



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Document à accès immédiat

# Acquisition sismique et construction d'un modèle géologique 3D pour préciser l'implantation de forages de reconnaissance hydrogéologique dans les calcaires du jurassique du Grand Belfort


Rapport final

**BRGM/RP-73653-FR**

Version 1 du 27 septembre 2024

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche et développement

**Caritg S., Delaunay M. et Lacquement F.**

<b>Vérificateur :</b>	
Nom :	Eric Lasseur
Fonction :	Expert scientifique DGR/GBS
Date :	22/07/2024
Signature :	

<b>Approbateur :</b>	
Nom :	A. Vallet
Fonction :	Directeur régional
Date :	16/09/2024
Signature :	

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

## Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

## Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



**Mots clés :** Modèle géologique 3 dimensions, Levés sismiques, Sismique réflexion, forage de reconnaissance, Belfort, Territoire de Belfort, Bourgogne-France-Comté.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Caritg S., Delaunay M. et Lacquement F.** 2024. Acquisition sismique et construction d'un modèle géologique 3D pour préciser l'implantation de forages de reconnaissance hydrogéologique dans les calcaires du jurassique du Grand Belfort. Rapport final V1. BRGM/RP-73653-FR, 174 p.

© BRGM, 2024, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-09/03/2023

## Synthèse

L'alimentation en eau potable du Grand Belfort est principalement assurée par les nappes alluvionnaires de la Savoureuse et de l'Allaine, le complément provient de services de distribution voisins. Cependant, la tension sur ces ressources augmente en raison des sécheresses croissantes et des changements climatiques. En réponse, le Grand Belfort a initié des études pour renforcer ses capacités de production d'eau potable en explorant les aquifères souterrains.

En 2019, une étude menée par le BRGM a identifié les calcaires du jurassique comme étant des entités hydrogéologiques potentiellement intéressantes pour l'exploitation en eau. Une étude complémentaire en 2021 a révélé que les calcaires affleurants sont vulnérables aux variations climatiques et aux pollutions, suggérant de poursuivre les recherches sur les calcaires sous couverture, mieux protégés.

En 2023, le BRGM a poursuivi ses investigations sur le territoire du Grand Belfort avec deux objectifs principaux : imager par sismique réflexion la géométrie et la structuration des formations géologiques susceptibles d'être exploitées pour la production d'eau potable, et construire un modèle géologique 3D intégrant les informations existantes. Cette approche multidisciplinaire s'est avérée particulièrement efficace. En intégrant les données géologiques provenant de la bibliographie, les résultats des campagnes de terrain, et les nouveaux profils sismiques acquis, le BRGM a pu contraindre la géométrie des formations jurassiques et des failles en profondeur, notamment dans les secteurs recouverts par des dépôts tertiaires.

Le modèle géologique 3D final prend en compte les formations de la couverture pliocène et oligocène ainsi que toutes les formations carbonatées de la série jurassique présentes jusqu'à 400 mètres de profondeur. Parmi ces formations, les calcaires oolithiques de l'oxfordien supérieur (faciès rauracien) ont été définis comme la cible aquifère la plus prometteuse pour ce projet. Le modèle géologique a également permis d'identifier et de modéliser 16 failles, principalement orientées nord-sud, avec un pendage subvertical et une vergence vers l'ouest.

Les contraintes géologiques et hydrogéologiques mises au regard des contraintes administratives de la communauté de commune du Grand Belfort, ont permis de sélectionner quatre parcelles pour l'implantation de forages de reconnaissance. Ces parcelles se situent dans les communes de Morvillars (deux sites), Méziré et Charmois. Une campagne de forage, permettra à l'avenir de valider les hypothèses du modèle et de déterminer les capacités réelles de l'aquifère jurassique identifié.

En conclusion, le modèle géologique 3D réalisé a démontré son efficacité en contraignant la géométrie des formations jurassiques et des failles en profondeur. En tenant compte de l'ensemble des contraintes, il offre la possibilité de définir quatre sites cibles pour l'implantation future de forages d'eau potable.



