue et ses relations avec le Doubs (Franche-Comté), in: Séminaire "Pour Une Gestion Active Des Ressources En Eau d'origine Karstique", Montpellier, 27-29/11/1996 - Rapport BRGM R 40126. pp. 103–118.

Meury, P.X., 1984. Essai de coloration à la perte du moulin de Plain de Saigne Montfaucon. Jura. Spéléo-club Jura, commission scientifique de la Société Suisse de Spéléologie.

MFR, 2004. Sonde géothermique. MFR Géologie-Géotechnique, 2503 Bienne, Suisse.

MFR, 2002. Sondage COMB 2. MFR Géologie-Géotechnique SA, 2503 Bienne, Suisse.

MFR, 1997. Mise en valeur des ressources en eau souterraine du plateau des Franches-Montagnes. Rapport final. MFR Géologie-Géotechnique SA, 2503 Bienne, 2800 Delémont, 2300 La Chaux-de-Fonds, Suisse.

Mouchet, P., 1995. Le Kimmeridgien du Jura central. Microfaciès, minéralogie et interprétation séquentielle. Université de Neuchâtel, Suisse.

Mudry, J., 2009. Géologie et eaux souterraines en Franche-Comté. Géologues 56–62.

Muhlethaler, C., 1931a. Etude géologique de la région des Verrières. Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles 56, 123–302.

Muhlethaler, C., 1931b. 276 La Chaux, 277 Les Verrières, in: Atlas Géologique de La Suisse 1/25 000. Notice Explicative. Commission Géologique Suisse, p. 6.

Mühlethaler, C., 1930. 1162 Les Verrières, in: Atlas Géologique de La Suisse 1/25 000. Notice Explicative.

Nagel, J.L., 2007. Carte géologique harmonisée du département du Jura. Notice géologique. Rapport final BRGM/RP-55733-FR (No. BRGM/RP-55733-FR).

NAGRA, 1988. Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz. Sedimentstudie - Zwischenbericht 1988 (Technischer Bericht No. NTB 88-25). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, NAGRA, Parkstrasse 23, 5401 Baden, Schweiz.

Nolthenius, A.B.T., 1921. Etude géologique des environs de Vallorbe (Canton de Vaud),, in: Matériaux Pour La Carte Géologique de La Suisse, XLVIII. A. Francke S.A., Berne, p. 127.

Nuffer, R., 1974. Hydrologie souterraine des bassins de la Haute-Loue et du Lison. Cavernes. Bulletin des sections neuchâteloises de la société suisse de spéléologie.

- Pascal, M., 1976. Tunnel de Remonot. BRGM.
- Pasquier, F., Bichet, V., Zwahlen, F., 2006. Vallorbe - Léman nord, in: Commission Géotechnique Suisse (SGTK) et Office fédéral de topographie, S. géologique national (Ed.), Carte Hydrogéologique de La Suisse 1:100 000. p. 102.
- Pasquier, F., Burkhard, M., Mojon, P.-O., Gogniat, S., 2013. 1163 Travers, Notice explicative 162, in: Atlas Géologique de La Suisse 1/25 000. Notice Explicative. CH-3084 Wabern, p. 148.
- PGN, G. de travail, 2008. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN). Vol. 1: Rapport final, Vol. 2: Annexes. Centre de recherche en géothermie, Université de Neuchâtel, Suisse.
- Philippe, Y., 1995. Ramps latérales et zones de transfert dans les chaînes plissées: géométrie, condition de formation et pièges structuraux associés. Université de Savoie.
- Philippe, Y., Colletta, B., Deville, E.P., Mascle, A., 1996. The Jura fold-and-thrust belt: a kinematic model based on map balancing, in: Peri-Tethys Memoir 2. p. 32.
- Piquerez, A., 2014. Source de Blanches-Fontaines, Haute-Sorne (Jura suisse). Etude hydrogéologique de la source et de son système karstique. Centre d'hydrogéologie de l'université de Neuchâtel (CHYN).
- Pointet, T., 1974. Tunnel du Bouquet (Doubs). Etude géologique. Etude des venues d'eau d'origine karstique (No. 74 SGN 102 JAL). BRGM - Service Géologique National.
- Rabin, M., Sue, C., Valla, P.G., Champagnac, J.-D., Carry, N., Bichet, V., Eichenberger, U., Mudry, J., 2015. Deciphering neotectonics from river profile analysis in the karst Jura Mountains (northern Alpine foreland). Swiss J Geol 26.
- Rangheard, Y., Demarcq, G., Mongereau, N., Pharisat, A., Pouyet, S., Truc, G., 1985. Le Miocène du val des Verrières et du bief des Lavaux (Jura central, haute-chaîne): Événements paléobiogéographiques et géodynamiques. Geobios 18, 769–785.
- Reilé, P., 2020. Campagnes de reconnaissance des pertes du Doubs -Explorations et traçages. Le Karst Comtois 2, 32–46.
- Rickenbach, E., 1925. Description géologique du Val-de-Travers, du cirque de Saint-Sulpice et de la vallée de la Brévine. Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich.
- Rieben, C., 2000. Multitraçage dans la partie centrale des Franches-Montagnes, Jura. Bulletin d'Hydrogéologie du CHYN 18, 49–62.
- Rieben, C., 1983. Etude géologique de l'anticlinal de Pouillerel, Le Locle Nord et étude sur le Malm par microfaciès (Master's Thesis). Unis ETH/EPF.
- Rigassi, D., Weidmann, M., 2011. 1182 Ste-Croix, in: Atlas Géologique de La Suisse 1/25 000. Notice Explicative. Service géologique national, CH-3084 Wabern, p. 140.
- Rime, V., Sommaruga, A., Schori, M., Mosar, J., 2019. Tectonics of the Neuchâtel Jura Mountains: insights from mapping and forward modelling. Swiss J Geosci 112, 563–578. <https://doi.org/10.1007/s00015-019-00349-y>
- Robaux, A., 1948. Etude géologique de la région sud d'Orchamps-Vennes; les chevauchements du Mont-Miroir et du cirque de N.-D.-de-Consolation. Bulletin de la Société Géologique de France S5-XVIII, 123–138. <https://doi.org/10.2113/gssgbull.S5-XVIII.1-3.123>
- Rollier, L., 1893. Structure et histoire géologique de la partie du Jura central comprise entre le Doubs (La Chaux-de-Fonds), le val de Delémont, le lac de Neuchâtel et le Weissenstein, (Premier supplément à la 2nde éd. de la Feuille VII de la carte géologique de la Suisse au 1/100'000).
- Schardt, H., 1917. Geologische und hydrologische Beobachtungen über den Mont d'Or-Tunnel und dessen anschliessende Gebiete. Schweizerische Bauzeitung 69/70, 261–264.
- Schardt, H., 1910. Le cours souterrain de la Ronde. Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles 37, 364–379.
- Schardt, H., 1909. Mélanges géologiques sur le Jura neuchâtelois et les régions limitrophes. Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles 37, 310–429.
- Scheidler, S., Huggenberger, P., Dresmann, H., Auckenthaler, A., Epting, J., 2021. Regional groundwater flow and karst evolution - theoretical approach and example from Switzerland. Environmental Earth Sciences 80, 18.
- Schindler, B., 1975. Hydrogéologie de la vallée de Tavannes. Rapports intermédiaires. Bureau B. Schindler - Géologues et ingénieurs conseils SIA. 2515 Prêles, Suisse.
- Schmutz, G., 2008. Sondage de reconnaissance pour sonde géothermique à la rue des Dentelières, Le Locle (NE).
- Schori, M., 2021. The Development of the Jura Fold-and-Thrust Belt: pre-existing Basement Structures and the Formation of Ramps. GeoFocus 50. <https://doi.org/10.51363/unifr.sth.2022.001>

SDAGE RM, 2021. Guide Technique du SDAGE RMC. Identifier et préserver les ressources stratégiques pour l'alimentation en eau potable.

Smeraglia, L., Fabbri, O., Choulet, F., Buatier, M., Boulvais, P., Bernasconi, S.M., Castorina, F., 2020. Syntectonic fluid flow and deformation mechanisms within the frontal thrust of a foreland fold-and-thrust belt: Example from the Internal Jura, Eastern France. *Tectonophysics* 778, 228178.

<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228178>

SMESD, 1995. Etude globale du système karstique Doubs-Loue. Rapport de synthèse provisoire. Syndicat Mixte d'Etude pour l'Aménagement du Bassin de la Saône et du Doubs. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée - Corse.

SMESD, 1994. Étude hydrogéologique et géophysique - Pertes du Doubs à l'aval de Pontarlier. Syndicat Mixte d'Etude pour l'Aménagement du Bassin de la Saône et du Doubs. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée - Corse.

Sommaruga, A., 1997. Geology of the central Jura and the Molasse Basin: new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt (PhD thesis). Université de Neuchâtel.

Sommaruga, A., Mosar, J., Schori, M., Gruber, M., 2017. The Role of the Triassic Evaporites Underneath the North Alpine Foreland, in: Permo-Triassic Salt Provinces of Europe, North Africa and the Atlantic Margins. Elsevier, pp. 447–466. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809417-4.00021-5>

Suter, H., Lüthi, E., 1969. 1144 Val-de-Ruz, in: Suisse, C.G. (Ed.), Geologischer Atlas Der Schweiz 1/25000. Erläuterungen. Kümmerly & Frey, Berne / Commission Géologique Suisse, p. 33.

Tripet, J.P., 1972. Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois). Centre d'hydrogéologie de l'université de Neuchâtel.

Turberg, 1987. Carte géologique de l'extremité occidentale du synclinal du "Locle / La Chaux-de-Fonds." Université de Neuchâtel - Institut de géologie.

Vancon, J.P., Gaubi, E., 1992. Etude de la plaine de Pontarlier (25). Modélisation du champ captant (No. R 36323 FRC 4S 92). BRGM - Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, France.

Vouillamoz, J., Malard, A., Schwab-Rouge, G., Weber, E., Jeannin, P.Y., 2013. Mapping flood related hazards in karst using KARSYS approach.

Application to the Beuchire-Creugenat karst system (JU, Switzerland), in: Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Held in Carlsbad, New Mexico, May 06-10, 2013. pp. 333–342.

Wittwer, C., 1982. Etude de l'ensablement du puits de La Brévine. Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel.

Annexe A. Géologie

A1. Découpages territoriaux

Références des cartes géologiques FR 1/50'000 utilisées : 0475N Delle (Chauve et al., 1985b), 0504N Maîche (Augier et al., 1950), 0505N Damprichard (Barlier et al., 1949), 0530N Ornans (Both et al., 1930), 0531N Morteau (Fallot and Perrodon, 1968), 0557N Pontarlier (Castany et al., 1930), 0582N Champagnole (Guillaume and Guillaume, 1965), 0583N Mouthe (Chauve et al., 1943) et 605N Morez-Bois d'Amont (Guillaume et al., 1968).

Références des cartes géologiques CH 1/25'000 utilisées : 1085 (Laubscher, 1963), 1104 et 1105 (Aufranc et al., 2016), 1124 (Bourquin et al., 1946), 1125 (Aufranc et al., 2017), 1143 (Eichenberger et al., 2020), 1144 (Suter and Lüthi, 1969), 1162 (Mühlethaler, 1930), 1163 (Pasquier et al., 2013), 1182 (Rigassi and Weidmann, 2011), 1202 (Aubert, 1963), 1221 (Aubert, 1941)

	0475N	0504N	0505N	0530N	0531N	0557N	0582N	0583N	0605N
M1	X								
M2			X						
M3		X	X						
M4				X					
M5		X		X					
M6				X					
M7				X					
M8			X						
M9					X				
M10					X				
M11						X			
M12						X	X		

	1085	1104	1105	1124	1125	1143	1144	1162	1163	1182	1202	1221
M1	X											
M2		X	X		X							
M3		X	X	X								
M4				X		X	X					
M5						X						
M6						X				X		
M7						X	X	X				
M8							X			X		
M9										X	X	
M10												
M11											X	X
M12												X

Tableau 8. Gauche : emprises des modèles sur les feuilles 1/50'000 des cartes géologiques FR. Droite : emprise des modèles sur les feuilles 1/25'000 des cartes géologiques CH.

A2. Unités géologiques visualkarsys

La Figure 55 présente les symbologies utilisées pour la représentation des unités géologiques des modèles visualkarsys.

CODE_VK	
QUAT	j7
p	j6
m	j5c-6aR
o	j5c2-6aC
e	j5c2-6aM
c1	j5c1
n5-n6	j5a-b
n4	j4
n3b	j3
n3	j2
n2	j1
n1	I
	t6-7

Figure 55. Symbologie utilisée pour les unités géologiques utilisées dans les modèles visualkarsys.

A3. *Lignes structurales*

ID	MOD	NOM
0	M2	RETRO_ST_BRAIS
1	M2	RETRO_BOLLEMENT
2	M2	CHE_PREPETITJEAN
3	M1	RETRO_CLOS_DU_DOUBS
4	M3	CHE_PREPETITJEAN
5	M3	CHE_LE_NOIRMONT
6	M3	RETRO_VALOREILLES
7	M2	CHE_FESSEVILLIERS
8	M1	CHE_ROCHE_D_OR
9	M1	CHE_CLOS_DU_DOUBS
10	M1	CHE_ST_BRAIS
11	M2	CHE_LE_NOIRMONT
12	M2	CHE_POUILLEREL
13	M2	CHE_DU_DROIT
14	M2	CHE_ST_IMIER_SUD
15	M3	CHE_MAICHE
16	M4	CHE_CHARQUEMONT
17	M4	RETRO_NORD_DOUBS
18	M3	CHE_CHARQUEMONT
19	M4	CHE_POUILLEREL
20	M4	CHE_PREPETITJEAN
21	M4	CHE_LE_NOIRMONT
22	M4	DEC_FERRIERE
23	M4	RETRO_ST_IMIER_NORD
24	M4	CHE_MT_PERREUX
25	M4	RETRO_CDF_SUD
26	M4	CHE_ST_IMIER_SUD
27	M4	RETRO_NORD_VDR
28	M4	DEC_BORBoux
29	M5	DEC_PLAMBOIS
30	M5	DEC_DOMPREL_OUEST
31	M5	RETRO_NORD_DOUBS
32	M5	RETRO_LONGEMAISON
33	M5	CHE_MAICHE
34	M5	CHE_CONSOLATION

ID	MOD	NOM
35	M5	RETRO_BELIEU
36	M5	CHE_CERNEUX
37	M5	DEC_DOMPREL_EST
38	M5	CHE_ORCHAMPS_VENNES
39	M5	DEC_ORCHAMPS_VENNES
40	M5	CHE_LE_LUHIER
41	M6	CHE_POUILLEREL
42	M6	CHE_MT_PERREUX
43	M6	RETRO_VDT_NORD
44	M6	CHE_VDA
45	M6	RETRO_COMBE_STAND
46	M7	RETRO_ALLIES
47	M7	RETRO_LONGEMAISON
48	M7	RETRO_NORD_BREVINE
49	M7	CHE_SUD_BREVINE
50	M7	RETRO_VDT_NORD
51	M7	CHE_POUILLEREL
52	M8	CHE_ATHOSE
53	M8	DEC_RELAISt_PONTARLIER
54	M8	DEC_PONTARLIER
55	M8	RETRO_AUBONNE
56	M8	RETRO_ALLIES
57	M8	CHE_OUHANS
58	M8	RETRO_ATHOSE
59	M8	CHE_HAUTEPIERRE
60	M8	CHE_AUBONNE
61	M9	DEC_PONTARLIER
62	M9	CHE_POUILLEREL
63	M9	RETRO_STE_CROIX
64	M9	CHE_VERRIRES
65	M9	RETRO_BAULMES
66	M9	CHE_BASE_RISOUX
67	M9	DEC_RELAISt_PONTARLIER
68	M10	RETRO_CHARGEBIN
69	M10	RETRO_LAVERON

ID	MOD	NOM
70	M10	RETRO_CHARGEBIN
71	M10	CHE_ST_POINT
72	M11	DEC_MONT_D_OR
73	M11	CHE_BASE_RISOUX
74	M11	RETRO_RISOUX_1
75	M11	RETRO_REMORAY
76	M11	RETRO_RISOUX_1
77	M11	DEC_PONTARLIER
78	M11	CHE_VALLORBE
79	M12	CHE_RISOUX
80	M12	RETRO_REMORAY
81	M12	DEC_MOUTHE
82	M12	CHE_REMORAY
83	M12	CHE_BASE_RISOUX
84	M12	CHE_BOUJEONS
85	M3	CHE_POUILLEREL
86	M3	CHE_CHAUVILLIERS
87	M3	CHE_FESSEVILLIERS
88	M3	DEC_FERRIERE
89	M3	CHE_ST_BRAIS
90	M9	RETRO_CHARGEBIN
91	M9	RETRO_ALLIES
92	M11	RETRO_CHARGEBIN
93	M11	CHE_BOUJEONS
94	M11	RETRO_STE_CROIX
95	M9	CHE_ST_POINT
96	M9	CHE_SUD_BREVINE
97	M8	RETRO_LONGEMAISON
98	M8	CHE_CONSOLATION
99	M12	CHE_REMORAY
100	M9	CHE_FOURGS
101	M8	CHE_DOUBS
102	M6	CHE_CONSOLATION
103	M2	RETRO_CLOS_DU_DOUBS

Tableau 9. *Liste des principales lignes structurales*

Annexe B. Sources karstiques

Les principales sources karstiques utilisées dans le cadre de ce projet sont listées et décrites dans le Tableau 10 – par ordre alphabétique, côté France et Suisse. La liste couvre les sources considérées comme « d'intérêt » pour l'étude, elle ne document pas toutes les sources apparaissant sur les cartes hydrogéologiques karstiques 1/25'000. A noter que certaines de ces sources sont en réalité des galeries drainantes ou des puits artificiels, d'autres sont des venues d'eau dans des tunnels ou des galeries.



Il est important de noter aussi que le positionnement X, Y et Z n'a pas été systématiquement contrôlé pour toutes les sources du tableau. Un travail important de contrôle des informations est recommandé (§. 10.2).

3 PUCELLES* (source des) [FR]	La source des 3 pucelles représente près de 60% de l'alimentation du cours d'eau en période d'étiage (Falconnet et al., 1991). Elle émerge de l'aquifère du Jurassique moy. , à la faveur d'un chevauchement assez plat (CHE_MAICHE, cf. Figure 57) qui fait remonter les formations calcaires du Bathonien dans le lit du Dessoubre.
ABRI SOUS ROCHE (source de) [FR]	La source émerge à Villers-le-Lac, depuis l'aquifère du Jurassique sup. (alt. 752 m) et présente à priori plusieurs exutoires disposés en chapelet. L'ensemble n'est pas véritablement documenté, mais a fait l'objet d'essais de traçages ³⁶ . En conditions de basses eaux, le débit de la source est de l'ordre de 5 L/s (ISSKA, 2023c)
AIN* (source de l') [FR]	La source émerge vers 680-690 m d'altitude de l'aquifère du Jurassique sup. Il s'agit d'une source temporaire. Les informations relatives au système hydrologique et au bassin de l'Ain sont compilés dans un rapport BRGM des années 1970 (Jonac, 1974). En conditions de hautes eaux, les débits atteignent plusieurs mètres cube par seconde. Il faut être vigilant car les mesures confondent souvent les différents exutoires pérennes et temporaires.
AREUSE* (source de l') [CH]	La source est pérenne à l'altitude de 790 m. Les débits de la source sont mesurés par l'OFEV ³⁷ . La source est relativement bien documentée (Burger, 1959; Kiraly and Morel, 1976; Tripet, 1972). Elle est alimentée par l'aquifère du Jurassique sup.
ARVOUX (source de l') [CH]	La source émerge dans le lac de Challeixon (lac des Brenets). La source est pérenne et hydrauliquement contrôlée par le niveau du lac. Les débits ne sont pas précisément connus, de l'ordre de quelques centaines de litres par seconde en basses eaux (~400 L/s) et certainement quelques mètres cubes par seconde en hautes eaux. La source est peu documentée car difficilement accessible (Burger and Schaer, 1996; Hapka et al., 2018; ISSKA, 2023c; Schardt, 1910).
BIEF AYROUX* [ou BIEF AIROUX, ou BIEF EROUX, ou BIZAROUX] (source du) [FR]	Le Bief Ayroux est noté comme une source pérenne émergeant à l'altitude de 500 m, en rive gauche du Dessoubre, à travers des blocs. Elle est alimentée par l'aquifère des calcaires du Rauracien (Jurassique sup. , nappe FNK001). La source est certainement une capture en cours des sources situées plus haut dans la reculée (source Noire, Dessoubre, etc.). Plus haut dans la pente, 2 exutoires de trop-plein sont mentionnés (GIPEK, 1996), respectivement à l'altitude de 510 m (grotte Inférieure) et à 530 m (grotte du Bief Ayroux). Les débits ne sont pas véritablement documentés.

³⁶ Traçages DREAL BFC n° D707, D782 et D783

³⁷ <https://www.hydrodaten.admin.ch/de/seen-und-fluesse/stationen-und-daten/2290>

	<p>→ Fiche RKM20</p>
BIEF DE BRAND* [ou BRAN] (source du) [FR]	<p>La source émerge en rive droite du Dessoubre, vers 390-400 m d'altitude, à la faveur d'un seuil hydraulique marqué par la remontée des marnes du Lias quelques mètres à dizaines de mètres en aval de la source. Elle draine l'aquifère du Jurassique moy. Les débits de la source ne sont pas mesurés mais ils représentent à priori plusieurs mètres cube par seconde en moyenne. Le débit d'étiage se situe entre 0.7 et 1.2 m³/s. A noter que cette source est paradoxalement peu documentée (Cornet, 1979; Fournier, 1926; GIPEK, 2004).</p> <p>→ Fiche RKM15</p>
BIEF DE FUESSE [ou de FUSSE] (source du) [FR]	<p>La source émerge vers 530 m d'altitude de l'aquifère du Jurassique sup. Elle est alimentée par la nappe FNK028. La source est décrite comme vauclusienne, certainement pérenne, et présentant des débits significatifs (GIPEK, 2004). Des exutoires de trop-plein sont envisageables plus hauts dans la combe.</p>
BIEF D'ETOZ (source du) [FR]	<p>La source émerge de l'aquifère du Jurassique sup., en rive gauche du Doubs, face à la centrale hydroélectrique de la Goule, à l'altitude approximative de 535 m, soit ~20 m en-dessus du cours d'eau (GIPEK, 2004). Si une partie de l'alimentation de la source provient du secteur de Charmauvillers (pollution avérée par les eaux de la STEP), une partie peut en théorie provenir des pertes du Doubs en amont, du fait de la surélévation de la ligne d'eau par le barrage de la Goule (possible via la continuité de la nappe MNK214). Cette hypothèse avait déjà été envisagée par E. Fournier en 1929. A l'époque le barrage de la Goule existait déjà.</p> <p>Les débits en basses eaux ne sont pas véritablement documentés, mais sont probablement de l'ordre de quelques litres par seconde.</p> <p>Un exutoire de trop-plein est mentionné, plus haut d'environ 20 m (soit 555 m environ). Les mises en charge sont notées comme fréquentes, mais aucune indication n'est donnée sur les débits.</p>
BIEF PAROUX (grotte / source du) [FR]	<p>Exutoire de trop-plein de la source de la Forge, situé en rive gauche, 80 m au-dessus du Doubs (alt. 560 m environ).</p> <p>La source n'est active que 4 à 5 fois par an, mais les débits ne sont pas documentés (GIPEK, 2004). Le système est vraisemblablement alimenté par l'aquifère du Jurassique sup. (nappe FNK066) pour laquelle il donne une hauteur des mises en charge possibles (+40 m par rapport à la cote de basses eaux).</p>
BIRSE* (source de la) [CH]	<p>La source émerge vers 771 m en bordure de l'agglomération de Tavannes. Elle est alimentée par l'aquifère du Jurassique sup. (ISSKA, 2012a). La source est pérenne et exploitée pour l'alimentation en eau potable.</p>

BLANCHEFONTAINE (source de) ³⁸ [FR]	<p>La source est en réalité un puits captant émergeant en rive gauche du Doubs à l'altitude de 490 m (Aufranc et al., 2016; Cornet and Putallaz, 1979). La source draine les eaux de l'aquifère du Jurassique sup., mais la zone noyée qui alimente la source semble principalement se développer dans les calcaires du Jurassique moy. (FNK038).</p> <p>La source est captée ; les prélevements sont de l'ordre de 35 L/s en moyenne, mais les débits totaux ne sont pas mesurés.</p> <p>A noter que la source est utilisée pour l'alimentation en eau potable du plateau maîchois. D'après les auteurs, le bassin d'alimentation de la source couvre une surface de 18 km².</p> <p>→ Fiche RKM16</p>
BLANCHES-FONTAINES* (source des) [CH]	<p>La source est pérenne et émerge dans les gorges du Pichoux à l'altitude de 586 m. Elle se présente sous la forme de plusieurs griffons alimentés par l'aquifère du Jurassique sup. Le débit moyen de la source est de 1.65 m³/s. Il peut descendre à 200 L/s en étiage et atteindre 12 m³/s en crue (Piquerez, 2014). Le bassin d'alimentation est évalué à plus de 50 km².</p>
BLEUE [ou CHAUDRON] (source) [FR]	<p>La source émerge des formations calcaires du Jurassique sup. à l'altitude de 889 m. Le débit moyen est de l'ordre de 90 L/s. A l'étiage, le débit est de l'ordre de quelques litres par seconde et en conditions de hautes eaux, il peut atteindre 1.6 m³/s (Liboz, 2019).</p> <p>La source est « barrée » à l'aval par les formations Crétacé. Pas de diminution de débit suite au percement du tunnel du Mont-d'Or (Fournier, 1926). La source n'est pas captée pour le moment. La source donne accès à un conduit exploré depuis les années 60 (GIPEK, 2004).</p> <p>→ Fiche RKM30</p>
BOUJEONS 1 & 2 (source de) [FR]	<p>Les deux sources émergent de l'aquifère du Crétacé inf. (étage Hauterivien) et sont captées pour l'eau potable. Le débit cumulé des deux sources avoisine 2 L/s en moyenne.</p>
CAMBOINE (source de) [FR]	<p>Source temporaire de la nappe FNK020 (GIPEK, 2004). Les débits ne sont pas documentés mais probablement plusieurs dizaines de litres par seconde en crue. Le positionnement de la source doit être vérifié, les coordonnées semblant erronées sur l'inventaire.</p>
CAPUCINS (source des) [FR]	<p>La source émerge vers 855 m d'altitude (GIPEK, 2004). Elle est alimentée par l'aquifère du Jurassique sup. (vraisemblablement pérenne). En lien vraisemblablement avec la source de la Drésine (alt. ~855 m également).</p>
CARRE (source de la) [FR]	<p>La source émerge vers 951 m. Sa position exacte n'a pas été déterminée. Elle est permanente et alimentée par l'aquifère du Jurassique sup. (Fournier, 1926). La source est en lien avec la source du Clos Bayet (Jeanblanc and Schneider, 1981).</p> <p>Le débit moyen de ces sources est évaluée à 400 L/s (Fournier, 1926). L'exutoire de trop-plein est la source de la Creuse (ou Bief rouge).</p> <p>La position exacte de la source de la Carré n'est pas connue avec précision.</p>

³⁸ Attention, ne pas confondre avec la source des Blanches Fontaines côté Suisse dans la vallée du Pichoux.

CEG (source) [FR]	La source émerge en bordure du Cébriot, vers 930 m d'altitude, quelques dizaines de mètres en amont de la confluence avec le Doubs. La source est notée comme temporaire et à faible débit (GIPEK, 2004; Pasquier et al., 2006). Elle est à priori alimentée par l'aquifère du Jurassique sup.
CHEZ NEMORIN (résurgence / fissure) [FR]	<p>La fissure Chez Némorin n'est pas une source à proprement parler. Il s'agit plutôt d'une diaclase qui s'ouvre en bordure du Doubs mais en contre-haut (alt. entrée ~790 m), dans les formations calcaires du Kimméridgien.</p> <p>Au fond de la diaclase, à la côte de -28 m environ (alt. ~662 m, mais plus vraisemblablement ~650 m), se développe un siphon qui se prolonge en direction du Doubs. Le débit émergeant du siphon est de l'ordre de 200 à 300 L/s.</p> <p>Cette source draine certainement la nappe MNK213 (Jurassique sup.).</p>
CLOS BAYET (source du) [FR]	<p>La source émerge vers 952 m. Elle est permanente et alimentée par l'aquifère du Jurassique sup. (Fournier, 1926). La source est vraisemblablement en lien avec la source de la Carré.</p> <p>Le débit moyen de ces sources est évaluée à 400 L/s (Fournier, 1926). L'exutoire de trop-plein est la source de la Creuse (ou Bief rouge).</p>
CLOUTERIE (source de la)	Source à priori pérenne émergeant vers 851 m d'altitude, des calcaires du Valanginien (nappe du Crétacé FNK043). Le débit moyen de la source est de l'ordre de 20 L/s.
CLUSETTE (source de la) [FR]	La source émerge sur la ligne de rétro-chevauchement vers 860 m d'altitude (GIPEK, 2004). Elle est supposée alimentée par l'aquifère du Jurassique sup.
COLOMBIERE (source de la) [FR]	Source pérenne dans le défilé d'Entreroches, à l'altitude de 755 m (GIPEK, 2004). Les débits de la source ne sont pas connus avec précision (de l'ordre de quelques litres à dizaines de litres par seconde à l'étiage). → Fiche RKM23
COMBE (source de la) [FR]	Source permanente de l'aquifère du Crétacé inf. Elle alimente la commune des Longevilles Mont d'Or (Liboz, 2019). Le débit de la source est de l'ordre de quelques litres à ~15 L/s en crue. → Fiche RKM33
COMBE LEVIER (source de) [FR]	Source en bordure du Drugeon, alimentée par la nappe FNK020 (Jurassique sup.) Les débits de la source sont de l'ordre de 20 L/s. La source est captée pour l'eau potable.