## Sommaire

1. Introduction .....	11
2. Méthodologie.....	13
2.1. Le logiciel de modélisation géologique 3D « Geomodeller » (BRGM).....	13
2.2. Objectifs et étapes de construction du modèle géologique 3D .....	13
3. Modélisation géologique 3D préliminaire à partir des données disponibles (étape 1) .....	15
3.1. Synthèse des données disponibles .....	15
3.1.1. <i>Modèle numérique de terrain</i> .....	16
3.1.2. <i>Cartes topographiques</i> .....	18
3.1.3. <i>Cartes géologiques</i> .....	18
3.1.4. <i>Forages</i> .....	19
3.1.5. <i>Mesures structurales et observations de terrain</i> .....	21
3.2. Définition de l'emprise du modèle.....	21
3.3. Construction du modèle préliminaire .....	23
3.3.1. <i>Contexte géologique structural de la zone d'étude</i> .....	23
3.3.2. <i>Construction de la pile lithostratigraphique du modèle</i> .....	27
3.3.3. <i>Mise en cohérence de la carte géologique avec la pile du modèle</i> .....	30
3.3.4. <i>Mise en cohérence des forages avec la pile du modèle</i> .....	33
3.3.5. <i>Sélection des failles retenues pour la modélisation</i> .....	33
3.4. Premiers résultats et recommandations pour les acquisitions sismiques.....	36
3.4.1. <i>Géométrie des formations</i> .....	36
3.4.2. <i>Géométrie des failles</i> .....	36
3.4.3. <i>Recommandations pour la sismique</i> .....	39
4. Acquisition des profils sismiques et premières interprétations (étape 2) .....	42
4.1. Acquisition des profils sismiques.....	42
4.2. Interprétation préliminaire des profils sismiques .....	44
4.2.1. <i>Interprétation des réflecteurs sismiques</i> .....	45
4.2.2. <i>Corrélation structurale entre les profils</i> .....	47
4.2.3. <i>Corrélation structurale entre les profils et les cartes géologiques</i> .....	49
5. Modélisation géologique 3D consolidée par la sismique (étape 3).....	52
5.1. Intégration des profils sismiques dans le GeoModeller.....	52
5.2. Interprétation des profils sismiques dans le GeoModeller.....	55
5.2.1. <i>Caractérisation des réflecteurs sismiques à partir des forages profonds</i> .....	55
5.2.2. <i>Ajustement de la pile géologique du modèle</i> .....	59
5.2.3. <i>Ajustement de l'interprétation de certains forages</i> .....	59
5.2.4. <i>Ajustement des formations</i> .....	59
5.2.5. <i>Ajustement des failles</i> .....	61
5.2.6. <i>Résultat des ajustements sur les profils sismiques</i> .....	73
5.3. Résultats et interprétation du modèle géologique 3D consolidé .....	77
5.3.1. <i>Pile géologique finale du modèle actualisé</i> .....	79
5.3.2. <i>Géométrie des formations géologiques</i> .....	80
5.3.3. <i>Géométrie des failles</i> .....	85
6. Recommandations pour le positionnement du ou des forages de reconnaissance AEP .....	87
6.1. Rappel des besoins.....	87
6.2. Critères d'implantation.....	87
6.3. Détermination des zones d'intérêts hydrogéologique .....	88
6.4. Compatibilité des zones d'intérêts hydrogéologique avec les spécificités du territoire du Grand Belfort .....	92

6.5. Colonnes lithostratigraphiques des cibles sélectionnées.....	95
6.5.1. Cible 1 .....	95
6.5.2. Cible 2 .....	95
6.5.3. Cibles 3 et 4.....	95
7. Conclusions et perspectives.....	101
7.1. Conclusions .....	101
7.2. Perspectives .....	102
8. Bibliographie .....	103