CORCHERE (source de la) [FR]	<p>Il existe à priori deux sources de la Corchère, ou alors il y a une confusion dans les désignations.</p> <p>L'inventaire de la DREAL BFC fait état d'une source en bordure du Doubs, vers 754 m d'altitude. Il s'agit à priori d'une source pérenne qui émerge des calcaires du Jurassique moy.</p> <p>Le GIPEK (2004) fait état d'une source de trop-plein du système Colombière / Pont du Diable à la sortie du défilé d'Entreroches. La source émerge en contre-haut de la route, à l'altitude de 780 m.</p> <p>Dans l'hypothèse que les deux sources existent, la 1^{ère} sera notée source « inférieure », la seconde source « supérieure ».</p> <p>→ Fiche RKM23</p>
CRET EST & OUEST [ou ROMARAY 1 & 2] (sources du) [FR]	<p>Petites sources émergeant de l'aquifère du Crétacé inf. Les alimentations proviennent des formations calcaires du Valanginien et de l'Hauterivien. Les débits de ces sources ne sont pas documentés – mais n'excèdent certainement pas quelques dizaines de litres par minute.</p>
CREUSE (ou BIEF ROUGE) (source de la) [FR]	<p>Source à priori temporaire (appelée aussi source du Bief rouge) se présentant sous la forme de plusieurs griffons. Elle émerge à 956 m d'altitude des formations aquifères du Jurassique sup. (Jeanblanc and Schneider, 1981). En hautes eaux, les débits atteignent plusieurs mètres cube par seconde (jusqu'à 3 m³/s).</p> <p>Les exutoires pérennes de la source sont la Carré et Clos Bayet.</p> <p>→ Fiche RKM33</p>
CUL DU BIEF (source du) [FR]	<p>Il s'agit des sources de trop-plein de la source du Doubs (GIPEK, 2004; Jeanblanc and Schneider, 1981). La relation hydraulique est clairement établie et montrent que les sources commencent à s'activer dès que la source permanente dépasse 2.5 m³/s et peuvent dépasser plusieurs mètres cube par seconde.</p> <p>La présence de ces sources de trop-plein indique que les mises en charge dans l'aquifère peuvent dépasser 100 m en conditions de hautes eaux hydrologiques.</p> <p>La fiche RMC 94I³⁹ avance un débit moyen de 360 L/s pour l'ensemble.</p> <p>→ Fiche RKM36</p>
DERRIERE-LE-MONT (source de) [FR]	<p>La source émerge vers 950 m d'altitude, à la base des calcaires du Séquanien. La source est pérenne et captée pour l'alimentation en eau potable de la commune de Montlebon, d'une partie de Morteau et du synclinal intercommunal du Plateau des Combles. Elle est alimentée par la nappe FNK006.</p> <p>Le débit d'étiage est de l'ordre de 11-13 L/s et le débit moyen de l'ordre de 37 L/s. Il existe à priori des exutoires de trop-plein, mais ceux-ci ne sont pas documentés (GIPEK, 2004). Les débits de hautes eaux ne sont pas connus.</p> <p>→ Fiche RKM25</p>

³⁹ https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/sites/sierm/files/content/waterbody_hydrogeological_documents/UniteKarstique/94I.pdf

DESSOUBRE* (source du) [FR]	<p>La source pérenne du Dessoubre émerge à l'altitude de 586 m. Elle fait l'objet de plusieurs travaux (Falconnet et al., 1991; Javey, 1980). En basses eaux le débit de la source est de l'ordre de quelques dizaines de litres par seconde. En conditions de hautes eaux les débits dépassent aisément 3 m³/s.</p> <p>→ Fiche RKM20</p>
DOUBS (source du) [FR]	<p>La source principale (l'exutoire inférieur), pérenne, émerge des calcaires du Jurassique sup. à l'altitude de 940 m environ.</p> <p>Les débits de la source sont mesurés via la station hydro U2002010. Le débit moyen est de 1.85 m³/s. En conditions de basses eaux (étiage estival), le débit peut descendre sous 100 L/s et en conditions de hautes, il dépasse facilement 10 à 15 m³/s. La source est alimentée par la nappe libre FNK015.</p> <p>Plusieurs résurgences temporaires sont mentionnées dans la combe du Bief Rau (sources temporaires du Cul du Bief) sont mentionnées entre 950 et 1050 m d'altitude.</p> <p>→ Fiche RKM36</p>
DRESINE (source de la) [FR]	<p>La source émerge vers 855 m d'altitude (GIPEK, 2004). Elle est alimentée par l'aquifère du Jurassique sup. En lien vraisemblablement avec la source des Capucins.</p>
DRUGEON (source du) [FR]	<p>Trois sources assez proches donnent naissance au Drugeon (GIPEK, 2004). Elles émergent d'une zone humide (tourbière), certainement alimentées par l'aquifère du Crétacé inf. Ces sources ne sont pas véritablement documentées.</p>
FONTAINE JEULE (source de) [FR]	<p>La source émerge des calcaires du Rauracien entre 750 et 770 m d'altitude. Les débits de la source sont relativement faibles (quelques litres par seconde).</p> <p>La source n'est pas davantage documentée.</p>
FONTAINE-RONDE (source de) [FR]	<p>Source intermittente des formations du Crétacé inf. (Jeanblanc and Schneider, 1981). Elle émerge à l'altitude de 953 m. Les intermittences sont de 8-10 minutes.</p> <p>Le débit du ruisseau en aval est de l'ordre de 200 L/s. A l'étiage, la source peut à priori tarir et en conditions de hautes eaux, des débits de 500 à 600 L/s peuvent être enregistrés (Liboz, 2019). Selon Jeanblanc and Schneider, 1981, les débits ne dépasseraient jamais 200 L/s.</p>
FORGE (source de la) [FR]	<p>La source est en réalité une galerie drainante alimentée par l'aquifère du Jurassique sup. et utilisée pour l'alimentation en eau potable (Aufranc et al., 2016; Cornet and Putallaz, 1979). Les débits évalués sur la base des prélèvements sont de l'ordre de 5 L/s au minimum et ~30 L/s en moyenne. La source est peu documentée.</p> <p>Cet exutoire est vraisemblablement lié à la source temporaire du Bief Paroux qui s'ouvre 400 m en amont</p> <p>→ Fiche RKM16</p>

FRENOIS (source du) [FR]	La source est à priori alimentée par l'aquifère du Jurassique sup. Elle émerge vers 454 m d'altitude, donc bien plus haut que la cote du Doubs sur ce tronçon. Le débit de la source est de l'ordre de 4 L/s en moyennes eaux. Des incertitudes demeurent donc sur la nature de cette source et les modalités d'alimentation.
FUVELLE (source de la) [FR]	Cette source alimente le Blanc Bief. Elle émerge à priori des calcaires du Crétacé mais est potentiellement alimentée par l'aquifère du Jurassique sup. Le débit de la source est de l'ordre de quelques litres par seconde (5 à 10 L/s)
GRANDE SOURCE (source de la) [FR]	Source temporaire, en hauteur par rapport à la source Schlumberger. Les débits en hautes eaux ne sont pas connus. → Fiche RKM30
GERANIUMS (source des) [FR]	La source émerge vers 955 m d'altitude. Elle draine l'aquifère karstique du Crétacé inf. A priori captée pour la commune de Métabief ⁴⁰ . Elle affiche un débit en basses eaux de l'ordre de 14 L/s.
LANCOT* (source du) [FR]	Source temporaire du cirque de Consolation, en lien avec le système hydrologique du Dessoubre, mais surtout en lien avec la source du Taboureau. En crue l'ensemble atteint voire dépasse 5m ³ /s. → Fiche RKM20
MALBUISSON (source de) [FR]	La source de Malbuisson correspond à priori à l'ensemble actuel formé par la galerie drainante de Schlumberger et la Grande Source. Le débit à l'étiage est de l'ordre de 35 L/s. D'après la littérature (Fournier, 1926), le débit est à priori plus faible depuis le percement du tunnel du Mont d'Or, mais cette information reste à valider. → Fiche RKM30
MALCOMBE [ou SOBEY] (sources de) [FR]	Il s'agit de plusieurs sources au lieu-dit « Sobey » ou la « Malcombe », ou encore la « Ferme de Volçon » - vers 757 m d'altitude. Le régime et le débit des sources en basses eaux n'est pas documenté, mais les indices laissent supposer qu'ils peuvent être importants – surtout au vu des connexions démontrées par traçages ⁴¹ . En hautes eaux, les débits sont signalés comme importants (GIPEK, 2004).
MARTIN [ou SAINT MARTIN] (sources) [FR]	Il s'agit de 3 sources pérennes, étagées entre 910 et 930 m d'altitude. La source supérieure est celle au plus fort débit. Une 4 ^{ème} source (la source de Ponthibaud) formerait l'exutoire aval du système vers 895 m d'altitude. Le débit de ses sources n'est pas très bien documenté. En basses eaux, le débit cumulé des 3 exutoires se situerait autour de 25 L/s. En hautes eaux,

⁴⁰ A noter que la source a été déplacée car elle ne correspondait pas avec le positionnement indiqué sur l'inventaire des traçages DREAL BFC.

⁴¹ Traçages DREAL BFC n° D657, D658 et D659

	<p>il dépasserait 1.4 m³/s. Le débit moyen sur l'année étant évalué autour de 0.4 m³/s (voir fiche RMC 94⁴²).</p> <p>Ces sources ont été utilisées pour l'alimentation de la ville de Pontarlier (eaufrance, 2013a) mais leur exploitation est maintenant abandonnée.</p> <p>→ Fiche RKM31</p>
<p>MARTINET [ou BOUVERANS] (source du) [FR]</p>	<p>La source émerge en rive droite du Drugeon, en aval de Vaux-et-Chantegrue, vers 860 m d'altitude. Elle est alimentée par la nappe FNK020 (calcaires du Séquanien). La source est captée mais son débit est faible.</p>
<p>MONT D'OR* (sources du Tunnel) [FR]</p>	<p>Plusieurs sources sont observées dans le tunnel du Mont d'Or, la principale étant la source C (ou source n°8), émergeant vers 870 m d'altitude et drainant les eaux de l'aquifère du Jurassique sup. (nappe FNK015). D'autres sources secondaires sont aussi à mentionner, notamment la source O'Barth (Liboz, 2019).</p> <p>Les eaux du tunnel sont entièrement dirigées côté Suisse. Le débit moyen du drainage est de l'ordre de 150 L/s (Chauve et al., 1986; Jeanblanc and Schneider, 1981). Des mesures plus récentes (Liboz, 2019) ont permis de préciser ce débit de drainage côté Vallorbe (CH). Il est de l'ordre de 69 L/s en fin d'étiage et atteint 250 L/s en conditions de hautes eaux. Ainsi, le débit moyen est de l'ordre de 110-120 L/s. Soit les mesures d'époque (années 80-90) étaient surestimées, soit la ressource s'est sensiblement réduite depuis ces années.</p> <p>D'après la littérature, notamment Fournier (1926), le percement des premières circulations d'eau souterraine vers 870 m d'altitude par le tunnel a entraîné :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le tarissement des sources du Bief Rouge (démontré) sur la commune de Métabief, à savoir la source de la Carré, la source du Clos Bayet et la source de la Creuse (956 m). - Le tarissement des sources à Malbuisson (900 m), à vérifier. - Un impact sur le débit des sources Martin - Un tarissement, à priori temporaire, des sources de Fontaine Ronde (non véritablement démontré) <p>Pendant la période des travaux, deux crues majeures sont enregistrées (extrait de Cornet, (1977)) : la crue de décembre 1912 (5 m³/s) et celle d'avril 1913 (8 m³/s). La plupart des venues d'eaux ont selon l'auteur été obturées qui parlent d'un débit de fuite au jour d'aujourd'hui de l'ordre de 70 à 200 L/s.</p>

⁴² https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/sites/sierm/files/content/waterbody_hydrogeological_documents/UniteKarstique/941.pdf

MORON (sources de) [CH]	Les sources émergent de l'aquifère du Jurassique moy. en rive droite du lac de Moron (Burger and Persoz, 1983; Hapka et al., 2018). Les débits ne sont pas connus avec précision, mais de l'ordre de quelques dizaines de litres par seconde en conditions de hautes eaux. Les sources sont des cavités pénétrables qui donnent accès à des siphons sans lien hydraulique direct avec le niveau du lac en basses eaux. Les sources restent de toute évidence perchées et ne sont pas liées à une nappe en particulier.
MOULIN BOURNEZ (source de) [FR]	La source émerge à l'aval du bourg de Morteau, en rive du Doubs, à l'altitude de 753 m (Cornet and Putallaz, 1979). La source est en réalité une galerie drainante, aménagée et utilisée pour l'alimentation en eau potable. Le débit d'étiage de la source est situé vers 10-15 L/s. La source est alimentée par la nappe FNK036, et son bassin d'alimentation est de l'ordre de 7 km ² environ. → Fiche RKM24
MOULIN DU BOIS* [ou COTTARDS] (source du) [FR]	La source émerge des calcaires du Kimméridgien et est captée pour l'eau potable. Les débits de la source ne sont pas documentés (GIPEK, 2004).
MOULIN MIGUET (source du) [FR]	La source émerge vers 465 m d'altitude, probablement de la nappe FNK022 (Jurassique sup.) et est vraisemblablement liée à la source du Pontet . La source est à priori permanente (GIPEK, 2004).
MOULINOT [ou DES 2 TORRENTS] (source de) [FR]	Emerge en rive droite du Doubs, depuis l'aquifère du Jurassique sup. Après étude, il s'agit en réalité de deux sources (GIPEK, 2004) : <ul style="list-style-type: none">- Une source inférieure (alt. 753 m), permanente et émergeant à travers les éboulis. En basses eaux, les débits sont de l'ordre de quelques litres par seconde. Le positionnement exact de la source n'est pas connu avec précision.- Une source supérieure (785 m environ), temporaire et émergeant d'un conduit. Les débits en hautes eaux sont mentionnés comme « important », certainement plusieurs dizaines de litre par seconde. Le positionnement exact de la source n'est pas connu avec précision.
MOULINS DU DIABLE (source des) [FR]	La source a été redécouverte récemment à la faveur des étiages importants du lac de Moron (Hapka et al., 2018; ISSKA, 2023c). Elle est à priori pérenne à 710 m d'altitude, et les débits sont de l'ordre de quelques litres par seconde à l'étiage et plusieurs dizaines en « hautes eaux ». Rappelons qu'il n'est pas possible d'observer la source la plupart du temps car sous le lac de Moron. Elle est alimentée par l'aquifère du Jurassique sup.
NOIRAIQUE* (source de) [CH]	La source émerge dans le village de Noirague, en rive gauche de l'Areuse, à l'altitude de 730 m. Elle est alimentée par l'aquifère du Jurassique sup.

	Les débits de la source sont suivis par le service des Ponts & Chaussées du canton de Neuchâtel ⁴³ .
NOIRE (source) [FR]	La source noire est située dans le cirque de Consolation vers 560 m et alimente le Dessoubre. Il s'agit à priori d'une source pérenne. La source dépasse 8 m ³ /s en crue. → Fiche RKM20
PAPETERIE* (source de la) [FR]	Source permanente du système hydrogéologique de la source de l'Ain. La source émerge vers 620 m d'altitude. Les débits ne sont pas documentés.
PONTET* (source du) [FR]	Source permanente émergeant en rive droite de la Loue vers 420 m d'altitude (GIPEK, 1996; Nuffer, 1974). Elle draine l'aquifère du Jurassique sup. (nappe FNK022). Les débits de la source sont mesurés en temps réel ⁴⁴ . Les débits sont de l'ordre de 100 L/s à l'étiage et peuvent dépasser 10 m ³ /s en crue.
PONT DU DIABLE (source du) [FR]	Source à priori temporaire du défilé d'Entreroches (GIPEK, 2004). Elle émerge à proximité de la source de la Colombière, à 755 m d'altitude. Les débits ne sont pas connus mais il est supposé qu'en hautes eaux les débits soient plus importants qu'à la Colombière. → Fiche RKM23
RASSE (source de la) [FR]	La source émerge des formations calcaires du Jurassique moy. , en bordure du Doubs, vers 610 m d'altitude (Gogniat et al., 1996b). En réalité, la source se compose de plusieurs exutoires, dont certains actifs seulement en crue. Les débits de la source ont été mesurés à 45 L/s en conditions de basses eaux et près de 750 L/s en conditions de hautes eaux (Gogniat et al., 1996b; Mages, 1993). D'autres résurgences à proximité sont signalées. Elle est en lien à priori avec la source de la Verrerie.
REMONOT (source de) [FR]	Aussi décrite comme le siphon de la grotte de Remonot, ou de la Chapelle Notre Dame de Remonot, elle s'ouvre dans le défilé d'Entreroches. La vasque est située vers 755 m d'altitude. Source temporaire de l'aquifère du Jurassique sup. Les débits ne sont pas documentés.
REVEROTTE* (sources de) [FR]	Série de sources en chapelet, émergeant vers 570 m d'altitude de l'aquifère du Rauracien. Le cours d'eau en aval des sources est partiellement infiltrant – les écoulements sont capturés par la source des 3 Pucelles (Cabinet Reilé, 2005).
ROCHER (source du) [FR]	La source du Rocher émerge à Ville du Pont. Elle draine les formations calcaires du Valanginien. La structuration de l'aquifère ne laisse pas supposer de zone noyée importante.

⁴³ <https://www.vhne.ch/>⁴⁴ <https://mesures.spiteurs-fous.fr/>

RONDE (source de la) [CH]	<p>La source émerge en rive droite du Doubs au niveau de Biaufond, vers l'altitude de 610-615 m (Gogniat et al., 1996a). Dans le détail, il s'agit de deux sources (Ronde Inf. et Ronde Sup.).</p> <p>Les débits de la source sont de quelques dizaines de litres par seconde en basses eaux et peuvent atteindre plusieurs mètres cubes par seconde en crue. La source est alimentée par l'aquifère du Jurassique sup.</p> <p>A noter que – comme pour la source de l'Arvoux – l'altitude d'émergence de la source de la Ronde s'est certainement élevée suite à la mise en place du barrage du Refrain.</p>
ROUTE DU FORT (source de la) [FR]	<p>La source est captée pour l'alimentation de la commune de Malbuisson. Elle émerge des calcaires Portlandien à une altitude d'environ 900 m.</p> <p>Les débits sont modestes, de l'ordre de 2 L/s à l'étiage et probablement quelques litres à dizaines de litres par seconde en conditions de hautes eaux.</p> <p>→ Fiche RKM30</p>
SAINE* (source de la) [FR]	<p>La source est pérenne et émerge vers 895 m d'altitude de l'aquifère du Jurassique sup. (eaufrance, 2013c). Les débits ne sont pas documentés. Des exutoires de trop-plein sont mentionnés dans la ravine en amont direct de la source. L'ordre de grandeur des débits moyens est toutefois fixé autour de 1 m³/s.</p> <p>→ Fiche RKM35</p>
SCHLUMBERGER (source / galerie drainante) [FR]	<p>La source est en réalité une galerie drainante excavée dans l'aquifère du Jurassique sup. à l'altitude de 890 m environ (année 1967). Les venues d'eau sont pérennes et captées pour l'alimentation de la commune de Malbuisson. Les débits ne sont pas connus avec précision - de l'ordre de quelques dizaines de litres par seconde - sans grandes variations sur l'année. On peut penser que les débits affichés à la source de Malbuisson sont en réalité maintenant ceux du captage de Schlumberger (~35 L/s).</p> <p>En hautes eaux, la source atteint un débit maximum plafonné – dont la valeur n'est pas documentée. Le surplus d'eau du système hydrogéologique est dirigé vers la Grande Source, mais aussi vers d'autres sources temporaires (sources Fonteniaux, source du Tennis, de Vézenay et Bois Brûlé, non décrites ici).</p> <p>→ Fiche RKM30</p>
SOUBEY [ou MOULINS DE...] (sources de) [CH]	<p>Les sources des Moulins de Soubey regroupent à priori 3 émergences (Aufranc et al., 2016; Rieben, 2000).</p> <p>Les sources 1 & 2 émergent de l'aquifère du Jurassique sup. La source 3 émerge de l'aquifère sous-jacent du Jurassique moy. vers 480 m d'altitude. Dans le détail, ces sources ne sont pas positionnées précisément.</p> <p>Le régime et les débits respectifs des sources ne sont pas réellement documentées mais les spécialistes s'accordent pour confirmer qu'il s'agit de sources d'importance. Ces sources sont certainement celles connues sous le nom de « Source de derrière le Moulin de Passalet » (Fournier, 1926). L'auteur cite encore quelques sources en aval de Soubey, jusqu'à St-Ursanne mais sans être précis. Si les sources 1 & 2 sont à priori des sources temporaires (Gigon and Wenger, 1986), la source 3 est vraisemblablement une source pérenne.</p>

TABOUREAU* (source du) [FR]	Source permanente du cirque de Consolation, en lien avec le système hydrologique du Dessoubre. La source émerge vers 580 m d'altitude. En crue, la source temporaire du Lançot s'active et l'ensemble atteint voire dépasse 5 m ³ /s. → Fiche RKM20
THEUSSERET (source du) [CH]	La source émerge en rive droite du Doubs à l'altitude de 500 m environ. Elle affiche un débit moyen de 1.1 à 1.2 m ³ /s (0.3 m ³ /s à l'étage), le bassin d'alimentation est évalué entre 40 et 45 km ² (Rieben, 2000). La source et son bassin d'alimentations sont aussi décrits dans les références suivantes (Aufranc et al., 2016). A noter aussi que d'autres exutoires ont été mis en évidence dans le lit du cours d'eau, en aval du restaurant, mais plutôt en rive droite. L'alimentation de la source est assurée par les eaux des aquifères du Jurassique Sup. et moy. Deux nappes sont identifiées : la nappe MNK221 dans les formations du Jurassique sup. et la nappe FNK012 dans celle du Jurassique moy. dont l'extension vers l'est n'est pas déterminée avec précision
TOFFIERE (source de la) [CH]	Source temporaire émergeant en rive droite du lac des Brenets (Chaillexon) à l'altitude de 760 m environ. La source fonctionne comme exutoire de trop-plein des sources de l'Arvox (Schardt, 1910).
VERRERIE [ou BAS DES BRENETS] (source de la) [CH]	La source émerge des formations calcaires du Jurassique moy. , en bordure du Doubs, vers 625 m d'altitude. La source est à priori pérenne mais peu documentée (Gogniat et al., 1996b). Les débits ne sont pas clairement établis. En lien à priori avec la source de la Rasse.

Tableau 10. Sources karstiques en lien direct ou indirect avec le système hydrogéologique du Doubs transfrontalier. Les sources marquées d'un « * » n'ont aucun lien hydrogéologique avec le système hydrogéologique du Doubs transfrontalier.

Annexe C. Valeurs de débits

Le tableau suivant liste les stations de mesures de débits du cours d'eau coté France et Suisse depuis l'amont vers l'aval. 12 stations de mesure sont actives sur le tronçon Mouthe → Brémoncourt, 13 en comptant celle de Glère, quelques kilomètres en en aval de Brémoncourt.

Stations	Code station	Coord. X / Y EPSG 2056	Coord. X / Y EPSG 2154	Altitude [m.s.m.]
Mouthe [FR / DREAL]	U2002010	2'505'964 / 1'173'371	945'102 / 6'627'737	945
Labergement-Sainte-Marie [FR / DREAL]	U201 2010 01	2'511'502 / 1'180'871	950'204 / 6'635'529	853
Oye-et-Pallet [FR / DREAL]	U201 2020	2'515'754 / 1'189'171	953'978 / 6'644'048	849
Cluse et Mijoux [FR / DREAL]	U202 2010 01	2'518'138 / 1'192'808	956'152 / 6'647'810	841
Pontarlier (Doubs à Doubs) [FR / DREAL]	U202 2020 01	2'516'937 / 1'197'981	954'663 / 6'652'902	808
Arçon* [FR / DREAL]	U210 2020 01	2'519'780 / 1'200'090	957'380 / 6'655'166	792
Ville du Pont [FR / DREAL]	U210 2010	2'527'120 / 1'206'213	964'357 / 6'661'686	773
Les Brenets [CH / OFEV]	2247	2'544'553 / 1'214'873	981'259 / 6'671'304	756
Fournet la Rasse [FR / DREAL]	U211 2010 01	2'554'828 / 1'222'825	991'062 / 6'679'814	615
La Goule – le Noirmont [CH / OFEV]	2370	2'561'438 / 1'231'060	997'193 / 6'688'400	510
Goumois [FR / DREAL]	U212 2010 01	2'563'061 / 1'235'752	998'549 / 6'693'172	487
Ocourt [CH / OFEV]	2210	2'572'555 / 1'244'458	1'007'530 / 6'702'390	421
Glère, Courclavon [FR / DREAL]	U214 2010 01	2'568'840 / 1'243'746	1 003 864 / 6 701 471	411

Tableau 11. Liste des stations de mesures des débits du Doubs FR / CH. A l'exception de la station Arçon*, désinstallée en 1985, toutes sont en service courant 2024



A ces stations s'ajoutent d'autres stations, actives par le passé, ou simplement temporaires, qui n'ont pas été analysées dans le cadre de ce projet en raison de la disponibilité des données. Par exemple ; la station de mesure du barrage du Refrain a fonctionné pendant plusieurs années mais l'analyse des mesures nécessite un travail conséquent de compilation et de mise en forme des données.

Le tableau présenté à la page suivante, liste les valeurs de débits [m³/s] des différentes stations de mesures, affluents, sources et pertes qui ponctuent le cours du Doubs depuis sa source jusqu'à Brémoncourt. Les affluents sont notés en *bleu italique*, les sources en noir, les pertes en *rouge italique* et les stations de mesure en **gras**. Pour les stations de mesure, le tableau affiche les débits moyens mensuels, le Q347⁴⁵, le NM7Q⁴⁶, le QMNA5⁴⁷, le Module⁴⁸, les Q_{min} et Q_{moy} et Q_{HE} (resp. conditions de basses, moyennes et hautes eaux).

[Page suivante] Tableau 12. Valeurs de débits *mesurées* ou *estimées* des stations de mesures, affluents, sources et pertes qui ponctuent le Doubs d'amont en aval. Source « P » (permanente), « T » (temporaire), « neg » (négligeable).

⁴⁵ Le débit Q347 [CH] représente le débit atteint ou dépassé dans 95 % des cas

⁴⁶ Le paramètre d'étiage NM7Q [CH] indique le plus faible débit moyen sur 7 jours consécutifs durant une année d'étiage (moyenne minimale calculée sur 7 jours).

⁴⁷ Le QMNA5, exprimé en m³/s, est le débit mensuel minimal ayant la probabilité 1/5 de ne pas être dépassée une année donnée, c'est donc la valeur du QMNA telle qu'elle ne se produit, en moyenne, qu'une année sur cinq ou vingt années par siècle.

⁴⁸ Le module correspond au débit hydrologique moyen interannuel (pluriannuel) d'un cours d'eau.

Stations, affluents, sources et pertes (amont vers aval)	Type	Code	Période	Qmoy Jr Janvier	Qmoy Jr Février	Qmoy Jr Mars	Qmoy Jr Avril	Qmoy Jr Mai	Qmoy Jr Juin	Qmoy Jr Juillet	Qmoy Jr Aout	Qmoy Jr Septembre	Qmoy Jr Octobre	Qmoy Jr Novembre	Qmoy Jr Décembre	Q347	NM7Q	QMNA5	Module	Qmin	Qmoy	QHE	
				m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s		
Mouthe source (FR)	Station	U200 2010	1979-2023	1.97	1.72	2.62	3.06	2.33	1.51	1.1	0.848	1.16	1.67	1.93	2.29	0.18	0.024	0.21	1.87				
<i>Cébriot</i>	<i>Cours d'eau affluent</i>																				0.28		
Cul de Bief	Source T																				0.36		
Ceg	Source P																				neg.		
<i>Bief Rouge</i>	<i>Cours d'eau affluent</i>	U201 5030	1986-2024	0.927	0.916	1.23	1.08	0.709	0.539	0.456	0.272	0.311	0.62	0.859	1.11			0.03		0.751	3.33		
Labergement (FR)	Station	U201 2010 01	1970-2023	4.93	4.93	6.53	6.99	4.93	3.47	2.36	2.22	2.67	3.59	4.77	5.7	0.42	0.0313	0.49	4.42				
<i>Taverne (aval lac Remoray)</i>	<i>Cours d'eau affluent</i>																				?		
<i>Clusette</i>	<i>Cours d'eau affluent</i>																				?		
<i>Blanc Bief</i>	<i>Cours d'eau affluent</i>																				?		
Schlumberger	Source P																				0.035		
Grande source	Source P																						
Route du Fort	Source P																				0.02		
Bleue	Source P																				0.09	1.6	
Oye et Pallet (FR)	Station	U201 2020	1982-2023	8.3	7.13	9.42	9.39	6.82	5.36	3.86	3.09	4.24	5.78	7.05	8.8	1.21	0.54	1.1	6.28				
<i>Malpas</i>	<i>Cours d'eau affluent</i>																				?		
<i>Pertes (1)</i>																					-0.1		
<i>Fontaine Ronde (+ Morte)</i>	<i>Cours d'eau affluent</i>																				0.65		
Mijoux (FR)	Station	U202 2010 01	1969-2023	9.38	9.83	11	11.2	8.05	6	4.16	3.79	4.6	6.01	8.25	10.1	1.14	0.258	0.9	7.72				
<i>Lavaux</i>	<i>Cours d'eau</i>																				?		
<i>Pertes (2)</i>																					-1	-2	
Doubs (FR)	Station	U202 2020 01	1986-2024	11	9.6	11.6	9.98	6.92	5.78	4.52	3.43	4.25	6.65	9.34	11.9	0.88	0.15	0.49	7.69				
<i>Drugeon</i>	<i>Cours d'eau affluent</i>	U203 5020	1967-2024	4.4	4.3	4.15	3.47	2.65	2.52	1.86	1.65	2.23	2.83	3.8	4.72						3.21	14	
Arçon (FR)	Station	U210 2020 01	1982-1985	16.5	15.5	14.5	27.2	20.9	7.67	3.4	5.52	10.6	11.7	10.4	17.3						13.4		
<i>Pertes (3)</i>																					-0.66		
Ville du Pont (FR)	Station	U210 2010	1978-2023	15.7	14.2	15.6	10.5	10.2	7.52	3.21	2.45	1.68	4.12	9.94	14.3	0.05	0.15	0.26	10.24				
Remonot	Source T																						
Colombière	Source P																				0.1		
Pont du Diable	Source P																						
Corcherie	Source P																						
Moulinot	Source P																				0.01		
<i>Théverot</i>	<i>Cours d'eau affluent</i>																				?		
<i>Chataignat</i>	<i>Cours d'eau affluent</i>																				?		
Moulin Bournez	Source P																						
Abri-sous-Roche	Source P																						
Malcombe	Source P																						
Arvoux	Source P																				0.4	1	
<i>Pertes (4)</i>																							
Sortie du lac des Brenets (CH)	Station	2247	1973-2023	26	22	28	21	15	12	8.1	7.1	8.4	15	20	27	2	0.85	1.6	18.21				
Moulins du Diable	Source P																				0.01	0.1	
Moron	Source P																				0.1		
Chez Némorin	Source P																				0.25		
Verrerie	Source P																				0.1		
Fournet-Blancheroche [La Rasse] (FR)	Station	U211 2010 01	1969-2023	28.2	24.7	31.3	26	17.5	14.2	10.4	9.2	10.8	16.4	22.8	30.2	4.62	2.38	3.7	28.7				
Rasse	Source P																				0.045	0.3	0.75
Ronde	Source P																				0.1		1
Bief d'Etroz	Source P																				0.001		

La Goule (CH)	Station	2370	1971-2023	39	33	40	32	23	19	14	12	15	22	30	39	4.16	2.37	3.6	26.47		
Theusseret	Source P																		0.3	1.1	
Forge	Source P																				
Bief Paroux	Source T																				
Goumois (FR)	Station	U212 2010 01	1956-2023	37.2	37.6	42	39.3	27.4	23.7	17.6	16.1	16.8	21.9	29.7	38.7	2.02	1.1	2.2	28.9		
<i>Vautenaivre</i>	<i>Cours d'eau affluent</i>																				
Blanchefontaine	Source P																				
<i>Bief de Fuesse</i>	<i>Cours d'eau affluent</i>																		0.1		
Soubey	Source P																			?	
<i>Pertes (5)</i>																					
Ocourt (CH)	Station	2210	1969-2023	47	40	49	38	28	23	17	15	17	26	36	47	5.39	3.28	4.7	32.62		
Glère (FR)	Station	U214 2010 01	1969-2023	44	43.4	48.3	45.6	32.2	27	18.4	16.9	18	24.3	33.5	45.4	5.29	2.79	4.5	32.7		

Annexe D. Nappes karstiques

89 nappes karstiques ont été documentées dans le cadre de l'étude. La plupart sont en relation avec l'hydrogéologie du Doubs transfrontalier. Certaines en revanche appartiennent aux systèmes hydrogéologiques adjacents et n'ont pas obligatoirement fait l'objet d'une documentation exhaustive (Loue, Ain, Areuse, Beuchire-Creugenat, Saine, etc.). Ces nappes sont distinguées de celles en lien avec le Doubs par un *.

Les nappes se développant majoritairement en France sont codées selon le préfixe « **FNK** » + incrément. Coté Suisse, les nappes prennent le préfixe « **MNK** » + incrément⁴⁹.

Les volumes sont donnés pour une porosité efficace admise de **0.5%**.

⁴⁹ Depuis le projet Swisskarst (2012-2016), les nappes karstiques documentées côté Suisse se voient attribuer un code unique par l'ISSKA de type « **MNK** » de 0 à 999. Afin de distinguer les nappes karstiques suisses des nappes karstiques françaises, un autre type de code « **FNK** » (« **F** » pour France) a été adopté. Ces codes n'ont rien d'officiel mais ils permettent d'attribuer un identifiant unique à chaque nappe.

Code	Nom	Etage	Alt. Surface libre [m a.s.l] #	Volume [km ³]	Description
FNK001 [Carte M5]	Source du Dessoubre* [RKM20]	Jurassique sup.	586	>0.017	<p>La nappe se développe en amont de la source haute mais permanente du Dessoubre – vers l'altitude de 586 m. La source haute émerge des formations calcaires du Kimméridgien. Les sources Lançot (580 m) et Taboureau (580 m) émergent du même horizon aquifère, à la même altitude. La source Noire, située vers 560 m d'altitude émerge très certainement aussi de la même nappe. En revanche, les sources en aval, plus basses en altitude – comme celles observées dans le lit du cours d'eau à hauteur de Consolation-Maisonnettes, ou le Brief Ayroux par exemple (alt. 505 m) – émergent de l'horizon calcaire du Rauracien. La source des 3 Pucelles émerge directement de l'aquifère du Jurassique moy. (nappe FNK004).</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe est relativement bien contrainte par la structuration géologique. La partition des écoulements entre les différents exutoires en revanche n'est pas connue avec précision.</p>
FNK002 [Carte M12]	Source de l'Ain*	Jurassique sup.	650 (690)	>>0.012	<p>Le niveau de base de la nappe est à priori conditionné par l'altitude de la source de la Papeterie (commune de Sirod), env. 2 km à l'ouest de la source de l'Ain, vers 620 m d'altitude (Bertrand and Mudry, 2010). Les indices géologiques et les traçages montrent en effet que cet exutoire est la source principale du système.</p> <p>La source de l'Ain (située entre 680 et 690 m, l'incertitude sur l'altitude est assez forte) est un exutoire temporaire (Figure 56). Les observations montrent aussi des sources plus ou moins permanentes vers 650 m d'altitude (« saut de Maillys »), 1 km en aval de la source de l'Ain. C'est cette altitude de 650 m qui sera prise comme niveau de base pour la nappe.</p> <p>La nappe s'étend vers l'est jusqu'au chevauchement de Rondefontaine. La nappe est majoritairement libre, seul le coin nord-ouest est captif sous les formations du Crétacé. Elle n'est que partiellement représentée dans les modèles et cartes de cette étude.</p> <p>En conditions de hautes eaux, les mises en charge atteignent 690 m au niveau de la source de l'Ain. Elles dépassent donc facilement les 700 m en amont de la nappe.</p>

					 
					<p><i>Figure 56. La source de l'Ain, à gauche, en crue en octobre 2008 et à droite, à l'étiage en aout 2018 (source visinand.ch)</i></p> <p>Incertitude : l'incertitude sur l'extension de la nappe est importante, notamment vers l'est – en direction de la plaine de Frasne / Pontarlier. Au sud, la ligne de partage des eaux semble bien conscrite à la ligne du chevauchement de Rondefontaine.</p>
FNK003 [Carte M3]	Bief de Brand* [RKM15]	Jurassique moy.	390	>0.017	<p>La nappe est contrôlée par l'altitude de la source du Bief de Brand (390 m). L'extrapolation du gradient hydraulique vers l'amont dessine une large zone noyée dans les formations calcaires du Bathonien / Bajocien. La nappe est majoritairement libre – mais semi-captive sous les marnes du Callovien. La nappe alimente le Dessoubre⁵⁰.</p> <p>Entre la source du Bief de Brand et Maîche, le gouffre de la Rasse (profondeur ~180 m) atteint les calcaires du Bajocien vers 565 m, toujours dans la zone non saturée – signe que la nappe FNK003 ne s'étend à priori pas jusqu'au lieu-dit « la Rasse ».</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe est relativement incertaine du fait d'une structuration géologique du secteur assez complexe (nombreux décrochements, petits chevauchements en relais, etc.).</p>
FNK004 [Carte M5]	Source des 3 Pucelles*	Jurassique moy.	470	>>0.06	<p>La source des 3 Pucelles fixe le niveau de base régional de l'aquifère du Jurassique Inf. à 470 m. La nappe FNK004 se développe vers le sud et passe sous les nappes de l'aquifère du Jurassique sup. (FNK001 et FNK005) dont elle tire probablement aussi une partie de l'alimentation.</p>

⁵⁰ D'autres sources alimentent le Dessoubre en rive droite (ex : Mouillevillers), mais elles n'ont pas fait l'objet de documentation dans le cadre de ce projet.

					<p>Figure 57. Profil hydrogéologique NS le long du lit du Dessoubre à hauteur de la source des 3 Pucelles. Les formations du Callovien (« Call. ») sont marneuses, relativement imperméables. La nappe FNK010 est donc majoritairement captive en aval de la source.</p> <p>Incertitude : les incertitudes concernant la géométrie et l'organisation des écoulements sont très importantes. La nappe présente une très grande extension ($>120 \text{ km}^2$) – qui dépasse par ailleurs l'emprise du modèle M5. Les informations géologiques à cette profondeur sont rares. Les relations avec les aquifères sus-jacents doivent être explorées.</p>
FNK005 [Cartes M5, M4, M3]	Moulin du Bois* [RKM20]	Jurassique sup.	780	0.006	<p>La nappe est supposée alimenter la source de Moulin du Bois. Son extension est contrainte par la géométrie du synclinal de Montbéliardot. Les eaux de la nappe peuvent en théorie se réinfiltrer dans les calcaires du Jurassique moy. en aval de la source et alimenter la nappe de la source des 3 Pucelles (FNK004).</p> <p>Incertitude : la présence de cette nappe doit être vérifiée. Il n'existe aucun indice direct attestant de son existence.</p>

FNK006 [Carte M7]	Derrière le Mont [RKM25]	Jurassique sup.	950	0.004	<p>L'altitude du toit de la nappe est fixée à 950 m (altitude de la source de Derrière le Mont). En aval dans la Malcombe, une source de trop plein est mentionnée vers 915 m d'altitude (Grotte de Derrière Sobey), aux coordonnées suivantes : 2°54'0"582, 1°21'0"135⁵¹.</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe est relativement bien contrainte, ainsi que son épaisseur. Les incertitudes portent surtout sur la dynamique de la nappe en conditions en hautes eaux.</p>
FNK007 [Carte M6]	Villers le Lac	Jurassique sup.	750	0.008	<p>La nappe alimente entre autres la source de l'Arvoux. Le toit de la nappe est fixé à 750 m d'altitude – ce qui correspond à l'altitude du niveau d'eau « normal » du lac des Brenets / Chaillexon. A l'étiage, lorsque que le lac s'assèche, l'émergence de source se positionne vers 737 m d'altitude – ce qui donne une indication sur le toit de la nappe à l'étiage. L'extension de la nappe est limitée à l'aval au niveau du saut du Doubs. Majoritairement libre, la nappe plonge au sud-est sous le chevauchement de Pouillerel et devient captive. En conditions de hautes eaux, l'activation de la source temporaire de la Toffière fixe la hauteur d'eau de la nappe vers 760 m.</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe en aval, au niveau du saut du Doubs, est incertaine. La mise en place de la nappe est liée à l'éboulement du saut du Doubs. On peut penser qu'avant l'éboulement et la mise en place du lac des Brenets / Chaillexon, cette nappe se positionnait environ 30 à 40 m plus bas. Suite à l'effondrement, son niveau est remonté, prolongeant aussi son extension vers l'extrême ouest du val de Morteau (secteur de « la Fresse »).</p>
FNK008 [Carte M6]	Les Bassots*	Jurassique sup.	750	<0.001	<p>En rive droite du Doubs, superposée à la nappe FNK007, le chevauchement de Pouillerel permet d'isoler une nappe dans les formations du Jurassique supérieur du flanc chevauché. Celle-ci est supposée alimenter des petites sources au niveau des Bassots.</p> <p>Incertitude : l'existence de cette nappe devrait être validée.</p>
FNK009 [Cartes M3 et M4]	Charque-mont* [RKM15]	Jurassique sup.	800	>0.01	<p>La présence de cette nappe est supposée en fonction des conditions géologiques propices à la formation d'un réservoir dans les calcaires du Jurassique sup. (structure synclinale). La nappe est globalement libre, seule une portion est captive sous les Seignes des Guinots.</p>

⁵¹ EPSG 2056

					<p>A noter que la nappe avait déjà été identifiée par le passé (Kiraly, 1973). Elle présente par ailleurs une ressource intéressante.</p> <p>Les écoulements sont dirigés vers l'est, vers un débordement souterrain qui rejoint ensuite la nappe FNK003 par des circulations majoritairement vadoses sur le toit des marnes oxfordiennes et ensuite alimenter la source du Bief de Brand.</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe doit être précisée.</p>
FNK010 [Carte M5]	Rosureux*	Jurassique moy.	450	>0.008	<p>En aval direct de la source des 3 Pucelles où un saut hydraulique peut être observé. Il se marque par une section plus érosive du lit du Dessoubre entre 470 et 450 m d'altitude. Vers 450 m, le profil du Dessoubre s'aplatit notablement, suggérant le développement d'une nappe à cette altitude.</p> <p>Celle-ci est vraisemblablement drainée par diverses petites sources en bordure du Dessoubre, au nord-est du modèle M5.</p> <p>Incertitude : la nappe s'étend en bordure du modèle – elle n'a pas été modélisée avec précision.</p>
FNK011 [Carte M3]	Maîche* [RKM15]	Jurassique sup.	720	0.003	<p>La présence de cette nappe est supposée en fonction des conditions géologiques propices à la formation d'un réservoir dans les calcaires du Jurassique sup. (structure synclinale). Les écoulements sont dirigés vers l'est avec un débordement souterrain qui rejoint la nappe FNK003 et alimente la source du Bief de Brand. La nappe présente une ressource intéressante pour le secteur.</p> <p>Incertitude : l'existence de cette nappe devrait être validée.</p>
FNK012 [Carte M3]	Source du Theusseret	Jurassique moy.	500-540	0.012	<p>La nappe accompagne le Doubs sur la section située entre la côte 540 m (1 km en aval de l'usine du Refrain), jusqu'à l'entrée du village de Goumois où elle finit sur la ligne de chevauchement vers 500 m d'altitude (cf. Figure 47).</p> <p>La nappe est majoritairement captive sous les marnes oxfordiennes, mais des relations indirectes avec la source du Theusseret ne peuvent toutefois pas être écartées. Des sources pourraient en outre exister dans le lit du Doubs à la hauteur du lieu-dit « Sous le Château ».</p> <p>Incertitude : l'existence et l'extension spatiale de la nappe sont relativement incertaines – mais une structure de réservoir est clairement identifiée dans les modèles géologiques.</p>

FNK013 [Carte M4]	Cote du Doubs RG	Jurassique moy.	660-610	0.022	<p>Nappe d'accompagnement du Doubs dans les calcaires du Dogger. En aval direct du barrage du Châtelot, le niveau de base est fixé vers 660 m sur la base de la position du siphon de la fissure de chez Nemorin : 2546975 / 1217823, en relation direct avec des griffons dans le lit du Doubs sur cette section (GIPEK, 2004). En aval, ce sont les sources de la Verrerie (625 m) et de la Rasse (610 m) qui fixe le niveau de base. Le gradient hydraulique diminue fortement de l'ouest vers l'est.</p> <p>En aval, au niveau du Refrain, la nappe alimente aussi potentiellement les sources de l'Isle de la Saulce (« la Couleuse »), et du Bief et de la Grotte, qui sont à priori des résurgences importantes (Fournier, 1926).</p> <p>A noter que la charge imposée dans l'aquifère par le barrage du Châtelot modifie certainement l'état d'équilibre hydraulique dans l'aquifère de la nappe FNK013.</p> <p>Incertitude : l'équilibre hydrogéologique de la nappe est probablement modifié par la charge imposée au niveau du barrage du Châtelot.</p>
FNK014 [Carte M4]	Cote du Doubs, rive droite	Jurassique moy.	660-610	0.016	<p>La nappe se développe dans les formations du Jurassique moy., dans le flanc chevauchant, rive sud du Doubs (CH). La nappe remonte ensuite vers la Ferrière. Elle est largement captive dans le synclinal de La Chaux-de-Fonds – Le Locle, surmontée par la nappe du Jurassique supérieur qui l'alimente. Elle assure la circulation des eaux souterraines entre la vallée de la Chaux-de-Fonds et les sources en bordure du Doubs, notamment les sources de la Verrerie (625 m), de la Rasse (610 m) et probablement d'autres.</p> <p>Incertitude : La géométrie exacte de la nappe doit être précisée, et notamment son extension vers la Ferrière. En revanche, si les écoulements sont globalement bien compris, des exutoires restent probablement à découvrir sur ce tronçon du Doubs, certainement dans le lit de la rivière.</p>
FNK015 [Cartes M11 et M12]	Source du Doubs [RKM36]	Jurassique sup.	940 (1050)	0.007	<p>La position de la source du Doubs en conditions de basses eaux fixe l'altitude du toit de la nappe karstique dans les formations calcaires chevauchant le synclinal de Mouthe (nappe tectonique du Risoux).</p> <p>La nappe karstique qui se loge dans l'unité chevauchée du Risoux (Jurassique sup.) et qui est en partie supposée alimenter la source du Doubs prend le code FNK015. Elle se distingue de la nappe FNK019, située à l'ouest, en raison d'un possible obstacle hydraulique au niveau du décrochement de Mouthe.</p> <p>La nappe est assez étroite, les réserves sont à priori plutôt modérées.</p>

					<p>En conditions de hautes eaux, les mises en charge atteignent 1050 m d'altitude comme le montre l'étagement des sources de trop-plein, notamment la source du Cul du Bief.</p> <p>Incertitude : l'extension vers l'est de cette nappe, c.à.d. en direction du Tunnel du Mont d'Or et de ses sources n'est pas déterminée avec précision. A l'ouest, les écoulements traversent à priori le décrochement de Mouthe (alimentation depuis FNK019) comme l'attestent plusieurs traçages – mais la présence d'un obstacle hydraulique au niveau du décrochement ne peut être complètement écartée.</p>
FNK016 [Carte M9]	Les Fourgs - Source Martin [RKM31]	Jurassique sup.	910	0.013	<p>La position des sources Martin suggère la présence d'une nappe FNK016 dont le toit est fixé à minima à 910 m. La nappe se propage dans les formations calcaires du Jurassique sup. A l'ouest, il semblerait que la nappe soit limitée par le décrochement de Pontarlier. A l'est, une limite est supposée exister entre la nappe FNK016 et la nappe de l'aquifère du Malm (Jurassique sup.) de la Cote aux Fées (MNK087) dont le toit est fixé à l'altitude de 780 m (ISSKA, 2023b)⁵², mais elle est difficilement contrainte par la géologie qui semble maquer un corridor entre les Fourgs et la Cote aux Fées. Kiraly (1973) suggérait une continuité hydraulique avec la nappe MNK087, ce qui semble difficile à défendre au vu des écarts de hauteurs d'eau entre les deux nappes. Les réserves sont assez intéressantes.</p> <p>La nappe est partiellement alimentée aussi par la drainance ou le débordement de la petite nappe FNK056 du Crétacé inf. qui lui est superposée.</p> <p>Incertitude : Des investigations complémentaires devraient permettre de mieux localiser et de définir les limites hydrauliques à l'ouest (décrochement de Pontarlier) et à l'est (nappe MNK087 de la Côte-aux-Fées).</p>
FNK017 [Cartes M11, M9 et M12]	Haut-Doubs [RKM32]	Jurassique sup.	900	>0.05	<p>La nappe se développe dans les calcaires du haut synclinal du Haut-Doubs, à l'est du décrochement de Mouthe. L'altitude du toit de la nappe est inférieure à celle de la nappe alimentant la source du Doubs (FNK015, 940 m) mais supérieure à 900 m qui est l'altitude de la cluse anticlinale en aval de Longevilles Mont-d'Or. L'altitude de 900 m sera donc prise comme référence – même s'il est probable qu'elle soit localement plus haute.</p> <p>La nappe est captive sur l'essentiel de sa surface, sous les marnes purbeckiennes et la nappe du Crétacé (FNK040), hydrauliquement plus haute. Dans la partie sud-est, elle est captive sous le chevauchement du Risoux et passe donc sous la nappe FNK015. Au vu de sa taille, la nappe présente des réserves très significatives. A l'est, la nappe est en</p>

⁵² La nappe **MNK087** (canton de Vaud) n'est pas représentée sur les documents hydrogéologiques. Elle ne présente pas de relation avec le Doubs.

					<p>partie drainée par le système des sources de Clos Bayet et de la Carré, ce qui suppose que la hauteur d'eau de la nappe peut localement être plus élevée que 950 m, soit en conditions hydrologiques normales, soit en conditions de hautes eaux.</p> <p>Dans la partie médiane, il n'existe que peu d'exutoires de cette nappe, même si des circulations en direction des sources de Malbuisson sont attestées (Schlumberger, source Bleue, etc.). Des émergences sont toutefois supposées dans la cluse en aval de Longevilles – Mont-d'Or (possiblement dans le lac en amont de la retenue) et vers la nappe FNK053 en passant sous la cluse.</p> <p>Incertitudes : la géométrie de la nappe est relativement bien contrainte par la structure du synclinal de Métabief. En revanche, les limites imposées au niveau des décrochements de Mouthe (vers la nappe FNK018) et de Pontarlier (vers la nappe FNK016) sont arbitraires, car les indices semblent montrer que les écoulements passent à travers ces obstacles. La nature de la connexion avec la nappe FNK053 sous la cluse de Longeville – Mont d'Or est aussi incertaine. Les exutoires de la nappe ne sont pas tous correctement déterminés. La nappe FNK017 présente des ressources intéressantes, des investigations sont toutefois nécessaires pour mieux comprendre sa géométrie et son fonctionnement.</p>
FNK018 [Carte M12]	Source de la Saine* [RKM35]	Jurassique sup.	895	>0.03	<p>La nappe se développe dans la structure synclinale de Mouthe – supposée comme hydrauliquement continue entre les deux flancs, déconnectée de la nappe FNK019 par le chevauchement du Risoux (→ PROFIL TRANS 1). Le niveau de base est contrôlé par l'altitude de la source. La portion de nappe alimentant majoritairement la source de la Saine est plutôt supposée se trouver le long du flanc nord. L'altitude de la source pose cependant la question d'un rétro-chevauchement qui isolerait et percherait la nappe alimentant la source du reste du synclinal. Les interprétations tectoniques récentes (projet Swisstopo Jura 3D) ne montrent toutefois aucun rétro-chevauchement...</p> <p>Incertitude : L'extension vers l'est de la nappe (vers nappe FNK017) est assez arbitraire, bien que géologiquement à cet endroit les déplacements induits par le décrochement de Mouthe ne sont pas très marqués.</p>
FNK019 [Carte M12]	Risoux	Jurassique sup.	950	>0.02	<p>La nappe se développe dans les calcaires du flanc chevauchant, au nord de la chaîne du Risoux. Côté ouest, la direction des écoulements n'est pas connue. Côté est, une partie des écoulements participe manifestement à l'alimentation de la source du Doubs via un déversement dans la nappe FNK015 au niveau du décrochement de Mouthe. Les réserves en eau souterraines sont assez significatives.</p>

					Incertitude : la géométrie de la nappe est relativement bien contrainte par la structure synclinale. En revanche, les gradients et les directions d'écoulement sont incertaines.
FNK020 [Carte M10]	Clusette	Jurassique sup.	860-850 (900)	0.015	<p>La nappe des sources de la Clusette (FNK020) se développe dans l'aquifère du Jurassique sup. Le toit de la nappe est fixé entre 850 et 860 m d'altitude.</p> <p>En aval de Vaux-et-Chantegrue, la nappe alimente diverses petites sources en chapelet le long du Drugeon (Martinet, Combe Levier, source Drugeon, etc.). Finalement la nappe se déverse en aval, probablement dans la nappe FNK042, via les pertes signalées dans le Drugeon sur ce tronçon.</p> <p>Dans la partie ouest, la nappe est surmontée par un aquifère crétacé (nappe FNK046) dont elle tire probablement une partie de son alimentation, soit directement (drainance, débordement), soit indirectement par des pertes le long du Drugeon.</p> <p>En conditions de hautes eaux, la nappe s'élève à l'altitude de 900 m au moins comme en témoigne la présence de la source temporaire de Camboine.</p> <p>Incertitude : les incertitudes sur les relations amont - aval de cette nappe ne sont pas documentées avec précision, à savoir :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les échanges hydrauliques avec la nappe FNK053 au sud-est, au niveau de la source de la Clusette, mais aussi au nord-est, vers Oye-et-Pallet, - Les modalités de déversement et d'alimentation vers la nappe FNK042 à l'ouest, - Les relations avec la nappe crétacée superposée (FNK046). <p>Les enjeux sur cette nappe sont significatifs et nécessiteraient d'étudier ces incertitudes.</p>
FNK021 [Carte M8]	Source de la Loue*	Jurassique sup.	535	>0.0035	<p>La nappe FNK021 se développe dans les calcaires du Jurassique sup. et alimente directement la source de la Loue (altitude surface libre 535 m). La nappe est alimentée principalement par le débordement de la nappe FNK063 (Jurassique moy.) à la faveur d'un ensellement dans la structure anticlinale.</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe est partielle car en bordure ouest du modèle M8.</p>
FNK022 [Carte M8]	Le Pontet*	Jurassique sup.	420	-	La nappe FNK022 alimente les sources du Pontet et de Moulin Miguet .

					Incertitude : la géométrie de la nappe est très partielle car en bordure ouest du modèle M8.
FNK023 [Carte M8]	Arc-sous-Cicon*	Jurassique sup.	735	0.005	<p>Cette nappe perchée se développe dans la structure synclinale sous le village d'Arc-sous-Cicon. Le seuil au niveau des marnes est positionné à l'altitude de 735 m (seuil de déversement). Les écoulements alimentent par débordement la nappe FNK022 et sont ensuite drainés vers les sources du Pontet et de Moulin Miguet. Les traçages hydrogéologiques ne montrent en revanche aucune relation d'alimentation vers la nappe FNK021. Les réserves en eau souterraine sont significatives pour le secteur.</p> <p>Incertitude : l'existence de la nappe FNK023 n'est pas prouvée mais les indices géologiques sont favorables au développement d'une zone noyée d'importance moyenne à cet endroit.</p>
FNK024 [Carte M7, M8 et M5]	Plateau de Gilley / Les Combes [RKM23]	Jurassique sup.	755 (780)	>0.04	<p>Nappe des sources du Défilé d'Entreroches – dans la continuité de la nappe FNK041. La nappe est intégralement libre.</p> <p>En aval du défilé, le niveau de base est fixé par la source de la Colombière à 755 m qui serait l'exutoire pérenne des sources du Pont du Diable et de Remonot. Le siphon terminal de la grotte Chapelle de Remonot est aussi situé vers 755 m. En conditions de hautes eaux, les mises en charge observées dans le piézomètre du Gros Foyard (Colin et al., 1995) et l'activation de la source temporaire de la Corchère (GIPEK, 2004) montrent que le niveau de la nappe peut facilement atteindre voire dépasser la cote de 780 m.</p> <p>Incertitude : l'incertitude principale concerne la limite hydraulique supposée à hauteur de Maison du Bois qui sépare les écoulements drainés vers les sources du Défilé d'Entreroches de ceux drainés vers la source de la Loue (FNK041), cf. Figure 38. Cette limite pourrait en effet se déplacer suivant l'axe de la vallée selon les conditions hydrologiques.</p>
FNK025 [Carte M1]	Ocourt amont	Jurassique sup.	420	<0.001	<p>Petite nappe karstique d'accompagnement du Doubs. Faible épaisseur, pas d'exutoire connu. Les réserves sont peu significatives.</p> <p>Incertitude : l'existence de la nappe n'est pas validée.</p>
FNK026 [Carte M1]	Ocourt aval	Jurassique sup.	420	<0.001	Petite nappe karstique d'accompagnement du Doubs. Faible épaisseur, pas d'exutoire connu. Les réserves sont peu significatives.

					Incertitude : l'existence de la nappe n'est pas validée.
FNK027 [Carte M1]	Seleute			<0.001	<p>Cette nappe perchée est supposée se développer dans la petite écaille des calcaires du Jurassique sup.</p> <p>Incertitude : l'existence de la nappe doit être confirmée.</p>
FNK028 [Cartes M3, et M1]	Synclinal d'Indevillers	Jurassique sup.	550	0.0015	<p>La nappe est supposée se développer dans les calcaires du Jurassique sup. sous le village de Indevillers, à la cote de 550 m environ. L'altitude de la surface de la nappe est fixée par les sources mentionnées comme émergentes à la base des calcaires rauraciens dans le vallon du Bief de Fuesse. Le système hydrogéologique est par ailleurs attesté par un traçage depuis la scierie à l'ouest d'Indevillers.</p> <p>Incertitude : si la présence de cette nappe est assez certaine, l'incertitude sur la géométrie est assez importante.</p>
FNK029 [Carte M1]	Fontaine Jeule	Jurassique sup.	750-770	<0.001	<p>La nappe est associée à la source captée de Fontaine Jeule. Elle se développe à priori dans les calcaires du Rauracien.</p> <p>La source de Fontaine Jeule émerge en rive gauche du Bief de Fuesse - entre 750 m et 770 m d'altitude. L'émergence est marquée par un énorme dépôt de travertins sur toute sa hauteur, attestant soit de fortes et fréquentes mises en charge, soit de l'existence de plusieurs niveaux aquifères étagés. A ce stade et à cette échelle, il n'est pas possible de trancher. Les réserves sont toutefois peu significatives.</p> <p>Des essais de traçage depuis le Surmont – quasiment sur la ligne de frontière – confirment les écoulements en direction de la source.</p> <p>Incertitude : Si la présence de la nappe peut être attestée, ses contours restent encore incertains. Les réserves en eau souterraine sont en revanche assez limitées.</p>
FNK030 [Carte M5]	Narbief* [RKM20]	Crétacé inf.	880	0.001	<p>La nappe se développe dans les calcaires du Valanginien. L'altitude de la surface libre est positionnée vers 880 m soit l'altitude de la perte de Narbief.</p> <p>La perte draine les eaux de surface mais certainement aussi les eaux de débordement de la nappe qui sont ensuite infiltrées dans les calcaires sous-jacents du Jurassique sup. (nappe FNK009).</p> <p>Incertitude : l'existence de cette nappe doit être validée.</p>

FNK031 [Carte M4]	Russey ouest [RKM15]	Crétacé inf.	890	<0.001	<p>Nappe supposée dans les calcaires du Valanginien. La nappe alimente ensuite l'aquifère du Jurassique sup. via des pertes (nappe FNK050).</p> <p>Incertitude : l'existence de cette nappe doit être validée.</p>
FNK032 [Carte M4]	Russey est [RKM15]	Crétacé inf.	880	<0.001	<p>Nappe supposée dans les calcaires du Valanginien. La nappe alimente ensuite l'aquifère du Jurassique sup. via des pertes (nappe FNK009).</p> <p>Incertitude : l'existence de cette nappe doit être validée.</p>
FNK033 [Cartes M3 et M4]	Creux de Charque-mont* [RKM15]	Crétacé inf.	870	<0.001	<p>La nappe se développe dans les calcaires du Valanginien. L'altitude du toit de la nappe est fixée par un point de déversement supposé aux Seignes des Guinnots vers 870 m. La nappe est à priori drainée vers les calcaires du Jurassique sup. où elle s'infiltra (nappe FNK009).</p> <p>Incertitude : l'existence de cette nappe doit être validée</p>
FNK034 [Carte M9]	Frambourg - Verrieres	Crétacé inf.	820	>0.005	<p>La nappe se développe dans les calcaires du Valanginien. L'altitude du toit est positionnée vers 820 m dans la partie amont – cf. forage du Grd. Bourgeau 1 (De Bosset, 1965) – le niveau étant censé diminuer progressivement vers l'ouest en se rapprochant du Frambourg. La nappe est probablement compartimentée de l'amont vers l'aval. Les écoulements sont supposés tous se diriger vers l'ouest (le Frambourg). Les émergences pérennes se situent probablement dans le marais du Petit Bois, et en conditions de hautes eaux, il est possible que des émergences apparaissent dans le lit de la Morte. Ces écoulements peuvent ensuite se réinfiltrer dans l'aquifère sous-jacent du Jurassique sup. (MNK216).</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe est relativement bien contrainte. En revanche, des incertitudes subsistent sur la direction des écoulements. Dans le détail, la nappe est certainement davantage compartimentée.</p>
FNK035 [Carte M7]	Val de Morteau	Crétacé inf.	755-753	>0.007	<p>La nappe se développe dans les calcaires du Valanginien du Val de Morteau. Elle est globalement captive sous les formations quaternaires. L'altitude de la surface libres est placée vers 755 m en amont (débouché du défilé d'Entreroches) et 753 m en aval (vers les captages de Moulin Bournez).</p>

					Incertitude : La géométrie de la nappe pourrait être précisée. Dans le détail, la nappe est certainement davantage compartimentée.
FNK036 [Carte M7]	Val de Morteau	Jurassique sup.	753 (830)	0.03	<p>Dans les calcaires jurassiques sup. du Val de Morteau, l'altitude de la surface libre de la nappe est fixée vers 753 m, altitude du Doubs à la sortie du défilé d'Entreroches (source inférieure du Moulinot), et autour de 752 m à la sortie du Val, c.à.d. à la hauteur de la source de Moulin Bournez. A noter que le forage BRGM Préciforage de 1994 (BSS 05316X0039) pénètre à l'évidence les calcaires du Portlandien vers 115 m de profondeur. Le niveau d'eau mesuré après forage s'établit autour de 760 m d'altitude. Les conditions de mesures ne sont toutefois pas documentées.</p> <p>La nappe est majoritairement captive sous les formations Crétacé (nappe FNK035).</p> <p>D'après l'inventaire spéléologique du Doubs Tome 4 (GIPEK, 2004), en conditions de hautes eaux, des mises en charge peuvent à priori atteindre la cote de 785 m (source supérieure du Moulinot), voire 830 m dans le secteur de Morteau (Grotte du Trou au Loup). Ceci sous-entendrait une hauteur de mise en charge de plus de 75 m (→ PROFIL TRANS 9).</p> <p>Incertitude : de même que la nappe FNK007, les conditions actuelles de la nappe FNK036 résultent de l'éboulement du Saut du Doubs qui a conduit à remonter les hauteurs d'eau dans l'aquifère d'environ 30 m. Si la géométrie de la nappe est globalement bien contrainte, les relations avec les nappes en amont / aval et autour (FNK007, FNK048) ne sont pas connues avec précision.</p>
FNK037 [Carte M1]	Aval St-Ursanne	Jurassique moy.	420-410	0.013	<p>La nappe se développe dans les calcaires du Jurassique moy., sous le lit du Doubs, entre St-Ursanne et l'aval de Brémoncourt. L'altitude du toit de la nappe est fixée par la cote du Doubs, soit entre 420 m en amont et 410 m en aval. Elle est supposée être drainée vers le Doubs via l'intermédiaire des sources entre Ocourt et Brémoncourt.</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe est relativement bien contrainte. Dans le détail, la nappe est certainement davantage compartimentée.</p>
FNK038 [Cartes M3, M2 et M1]	Blanche-fontaine [RKM16]	Jurassique moy.	494-470	>0.014	<p>La nappe se développe dans l'aquifère du Jurassique moy., à l'altitude de 494 m en amont et de 470 m dans la partie aval. La nappe est globalement captive sous les marnes oxfordiennes. Elle alimente la source de Blanchefontaine et diverses autres petites sources en aval.</p> <p>Incertitude : Une extension de la nappe en direction de Maîche (ouest) et de Trevillers au nord est possible mais demeure difficile à modéliser en raison des incertitudes</p>

					géologiques sous le plateau de Maîche. Des investigations complémentaires sont nécessaires pour mieux appréhender la géométrie et le fonctionnement de cette nappe.
FNK039 [Carte M3]	Goumois	Jurassique moy.	495-490	0.004	<p>En aval de la nappe FNK012, la pente du Doubs s'accentue en traversant la cluse de Goumois puis celle de Gourgouton. Le fond de la cluse de Goumois voit affleurer les formations calcaires du Callovien (membre de Bollement CH) probablement perméables et le fond de la cluse de Gourgouton voit affleurer les calcaires du Bathonien et du Bajocien.</p> <p>L'altitude du toit de la nappe est fixée par la cote du Doubs en aval de Goumois à 495 m. A l'ouest la nappe est certainement limitée par le décrochement de Damprichard (à vérifier). Il est toutefois possible que la nappe traverse le Doubs, en suivant l'axe du chevauchement et devienne progressivement captive en passant sous le chevauchement.</p> <p>En aval de Goumois, le niveau de base est fixé à 490 m (siphon dans la grotte du Bois des Planches, siphon de la grotte de la Falaise).</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe reste incertaine en raison de la qualité des données / informations géologiques de ce secteur. Les exutoires de la nappe ne sont pas précisément connus.</p>
FNK040 [Cartes M1, M12 et M9]	Haut-Doubs [RKM32]	Crétacé inf.	1010 – 910	0.016	<p>Le toit de la nappe est positionné vers 1010 m à l'ouest (secteur Châtelblanc), puis diminuant vers 910 m à l'aval de Longevilles Mont-d'Or avant le passage dans la cluse. Coté est, la nappe est supposée remonter jusqu'à la cote 970 m. La nappe est majoritairement captive sous les formations marneuses de l'Hauterivien.</p> <p>A l'ouest, la nappe est supposée alimenter les sources du Lernier 1 & 2, du Grand Git (secteur de Chaux Neuve, puis du Perthuis et des Cotes vers 970 m, secteur Mouthe), éventuellement celles de Rançon et de Meix dans le même secteur – bien que des circulations dans l'aquifère de l'Hauterivien soient possibles aussi.</p> <p>Plus à l'est, la nappe alimente la source de la Combe (secteur de Longevilles Mont-d'Or) vers 950 m. Les eaux des aquifères du Crétacé inf. sont ensuite évacuées par le Doubs via la cluse en aval de Longevilles Mont-d'Or mais des circulations souterraines restent possibles via le vallon à l'est de Saint-Antoine qui offre une continuité géologique au moins pour l'aquifère du Malm.</p> <p>Dans le secteur de Métabief, les sources de la Creuse, Géraniums, etc. sont positionnées autour de 970 m, alors que la charge observée dans le forage profond de 1957 (Cornet, 1977; François et al., 1957) était vers 947 m environ. Un profil géologique de la plaine du Bief rouge est proposé par Cornet (1977) qui montre l'épaisseur de l'aquifère.</p>

					Cette nappe alimente des sources et le cours du Doubs mais peut aussi alimenter la nappe FNK017 sous-jacente par infiltration. Incertitude : la nappe FNK040 n'est pas hydrauliquement continue, il s'agit plutôt de petits blocs aquifères disloqués qui entretiennent des relations d'alimentation entre eux. Chaque bloc alimente sa propre source.
FNK041 [Cartes M9, M8 et M7]	Arçon	Jurassique sup.	755 (790 m)	0.003	<p>La nappe se développe dans l'aquifère du Jurassique sup. L'altitude de la surface libre est fixée indirectement par les informations de forages. Le forage de 30 m vers Maison du Bois (alt 790 m) est sec, ce qui tend à montrer que l'altitude de la zone noyée est ≤ 760 m sur la section entre Pontarlier et Ville-du-Pont. Elle ne peut cependant pas être plus basse que 755 m qui est l'altitude des sources de la Colombière et du Pont du Diable.</p> <p>La nappe est en contact hydraulique à l'est avec la nappe FNK024, elle-même drainée vers le défilé d'Entreroches.</p> <p>A l'ouest, la nappe FNK041 est arbitrairement arrêtée sur le décrochement de Pontarlier – mais des connexions hydrauliques avec la nappe du bassin de Pontarlier (FNK042) à l'ouest du décrochement sont possibles.</p> <p>La nappe est majoritairement drainée vers la source de la Loue, via une infiltration dans les calcaires du Jurassique moy. Le long du décrochement de Pontarlier (nappes FNK063 et FNK048), puis un seuil de débordement identifié au niveau de l'anticinal du Mont Pelé comme exutoire de la nappe FNK063 (cf. Figure 37).</p> <p>Le forage du gros Foyard, situé à proximité du Doubs à Maison du Bois (Colin et al., 1995), confirme que le niveau piézométrique en basses eaux est situé plus de 10 m sous le niveau du Doubs. En revanche, en conditions de hautes eaux, les mises en charge au forage atteignent la cote du Doubs. En période de hautes eaux, les pertes sont donc rapidement limitées et ne peuvent plus augmenter. La « saturation » des pertes résulte probablement d'un passage étroit des conduits drainant la perte. La cote de 780, voire 790 m, sera retenue comme côte maximale de la nappe sur ce tronçon.</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe est relativement bien contrainte, surtout en conditions de basses eaux. La cote en hautes eaux demeure incertaine. La valeur prise à 790 m est basée sur une seule et unique valeur de piézomètre qui peut aussi bien refléter une mise en charge de toute la nappe FNK041 qu'une mise en charge très locale (à l'endroit du forage simplement). Ces valeurs devront être vérifiées.</p>
FNK042	Plaine de Pontarlier	Jurassique sup.	755	>0.08	Très grande nappe karstique dans les formations du Jurassique sup., majoritairement captive. La nappe est certainement en connexion avec les nappes FNK041 (Jurassique sup.), FNK048 et FNK063 (Jurassique moy., via le décrochement de Pontarlier).