## Liste des figures

Figure 1. Visualisation 3D du MNT intégré dans GeoModeller. Le nord est indiqué par la flèche "y" verte. ....	16
Figure 2. Modèle numérique de terrain du modèle géologique 3D du Grand Belfort. Base de données RGE ALTI® (IGN). Système de coordonnées en RGF93/Lambert 93. Précision de 5 m. Format ascii. Tirets blancs : failles issues de la carte géologique.....	17
Figure 3. Visualisation 3D des cartes géologiques de Belfort (Feuille n°444) et de Delle (Feuille n° 475) intégrées dans GeoModeller. Le nord est indiqué par la flèche "y" verte.....	19
Figure 4. Visualisation 3D des 23 forages intégrés dans le GeoModeller sur fond de carte géologique. Le nord est indiqué par la flèche "y" verte. ....	20
Figure 5. Emprise du modèle 3D de Belfort (Extension horizontale) sur fond de cartes géologiques au 1/50 000 de Belfort (Feuille de Belfort n°444) sur la moitié nord, et de Delle (Feuille de Delle n°475) sur la moitié sud. ....	22
Figure 6 (à gauche). Contexte structural à grande échelle de la zone d'étude. Le rectangle rouge correspond à l'emprise du modèle 3D du Grand Belfort. Le fond cartographique est issu de la carte géologique de la France à 1/1 000 000 (6ème édition révisée). ....	25
Figure 7 (à droite). Orientations des failles à l'échelle régionale : orientation principale N-S. Orientation secondaire NE-SO. Toutes deux sont probablement héritées de l'orogénèse hercynienne et réactivées durant l'ouverture du fossé Rhénan (éocène-oligocène puis l'orogénèse alpine (Miocène à Pliocène).....	25
Figure 8. Pile lithostratigraphique du modèle géologique 3D préliminaire (extrait du logiciel GeoModeller). Colonne de gauche : nom des Séries. Colonne de droite : Formations (parfois regroupées dans une même série) .....	28
Figure 9. Carte géologique synthétique du projet Grand Belfort, réalisée à partir de la mise en cohérence des cartes géologiques harmonisées au 1 :50 000 avec la pile lithologique du modèle 3D. Traits noirs : failles observées (trait plein), supposées (tirets).....	32
Figure 10. Exemple d'ajustement des failles lors du processus de modélisation 3D. Positionnement de la faille FA par rapport au sondage BSS001EMEF lors de la construction du modèle géologique 3D préliminaire du Grand Belfort. ....	37
Figure 11. Carte des failles modélisées à l'issue du modèle géologique 3D préliminaire du Grand Belfort. ....	38
Figure 12. Carte de localisation des tracés recommandés pour les 4 profils sismiques à acquérir. Fonds de carte géologique synthétique au 1 :50 000 du projet Grand Belfort (Figure 7) et cartes topographiques au 1 :25 000 (SCAN 25®, Géoservices (ign.fr)). ....	41

Figure 13. Carte de localisation des 4 profils sismiques acquis. Fonds de carte géologique synthétique au 1 :50 000 du projet Grand Belfort (Figure 7) et cartes topographiques au 1 :25 000 (SCAN 25®, Géoservices (ign.fr)). Les triangles verts représentent les forages issus de la BSS du BRGM. ....	43
<i>Figure 14. Profils sismiques en temps double interprétés en termes de réflecteurs remarquables. <b>Légende</b> : Le trait noir continu marque le passage entre une unité sismiquement transparente (au-dessus) et une unité sismique présentant des réflecteurs bien marqués, superposés et discontinus. Le trait en pointillé noir sur les profils C01 et PS02 indique l'intersection entre les profils. Les chiffres en blanc de 1 à 3 correspondent au centre-dépôt des principaux hémigrabens, Le profil encadré en gris correspond à une proposition d'interprétation alternative de la partie nord du profil C04. Deux familles de failles sont identifiées, les failles principales notés F et numérotées de « 1 » à « 4 » et les failles mineures notées F et numérotées de « a » à « i ».</i> .....	45
Figure 15. Photographie aérienne avec localisation des failles identifiées (traits vert) sur les profils sismiques (rouge), En bandes transparente jaune : proposition de corrélation de failles déduites des profils sismiques. ....	48
Figure 16. fig.11 du rapport Doney et Lacquement, 2022 avec la carte géologique à 1/50 000 et représentation stéréographique des failles dans le secteur de la zone d'acquisition des profils sismiques réflexion. Le secteur B et la partie nord de A correspondent à la zone d'intérêt .....	49
Figure 17. Photographie aérienne avec localisation des failles déduites des profils sismiques et les failles extraites de la carte géologique à 1/50 000 de Delle (traits blanc discontinus).....	51
Figure 18. Profils sismiques vierges intégrés dans GeoModeller (profils convertis en temps/profondeur). ....	53
Figure 19. Profils sismiques préalablement interprétés et intégrés dans GeoModeller (profils en temps double). ....	53
Figure 20. Géoréférencement du profil sismique PS01 vierge, avant intégration dans le GeoModeller. Le système de coordonnées est en RGF93/Lambert 93.....	54
Figure 21. Intégration et calage du profil sismique PS01 préalablement interprété, dans le GeoModeller. Le système de coordonnées est en RGF93/Lambert 93 ; x, y et z sont en mètres. ....	54
Figure 22. Fiche descriptive simplifiée des terrains du forage de Charmois BSS001EMED .....	56
Figure 23. Caractérisation lithologique des terrains du jurassique à partir des renseignements issus de la notice de la carte géologique de Delle et des informations du forage de Charmois (BSS001EMED). La colonne lithologique en bleu, cyan, rouge et jaune renseigne la nature lithologique principale de l'étage correspondant respectivement aux calcaires, marnes, argiles et grès. ....	57
Figure 24. Identification des réflecteurs sismiques (coupe n°4) à partir du forage du Charmois projeté sur la coupe à 55 m de distance. Sur le profil, les traits de couleurs correspondent aux lignes caractérisées sur les interprétations sismiques. Les traits noirs en pointillés correspondent aux contacts stratigraphiques des différents étages du jurassique. ....	58
Figure 25. Ajustement de la pile GeoModeller du modèle actualisé par la sismique. Correspondance avec la pile du modèle géologique 3D préliminaire.....	59
Figure 26. Ajustement de la géométrie (épaisseur, profondeur, extension) des formations suite à l'intégration et l'interprétation des profils sismiques dans le GeoModeller. Exemple du profil PS04 avant intégration des profils sismiques (modèle préliminaire) et après (modèle actualisé). ....	61