[Cartes M10, M9 et M8]						<p>La nappe est principalement alimentée par les coteaux de la plaine de Pontarlier, là où les formations du Jurassique sup. affleurent. Elle est aussi alimentée par les pertes du Dugeon en amont direct de Bonnevaux.</p> <p>Les points de fuite sont : (i) les sources dans la vallée de la Loue (source de la Loue, de la Baume Archée, etc.) via la nappe FNK063 et (ii) les sources de l'Ain vers le sud-ouest (incertain).</p> <p>Les réserves en eau souterraine sont très significatives. Les relations avec la nappe sus-jacente du Crétacé (FNK044) ne sont pas clairement établies. Etant donnée les différences d'altitude entre la nappe FNK044 (> 800 m) et la nappe FNK042 ($<< 800$ m), des alimentations depuis la nappe du Crétacé, par drainance ou par débordement, ne peuvent pas être exclues.</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe semble assez bien contrainte à l'ouest. En revanche, à l'est, la terminaison de la nappe est arbitraire compte tenu (i) du manque d'informations géologiques en profondeur dans le bassin de Pontarlier et (ii) des effets de bord du modèle géologique M10. Il est probable qu'elle s'étende davantage vers le sud-ouest. Il est par ailleurs démontré qu'une partie des écoulements est drainée vers les sources de l'Ain. La nappe semble donc davantage compartimentée que la géométrie représentée ici. Plusieurs indicateurs semblent montrer que le niveau de la nappe est plus bas vers l'ouest :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le gouffre de Jardelle (946415 / 6651339, EPSG 2154) : ZNS entre 710 et 845 m. La nappe se situerait vers 710 m d'altitude (profondeur -135 m) mais des mises en charge de plus de 20 m sont à priori possibles (GIPEK, 2004) – donc 730 m en conditions de hautes eaux minimum... - Perte de la Beaume de Boujailles (936051 / 6647588, EPSG 2154) : ZNS entre 709 et 796 m, siphon à 709 m - Gouffre Didier, plus à l'ouest, le niveau statique est mentionné vers 679 m d'altitude... <p>Ces indications semblent montrer qu'un phénomène de capture de l'aquifère du Jurassique sup. - nappe FNK042 - par le bassin de l'Ain est très probablement en cours.</p>
FNK043 [Cartes M10, M9 et M11]	Remoray - St Point	Crétacé inf.	850	<0.01	Nappe des calcaires du Valanginien dans la vallée du lac de Remoray et Saint-Point. Le toit de la nappe est pris à l'altitude des lacs en conditions de basses eaux. Dans le détail, la nappe est certainement plus compartimentée que le modèle ne le montre. La nappe est peu épaisse (<50 m) et majoritairement captive sous les formations marneuses de	

	[RKM29]				<p>l'Hauterivien inférieur. Les relations entre la nappe FNK043 et les eaux superficielles du lac de Remoray ne sont pas clairement établies. Soit (i) la nappe alimente tout le système de tourbières autour du lac qui participent elles-mêmes au maintien du lac, soit (ii) les tourbières sont directement posées sur les marnes d'Hauterive et la nappe est alors déconnectée des eaux superficielles. Dans ce cas, les eaux pourraient réssurer à la source de la Clouterie.</p> <p>Incertitudes : la nappe entretient certainement des relations avec les lacs de Remoray et de Saint-Point qui ne sont pas documentées. A l'ouest, vers Boujeons, la nappe est supposée se prolonger (cf. sources de Crêt Est et Ouest), mais son épaisseur diminue fortement. Des modèles et des données plus détaillés seraient nécessaires pour appréhender sa géométrie dans ce secteur.</p>
FNK044 [Cartes M10 et M9]	Plaine de Pontarlier	Crétacé inf.	~800		<p>Nappe des formations calcaires du Crétacé (surtout Valanginien) de la plaine de Pontarlier.</p> <p>L'altitude du toit de la nappe FNK044 est fixée arbitrairement autour de 800 m, mais dans le détail, la nappe peut être davantage compartimentée. La perte de Ponsard (Bannans, coord : 947'491 / 6'648'698, alt 807 m), s'ouvrant dans les calcaires de l'Hauterivien est un indice qui fixe par défaut la hauteur du toit de la nappe (GIPEK, 2004). Les forages à Dommartin pénétrant les calcaires de l'Hauterivien (BSS001MCYS) montrent une hauteur d'eau autour de 805 m. La nappe est potentiellement drainée par les formations quaternaires de la Plaine de Pontarlier, puis par le Drugeon et enfin le Doubs (Castany et al., 1930). Elle peut éventuellement alimenter l'aquifère sous-jacent du Jurassique sup. (nappe FNK042) par drainance ou par débordement – mais les informations actuelles ne permettent pas de le vérifier.</p> <p>Incertitude : l'incertitude sur la géométrie, la profondeur et l'extension de cette nappe vers l'ouest (vers Frasne) est importante. Dans le détail, cette nappe est probablement davantage compartimentée que sa représentation ne le laisse suggérer. Une distinction pourrait éventuellement aussi être faite entre la nappe des calcaires du Valanginien et celle des calcaires de l'Hauterivien sup.</p>
FNK045 [Cartes M9, M8 et M7]	Les Alliés	Crétacé inf.	850	0.002	<p>La nappe se développe dans les formations du Crétacé inf. du synclinal des Alliés. La cote de la surface libre est placée approximativement vers 850 m d'altitude. La nappe alimente des petites sources dans le synclinal, mais les informations pour les identifier sont lacunaires. Une source est toutefois mentionnée dans le lit du Lavaux, à l'altitude de 848 m (Pasquier et al., 2006). Cette source n'apparaît toutefois pas sur les documents</p>

					<p>français. Une partie des écoulements est supposée s'infiltrer dans l'aquifère sous-jacent du Jurassique sup. (nappe FNK051) et rejoindre la source de la Loue.</p> <p>Incertitude : dans le détail, la nappe est certainement davantage compartimentée. La limite aval (sud-ouest) est approximative. La nappe est dessinée jusqu'au décrochement de Pontarlier mais une continuité avec la nappe FNK044 ne peut être complètement écartée.</p>
FNK046 [Carte M10]	Malpas	Crétacé inf.	880		<p>Petite nappe des formations calcaires du Valanginien. La nappe est supposée être drainée vers le Drugeon, ou alors déborder et se perdre vers la nappe FNK020.</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe est incertaine.</p>
FNK047 [Carte M8]	Arc-sous-Cicon*	Crétacé inf.	820	0.04	<p>Nappe des calcaires du Valanginien. Le toit de la nappe est supposé vers 820 m d'altitude, correspondant à l'altitude des marais. Cette nappe est très peu épaisse et les ressources associées sont faibles. Les eaux de la nappe FNK047 sont supposées s'infiltrer dans les calcaires du Jurassique supérieur et alimenter la nappe FNK022.</p> <p>Incertitude : Il n'est pas exclu que les marais se développent directement sur les marnes de l'Hauterivien et que la nappe soit reliée aux marais indirectement via des pertes.</p>
FNK048 [Cartes M7, M8, M9, M5 et M6]	Doubs Moyen	Jurassique moy.	755	>0.1	<p>Grande nappe de l'aquifère du Jurassique moy. qui se développe depuis le village de Doubs jusqu'à Villers le lac. La nappe traverse les modèles M9, M8, M7 et M6 sans obstacles à priori. Elle est largement surmontée par l'aquifère du Jurassique supérieur sous lequel elle est souvent captive (nappes FNK041, FNK024, FNK036, etc.). Globalement, la zone sud semble s'écouler vers la source de la Loue via la nappe FNK063. Les synclinaux de Gilley et de Morteau s'écouleraient en direction des Brenets</p> <p>L'altitude du toit de la nappe est fixée vers 755 m dans la partie amont (Doubs, Arçon). Il ne peut être beaucoup plus bas pour permettre le franchissement du seuil de débordement vers la nappe de la Loue (FNK049) puis vers la source de la Loue.</p> <p>Dans la partie médiane, vers le défilé d'Entreroches, des exutoires de la nappe sont hydrogéologiquement possibles dans le lit du Doubs au niveau de l'anticlinal de Hauterive Mont Vouillot (cf. Figure 38).</p> <p>Dans le synclinal de Morteau, puis le long du Doubs, la nappe se prolonge au moins jusqu'au lac de Moron. L'altitude du toit de la nappe est supposée autour de 750 m – du moins dans le vallon de Morteau. Les écoulements alimentent soit les sources de</p>

					<p>l'aquifère du Jurassique sup. sus-jacent (FNK036), soit des sources supposées de l'aquifère du Jurassique moy., en aval du lac des Brenets.</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe est relativement bien contrainte, mais on peut supposer qu'elle est compartimentée et qu'elle n'agit pas comme un ensemble. Elle est supposée continue entre Gilley et Morteau, mais il est toutefois possible qu'une limite sépare la nappe du synclinal de Gilley de celle du Val de Morteau.</p>
FNK049 [Carte M8]	Loue*	Jurassique moy.	535		<p>La nappe est majoritairement captive dans les formations du Jurassique moy. La nappe est supposée alimenter la source de la Loue via un transit à travers la nappe du Jurassique sup. (FNK021).</p> <p>Incertitudes : les incertitudes sont assez élevées du fait de la précision du modèle géologique dans ce secteur qui est relativement faible. Les données et informations géologiques sont rares et de qualité incertaine.</p>
FNK050 [Cartes M5, M4]	Le Russey*	Jurassique sup	800		<p>La présence de cette nappe est supposée en fonction des conditions géologiques propices à la formation d'un réservoir dans les calcaires du Jurassique sup. La nappe est globalement libre, seule une petite partie au centre est captive sous le ruisseau des Seignes. Cette nappe avait déjà été identifiée (Kiraly, 1973) – l'auteur avait fixé le toit de la nappe vers 750 m mais n'a pas fourni d'arguments pour l'identification de cette nappe.</p> <p>Les écoulements sont dirigés vers l'est, vers un seuil de débordement souterrain qui devrait s'écouler vers la nappe FNK004 au nord et ensuite alimenter la source des 3 Pucelles.</p> <p>Une connexion par débordement voire même une continuité avec la nappe FNK009 au nord-est est possible car le seuil sous le Russey n'est pas très marqué et peut résulter d'artéfacts dans les modèles géologiques.</p> <p>Incertitude : l'existence de cette nappe, son extension et l'altitude de la surface libre devraient être validés.</p>
FNK051 [Cartes M7, M8 et M9]	Les Alliés	Jurassique sup.	755		<p>La nappe se développe dans le synclinal entre Pontarlier et les Alliés. Elle est majoritairement libre avec une surface libre à l'altitude de 755 m minimum (780-790 m au maximum). En effet, en aval de Cluse et Mijoux, une série de petits forages⁵³ réalisés</p>

⁵³ 05577X0022/S3 (8.15 m de profondeur), 05577X0023/S4 (6.8 m de profondeur)

					<p>vers 842 m d'altitude, en bordure du Doubs, ne montrent aucune trace d'eau – même à la côte de 833 m. Le niveau d'eau est donc plus bas.</p> <p>La nappe alimente ensuite la nappe FNK041 (jurassique sup.) soit directement, soit par l'intermédiaire du décrochement de Pontarlier, via la nappe FNK061 (jurassique moy.). En aval les écoulements sont drainés vers FNK063 puis la source de la Loue.</p> <p>Incertitude : La géométrie de la nappe est relativement bien contrainte, mais celle-ci peut être davantage compartimentée que continue. La terminaison est de la nappe (secteur de « la Fresse ») pourrait être révisée si la charge hydraulique est supposée plus haute.</p>
FNK052 [Carte M12]	Les Pontets [RKM29]	Jurassique sup	870		<p>La nappe se développe dans la petite structure synclinale des Pontets. Elle est majoritairement libre à l'altitude de 870 m environ. Au nord-est, elle alimente la nappe FNK053 à travers le décrochement de Mouthe (en théorie il n'y a pas de rupture hydraulique).</p> <p>Incertitude : l'altitude de la surface libre est estimée à partir des conditions aval (altitude de la nappe FNK053). En théorie elle pourrait être significativement plus élevée si le décrochement de Mouthe barre significativement les écoulements. Cela ne semble pas être le cas, sinon des indices en témoigneraient. En revanche, la géométrie de la nappe est globalement bien contrainte.</p>
FNK053 [Cartes M10, M9, M11 et M12]	Saint-Point [RKM29]	Jurassique sup	840-900	>0.1	<p>En amont du lac de Remoray (851 m), le niveau de base des eaux souterraines est fixé entre 850 et 860 m sur la base des sources de la Drésine et des Capucins (GIPEK, 2004). Au nord-est, vers le Frambourg le niveau a été admis à 840 m où la nappe est délimitée par le décrochement de Pontarlier, avec des échanges possibles vers les nappes voisines le long de la faille.</p> <p>A l'est de Labergement Sainte-marie, la limite avec la nappe FNK017 (surface libre 900 m) est fixée arbitrairement car les deux nappes n'en forment probablement qu'une seule avec un lien par l'ensellement du massif de la Fuvelle. De manière similaire, le lien avec la nappe FNK020 à l'ouest est assez arbitraire, délimité par le rétro-chevauchement de l'anticlinal du bois de Montaigu (#RETRO_CHARGEBIN). L'orientation des échanges hydriques entre ces deux nappes n'est pas claire.</p> <p>La nappe FNK053 est surtout caractérisée par les exutoires importants en rive droite du lac de Saint Point (Schlumberger, Grande source, source Bleue) qui émergent vers 900 m.</p> <p>Incertitude : les incertitudes concernent surtout l'extension de la nappe vers le nord-ouest, en direction de Vaux-et-Chantegrue (secteur de la Clusette)</p>

FNK054 [Carte M12]	Les Pontets [RKM29]	Crétacé inf.	980	0.0015	<p>La nappe se développe dans les calcaires du Valanginien et de l'Hauterivien. Elle alimente les sources de Boujeons 1 & 2. La partie centrale de la nappe est captive. Une partie des écoulements peut potentiellement alimenter la nappe sous-jacente du Jurassique sup. (FNK052) dont la charge est bien plus basse en altitude.</p> <p>A noter que le volume de la nappe est significatif par rapport aux autres nappes crétacées, du fait de la géométrie relativement profonde et coffrée du synclinal.</p> <p>Incertitude : dans le détail, la nappe FNK054 est certainement davantage compartimentée. La partition des écoulements entre les sources de Boujeons 1 & 2 et l'aquifère inférieur du Jurassique sup. n'est pas connue.</p>
FNK055 [Cartes M6, et M7]	Villers-le-Lac - Les Bassots	Crétacé inf.	752	<0.001	<p>La nappe se développe dans les calcaires du Valanginien qui bordent le Doubs. La charge est fixée par l'altitude du lit du Doubs.</p> <p>Incertitude : La présence de la nappe est supposée.</p>
FNK056 [Carte M9]	La Testa	Crétacé inf.	1060	<0.001	<p>La nappe se développe au sud-ouest des Fourgs, dans les formations calcaires du Valanginien qui forment un petit réservoir aquifère perché en raison du plissement. La nappe n'est pas épaisse, libre pour l'essentiel, et elle semble se déverser majoritairement vers la nappe sous-jacente des calcaires du Jurassique sup. (FNK016).</p> <p>Incertitude : la présence de la nappe devrait être confirmée mais les enjeux sur la ressource sont négligeables.</p>
FNK057 [Carte M9]	Fontaine-Ronde	Crétacé inf.	960	<0.001	<p>La nappe occupe l'étroit synclinal des formations calcaires du Crétacé inf. Elle alimente la source intermittente de Fontaine Ronde.</p> <p>Incertitudes : Si la source paraît bien alimentée par cette nappe, des relations avec la nappe sous-jacente du Jurassique sup. (FNK017) ne peuvent être complètement écartées – surtout au regard des informations de traçage. Les débits de la source (~200 L/s) semblent suggérer que l'alimentation ne peut pas être simplement assurée par les affleurements de calcaires du Crétacé. Une alimentation depuis les calcaires du Jurassique sup. doit être envisagée.</p>

FNK058 [Carte M3]	Les Plains et Grands Essarts*	Jurassique sup.	710	-	<p>La présence de la nappe est supposée sur la base sur la base de la structure synclinale fermée des Plains et Grands Essarts. La nappe est drainée vers le nord, les écoulements sont dirigés vers la source du Bief de Brand par déversement dans la nappe FNK003.</p> <p>Incertitude : la présence de la nappe et la charge estimée (710 m) doivent être confirmées.</p>
FNK059 [Carte M3]	Montandon *	Jurassique sup.	680	-	<p>La présence de la nappe est supposée sur la base de la structure synclinale. Les eaux de la nappe sont drainées vers l'ouest et débordent via un seuil pour alimenter la nappe FNK003 ensuite drainée par la source du Bief de Brand.</p> <p>Incertitude : la présence de la nappe et la charge estimée (680 m) doivent être confirmées.</p>
FNK060 [Carte M3]	Le Friolais	Jurassique sup.	585	<0.001	<p>Petite nappe supposée dans le pincement synclinal du vallon qui remonte au sud-ouest de Mancenans. Elle présente à priori peu d'intérêt en termes de ressource en eau souterraine.</p> <p>Incertitude : la présence de la nappe et la charge estimée (585 m) doivent être confirmées.</p>
FNK061 [Cartes M9, M7 et M8]	Les Alliés	Jurassique moy.	760		<p>La nappe FNK061 est supposée. Elle serait drainée vers le décrochement de Pontarlier. Les eaux sont ensuite supposées rejoindre la Loue. L'altitude du toit de la nappe est hypothétique, elle ne peut à priori se situer plus bas, ni plus haut, les nappes sus-jacentes (FNK041 et FNK045) ayant des charges similaires.</p> <p>Incertitude : l'existence de la nappe doit être confirmée.</p>
FNK062 [Carte M9]	Frambourg - Verrieres	Jurassique moy.	760	0.024	<p>La nappe FNK062 est captive sous la nappe du Jurassique sup. (MNK216) et se développe des deux côtés de la frontière. Les écoulements sont à priori dirigés vers le Frambourg (FR) mais dans sa partie orientale, il n'est pas exclu qu'une part des écoulements soit drainée vers l'est et des sources du Val-de-Travers (CH). Les sources véritablement alimentées par cette nappe ne sont pas connues.</p> <p>Incertitude : La géométrie de la nappe est assez bien documentée, seuls les écoulements sont incertains.</p>

FNK063 [Cartes M10, M9 et M8]	Frasne	Jurassique moy	750	0.2	<p>La nappe épouse le fond du synclinal de Frasne. Dans la partie ouest, les écoulements sont supposés alimenter l'Ain, dans la partie est, ils sont supposés se diriger vers la Loue. La limite entre les deux systèmes n'est pas précisément positionnée. L'altitude se situerait entre 750 et 755 m en basses eaux.</p> <p>Incertitude : si l'existence de la nappe est pratiquement certaine, la direction des écoulements est encore très incertaine. Les informations géologiques et hydrogéologiques sous la plaine de Frasne sont très lacunaires.</p>
FNK064 [Carte M12]	Fontaine Noire*	Jurassique sup.	580		<p>La nappe alimente vraisemblablement la source de Fontaine Noire (580 m), et certainement d'autres aussi qui émergent au bord de la Saine (puis l'Ain). La nappe est majoritairement libre, elle est alimentée par les infiltrations directes, mais aussi par débordement de la nappe FNK065 qui se situe au nord-est.</p> <p>Incertitude : La nappe n'est présentée que partiellement car en bordure de l'emprise du modèle M12. Les incertitudes concernant sa géométrie et ses écoulements sont assez élevées.</p>
FNK065 [Carte M12]	Grand Chalesme*	Jurassique sup.	600		<p>La nappe se développe dans les calcaires du Jurassique sup. Elle est majoritairement libre. Les fluctuations de niveaux sont supposées importantes en conditions de hautes eaux (jusqu'à 690 m). La nappe alimente indirectement la source de Fontaine Noire par débordement, et traversée de la nappe FNK064, mais des écoulements vers le nord et le système des sources de l'Ain – Papeterie (FNK002) ne doivent pas être exclus.</p> <p>Incertitude : Si l'existence de la nappe est assez certaine, ses modalités de drainage le sont moins. Les différences basses eaux / hautes eaux sont aussi supposées importantes.</p>
FNK066 [Carte M3]	Forge [RKM16]	Jurassique sup.	520 (>560)	<0.01	<p>La nappe est supposée alimenter la galerie drainante de la Forge. Elle se développe dans le cœur du petit synclinal de « Sur le Mont » qui plonge vers le Doubs. Elle est barrée à l'aval par les formations quaternaires de recouvrement le long du Doubs. La taille de la nappe est modeste, le fond du synclinal étant essentiellement perché par rapport aux exutoires. Elle collecte les écoulements qui s'infiltrent dans le synclinal à l'est de Damprichard. La nappe est majoritairement libre, l'altitude du toit est au minimum de 520 m mais peut potentiellement être plus élevé (cf. Figure 46). En conditions de hautes eaux, la charge dépasse probablement 560 m.</p>

					Incertitude : l'existence et la géométrie de la nappe doivent être vérifiées.
FNK067 [Cartes M2 et M3]	Château Cugny	Jurassique sup.	700	<0.001	<p>Cette petite nappe est à cheval entre les périmètres des modèles M2 et M3. Elle est supposée se loger dans la petite structure synclinale perchée au sommet de laquelle se dresse le château. La nappe est majoritairement libre, et certainement de faible épaisseur (<50 m), ne présentant donc pas une ressource significative. Elle alimente au nord-ouest une série de sources à ~700 m d'altitude, qui déversent dans le Bief de Vautenaivre puis dans le Doubs.</p> <p>Incertitude : la présence de la nappe et son extension sont suggérées, elles doivent être démontrées.</p>
FNK068 [Cartes M8 et M7]	Arc-sous-Ciçon	Jurassique moy.	~450		<p>La nappe est supposée occuper les formations calcaires du Jurassique moy., dans la structure synclinale qui se développe sous le village d'Arc-sous-Ciçon. Aucune source n'y est directement associée et elle doit être drainée par des débordements souterrains, soit à l'ouest vers FNK049 et la source du Pontet, soit au nord-est vers FNK004 et le Dessoubre.</p> <p>Incertitude : L'altitude de débordement de la nappe n'est pas connue avec précision. L'extension vers le nord-est n'est pas clairement définie, elle pourrait éventuellement être connectée directement à FNK004.</p>
MNK019 [Carte M2]	Tramelan*	Jurassique sup.	850	>0.01	<p>La nappe karstique des calcaires du Jurassique sup. (MNK019) est drainée en partie vers la source de la Birse (Tavannes (CH), hors du périmètre d'étude). Elle peut cependant aussi vraisemblablement déborder au sud (au niveau du col de Pierre Pertuis) et alimenter la nappe karstique du vallon de Saint-Imier MNK020 (ISSKA, 2012a) et ensuite la Suze. L'altitude du toit de la nappe dans la vallée de Tavannes est positionnée vers 850 m (Bertrand, 1988).</p> <p>Incertitudes : la géométrie de la nappe est relativement bien contrainte. Le seuil de débordement au niveau du tunnel de Pierre Pertuis doit être confirmé. A noter que la nappe MNK019 n'est que partiellement documentée dans le cadre de cette étude.</p>
MNK020 [Cartes M2 et M4]	Vallon de St-Imier*	Jurassique sup.	790-710	>0.02	L'altitude de la surface libre de la nappe est supposée (ISSKA, 2012a) vers 790 m en amont du vallon de Saint-Imier (carte M4) et 710 m en aval (carte M2). Cette nappe n'entretient aucune relation avec le Doubs.

					Incertitude : la nappe MNK020 n'est que partiellement documentée dans le cadre de cette étude.
MNK021 [Cartes M6 et M7]	La Brévine	Jurassique sup.	986-1000 (>1028)		<p>La nappe de la Brévine se développe dans l'aquifère du Malm (Jurassique sup.). Elle est captive sous le fond de la vallée et libre sous ses flancs. L'altitude de la nappe libre est fixée vers 986 m dans la partie aval de la nappe, à proximité du village de la Brévine et dépasse probablement 1000 m dans zones amont. Les limites de la nappe ont fait l'objet d'une évaluation par le passé (Kiraly, 1973; Tripet, 1972). Des compléments sont apportés par des travaux plus récents (ISSKA, 2024b, 2010; Jeannin and Malard, 2020), notamment sur la cote de la nappe en hautes eaux (>1028 m).</p> <p>La nappe alimente la source de l'Areuse par débordement. Elle n'entretient aucune relation connue avec le Doubs.</p> <p>Incertitude : la nappe MNK021 n'est que partiellement documentée dans le cadre de cette étude. Une continuité hydrologique (voire hydraulique) est supposée avec la nappe MNK034, mais elle n'est pas clairement documentée.</p>
MNK022	Ponts-de-Martel	Jurassique sup.	750-730		<p>La nappe se développe dans les formations calcaires du Jurassique sup. qui dessinent le synclinal des Ponts de Martel. Elle alimente la source de la Noirague. L'altitude de la source (730 m) fixe le niveau de base hydraulique en aval. En amont la charge hydraulique est certainement plus élevée (750 m sur la base d'un gradient à 1 %). La charge est probablement située autour de 735 m aux environs des Ponts-de-Martel et 750 m au contact avec le décrochement de la Ferrière (extrémité nord-est, hors emprise de l'étude). La nappe est en partie captive au centre du synclinal. Elle n'entretient aucune relation avec le Doubs.</p> <p>Incertitude : la nappe MNK022 n'est que partiellement documentée dans le cadre de cette étude.</p>
MNK034 [Cartes M6 et M4]	La Chaux-de-Fonds	Jurassique sup.	900-850 (900-969)	>0.02	<p>La nappe du synclinal se développe entre le Locle et la Ferrière. Son extension est relativement grande et la nappe ne possède pas d'exutoire en surface.</p> <p>Vers La Chaux-de-Fonds, le toit de la nappe est positionné autour de 890-900 m d'altitude (la hauteur d'eau dans le forage des Eplatures⁵⁴ mesurée en 1965 indique 889 m, cf. De Bosset, 1965). Elle est relativement bien documentée par des travaux ultérieurs (Blant et</p>

⁵⁴ Coordonnées EPSG 2056 2551200 / 1215225

					<p>al., 2003; ISSKA, 2012b). La nappe déborde via un seuil souterrain vers le Valanvron pour alimenter la nappe MNK226 (Jurassique moy.) qui se décharge vers MNK226, puis dans le Doubs.</p> <p>Vers Le Locle, le toit de la nappe est fixé à 850 m au niveau du Col des Roches – même si elle peut être légèrement plus bas. La nappe déborde via un seuil au niveau du Col des Roches pour alimenter la nappe MNK226, qui elle-même, soit par débordement, soit par continuité hydraulique directe, alimente les nappes FNK048 et FNK007 qui alimentent ensuite les sources dans le lac des Brenets (source de l'Arvoux, de la Toffière, etc.). En conditions de hautes eaux, la nappe atteint vraisemblablement la cote de 969 m dans le secteur de la Chaux-de-Fonds (De Bosset, 1965), et de l'ordre de 900 m au minimum dans le secteur du Locle (ISSKA, 2024c)</p> <p>Incertitude : les écarts de hauteur d'eau en basses eaux entre les extrémités est (Ferrière) et ouest (Le Locle), > 50 m, posent la question de la continuité hydraulique de la nappe. Aucun argument ne permet actuellement de confirmer si la nappe est hydrauliquement continue ou discontinue. Dans ce dernier cas, une ligne de partage des écoulements devrait se dessiner entre le Crêt-du-Locle et les Forges.</p>
MNK041 [Carte M1]	Ajoulotte - Porrentruy*	Jurassique sup.	440	>>0.02	<p>La nappe s'étend au nord de la ligne St. Ursanne - Seleute – Montancy, jusqu'à Chevenez en amont. Les informations données par les forages montrent une décroissance de l'altitude du toit de la nappe de l'ouest vers l'Est (450 m à Chevenez, 440 m à Bressaucourt, et 423 m pour la source de la Beuchire). Les écoulements souterrains alimentent principalement le système des sources de la Beuchire et du Creugenat (ISSKA, 2018; Malard, 2018).</p> <p>La nappe MNK041 est libre ; elle n'est pas en relation avec le bassin du Doubs car séparée de celui-ci par l'anticlinal de la Roche d'Or (cf. PROFIL TRANS 14). En effet, les formations de marnes de l'Aalénien au cœur de l'anticlinal de la Roche d'Or sont poussées assez haut en altitude et forment la ligne de partage entre les eaux du bassin du Doubs et celles qui alimentent l'Allaine.</p> <p>Incertitude : la géométrie de la nappe n'a pas été entièrement modélisée vers le nord car elle dépasse le périmètre du modèle M1. Elle reste assez grossière et devrait être comparée aux travaux réalisés sur le système karstique Beuchire-Creugenat (Malard and Jeannin, 2022; Vouillamoz et al., 2013).</p>
MNK210 [Carte M1]	Synclinal Delémont Ouest*	Jurassique sup.	463-430	>>0.1	La nappe se développe à l'est de St-Ursanne, dans le synclinal de Delémont. Le niveau de base est normalement fixé par les affleurements de Malm (Jurassique sup.) incisés par la Birse à l'entrée des gorges de Soyhières, c.à.d. vers 405 m d'altitude. Les travaux

					<p>de forages profonds à Delémont (Flury et al., 1991) montrent cependant que la nappe du Malm est artésienne avec un charge à ~430 m d'altitude. En considérant une continuité hydraulique et un gradient de l'ordre de 1/1000, l'altitude du toit de la nappe sous le village de Glovelier devrait en théorie se situer 15 à 20 m en-dessus de cette valeur, soit vers 445-450 m. Le forage de reconnaissance REN 1⁵⁵ à Glovelier (tunnel du Mont Russelin) fixe la cote minimale de la nappe des calcaires du Malm vers 463 m, ce qui semble assez cohérent avec la valeur estimée. En pratique, cette valeur de 463 m sera retenue pour le secteur de Glovelier. Cette nappe n'est pas en relation avec le bassin du Doubs.</p> <p>Incertitude : La géométrie de la nappe n'a pas été entièrement modélisée vers l'est car elle dépasse le périmètre de l'étude.</p>
MNK211 [Cartes M3 et M4]	Cote du Doubs - Ronde	Jurassique sup.	610-615		<p>La nappe de la source de la Ronde s'étend à la cote de 610-615 m d'altitude. Les sources de la Rasse et de la Verrerie sont aussi des exutoires de la même nappe. Il s'agit d'un long et assez étroit synclinal qui se développe sous le Doubs entre La Verrerie et Biaufond et se prolonge à l'est au-delà du Noirmont, sous le plateau des Frances-Montagnes. Une partie des eaux de cette nappe provient de la nappe sous-jacente FNK013 du Jurassique moy. (cf. PROFIL TRANS 12).</p> <p>Incertitude : l'existence de la nappe doit être confirmée, même si à cet endroit il est hydrogéologiquement difficile d'imaginer que les calcaires ne soient pas noyés. La géométrie de la nappe en revanche est relativement bien conditionnée par la structure synclinale. L'organisation des écoulements reste en revanche assez complexe en raison du jeu des chevauchements. En amont, la nappe s'amincit et semble se pincer – mais elle peut toutefois être en continuité hydraulique avec la nappe MNK212. Des connexions hydrauliques avec la nappe FNK013 (Jurassique moy.) ne doivent pas être écartées.</p>
MNK212 [Carte M4]	Cote du Doubs - Sombaille	Jurassique sup.	630		<p>Nappe d'accompagnement du Doubs, en amont de la nappe MNK211. La nappe est peu épaisse et ne possède pas d'exutoire connu. Elle est en équilibre direct avec le niveau du Doubs. Elle est certainement en équilibre aussi avec la nappe FNK013 (Jurassique moy.) qui est la nappe karstique principale du synclinal.</p> <p>Incertitude : si l'existence de la nappe est très probable, sa géométrie doit néanmoins être précisée. La nappe étant peu épaisse, une légère variation de pendage des structures géologiques peut modifier significativement son extension. La nappe peut</p>

⁵⁵ 2'582'515 / 1'243'602, EPSG 2056

					éventuellement être en continuité hydraulique avec les nappes MNK212 (en aval) et MNK213 (en amont).
MNK213 [Carte M4]	Cote du Doubs - Chatelot	Jurassique sup.	650	-	<p>Nappe d'accompagnement du Doubs dont la cote est actuellement contrôlée par la réurgence Chez Némorin, vers 650 m d'altitude. La nappe se développe à l'ouest du lac de Moron et des captures sont possibles depuis le tronçon entre le saut du Doubs et lac de Moron en rive gauche ainsi que dans le lac de Moron lui-même. La nappe suit ensuite plus ou moins le tracé du Doubs. Elle présente une épaisseur assez faible et certainement une connexion hydraulique avec la nappe FNK013 (Jurassique moy.) qui est la nappe karstique principale du synclinal.</p> <p>Incertitude : l'existence de la nappe est globalement confirmée, mais sa géométrie reste à préciser, notamment vers l'est (aval). Une continuité hydraulique est possible avec la nappe MNK212 en aval.</p>
MNK214 [Carte M3]	Bief d'Etoz	Jurassique sup.	540-510	0.006	<p>L'altitude du toit de la nappe est positionnée vers 510 m en aval par l'altitude la source du Bief d'Etoz et plutôt 540 m en amont (altitude du Doubs).</p> <p>Incertitude : la nappe du Bief d'Etoz est relativement peu épaisse, les incertitudes sur son extension sont donc assez importantes.</p>
MNK215 [Carte M1]	St. Ursanne	Jurassique sup.	435	0.003	<p>La nappe est supposée se développer dans l'aquifère du Jurassique sup. de l'écaillée chevauchée située au nord de St. Ursanne. L'altitude du toit de la nappe est fixée à 435 m, soit l'altitude du Doubs qui recoupe l'écaillée à son extrémité ouest. Des petites sources sont mentionnées dans le secteur de St-Ursanne – elles sont probablement alimentées par cette nappe.</p> <p>Incertitude : L'extension de cette nappe vers l'est (vers Delémont) doit encore être précisée. Cette nappe est intéressante car elle pourrait assurer une connexion hydraulique entre les eaux du bassin de Delémont (nappe MNK210) et le Doubs. La différence d'altitude n'est toutefois pas importante.</p>
MNK216 [Carte M9]	Frambourg – les Verrières	Jurassique sup.	810 - 790	-	Côté Verrière de Joux, la présence de la nappe du Malm MNK216 est attesté par le forage du Grd. Bourgeau 1 (De Bosset, 1965). La cote la plus basse mesurée est donnée à 820.5 m, mais il semblerait que la cote de basses eaux ne soit pas correctement mesurée (possible communication avec la nappe sus-jacente du Valanginien FNK034). Tripet, (1972) propose une cote de basses eaux entre 810 et 812 m. Sachant que la source de l'Areuse émerge à 790 m, la valeur de 810 m reste relativement élevée. Une valeur de

					790 m sera donc retenue ici comme valeur pessimiste. Il s'agit d'ailleurs de la valeur retenue par L. Kiraly sur la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel (Kiraly, 1973). Incertitude : La géométrie de la nappe semble bien contrainte, mais l'altitude du toit de la nappe reste incertaine. La limite hydraulique entre un exutoire est (source de l'Areuse) et un exutoire ouest (décrochement de Pontarlier) n'est pas définie. Cette limite est pourtant une ligne de partage les eaux entre le bassin du Rhône et le bassin du Rhin.
MNK217 [Carte M1]	Chatillon	Jurassique sup.	448	<0.001	Une petite nappe libre est supposée se développer dans les calcaires du Rauracien sous le lit du Doubs au niveau de Tariche. Elle est peu épaisse et majoritairement libre. Son extension est limitée par l'amincissement des formations calcaires sous le lit du Doubs. La nappe est en équilibre avec le cours d'eau. Aucun exutoire ne peut lui être attribuée, ce qui ne signifie pas qu'il n'y a pas d'échange d'eau entre la nappe et la rivière. Incertitude : L'existence de la nappe devrait être confirmée, mais au vu de son épaisseur, l'enjeu en termes de ressources est faible.
MNK218 [Carte M2]	Soubey inf.	Jurassique moy.	480	0.004	La nappe se développe dans l'aquifère du Jurassique moy. L'altitude du toit de la nappe est fixée par la cote approximative de la source inférieure de Soubey (480 m). Incertitude : Si la géométrie de la nappe est assez bien contrainte à l'est, elle l'est moins à l'ouest (secteur des Pommerats). Les probabilités qu'il y ait des échanges avec le Doubs à l'ouest des Pommerats ne peuvent être écartées (capture ou à l'inverse alimentation). C'est pour cette raison que les écoulements ne sont pas déterminés avec précision dans la partie ouest de la nappe.
MNK219 [Carte M1]	Tariche	Jurassique moy.	450	-	La nappe dite de « Tariche » se développe sous le lit du Doubs dans les formations du Jurassique Moy. Elle est majoritairement captive. L'altitude du toit de la nappe est fixée vers 460 m en amont et 440 m en aval. La zone de décharge de la nappe est probablement située en bordure du Doubs sous le village de Montmelon. Incertitude : Dans le détail, la nappe est certainement en partie compartimentée.
MNK220 [Carte M2]	Pré-Petitjean	Jurassique sup.	870	-	La présence et l'altitude (870 m) de cette nappe sont interprétées sur la base d'une structure de réservoir (synclinal calcaire) mis en évidence par le modèle géologique. La nappe est supposée libre et drainée vers la source du Theusseret ; A la faveur d'un seuil identifié vers 870 m d'altitude, elle déborde vraisemblablement sous Saignelégier en

					<p>direction de Muriaux pour atteindre la nappe MNK221 puis la source en bordure du Doubs. A noter que deux tests de traçage sont à priori répertoriés dans le vallon, au niveau des pertes du Plain de Saigne (Meury, 1984; Rieben, 2000). Les deux montrent des connexions à la fois avec les sources de Soubey, du Theusseret et celle du Golat (Sorne), ce qui semble suggérer qu'il existe une zone de diffuence qui distribuerait sur trois systèmes hydrogéologiques distincts.</p> <p>Incertitudes : Si les mécanismes de drainage de la nappe MNK220 vers la source du Theusseret sont facilement identifiables, c'est moins le cas pour les relations avec les sources de Soubey ou du Golat.</p>
MNK221 [Carte M3]	Theusseret	Jurassique sup.	500		<p>La nappe MNK221 se développe en rive droite du Doubs, dans les formations calcaires du Jurassique sup. La nappe a une extension à priori relativement faible (environ 1 km²). Elle est en partie captive sous le chevauchement (« CHE_DOUBS ») et d'épaisseur moyenne. Elle alimente directement la source du Theusseret qui fixe l'altitude du niveau de base (500 m environ).</p> <p>La nappe est en partie alimentée par le débordement de la nappe perchée MNK220, mais aussi certainement pas des alimentations depuis les calcaires du Jurassique moy.</p> <p>On peut penser qu'à l'endroit du Theusseret, les deux nappes (FNK012 et MNK221) sont certainement en communication hydraulique.</p> <p>Incertitude : l'extension de la nappe vers l'est est incertaine.</p>
MNK222 [Carte M3]	Synclinal des Enfers ouest	Jurassique sup.	725		<p>La nappe est supposée se développer dans la structure synclinale très pincée à l'ouest du village des Enfers (CH). L'altitude du toit de la nappe est fixée par un seuil géologique dans les marnes oxfordiennes à 725 m environ. D'après le modèle 3D, les écoulements seraient dirigés vers l'ouest et pourraient alimenter les sources autour de la Grotte de la Vauchotte (Gigon and Wenger, 1986). Cette petite nappe est superposée à la nappe du Jurassique moy. alimentant la source de Soubey. Une connexion via le chevauchement longeant la vallée n'est pas exclue.</p> <p>Incertitude : La nappe est inférée directement du modèle 3D. Aucune information ou mesure directe ne permet de valider son existence et son extension.</p>
MNK223 [Carte M3]	Synclinal des Enfers est	Jurassique sup.	637		<p>La nappe est de très faible extension. Elle est supposée se développer dans le même synclinal que MNK222, mais à l'est du village des Enfers (CH). L'altitude du toit de la nappe est fixée par la cote du siphon qui se développe au fond de la cavité (637 m). Cette</p>

					<p>petite nappe est superposée à la nappe du Jurassique moy. alimentant les source de Soubey. Une connexion via le chevauchement longeant la vallée n'est pas exclue.</p> <p>Incertitude : La nappe est inférée directement du modèle 3D. Aucune information ou mesure directe ne permet de valider son existence et son extension.</p>
MNK224 [Cartes M4 et M6]	La Chaux-de-Fonds	Crétacé inf.	950		<p>La nappe se développe dans les formations calcaires du Valanginien. L'altitude du toit de la nappe est supposée vers 950 m environ. Il est peut-être captif dans la partie centrale du synclinal.</p> <p>Incertitude : Dans le détail l'aquifère du Crétacé est relativement mince et découpé par des failles. Il est donc probablement compartimenté, surtout dans la partie captive.</p>
MNK225 [Carte M6]	Le Locle	Crétacé inf.	910-920		<p>La nappe se développe dans les formations calcaires du Valanginien. L'altitude du toit de la nappe n'est pas connue avec précision mais doit se situer entre 910 et 920 m. L'altitude de 910 m sera prise comme référence à cette échelle. La nappe est peu épaisse. Elle ne possède pas d'exutoire connu, elle est supposée alimenter l'aquifère sous-jacent du Jurassique sup. (MNK034), par débordement ou par drainance. Dans le cas d'un débordement, le ou les seuil(s) pourraient être localisé(s) le long de la limite nord-ouest de la nappe, à la faveur du rétro-chevauchement de l'anticlinal de Pouillerel. Des échanges avec la nappe non-karstiques des formations quaternaires de l'Oeningien sont envisageables mais ne sont pas documentés dans le cadre de cette étude.</p> <p>Incertitude : les modalités de drainage de la nappe MNK225 vers la nappe sous-jacente du Jurassique sup. (MNK034) restent incertaines (déversement à la faveur d'un seuil, drainance, ou les deux).</p>
MNK226 [Cartes M6 et M4]	La Chaux-de-Fonds – le Locle	Jurassique moy.	650-790	0.035	<p>La nappe se développe dans le synclinal entre la Ferrière et le Locle. Elle peut être scindée en 2 sous-nappes, une qui s'étend à l'est sous la Chaux-de-Fonds, et la seconde qui s'étend à l'ouest sous le Locle.</p> <p>A l'est, sous la Chaux-de-Fonds, l'altitude du toit de la nappe a été fixée à 600 m par le passé (ISSKA, 2012b), valeur qui semble un peu basse par rapport aux niveaux de base du Doubs. Elle sera donc relevée vers 650 m. L'exutoire de la nappe est placé sous le Valanvron et alimente la nappe FNK014, soit en continuité hydraulique soit par débordement. Un seul et unique exutoire est supposé pour la zone à l'est du synclinal.</p> <p>A l'ouest, sous le Locle, le toit de la nappe est supposé beaucoup plus haut en altitude, autour de 790 m. La nappe se décharge sous le Col-des-Roches, et alimente la nappe FNK048 (Jurassique moy.) qui alimente à son tour la nappe FNK007 (Jurassique sup.).</p>

					<p>La nature de la connexion entre la nappe MNK226 et la nappe FNK048 reste incertaine. Compte tenu de la différence d'altitude supposée (40 m) et des incertitudes, la connexion peut se faire par débordement ou par continuité hydraulique directe, même si cette dernière option paraît moins probable.</p> <p>Incertitudes : Dans le détail, cette nappe est certainement en partie compartimentée. L'altitude estimée pour le toit de la nappe (790 m) coté Le Locle devra être confirmé – même si des écarts sont attendus localement du fait de la compartimentation. D'un point de vue géologique, la continuité hydraulique de la nappe MNK226 avec celle de l'aquifère du Jurassique moy. du synclinal de la Brévine (non documentée dans le cadre du projet) est envisageable. Ces relations complexes devraient être validées par des forages et/ou traçages.</p>
[Carte M2]	Blanches Fontaines*	Jurassique sup.	>586	>>0.1	<p>La nappe des sources des Blanches-fontaines (Gorges du Pichoux, CH) n'est pas représentée sur les documents présentés dans cette étude. Elle s'étend vers depuis les gorges vers l'ouest dans le synclinal de Lajoux (JU) jusque dans la région des Bois Rebetez, voire plus à l'est (ISSKA, 2012a). Le fond du synclinal étant très plat, il n'est pas facile de définir exactement l'extension de la nappe. En revanche, l'extension de la nappe est assez importante et les volumes en eau souterraine sont supposés être conséquents.</p> <p>Incertitude : La position du toit de la nappe est très incertaine. Elle est fixée en aval par l'altitude des sources des Blanches-fontaines (586 m).</p>

Tableau 13. Description des principales nappes karstiques en relation avec le Doubs transfrontalier ou avec les systèmes hydrogéologiques adjacents (Areuse, Ain, Dessoubre, etc.). Les altitudes de nappe sont données en conditions de basses eaux. Les valeurs entre (...) correspondent aux altitudes mesurées ou supposées en conditions de hautes eaux. Les nappes marquées « * » ne sont pas liées au système hydrogéologique du Doubs transfrontalier.

Annexe E. Cartes hydrogéologiques karstiques 1/25'000

Pour chaque emprise de modèle (Tableau 1, M1 à M12), 1 carte hydrogéologique à l'échelle 1/25'000 a été élaborée. Ces cartes permettent de représenter chaque étage aquifère via un ensemble de calques (Crétacé, Jurassique sup., Jurassique Inf.) que le lecteur peut afficher / désafficher par lui-même. Ces cartes présentent les informations suivantes :

- Extension des nappes karstiques par étage aquifère, discrétisées selon **l'épaisseur et la captivité**. Les extensions sont accompagnées des courbes de niveaux (**isohypes**) du toit de la nappe dans les zones captives.
- Géométrie de la **formation géologique à la base de l'étage aquifère** (marnes oxfordiennes pour l'aquifère du Jurassique sup., marnes du Lias pour l'aquifère du Jurassique moy.), sous la forme d'un ombrage accompagné de courbes de niveaux.
- Direction interprétée des écoulements souterrains (petites flèches, distingués selon la nature des écoulements (orange = non saturé/vadose, bleu = saturé/phréatique).
- Seuils de débordement
- Informations d'isopièzes.
- Localisation des principales sources
- Lignes structurales
- Position des principales stations de mesure de débits du Doubs FR et CH

Pour les aquifères du Crétacé, les formations géologiques à la base des nappes ne sont pas représentées. Pour ceux du Jurassique sup., les formations imperméables à la base des nappes – principalement les marnes de l'Oxfordien – sont représentées avec un ombrage gris (■). Les formations imperméables à la base de l'aquifère du Jurassique moy. – principalement les marnes du Lias – sont représentées avec un ombrage lie de vin (■■■)

Il est important de noter que le mode de représentation n'est pas 100% exact dans la mesure où certaines nappes peuvent se positionner en-dessus ou en-dessous du raster représentant la base aquifère, notamment dans les zones de chevauchement, mais aussi les zones de plis (Figure 58). La représentation en carte demeure donc relativement indicative et ne reflète pas toujours la complexité en profondeur.

L'assemblage des cartes est présenté en Figure 59 et la légende en Figure 60. Des commentaires supplémentaires pour chacune des cartes sont portés dans le Tableau 14.

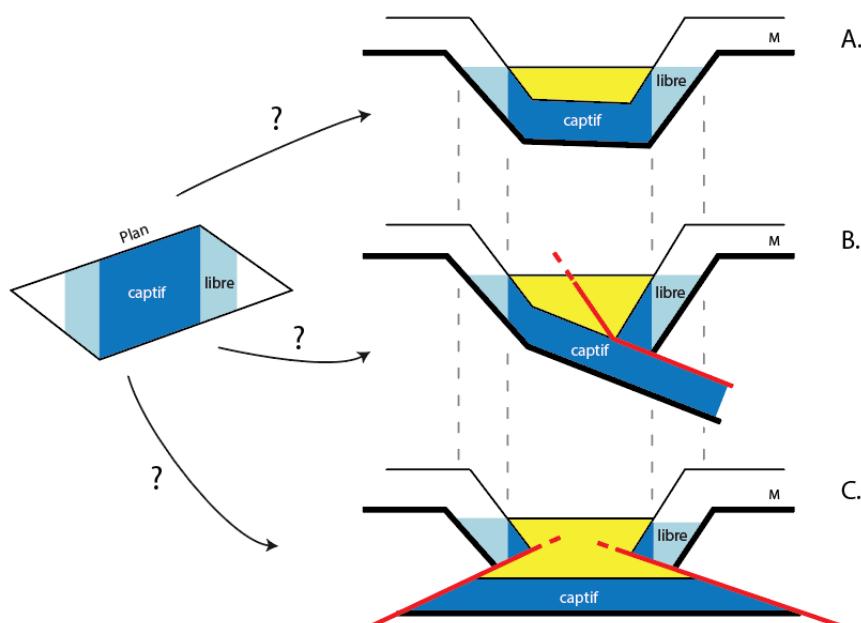


Figure 58. La représentation des nappes karstiques en plan (gauche) ne reflète pas toujours la complexité en profondeur (droite), surtout dans les secteurs où il y a superposition des compartiments aquifères. M = calcaires aquifères. A. cas d'un synclinal simple, B. cas d'un synclinal chevauché, C. cas d'un synclinal chevauché et rétro-chevauché (Malard et al., 2012).

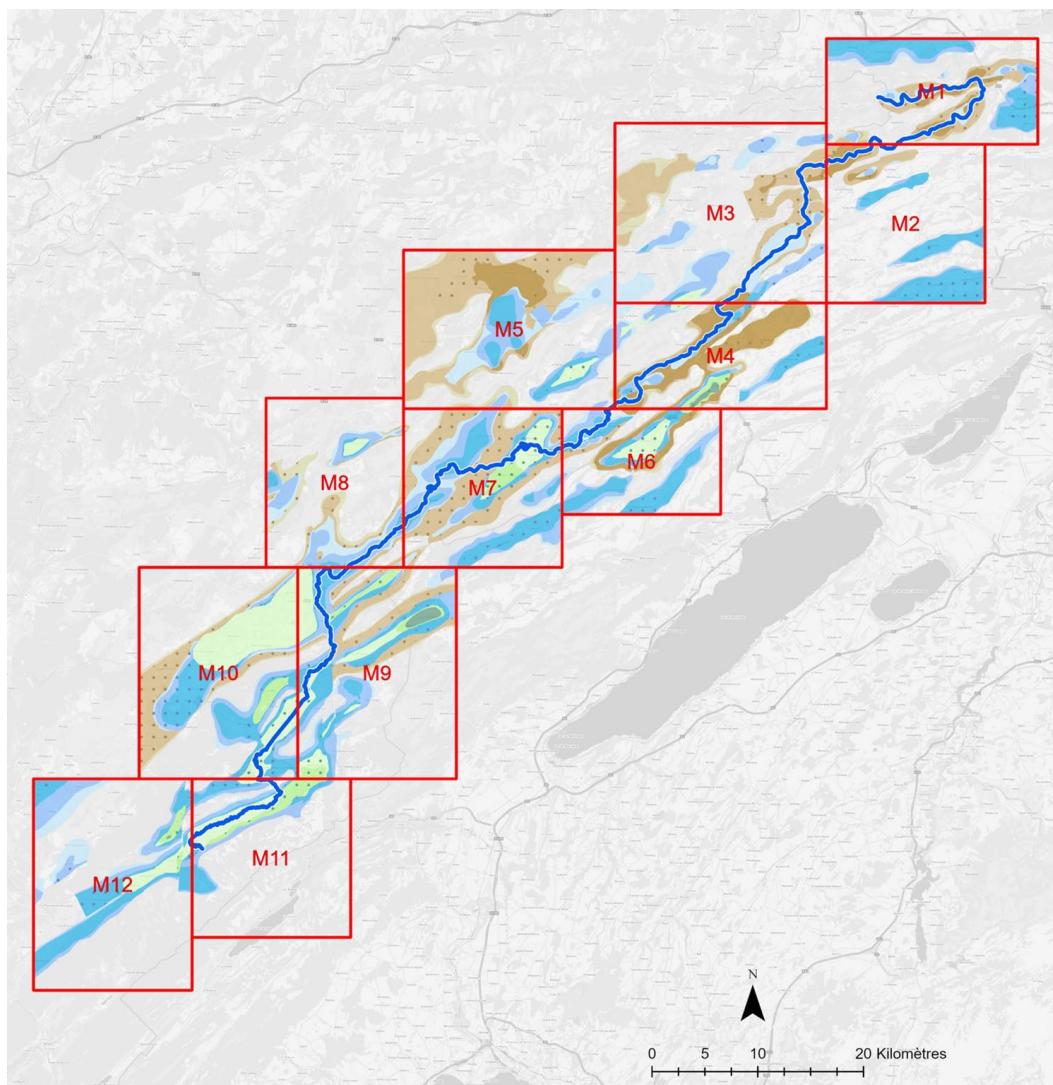


Figure 59. Assemblage des cartes hydrogéologiques M1 à M12 - 1/25'000

Sources karstiques

- aquifère indéterminé
- Crétacé

- Jurassique sup.
- Jurassique moy.

Nappes

karstiques Crétacé

		Crétacé	Jurassique sup.	Jurassique moy.
< 50 m	libre	●	●	●
	captif	●●●●	●●●●	●●●●
50-150 m	libre	●	●	●
	captif	●●●●	●●●●	●●●●
>150 m	libre	●	●	●
	captif	●●●●	●●●●	●●●●

Ecoulements souterrains  vadose  phréatique  indéterminé

Base aquifère Jurassique sup.

Base aquifère Jurassique moy.

Profil transversal

Bassin alimentation Doubs / limites

	Géologique strict	Géologique souple	Hydraulique	Hydraulique aval
très fiable	—	—	—	—
moy. fiable	—	—	—	—
peu fiable

Douze cartes sont délivrées sous format .pdf. Les cartes affichent les différents niveaux aquifères par l'intermédiaire de calques permettant à l'utilisateur de gérer leur visibilité sur un fond cartographique suisse (swisstopo) ou français (ign), à l'échelle 1/25'000. L'utilisateur est donc invité à accéder à la boîte de calques pour permettre de cocher / décocher les calques souhaités (cf. Figure 61).

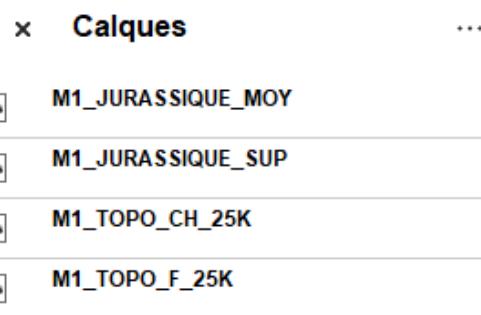


Figure 61. Exemple de structuration / désignation des calques aquifères de la carte hydrogéologique 1/25'000 au format .pdf du modèle M1.

Carte 1/25'000	Calques	Commentaires
CARTE_HYDROGEOLOGIQUE _M1_25K_.pdf	M1_CRETACE	Pas d'aquifère Crétacé sur l'emprise du modèle M1. Le calque n'est pas disponible.
	M1_JURASSIQUE_SUP	Les aquifères du Jurassique sup. sont peu développés le long du Doubs transfrontalier (extension, épaisseur).
	M1_JURASSIQUE_MOY	Les nappes du Jurassique moy. des secteurs de Delémont et d'Ajoie n'ont pas été

		modélisées. La nappe FNK037 s'étend probablement plus en aval que Brémoncourt.
CARTE_HYDROGEOLOGIQUE _M2_25K_.pdf	M2_CRETACE	Pas d'aquifère Crétacé sur l'emprise du modèle M2. Le calque n'est pas disponible.
	M2_JURASSIQUE_SUP	La documentation des nappes du Jurassique sup. dans le secteur des Franches Montagnes n'est pas exhaustive.
	M2_JURASSIQUE_MOY	Les nappes du Jurassique moy. de la région des Franches Montagnes n'ont pas été modélisées.
CARTE_HYDROGEOLOGIQUE _M3_25K_.pdf	M3_CRETACE	Les aquifères du Crétacé ne concernent que la partie sud de la carte.
	M3_JURASSIQUE_SUP	Des nappes karstiques du Jurassique sup. pourraient se développer sous les villages de Damprichard et de Trévillers. Elles n'ont pas été modélisées.
	M3_JURASSIQUE_MOY	Des nappes karstiques du Jurassique moy. pourraient se développer sous les villages de Damprichard et de Trévillers. Elles n'ont pas été modélisées.
CARTE_HYDROGEOLOGIQUE _M4_25K_.pdf	M4_CRETACE	Les nappes karstiques des aquifères du Crétacé du vallon de St-Imier n'ont pas été modélisées.
	M4_JURASSIQUE_SUP	Les nappes karstiques du Jurassique sup. des Franches Montagnes n'ont pas été modélisées.
	M4_JURASSIQUE_MOY	Les nappes karstiques des aquifères du Jurassique moy. du vallon de St-Imier n'ont pas été modélisées.
CARTE_HYDROGEOLOGIQUE _M5_25K_.pdf	M5_CRETACE	Les nappes karstiques des aquifères du Crétacé sont uniquement modélisées dans la partie est de la carte.
	M5_JURASSIQUE_SUP	Les nappes karstiques des aquifères du Jurassique sup. n'ont pas été modélisées dans la partie nord-ouest de la carte (secteur Reverotte)
	M5_JURASSIQUE_MOY	Une nappe peut potentiellement se développer dans les formations. entre Le Bélieu, Le Barboux et La Chenalotte. Celle-ci n'a pas été modélisée.
CARTE_HYDROGEOLOGIQUE _M6_25K_.pdf	M6_CRETACE	Les nappes de l'aquifère du Crétacé dans la vallée des Ponts-de-Martel n'ont pas été modélisées.
	M6_JURASSIQUE_SUP	Toutes les nappes connues de l'aquifère du Jurassique sup. ont été modélisées.
	M6_JURASSIQUE_MOY	Les nappes de l'aquifère du Jurassique moy. de la vallée des Ponts de Martel et de la Brévine ne sont pas modélisées. La nappe du Jurassique moy. sous Villers-le-lac n'est que partiellement modélisée.
CARTE_HYDROGEOLOGIQUE _M7_25K_.pdf	M7_CRETACE	La nappe de l'aquifère du Crétacé de la vallée de la Brévine n'a pas été modélisée.
	M7_JURASSIQUE_SUP	Toutes les nappes connues de l'aquifère du Jurassique sup. ont été modélisées.
	M7_JURASSIQUE_MOY	Le nappe de l'aquifère du Jurassique moy. de la vallée de la Brévine n'a pas été modélisée.