Figure 27. Carte des failles ajustées d'après l'intégration et l'interprétation des profils sismiques dans GeoModeller et modélisées à l'issue du modèle géologique 3D actualisé du Grand Belfort. Fond de carte synthétique du projet (Figure 7).....	62
Figure 28. a) Coupe S1 au sud de la zone d'étude issue du modèle géologique 3D final du Grand Belfort (GeoModeller). b) Localisation en carte de la coupe S1 sur fond de carte géologique synthétique du projet.....	63
Figure 29. Carte de comparaison entre a) le tracé des failles proposé lors de l'étude géologique de première phase du projet (Doney et Lacquement, 2022) et b) le résultat du modèle géologique 3D consolidé par la sismique du Grand Belfort (logiciel BRGM GeoModeller).....	66
Figure 30 : Carte zoomée sur la cible hydrogéologique (encadrée en traitsillés rouges), des failles ajustées d'après l'intégration et l'interprétation des profils sismiques dans GeoModeller et modélisées à l'issue du modèle géologique 3D actualisé du Grand Belfort. Fond de carte synthétique du projet (Figure 9). ....	67
Figure 31. Vue 3D de l'interaction/Relation entre les failles modélisées dans l'emprise de la cible hydrogéologique. Modèle géologique 3D final du Grand Belfort (logiciel BRGM GeoModeller). 71	71
Figure 32. Étapes d'ajustement du modèle géologique 3D et résultat des interprétations sur le profil sismique PS03. ....	74
Figure 33. Profils sismiques interprétés d'après le résultat du modèle géologique 3D final ..... 75	75
Figure 34. Vue 3D du modèle géologique 3D final du Grand Belfort (logiciel BRGM GeoModeller), réalisé des données de MNT, cartes géologiques, mesures structurales, forages et profils sismiques. Exagération verticale X2.....	77
Figure 35. Pile lithostratigraphique finale d'après les résultats du modèle géologique 3D actualisé par la sismique. Dans la colonne « notation, la couleur bleue indique une formation à tendance « aquifère », bleu pâle une formation à tendance « semi-aquifère » et grise une formation à tendance « aquitard ». ....	80
Figure 36. Coupe N-S montrant le plongement vers le nord de l'ensemble des formations du modèle géologique 3D final du Grand Belfort (extrait GeoModeller).....	81
Figure 37. Coupe à travers les 2 grands bassins oligocènes, au nord de la zone d'étude du Grand Belfort. Résultat issu du modèle géologique 3D final (Extraction GeoModeller). À noter que l'épaisseur de l'oligocène modélisée au niveau de la faille FA sur cette coupe est probablement exagérée car peu contrainte en bordure NE du modèle. ....	81
Figure 38 : Carte d'épaisseur cumulée de la couverture pliocène et oligocène issue du modèle géologique 3D final du Grand Belfort. ....	83
Figure 39 : Carte d'épaisseur des calcaires de la série jurassique (j6b, j6a, j5c6aC, et j5bP), hors formation marneuse (j5), issue du modèle géologique 3D final du Grand Belfort (logiciel BRGM GeoModeller).....	84
Figure 40. Coupe Ouest-est au centre de la zone d'étude passant par Allenjoie à l'ouest et le forage de Grandvillars – Le calvaire (BSS001EMJH) à l'est.....	85
Figure 41. Carte géologique des formations et des failles modélisées, issue du modèle géologique 3D final du Grand Belfort (Logiciel BRGM GeoModeller).....	86
Figure 42. Synoptique simplifié pour la définition de sites d'implantation de forages de reconnaissance.....	87
Figure 43. Horsts et grabens observés le long du profil sismique PS03. ....	88