CARTE_HYDROGEOLOGIQUE _M8_25K_.pdf	M8_CRETACE	Toutes les nappes significatives de l'aquifère du Crétacé ont été modélisées.
	M8_JURASSIQUE_SUP	Toutes les nappes connues de l'aquifère du Jurassique sup. ont été modélisées, à l'exception de celles de la partie nord de la carte (hors bassin du Doubs transfrontalier).
	M8_JURASSIQUE_MOY	Les nappes de l'aquifère du Jurassique moy. dans le quart nord-ouest de la carte (aval Loue) n'ont pas été modélisées.
CARTE_HYDROGEOLOGIQUE _M9_25K_.pdf	M9_CRETACE	Toutes les nappes significatives de l'aquifère du Crétacé ont été modélisées, à l'exception de celles de partie sud-est de la carte (hors bassin du Doubs transfrontalier).
	M9_JURASSIQUE_SUP	Toutes les nappes connues de l'aquifère du Jurassique sup. ont été modélisées, à l'exception de celles de la partie sud-est de la carte (hors bassin du Doubs transfrontalier).
	M9_JURASSIQUE_MOY	Les nappes de l'aquifère du Jurassique moy. sont modélisées dans la partie nord de la carte. Les nappes de la partie sud (hors bassin du Doubs transfrontalier) ne sont pas modélisées. Sous le village d'Oye-et-Pallet, la nappe n'est pas non plus modélisée.
CARTE_HYDROGEOLOGIQUE _M10_25K_.pdf	M10_CRETACE	Toutes les nappes significatives de l'aquifère du Crétacé ont été modélisées. A l'ouest de la carte, des nappes de l'aquifère du Crétacé sont supposées mais non modélisées car en dehors du bassin du Doubs transfrontalier.
	M10_JURASSIQUE_SUP	Toutes les nappes connues de l'aquifère du Jurassique sup. ont été modélisées, à l'exception de celles de la partie nord-ouest de la carte (hors bassin du Doubs transfrontalier).
	M10_JURASSIQUE_MOY	Seule la nappe de l'aquifère karstique du Jurassique moy. de la plaine de Pontarlier a été modélisée. Les nappes supposées au nord (hors bassin du Doubs transfrontalier) n'ont pas été modélisées, ainsi que celle supposée sous les lacs de St-Point et de Remoray.
CARTE_HYDROGEOLOGIQUE _M11_25K_.pdf	M11_CRETACE	Toutes les nappes significatives de l'aquifère du Crétacé du bassin du Doubs transfrontalier ont été modélisées. Les nappes au sud de la carte (hors bassin) n'ont pas été modélisées.
	M11_JURASSIQUE_SUP	Seules les nappes de l'aquifère du Jurassique sup. en lien avec le bassin du Doubs transfrontalier ont été modélisées. Aucune nappe n'a été modélisée dans la moitié sud de la carte.
	M11_JURASSIQUE_MOY	Aucune nappe de l'aquifère du Jurassique moy. n'a été modélisée sur cette carte car trop profonde.
CARTE_HYDROGEOLOGIQUE _M12_25K_.pdf	M12_CRETACE	Seules les nappes en lien avec le bassin transfrontalier du Doubs ont été modélisées. Les nappes à l'ouest, au nord et au sud de la carte n'ont pas été modélisées.
	M12_JURASSIQUE_SUP	Toutes les nappes du Jurassique sup. du bassin transfrontalier du Doubs ont été

		modélisées. L'extension de la nappe FNK018 vers le sud-ouest (Saine) n'est pas modélisée. Au sud de la feuille, aucune nappe n'a été modélisée. Il est toutefois probable qu'il n'en existe pas.
	M12_JURASSIQUE_MOY	Aucune nappe de l'aquifère du Jurassique moy. n'a été modélisée sur cette carte car trop profonde.

Tableau 14. Commentaires complémentaires aux calques des cartes hydrogéologiques karstiques 1/25'000

Annexe F. Doubs : profil hydrogéologique longitudinal

En raison de sa taille, le profil hydrogéologique longitudinal est rendu sous forme d'un fichier .pdf distinct « ANNEXE_F_PROFIL_LONG_DOUBS.pdf ». Un aperçu miniature est proposé sur la page suivante.

Le profil altitudinal du lit du Doubs est extrait du jeu de données DEM BDALTIV2 25M⁵⁶. Les données sont ensuite filtrées selon la condition suivante afin de respecter toujours une altitude décroissante de l'amont vers l'aval (fonction EXCEL : =SI(ET(B3<B2;B3<MIN(\$B\$2:B2));B3;MIN(\$B\$2:B2))), avec B2 l'altitude au point amont (n) et B3, l'altitude au point aval (n+1).

Le profil est ensuite représenté avec une échelle X/Y différenciée :

- Echelle X 1/50'000 (1 cm = 500 m)
- Echelle Y 1/1'000 (1 cm = 10 m)

Les altitudes des lacs et barrages sont les suivantes (AQUARIUS et al., 2012)⁵⁷ :

- Châtelot :
 - o Max : 716 m
 - o Min : 696,5 m
 - o Hauteur (lit de rivière)
- Retenue du Refrain⁵⁸ :
 - o Max : 609,53 m
 - o Min : 608,7 m (min exploitation)
 - o Hauteur (lit de rivière) : 15,7 m
- Retenue de la Goule⁵⁹ :
 - o Max : 537,8 m
 - o Min :
 - o Hauteur (lit de rivière) : 28m
- Lac de Saint-Point⁶⁰ :
 - o Altitude : 850 m
 - o Profondeur : 43 m
- Lac des Brenets / de Chaillexon
 - o Altitude normale : 750 m
 - o Altitude min : 746,82 m le 26 mai 2011⁶¹ ; 743,50 le 26 juin 2022⁶²

⁵⁶ <https://geoservices.ign.fr/bdalti>

⁵⁷ https://sfv-fsp.ch/fileadmin/user_upload/Dossiers/Doubs/dfs_reglement_eau_final_publi_cle0142f7.pdf

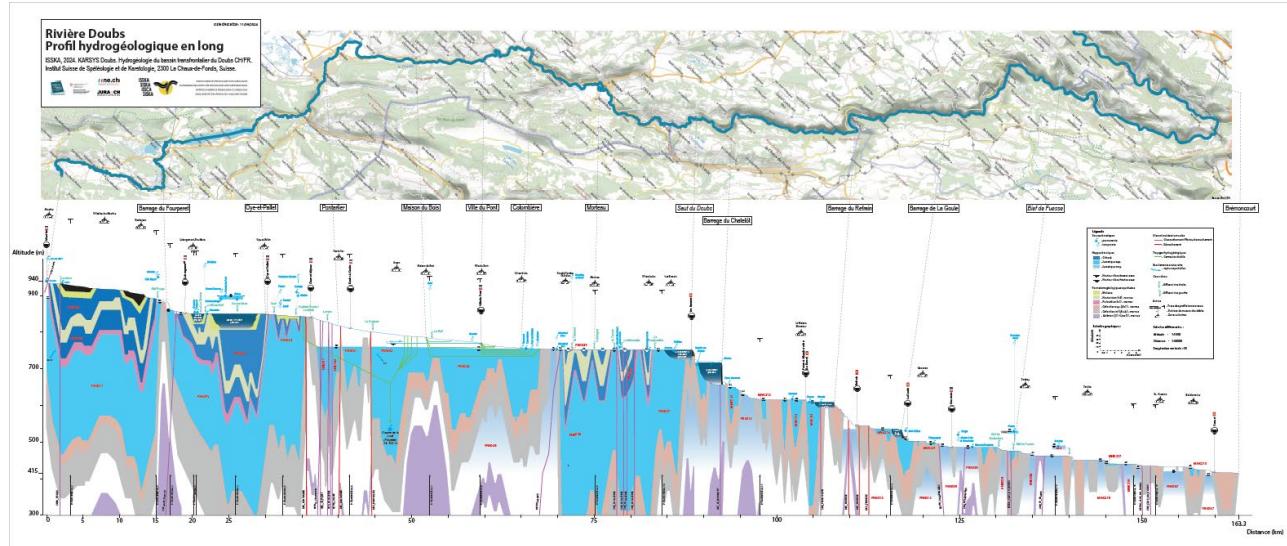
⁵⁸ https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_du_Refain

⁵⁹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_de_La_Goule

⁶⁰ http://www.donnees.rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/bassin_rmc/rdbrmc/lacs/lacs_frc/lacs_st-point.htm

⁶¹ <https://www.arcinfo.ch/neuchatel-canton/montagnes/le-locle-commune/les-brenets/jamais-le-lac-des-brenets-n-a-connu-un-niveau-d-eau-aussi-bas-en-mai-173657>

⁶² <https://www.rts.ch/info/regions/neuchatel/13192553-le-lac-des-brenets-ne-est-a-nouveau-victime-dun-assechement-rapide.html>



→ Aperçu miniature du profil hydrogéologique longitudinal

Annexe G. Doubs : profils hydrogéologiques transversaux

G1. Localisation

14 profils hydrogéologiques ont été dessinés transversalement à l'axe du cours du Doubs afin d'illustrer la géométrie des aquifères karstiques, l'extension des nappes et les directions d'écoulement des eaux souterraines. Les tracés des 14 profils sont présentés en Figure 62. Ils sont aussi reportés sur les cartes hydrogéologiques karstiques 1/25'000 (Annexe E) et sur les cartes de situation des tronçons étudiés au §. 7.

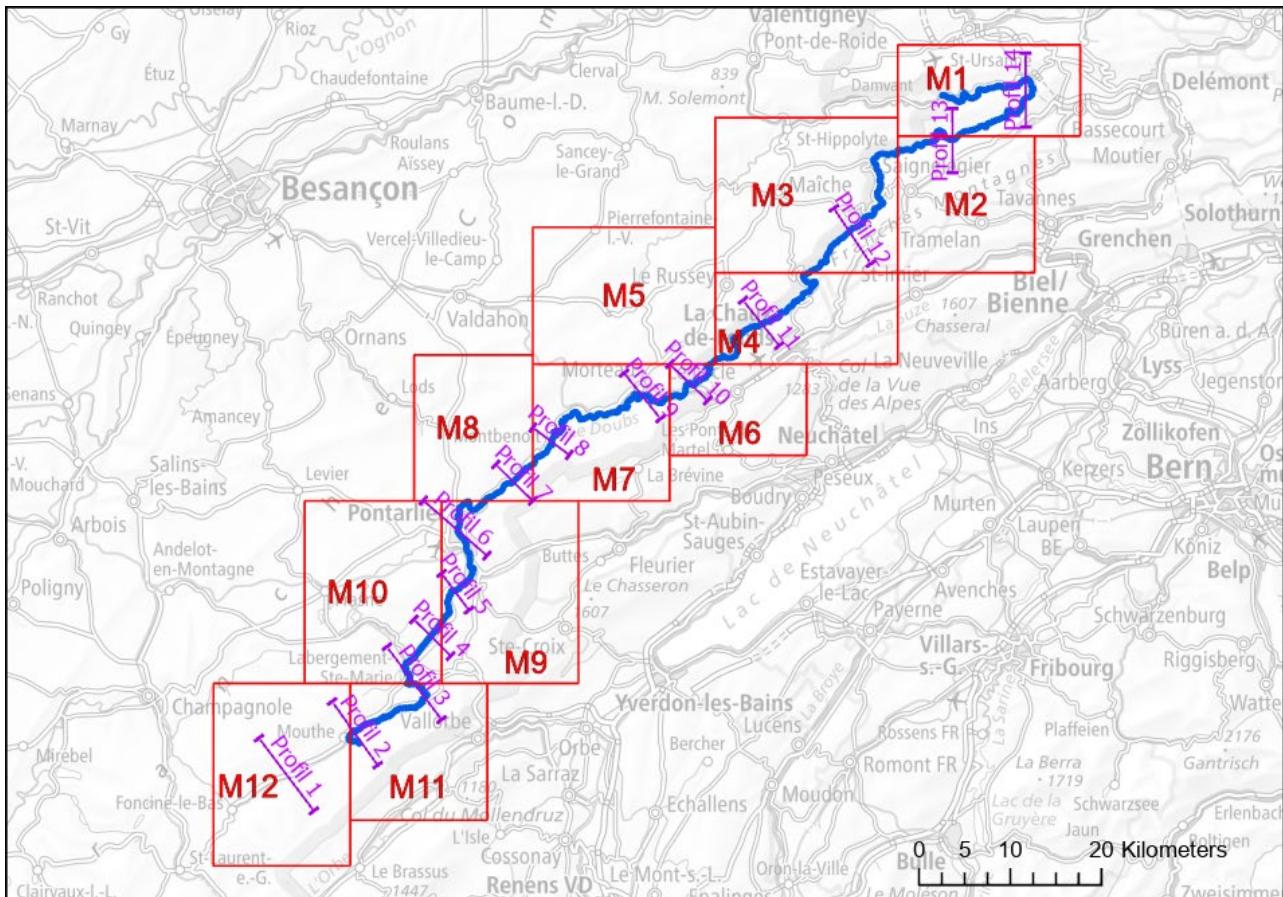
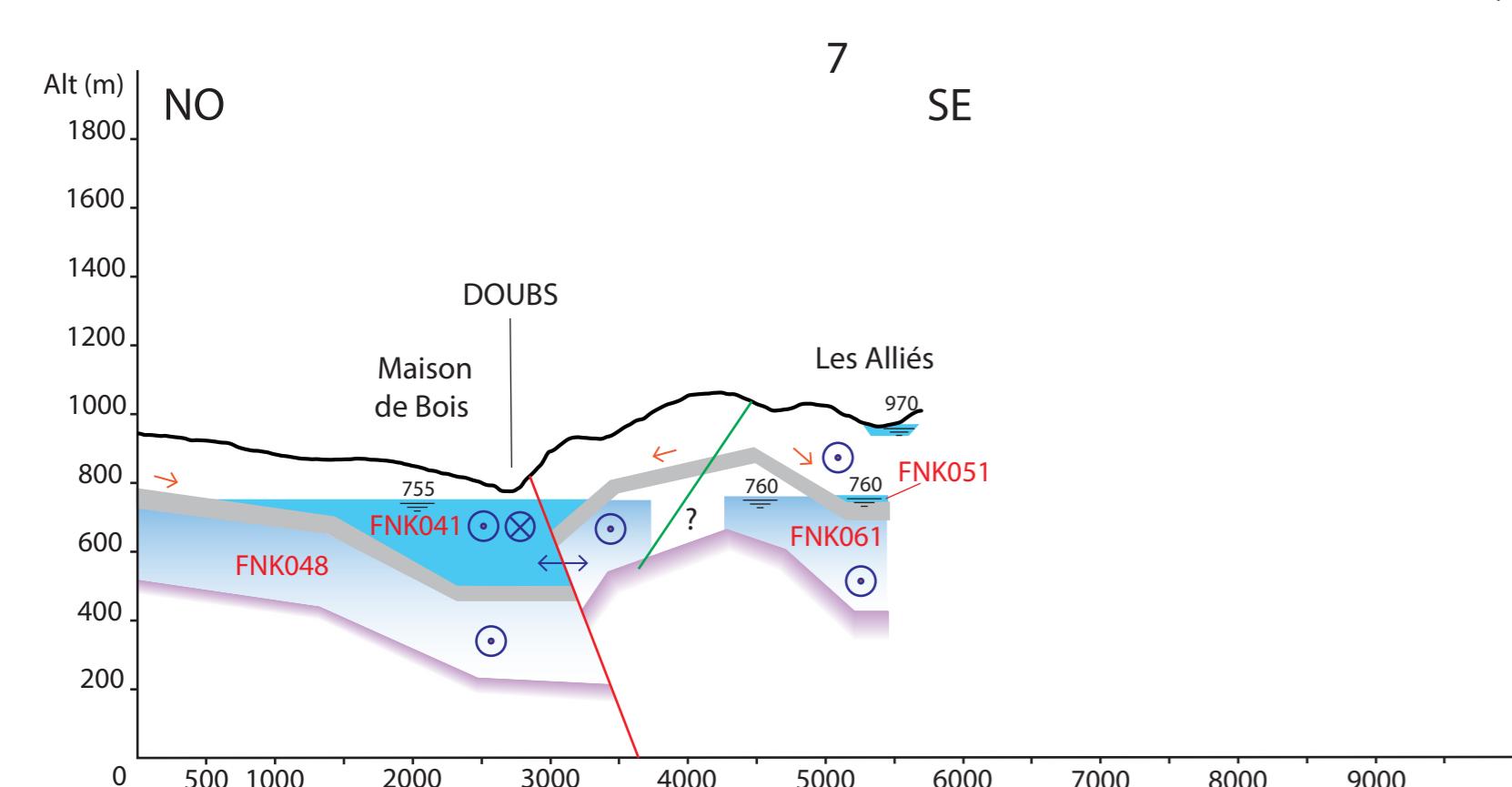
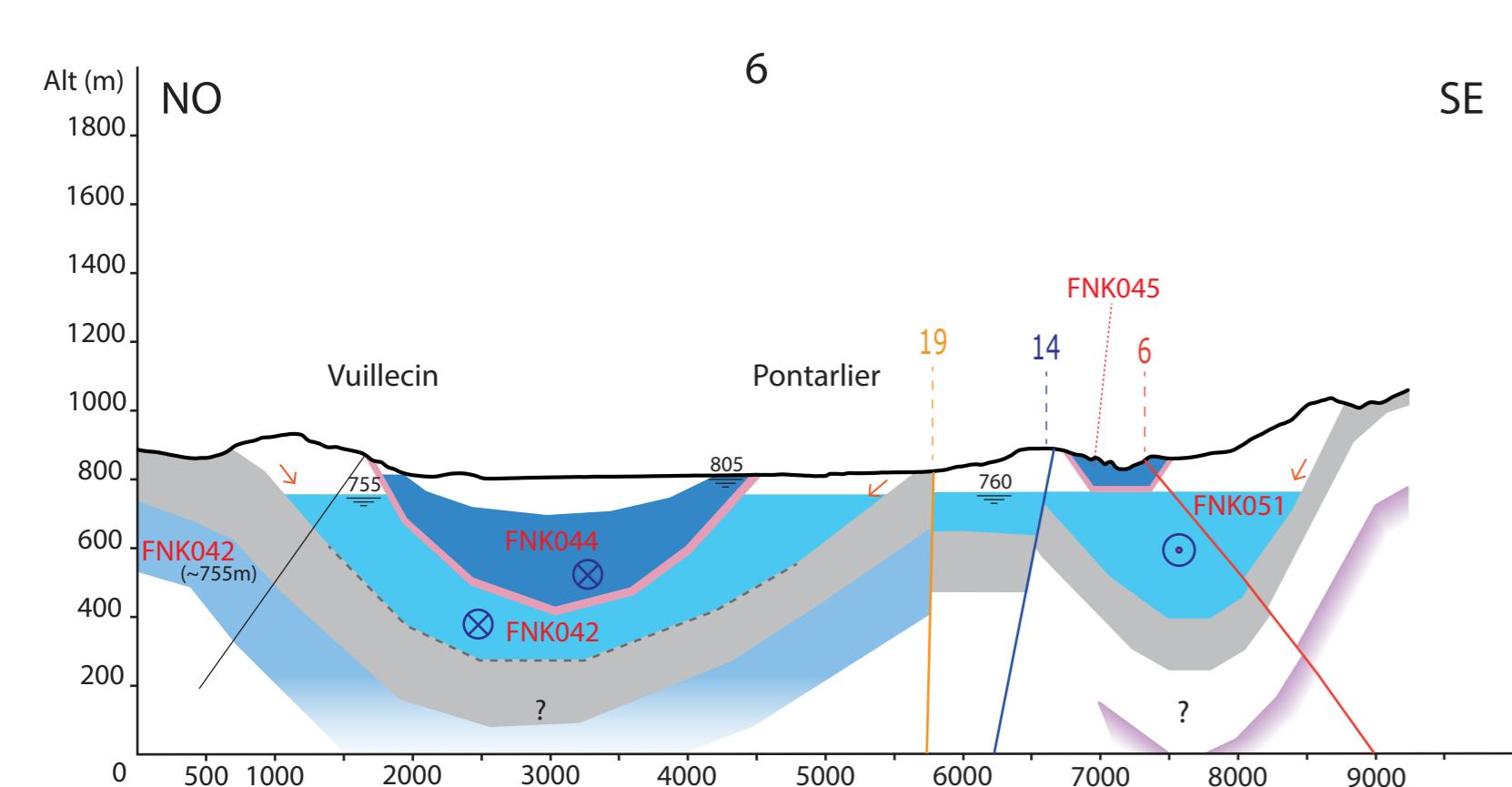
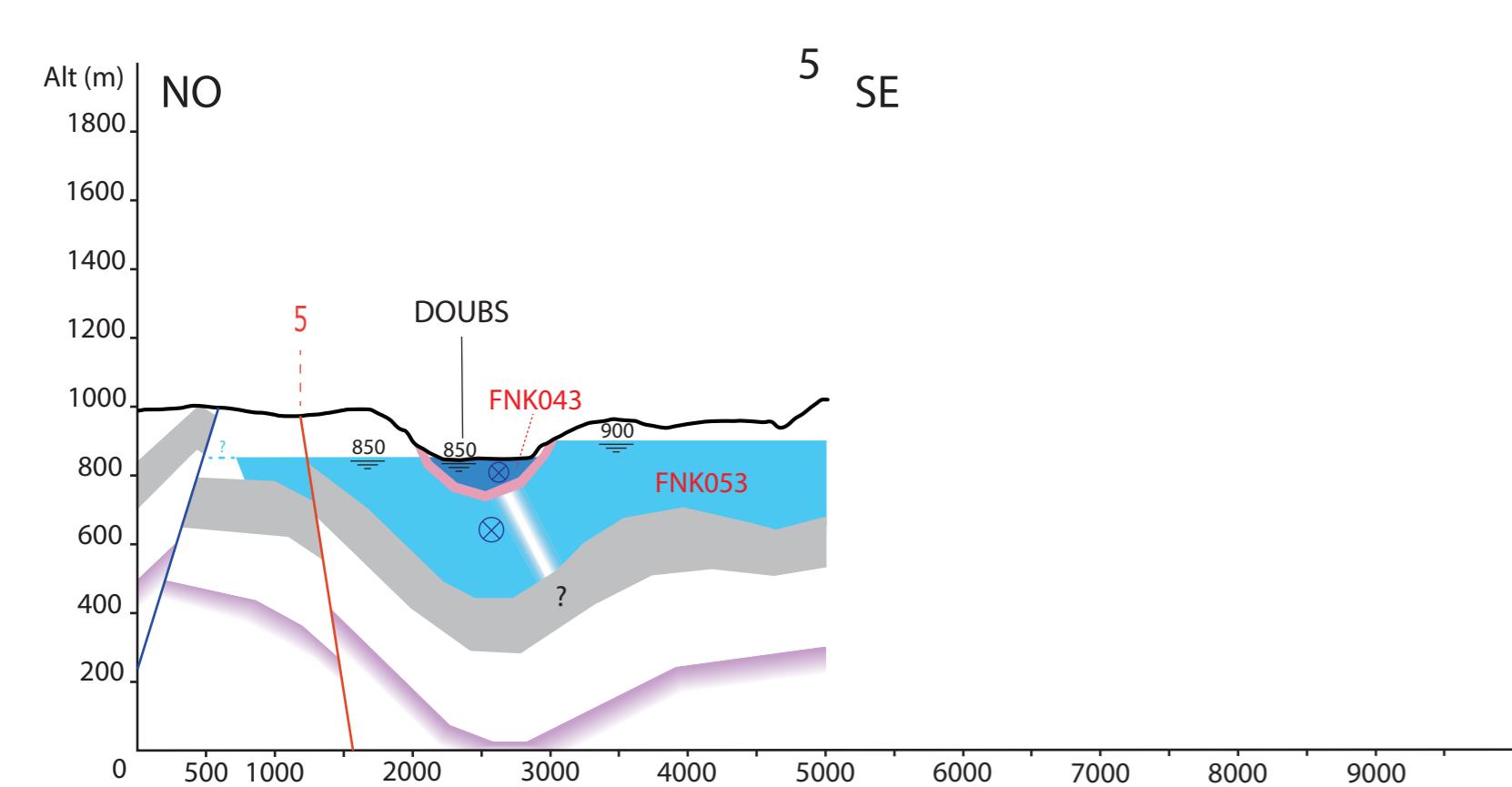
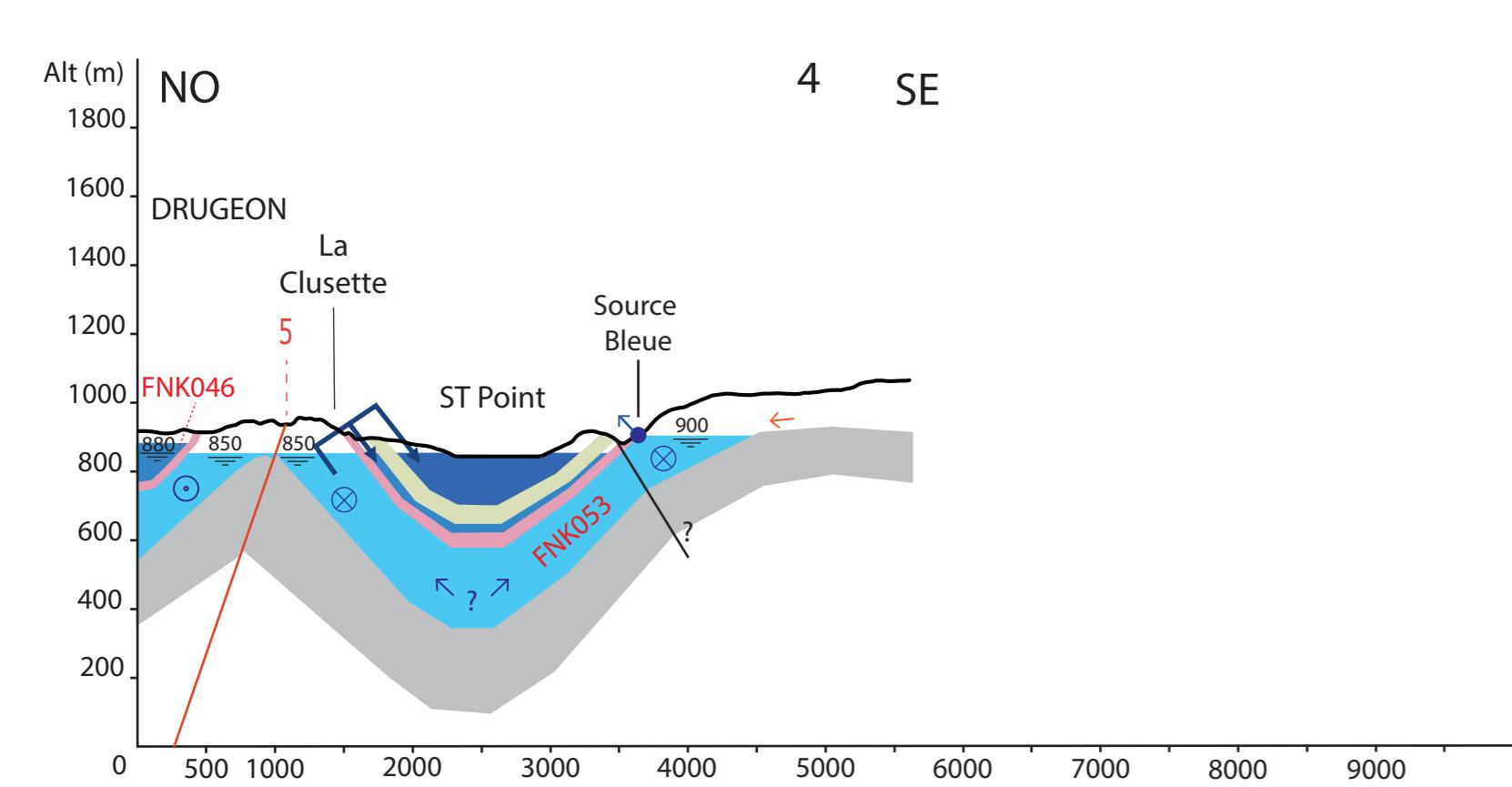
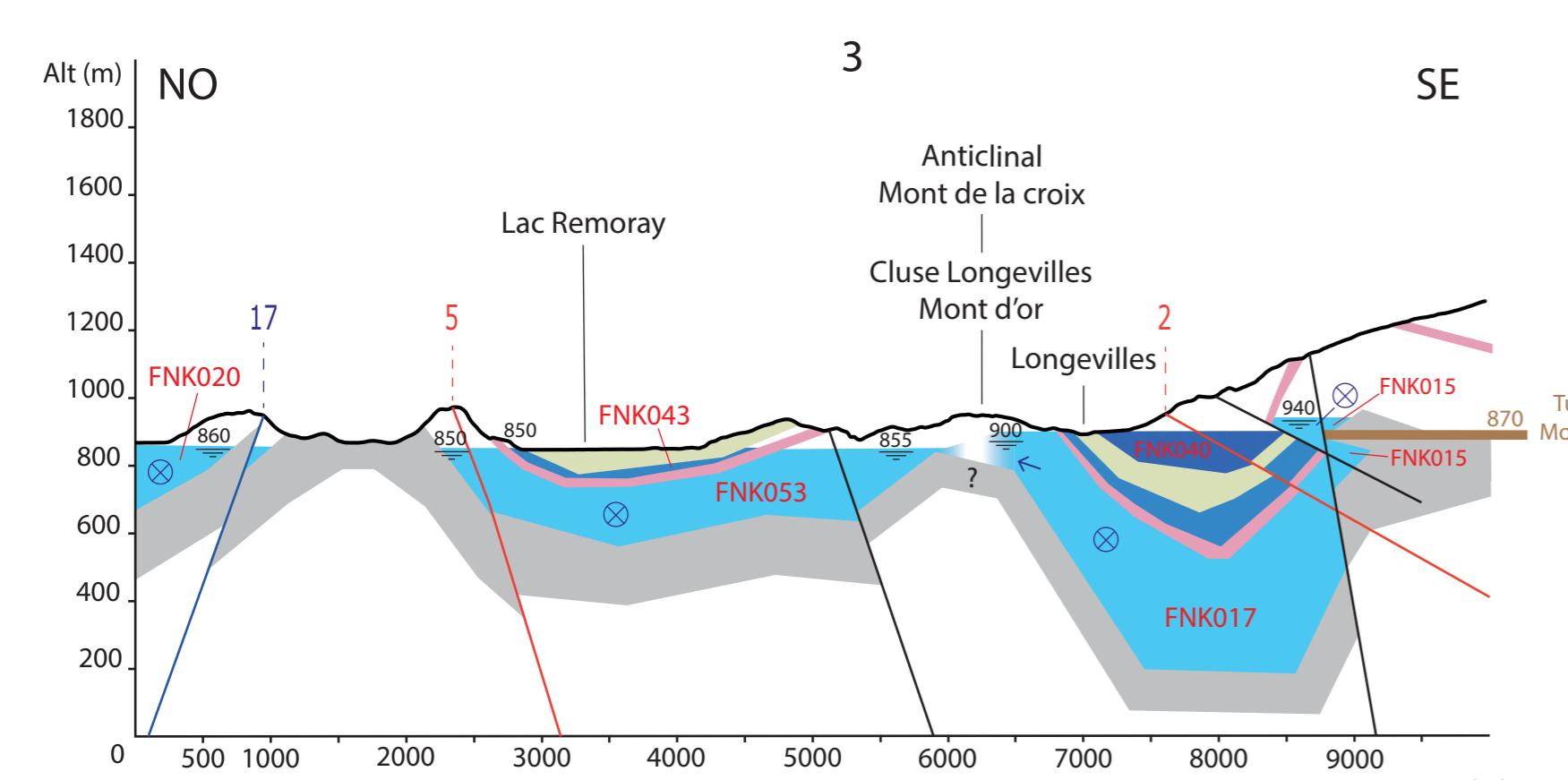
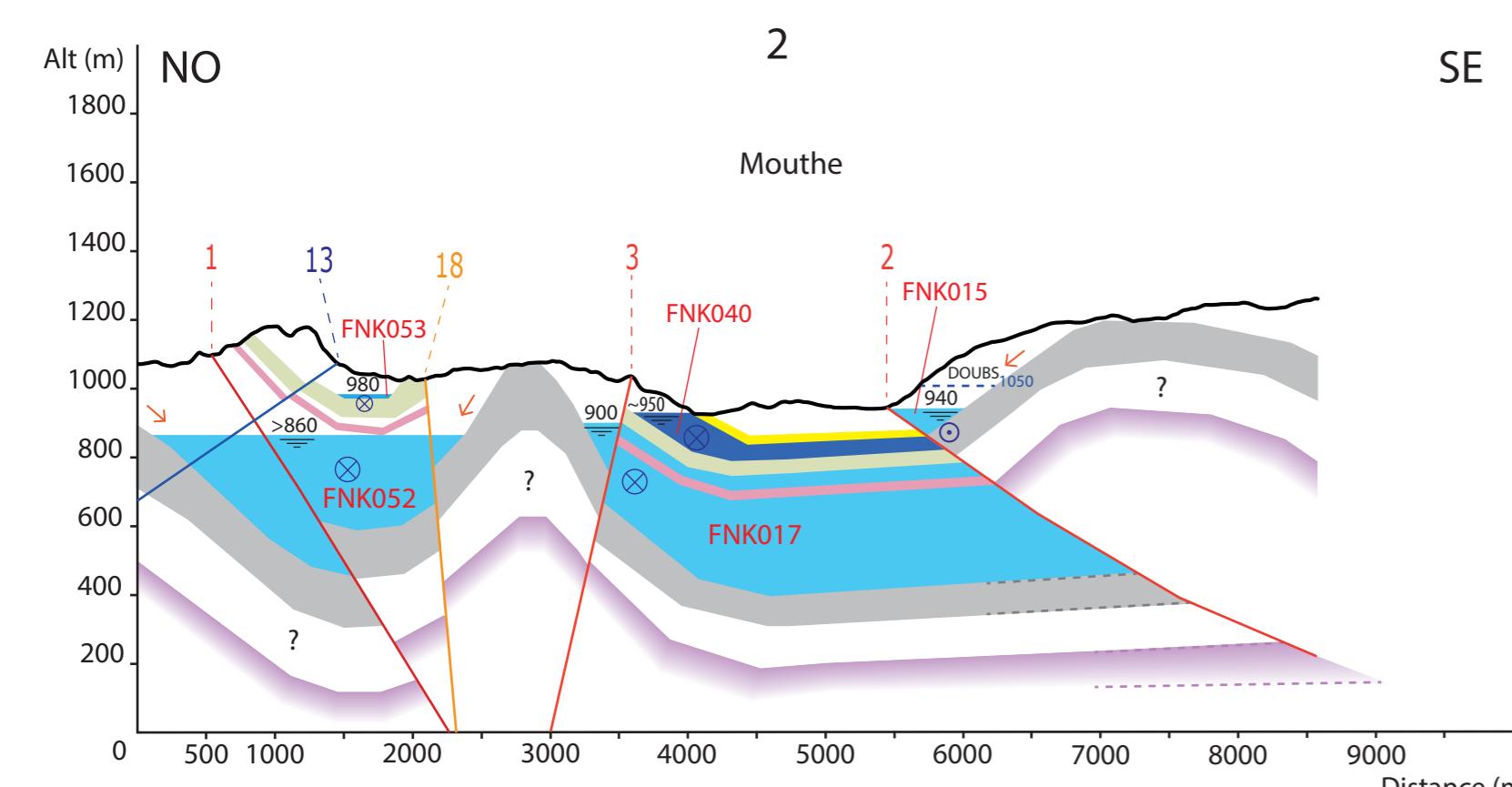
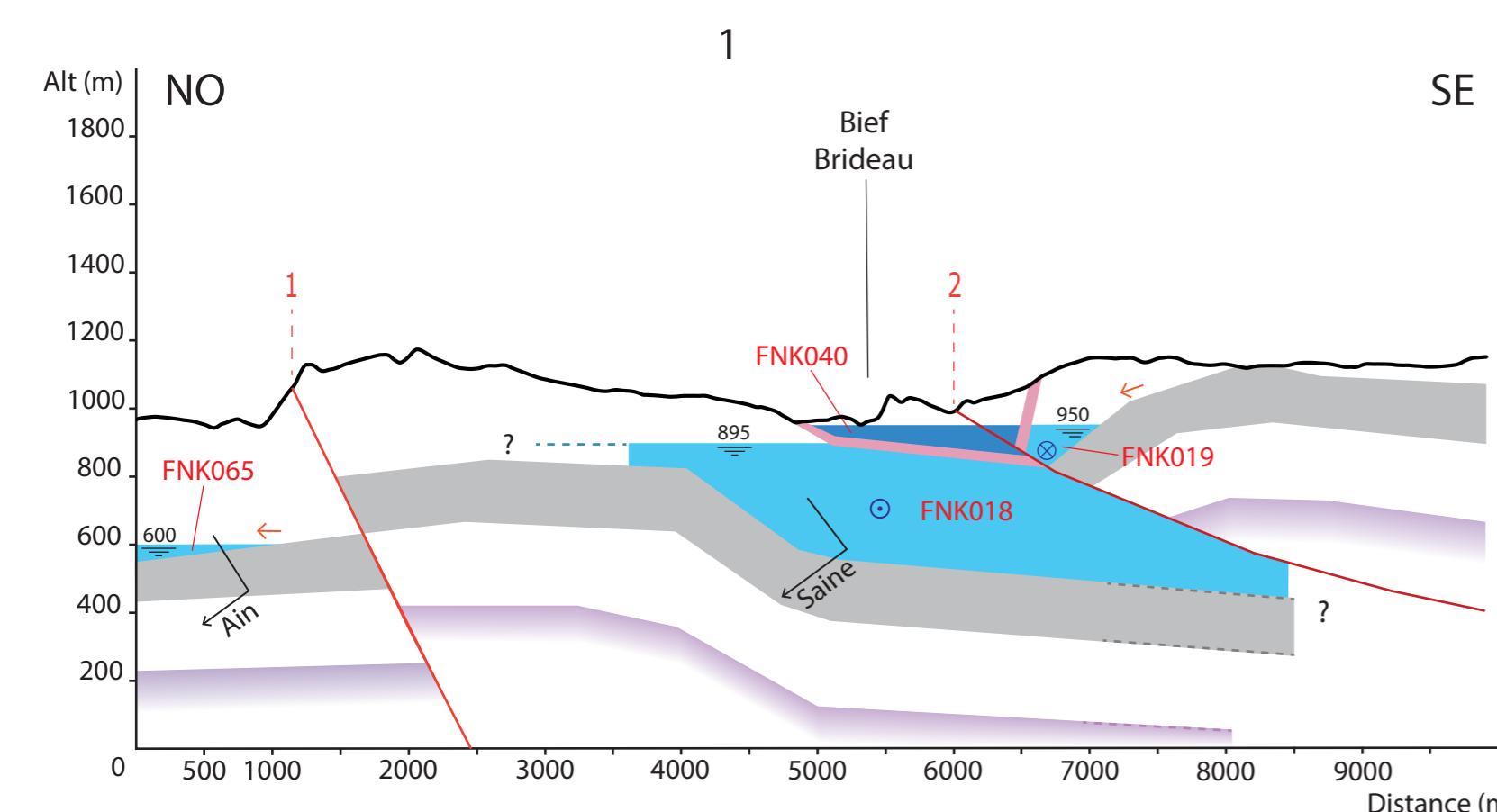


Figure 62. Tracés des 14 profils hydrogéologiques transversaux et emprises des modèles géologiques M1 à M12.

G2. Profils

Les 14 profils sont placés sur la page suivante mais sont aussi disponibles sous forme d'un fichier .pdf distinct.



Rivière Doubs

Profils

hydrogéologiques

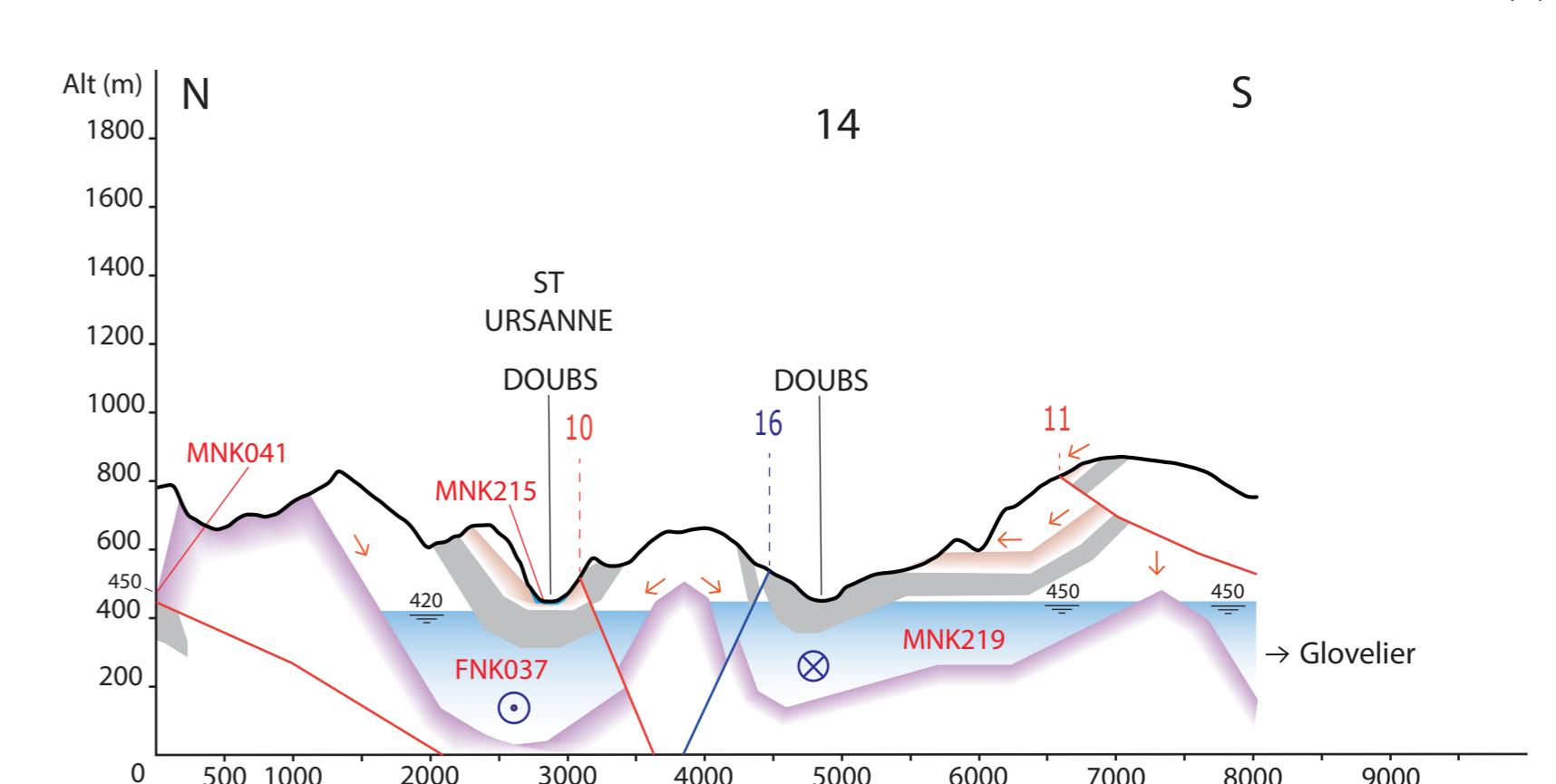
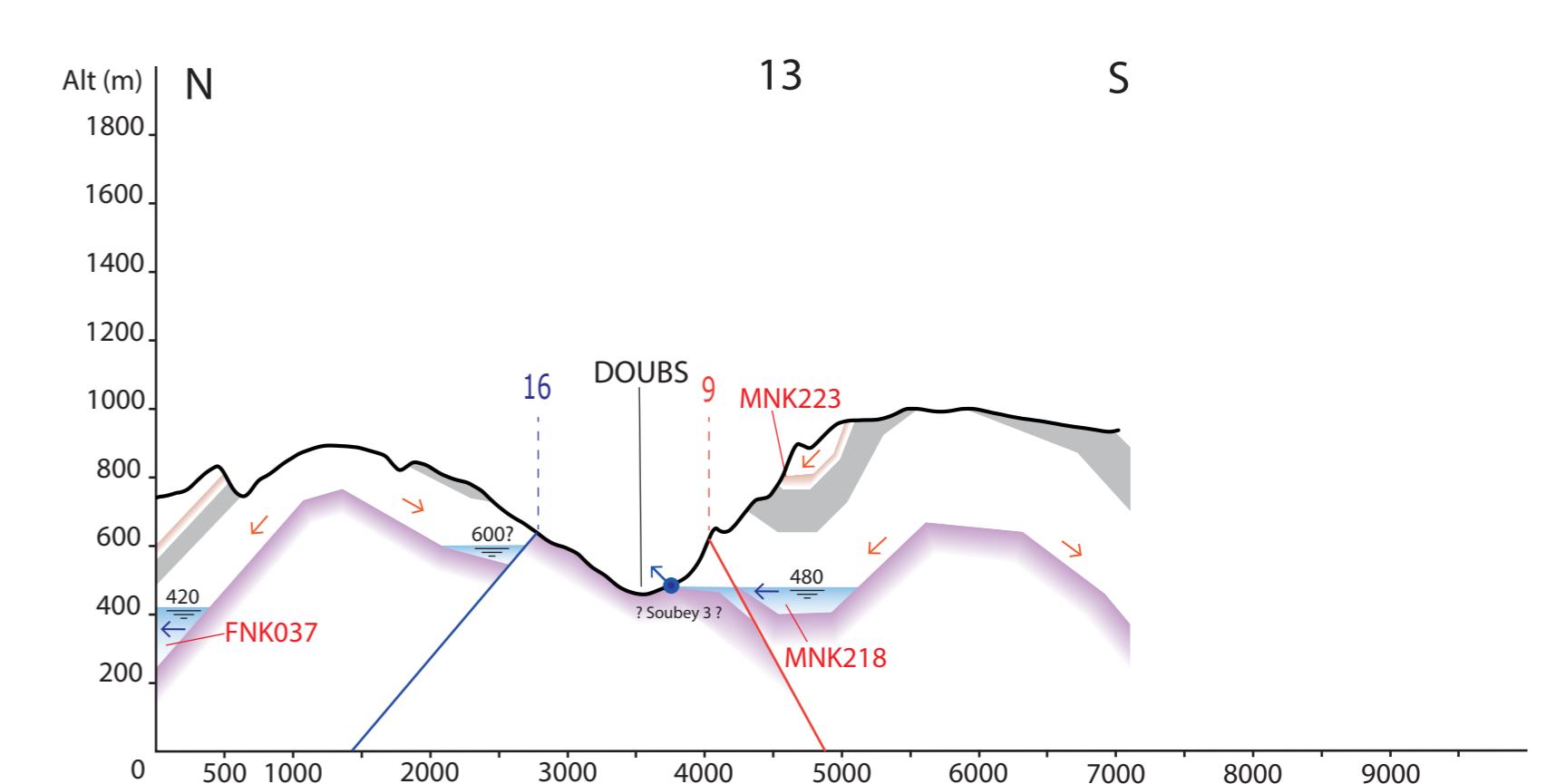
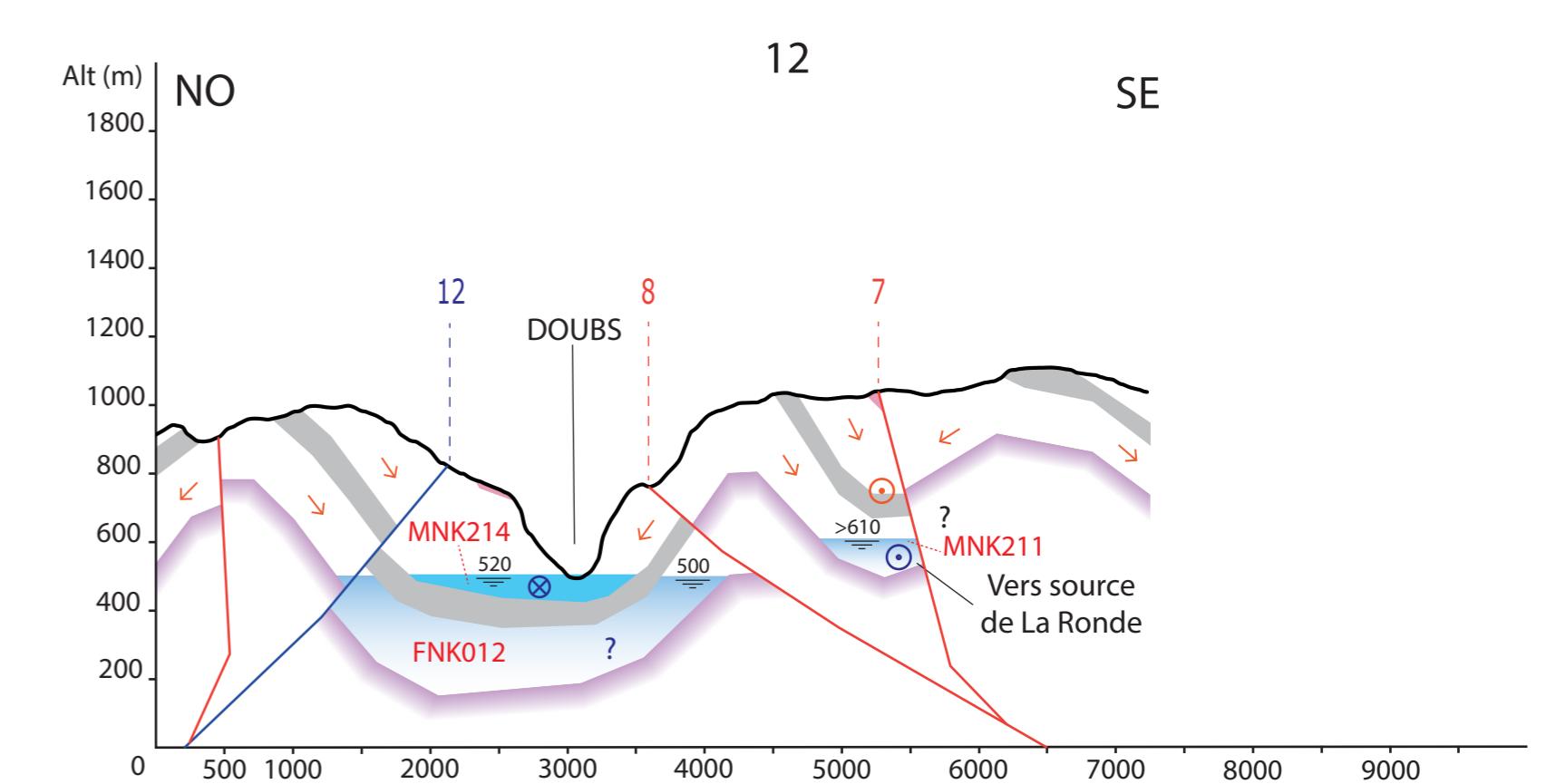
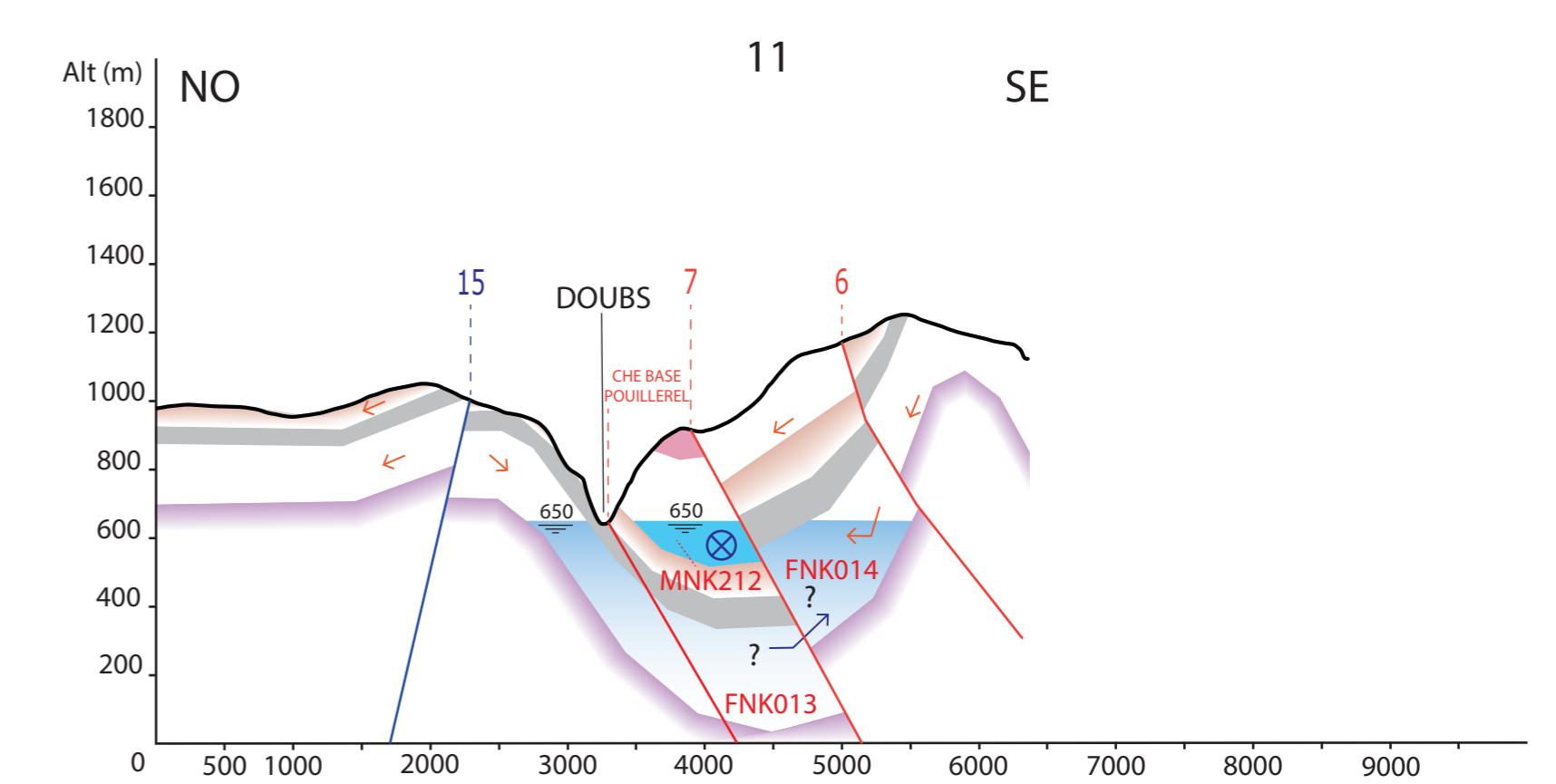
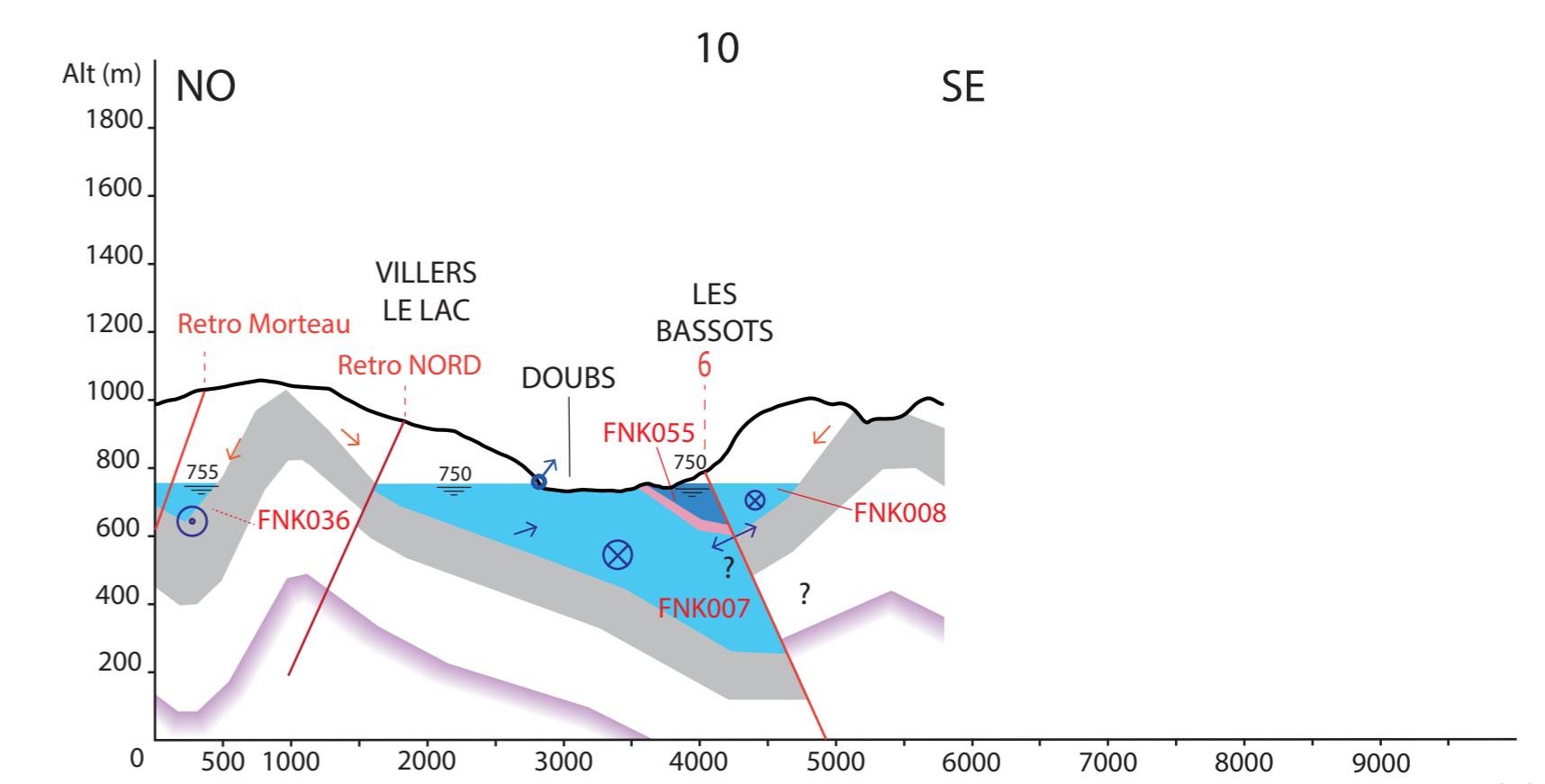
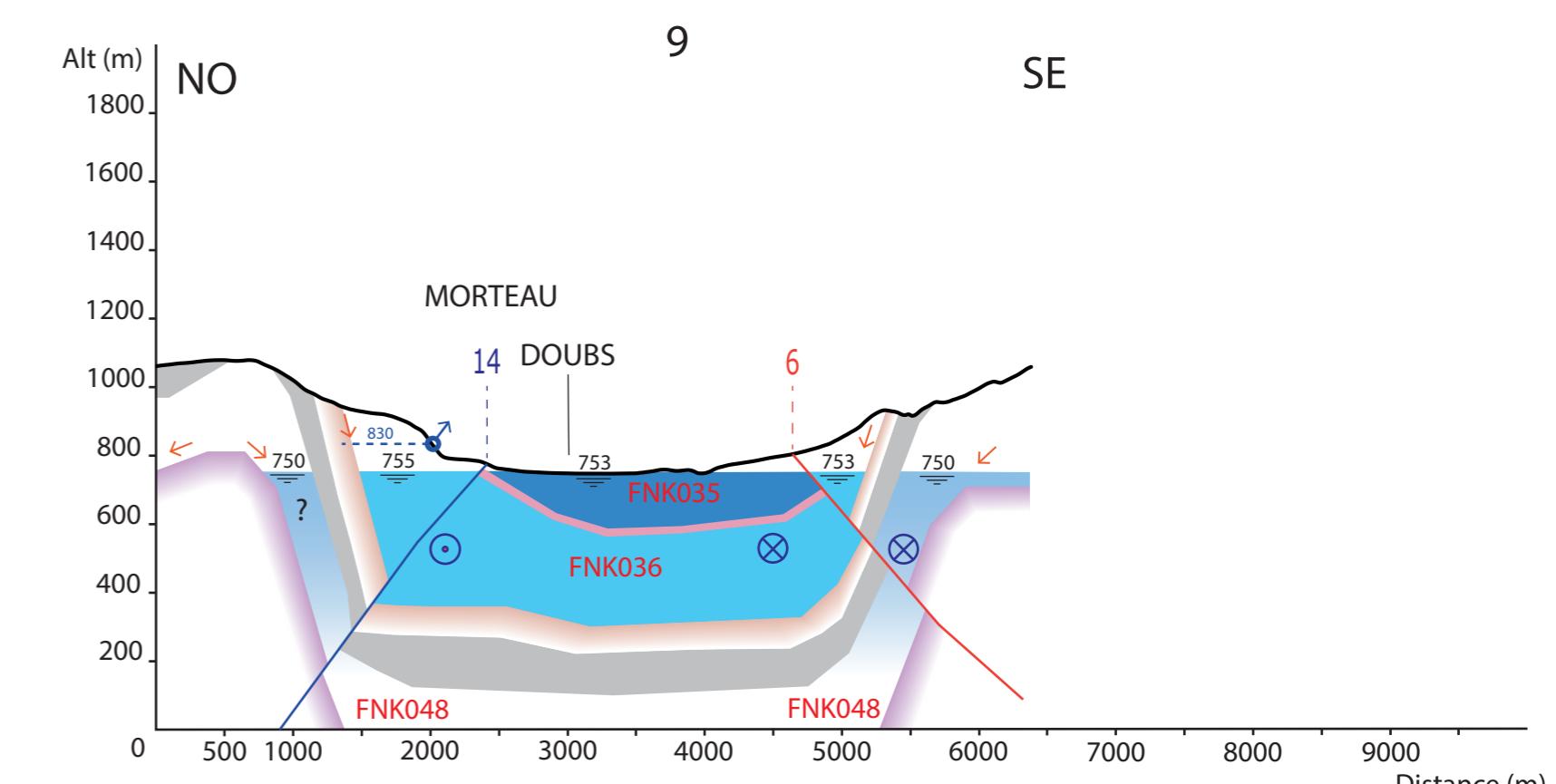
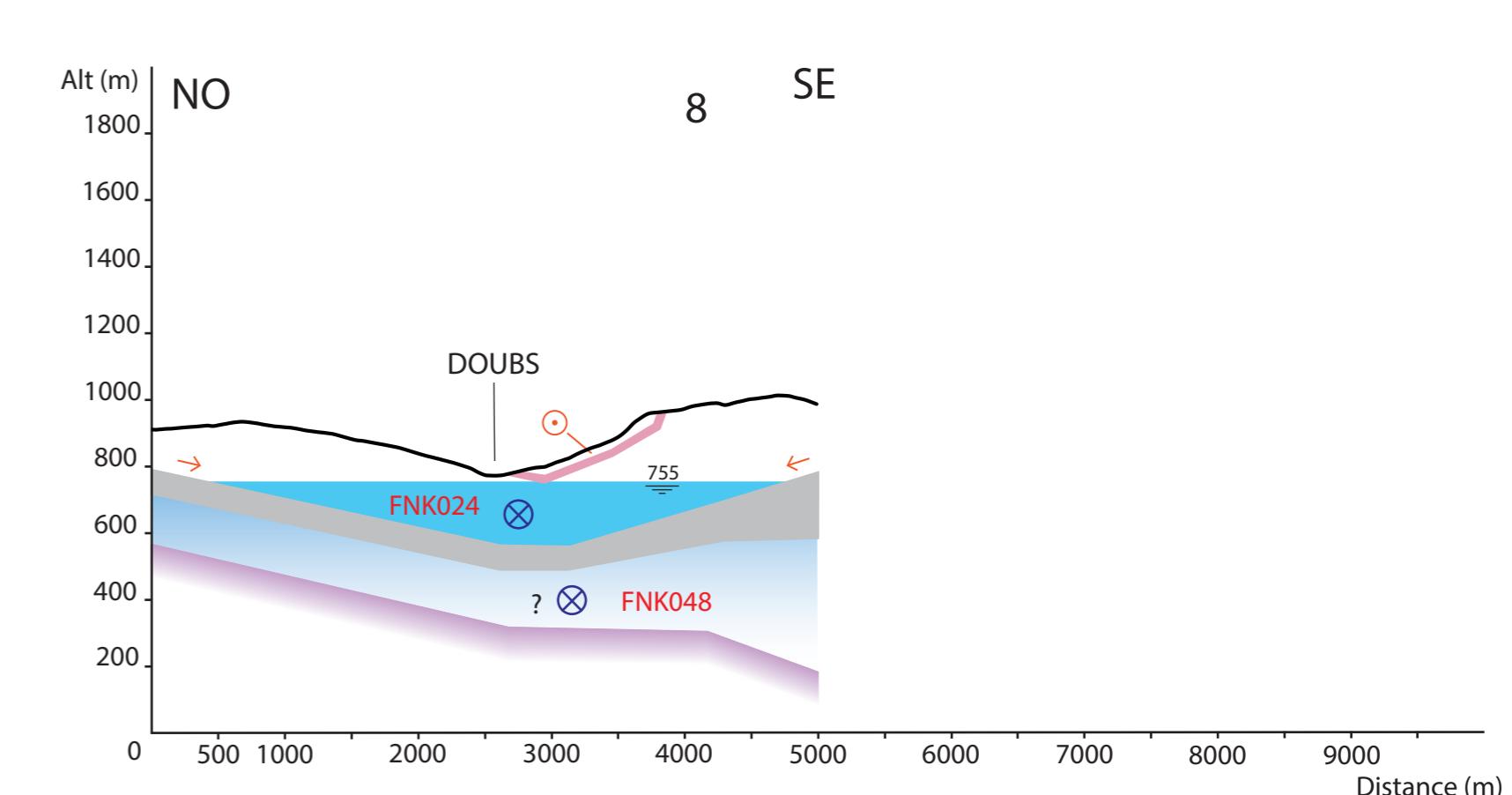
transversaux

ISSKA
SISKA
ISSCA
SISKA



INSTITUT SUISSE DE SPELEOLOGIE ET DE KARSTOL
SCHWEIZERISCHES INSTITUT FÜR SPELÄOLOGIE UND KARSTFORSCH
INSTITUTO SVIZZERO DI SPELEOLOGIA E CARSOLOG
SWISS INSTITUTE FOR SPELEOLOGY AND KARST STUDIES

ISSKA, 2024. KARSYS Doubs.
Hydrogéologie du bassin transfor-
talier du Doubs CH/FR. Institut
Suisse de Spéléologie et de Karst
ologie, 2300 La Chaux-de-Fonds
Suisse.



Annexe H. Géodonnées & Modèle de données

Les géodonnées sont décrites dans le Tableau 15 et le modèle de données associé est présenté en Figure 63. Ce modèle est largement inspiré de celui développé et appliqué dans le cadre de la loi sur la GeoInformation (LGéo⁶³), et légèrement adapté au contexte et aux données sources. Il s'agit à l'heure actuelle du seul modèle de données permettant de décrire la complexité des objets et processus hydrogéologiques des aquifères karstiques.

Géodonnée	Abrév.	Type	Description	ID
NAPPE_TABLE	MNK	TABLE	Liste des nappes documentées	-
NAPPE_ENTITEES	NK	POLYGON	Parties de nappes (épaisseurs, captive / libre, etc.)	24
NAPPE_CONTOUR	NK_C	POLYLINE	Ligne de contour des nappes (situation hydrologique, incertitude)	29
NAPPE_ISOHYPSE	NK_YPSE	POLYLINE	Ligne d'élévation du toit de la nappe – essentiellement dans les parties captives de l'aquifère.	28
NAPPE_SEUIL	NK_SEUIL	POLYLINE	Ligne de « débordement » ou de « déversement » de la nappe – surtout pour les nappes perchées.	-
NAPPE_ISOPIEZE	NK_PIEZ	POLYLINE	Indication d'altitude du toit de la nappe – essentiellement dans les parties libres de l'aquifère.	26
DIRECTION FLUX	NK_DR	POINTS	Points (avec attributs de direction de 0 à 360) indiquant la principale direction des écoulements souterrains, dans la zone noyée (écoulements symbolisés en bleu) et dans la zone non saturée (écoulement symbolisé en jaune)	22
INTERACTIONS_PONCTUELLES	IP	POINTS	Points de sources. Le fichier est repris de l'inventaire de la DREAL BFC. Les champs d'origine n'ont pas été modifiés. Seuls quelques champs supplémentaires ont été ajoutés	14
AQUIFERE	AQUI	TABLE	Table renseignant les horizons aquifères des différentes nappes	
NAPPE ORDRE	NK_SUP	TABLE	Table renseignant l'ordre de superposition des nappes (notamment pour l'affichage).	

Tableau 15. Description des géodonnées qui composent le modèle de données des informations relatives aux aquifères karstiques.

Les entités géographiques (POINT ; POLYLINE ; POLYGON) font toutes l'objet d'une codification basée sur la localisation spatiale de l'entité. La règle de codification varie selon l'Etat (CH / FR) où l'entité est saisie, ainsi :

- En Suisse, le code s'écrit « ##0000XXnnnn » ou « ## » réfère à l'ID du type d'objet (cf. Tableau 15), « 0000 » au numéro de la carte 1/25'000⁶⁴, « XX » est l'abréviation du canton, « nnnn » est un numéro incrémentiel.
- En France, le code s'écrit « ##1111FFnnnn » ou « ## » réfère à l'ID du type d'objet (cf. Tableau 15), « 1111 » au numéro de la carte TOP25, « FF » se réfère à la France et « nnnn » est un numéro incrémentiel.

⁶³ <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2008/388/fr>

⁶⁴ <https://map.geo.admin.ch/?lang=en&topic=ech&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&layers=ch.swisstopo.pixelkarte-pk25.metadata>

Les données non géographiques (NAPPE_TABLE) font l'objet d'une codification spéciale. Les nappes côté Suisse sont codées de la manière suivante « MNK00n », celles côté France sont codées de la manière suivant « FNK00n » avec « 00n » le numéro incrémentiel.

Les codes permettent par ailleurs de construire des relations entre les objets. Le modèle de données et le schéma relationnel entre les objets est présenté en Figure 63. La table MNK (NAPPE_TABLE) est la table de référence pour les objets nappes. Les propriétés des nappes sont réparties dans les différentes couches d'entités associées. Les associations / relations sont de deux types : (i) directes, c.à.d. basées sur une jointure entre les identifiants (ex : 1 MNK_ID vers plusieurs valeurs) ou (ii) indirectes, c.à.d. basées sur une table de relations (ex : 1 MNK_ID vers plusieurs IP, et inversement, 1 IP vers plusieurs MNK_ID).

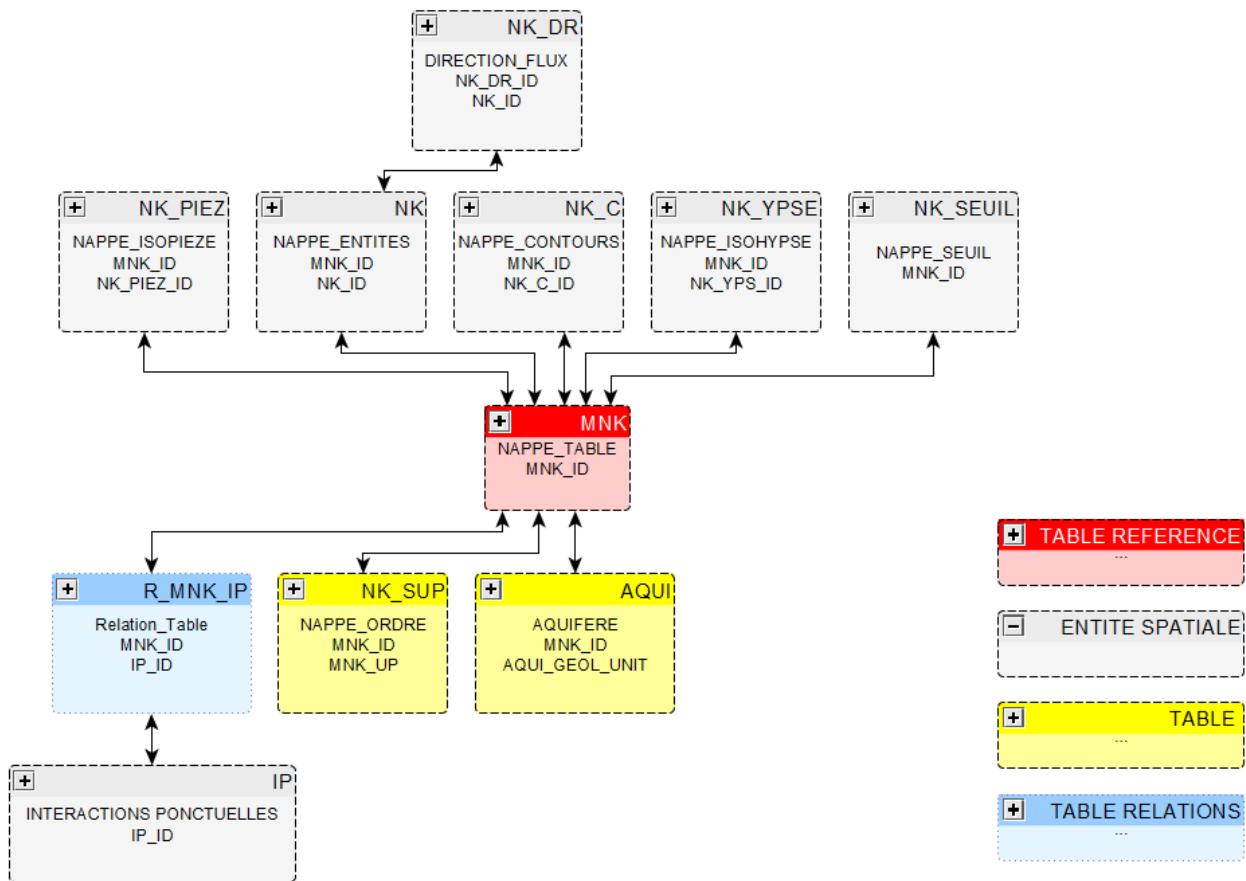


Figure 63. Modèle de données SIG utilisé pour la documentation des informations hydrogéologiques karstiques.

Les géodonnées sont livrées sous la forme d'une Géodatabase ArcGIS (.gdb) qui contient les principaux fichiers de forme vectoriels et qui documente les relations entre les objets. Le contenu est illustré en .



Figure 64. Contenu de la Geodatabase ArcGIS qui contient les géodonnées.

Une seconde Geodatabase ArcGIS est livrée. Elle contient les fichiers rasters (ombrages) et isolignes du top des principales formations géologiques aquiclude (cf. §. H13), à savoir les rasters qui ont permis l'élaboration des cartes en Annexe E.

Les sections suivantes présentent chacune des géodonnées (type, attributs, etc.) et la nature des relations entre elles.

Deux projets GIS sont livrés :

- 1 projet QGIS au format de coordonnées EPSG 2154 (utilisable côté France)
- 1 projet ArcGIS Pro au format de coordonnées EPSG 2056 (utilisable côté Suisse)

H1. MNK

La table [MNK] liste les objets de type nappes karstiques et leur propriétés non géométriques.

Entité	MNK
Alias	NAPPE_TABLE
Type	Table
Code	..

Description

Table listant les différentes nappes documentées. Les nappes sont identifiées par un CODE (MNK / FNK) et liste les différentes informations relatives aux entités de nappe NK, NK_C,

Liste des champs

Nom	Alias	Format	Longueur	Domaine	Description / commentaires
MNK_ID	CODE MNK	String	10		Code Nappe - identifiant unique
MNK_AQ	TYPE	Short Integer		DMN_AQ	Type d'aquifère: Karst, Poreux, fissuré - ici "karst" seulement
MNK_NAT	NATURE	Short Integer		DMN_NAT	Nature / "Art", selon MGDM - ici ce sera: "extension de la zone saturée"
MNK_NAME	NOM	String	30		Nom de la nappe
MNK_DESC	DESCRIPTION	String	250		Description générale, spécifique à la nappe en soi
MNK_VOL	VOLUME [km3]	Double			Volume supposé de la ressource en eau de la nappe (porosité 0.5%)
MNK_REM	REMARQUES	Text	200	-	Remarques spécifiques à la MNK

H2. NK

Les entités de nappes [NK] composent l'extension de la nappe [MNK], c.à.d. l'extension réelle de la zone saturée. Les entités sont découpées selon plusieurs critères : (i) la situation hydrologique, (ii) la pression (**nappe libre, captive, artésienne**), (iii) l'épaisseur (**<50 m, 50-150 m, >150 m**) et leur extension « **établie** » ou « **supposée** ». Les entités de nappes sont liées à la nappe [MNK] via le champ « **NK_MNK_ID** ».

Entité	NK
Alias	NAPPE_ENTITES
Type	Polygone
Code	24

Description

Polygones des entités / portions de nappe karstique

Liste des champs

Nom	Alias	Format	Longueur	Domaine	Description / commentaires
NK_ID	CODE NK	String	50	-	Identifiant unique de l'entité de nappe
NK_MNK_ID	CODE MNK	String	10	-	code de correspondance vers NAPPE_TABLE
NK_STA	STATUT	Short Integer		DMN_STA	statut de l'entité de nappe (établi, supposé ou indéterminé)
NK_PRES	PRESSION	Integer		DMN_PRESSION	Renseigne sur les conditions de pression de l'entité de nappe
NK_EPAI	EPAISSEUR	Short Integer		DMN_EPAI	Renseigne sur l'épaisseur de la nappe (selon classes OFEV)
NK_REM	REMARQUES	String	200	-	Remarques spécifiques à l'entité / portion de nappes

H3. NK_C

Les lignes de contour [NK_C] épousent l'extension de la nappe MNK en fonction de la **situation hydrologique** et renseignent sa **fiabilité**. Toutes les nappes possèdent un contour en situation de basses eaux (« **interannuel bas** ») et certaines se voient ajouter un contour en conditions de hautes eaux (« **interannuel élevé** ») sous l'apparence d'une ligne rouge.

Deux remarques sont à mentionner :

- (i) Les contours peuvent se référer à une limite altimétrique arbitraire : c'est typiquement le cas pour les nappes qui se prolongent sous la cote 0 m. Ces indications sont portées en commentaires.
- (ii) L'absence de contour indique que la nappe n'est ni « physiquement » ni « arbitrairement » arrêtée, principe qui s'applique surtout à certaines nappes de l'aquifère du Jurassique moyen.

Les lignes de contour sont liées à la nappe via le champ « **MNK_ID** ».

Entité	NK_C	Description
Alias	NAPPE_CONTOURS	Contours / périmètre des nappes karstiques. Les contours suivent les contours des entités de nappe fusionnés mais portent des informations indépendantes. Il peut exister un ou plusieurs contour(s) par nappe (i.e. MNK)
Type	Polyline	
Code	29	

Liste des champs

Nom	Alias	Format	Longueur	Domaine	Description / commentaires
NK_C_ID	CODE_NK_C	String	12		Identifiant unique du contour ou de la portion de contour
MNK_ID	CODE_MNK	String	10		Code de correspondance vers NAPPE_TABLE
NK_C_HYD	HYDRO	Short Integer		DMN_HYDRO	Situation hydrologique du contour de la nappe
NK_C_FIAB	FIABILITE	Short Integer		DMN_FIAB	Degré de fiabilité du contour
NK_C_REM	REMARQUES	String	200		Remarques / commentaires spécifiques au contour
NK_C_ALTI	ALTI_CONTOUR	Double			Altitude du contour de la nappe

H4. NK_SEUIL

Les seuils de débordement / déversement sont dessinés le long du contour de la nappe NK_C, aux endroits supposés de débordement / déversement de la nappe (ensellement, etc.).

Entité	NK_SEUIL	Description
Alias	NAPPE_SEUIL	Seuils de déversement d'une nappe karstique MNK. Les seuils épousent les contours de nappe NK_C
Type	Polyline	
Code	-	

Liste des champs

Nom	Alias	Format	Longueur	Domaine	Description / commentaires
MNK_ID	CODE_MNK	String	10		Code de correspondance vers NAPPE_TABLE

H5. NK_YPSE

Les isohypses de nappe [NK_YPSE] renseignent sur l'altitude du toit de la zone saturée dans la partie captive. Elles sont représentées par des lignes d'intervalle **100 m**. A noter qu'il n'existe pas d'isohypses dans les parties libres de la nappe car celle-ci présente rarement un gradient hydraulique aussi fort au sein d'une même entité. Les isohypses de nappe sont liées à la nappe via le champ « **NK_YPSE_MNK_ID** » et

possèdent un champ qui renseigne les conditions hydrologiques. Les isohypses sont symbolisés par des lignes blanches continues en conditions de basses eaux et par des lignes pointillées en conditions de hautes eaux. Ce dernier cas n'est pratiquement pas documenté.

 La continuité des isohypses de nappe entre les différentes feuilles adjacentes n'est pas tout le temps assuré en raison des effets de bord des modèles géologiques.

Entité	NK_YPSE
Alias	NAPPE_ISOHYPSE
Type	Polyline
Code	28

Description
Isohypse qui renseigne le top de la nappe - surtout affichée dans les zones captives

Liste des champs

Nom	Alias	Format	Longueur	Domaine	Description / commentaires
NK_YPSE_ID	CODE NK_YPSE	String	12		Identifiant unique de l'isohypse
NK_YPSE_MNK_ID	CODE MNK	String	10		Code de correspondance vers NAPPE_TABLE
NK_YPSE_ELEV	ELEVATION	Double Short			Altitude de la ligne d'isohypse
NK_YPSE_HYD	HYDRO	Integer		DMN_HYDRO	Situation hydrologique de la ligne isohypse (certaines lignes peuvent n'exister qu'en hautes eaux)
NK_YPSE_REM	COMMENTAIRES	String	200		Champ de commentaires

H6. NK_PIEZ

Les isopièzes de nappe [NK_PIEZ] renseignent l'altitude mesurée ou supposée du niveau d'eau de la nappe localement. Elles sont figurées par des courtes lignes (max 100 m) portant l'information d'altitude du niveau d'eau, disposées perpendiculairement aux directions de flux [NK_DR]. Les isopièzes de nappe sont liées à la nappe via le champ « **MNK_ID** ».

Entité	NK_PIEZ
Alias	NAPPE_ISOPIEZE
Type	Polyline
Code	26

Description
Isopieze qui renseigne l'altitude du niveau d'eau en conditions de basse eau hydrologique. Les isopièzes ne sont en général pas pertinents dans les aquifères karstiques car ils témoignent d'une certaine homogénéité de la nappe - ce qui n'est pas réaliste. les isopièzes seront donc dessinées comme des lignes sur une distance très courte - quasi ponctuellement.

Liste des champs

Nom	Alias	Format	Longueur	Domaine	Description / commentaires
NK_PIEZ_ID	CODE NK_ISO	String	12		Identifiant unique de l'isopieze
MNK_ID	CODE MNK	String	10		Code de correspondance vers NAPPE_TABLE
NK_PIEZ_ELEV	ELEVATION	Double			Altitude de la ligne d'isopieze
NK_PIEZ_REM	COMMENTAIRES	String	200		Champ de commentaires

H7. NK_DR

Les directions de flux [NK_DR] sont des points renseignant le type et l'orientation principale (0-360°) des écoulements souterrains. Deux types sont distingués :

- Les écoulements dans la **zone saturée** (dans la nappe). Ces écoulements sont appelés « **phréatiques** » et sont symbolisés par une petite flèche bleue.

- Les écoulements dans la **zone non saturée** (verticaux à travers les formations calcaires ou contrôlés par la géométrie des formations imperméables). Ces écoulements sont appelés « **vadose** » et sont symbolisés par une petite flèche orangée.

Le positionnement des écoulements respecte les principes suivants :

- Au moins une direction d'écoulement est dessinée **par kilomètre carré**. Cette densité peut être renforcée dans les zones qui le nécessitent. Pour les nappes très étendues (typiquement celle du pied du Jura), la densité de directions de flux est réduite dans la zone captive ou les écoulements sont supposés être moins rapides.
- Les écoulements dans la zone non saturée sont déduits : (i) des connaissances spéléologiques, traçages, etc. et (ii) des lignes de plus grandes pentes des modèles géologiques.

Un indice de fiabilité (fort ou faible) est assigné à chaque entité. Les secteurs où la direction d'écoulement n'est pas clairement identifiée, le type et la fiabilité sont notés comme « indéterminée » et l'entité prend la forme d'un **point d'interrogation**. Ce cas s'applique surtout aux écoulements phréatiques pour lesquels le sens de circulation n'est pas identifié.

Les directions de flux sont liées indirectement à la nappe [MNK] via les entités de nappe [NK] sur la base du champ « **NK_DR_NK_ID** ».

Entité	NK_DR
Alias	DIRECTION_FLUX
Type	Point
Code	22

Description
Point avec orientation renseignant la direction d'écoulement des eaux dans la nappe en fonction de la situation hydrologique (basses eaux, hautes eaux, etc.)

Liste des champs

Nom	Alias	Format	Longueur	Domaine	Description / commentaires
NK_DR_ID	CODE_NK_DR	String	12		Identifiant unique de la direction de flux
NK_DR_NK_ID	CODE_NK	String	10		Code de correspondance vers ENTITES_NAPPE
NK_DR_TYP	TYPE	Short Integer		DMN_ECOU	Type d'écoulement (vadose, phréatique)
NK_DR_AZ	DIRECTION	Double			Azimuth de direction d'écoulement
NK_DR_FIAB	FIABILITE	Short Integer		DMN_FIAB	Fiabilité de la direction de flux
NK_DR_REM	COMMENTAIRES	String	200		Champ de commentaires

Les directions de flux sont associées aux entités de nappes (NK), et non pas à la nappe (MNK) car ils peuvent changer selon les conditions hydrologiques.

H8. IP

Les entités IP renseignent la position des principales sources karstiques. Ce fichier est repris de la base de données DREAL BFC.

Entité	IP
Alias	INTERACTIONS PONCTUELLES
Type	Points
Code	14

Description

Liste des champs

Nom	Alias	Format	Longueur	Domaine	Description / commentaires
IP_ID	CODE IP	String	14	-	Identifiant unique de la source IP
Nom_Point_	NOM	String	254	-	Nom de l'IP
Labels_	LABELS	String	50	-	Complément de nom de l'IP (« source de », « source du », etc.)
QMIN_	QMIN	Double	-	-	Débit minimum (m3/s)
QMOY_	QMOY	Double	-	-	Débit moyen (m3/s)
QMAX_	QMAX	Double	-	-	Débit maximum (m3/s)
X_2154	X2154	Long	-	-	Coordonnées X de l'IP (EPSG 2154)
Y_2154	Y2154	Long	-	-	Coordonnées Y de l'IP (EPSG 2154)
Z_Corr	Z_Corr	Long	-	-	Altitude corrigée de l'IP (m)
Commentair*	Commentair	String	254	-	Champ de commentaires

⚠️ La table attributaire de l'entités IP compte bien davantage de champs que ceux listés ci-dessus. Il s'agit des champs hérités de la base de données DREAL BFC. Ceux-ci n'ont été ni supprimés, ni modifiés. Il est important de noter que le positionnement des sources n'a pas été systématiquement contrôlé. Des erreurs de positionnement, de noms, etc. sont possibles.

H9. AQUI

La table [AQUI] permet de renseigner l'étage aquifère de l'objet nappe karstique [MNK] via une relation directe basée sur le champ « **MNK_ID** ». De cette manière, une nappe [MNK] peut appartenir à plusieurs étages aquifères.

Entité	AQUI
Alias	AQUIFERE
Type	Table
Code	..

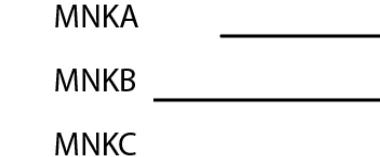
Description
Table listant les horizons aquifères de chacune des nappes MNK. Une nappe MNK pouvant être associée à un ou plusieurs horizon(s) aquifère(s)

Liste des champs

Nom	Alias	Format	Longueur	Domaine	Description / commentaires
MNK_ID	CODE MNK	String	10		Code Nappe - identifiant unique
AQUI_GEOL_UNIT		Short	-	DMN_GEOAQUI	Domaine géologique (horizon) de l'aquifère

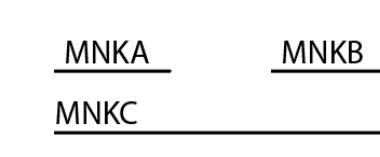
H10. NK_SUP

En raison de l'étagement des nappes, certaines nappes peuvent s'étendre en dessous et/ou en dessus d'autres nappes. La visualisation des entités de nappe doit donc prendre en considération le positionnement relatif des nappes les unes par rapport aux autres. La superposition des nappes est gérée par la table NK_SUP. Elle renseigne l'identifiant de la nappe ou des nappes directement sus-jacente(s) à la nappe considérée (cf. Figure 65).



a.

MNK	MNK_UP	MNK_ORDER
MNKA	-	1
MNKB	MNKA	2
MNKC	MNKB	3



b.

MNK	MNK_UP	MNK_ORDER
MNKA	-	1
MNKB	-	1
MNKC	MNKA	2
MNKC	MNKB	2

Figure 65. Principes de saisie des informations de positionnement relatif des nappes [MNK] par indication de la nappe ou des nappes directement sus-jacentes dans la colonne « MNK_UP ». La colonne « MNK_ORDER » est renseignée via un script et indique la position « absolue » de la nappe les unes par rapport aux autres. Cas a., les nappes A, B et C se superposent les unes par rapport aux autres ; elles prennent respectivement les positions 1, 2 et 3. Cas b., les nappes A et B se jouxtent et se placent en dessus de C ; elles prennent donc respectivement les positions 1, 1 et 2.

L'ordre absolu de positionnement d'une nappe est fixé par le nombre maximal de nappes sus-jacentes (Figure 66, cas c.) – même si toutes les nappes ne se superposent pas directement (Figure 66, cas d.).

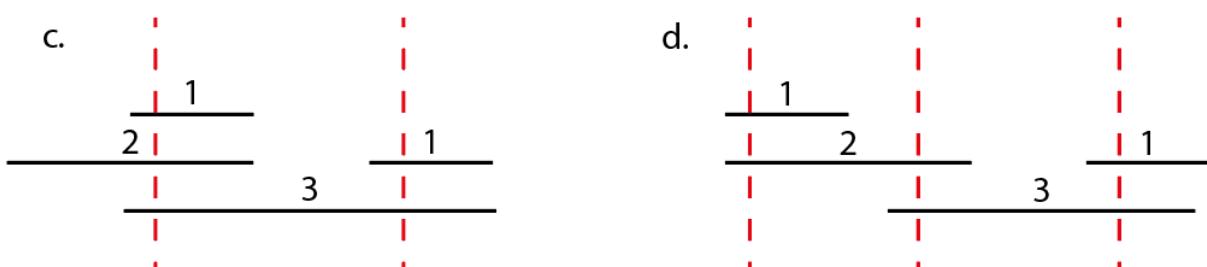


Figure 66. Principes d'indexation des positions absolues des nappes.

Entité	NK_SUP
Alias	NAPPE_ORDRE
Type	Table
Code	..

Description
Table permettant de renseigner l'ordre de superposition des nappes MNK pour affichage

Liste des champs

Nom	Alias	Format	Longueur	Domaine	Description / commentaires
MNK_ID	CODE MNK	String	6	-	Code Nappe - identifiant unique
MNK_UP		String	6	-	Code Nappe - identifiant unique de la nappe sus-jacente
MNK_ORDER		Short Integer		-	Ordre de positionnement de la nappe MNK

H11. LIMITS_BA

La couche d'entités renseigne les limites supposées du bassin d'alimentation du Doubs transfrontalier (hydrologique + hydrogéologique). Les informations sont décrites au §. 0. La couche n'est pas inscrite directement dans la base de données – mais fait cependant partie des livrables SIG.

Entité	LIMITS_BA
Alias	LIMITS_BA
Type	Polylinnes
Code	-

Description
Polylinnes décrivant les limites du bassin d'alimentation du Doubs transfrontalier. Chaque limite est documentée sur sa nature et sa fiabilité.

Liste des champs

Nom	Alias	Format	Longueur	Domaine	Description / commentaires
LIMITS_TYP	TYPE DE LIMITE	Long	-	-	Type de limite (cf. Tableau 5)
FIABILITE	FIABILITE	Long	-	-	Index de fiabilité (cf. Tableau 6)
COMMENTS	COMMENTAIRES	String	250		Champ de commentaires

H12. R_MNK_IP

La table R_MNK_IP liste les relations entre les nappes et les sources karstiques et réciproquement.

Entité	R_MNK_IP
Alias	R_MNK_IP
Type	Table
Code	-

Description
Table de relation MNK <-> IP

Liste des champs

Nom	Alias	Format	Longueur	Domaine	Description / commentaires
MNK_ID	-	String	10	-	Code Nappe - identifiant unique
IP_ID	-	String	14	-	Identifiant unique de la source IP

H13. Bases aquifères

La base de données **RASTERS_BASE_AQUIFERE.gdb** (Figure 67) rassemble les rasters formant le top des formations géologiques aquiclude. Les rasters sont classés par modèles (M1 à M12) et présentent l'ombrage (raster) et les isolignes d'altitude du top des marnes oxfordiennes (« OX »), à la base de l'aquifère du Jurassique sup. et celles du top des marnes du Lias (« L »), à la base de l'aquifère du Jurassique moy.

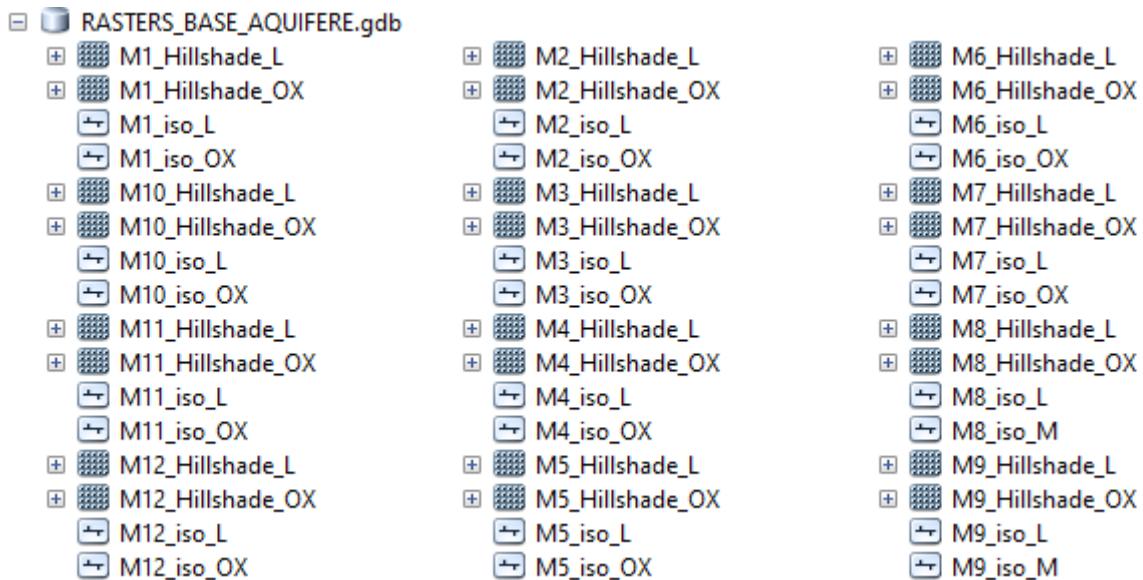


Figure 67. Couches raster des formations aquiclude et isolignes d'altitude de la base de données RASTERS_BASE_AQUIFERE.gdb.

H14. Domaines

DMN_HYDRO		Etat hydrodynamique
Classes		Valeurs
-9999	Indéterminé	
1	Interannuel bas	
2	Interannuel élevé	

DMN_PRESSION		Critère de pression hydraulique
Classes		Valeurs
-9999	Indéterminé	
1	Nappe libre	
2	Nappe captive	
3	Nappe artésienne	

DMN_EPAI		Classes d'épaisseur
Classes		Valeurs
-9999	Indéterminé	
1	< 50 m	
2	50 - 150 m	
3	> 150 m	

Classes	DMN_HET	Critère d'hétérogénéité	Valeurs
-9999		Indéterminé	
1		Aquifère karstique fortement hétérogène	
2		Aquifère karstique faiblement hétérogène	

DMN_NAT		Nature de la géométrie	Valeurs
Classes			
-9999		Indéterminé	
1		Aquifère affleure à la surface	
2		Extension réelle de l'aquifère	
3		Extension réelle de la zone saturée	

DMN_GEOAQUI		Ensemble géologique de l'aquifère	Valeurs
Classes			
-9999		Indéterminé	
1		Crétacé Sup.	
2		Crétacé Inf.	
3		Jurassique sup.	
4		Jurassique moy.	

DMN_STA		Statut de la portion de nappe	Valeurs
Classes			
-9999		Indéterminé	
1		extension établie	
2		extension supposée	

DMN_FIAB		Critère de fiabilité (degré)	Valeurs
Classes			
-9999		Indéterminé	
1		Fiabilité faible	
2		Fiabilité forte	

DMN_ECOU		Type d'écoulement	Valeurs
Classes			
-9999		Indéterminé	
1		Vadose (zone non saturée)	
2		Phréatique (zone saturée)	