Figure 44. Vue 3D du modèle géologique 3D final du Grand Belfort (logiciel BRGM GeoModeller), focalisée sur la formation des calcaires du rauracien (j6bP) dans la zone de la cible hydrogéologique.....	89
Figure 45. À gauche – sélection des secteurs d'intérêt à partir de la carte d'épaisseur de la série jurassique. À droite – ajustement des secteurs d'intérêt selon la présence ou non de couverture pliocène-oligocène. ....	91
Figure 46. Profondeur du mur du faciès rauracien 250 m et 350 m. ....	93
Figure 47. Parcelles du RFP qui intersectent la zone d'intérêt 3.....	93
Figure 48. Sélection des parcelles du RFP à proximité des profis sismiques réalisés (300 m environ) .....	94
Figure 49. Identification finale des zones d'intérêts .....	94
Figure 50. Caractéristiques de la cible 1.....	96
Figure 51. Carte détaillée de la cible 1. ....	97
Figure 52. Caractéristiques de la cible 2.....	98
Figure 53. Caractéristiques de la cible 3.....	99
Figure 54. Caractéristiques de la cible 4.....	100
Figure 55. Vue 3D du modèle géologique 3D final du Grand Belfort (logiciel BRGM GeoModeller), focalisée sur la cible hydrogéologique.....	101

## Listes des tables

Tableau 1 : Liste des fichiers fusionnés pour obtenir le modèle numérique de terrain (MNT intégré dans le processus de modélisation géologique 3D du Grand Belfort. Base de données RGE ALTI® (IGN). Système de coordonnées en RGF93/Lambert 93. Précision de 5 m. Format acsii. ....	16
Tableau 2 : Liste des SCAN25® (IGN) fusionnés et intégrés dans le GeoModeller. Système de coordonnées en RGF93/Lambert 93. Format GeoTIFF. ....	18
Tableau 3. Coordonnées et extension de du modèle géologique 3D du Grand Belfort. ....	23
Tableau 4. Construction de la pile lithostratigraphique du modèle géologique 3D préliminaire, à partir de l'analyse et de la mise en correspondance des différentes cartes géologiques utilisées. ....	29
Tableau 5. Liste des 23 forages codés selon la pile du modèle géologique 3D et mis en forme pour intégration dans le GeoModeller. Colonne 1 : identifiant. Colonne 2 : numéro BSS du forage. Colonnes 3 et 4 : coordonnées X et Y en système RGF93/RGF93. Colonne 5 : Altitude du forage. Colonne 6 : passe du mur de la formation. Colonne 7 : formation telle que codée dans le GeoModeller.....	34
Tableau 6. Tableau de relation entre les failles du modèle géologique 3D final du grand Belfort (extrait du GeoModeller).....	72
Tableau 7. Tableau de relation entre les failles et les série de formations du modèle géologique 3D final du grand Belfort (extrait du GeoModeller).....	72

## Liste des annexes

Annexe 1	Synthèses des rapports antérieurs .....	105
Annexe 2	Log des correspondances entre les cartes géologiques ayant permis d'obtenir la pile lithostratigraphique du modèle.....	112
Annexe 3	Rapport Geo2X Reconnaissances géophysiques par sismique réflexion.....	117
Annexe 4	Paramètres de calage et d'intégration des profils sismiques dans le GeoModeller 157	
Annexe 5	Paramètres de calage et d'intégration des profils sismiques dans le GeoModeller 162	
Annexe 6	Étapes d'ajustement du modèle géologique 3D et résultat des interprétations sur le profil sismique PS01, PS02 et PS04 .....	165
Annexe 7	Cartes d'épaisseur de chacune des 7 formations, d'après les résultats du modèle géologique 3D final du Grand Belfort .....	169
Annexe 8	Cahier des Charges pour la création d'un forage d'exploration et d'un piézomètre dans le territoire du Grand Belfort (90) .....	175

# 1. Introduction

L'alimentation en eau potable (AEP) du Grand Belfort provient à environ 70 % des nappes alluvionnaires de la Savoureuse et de l'Allaine. Les 30 % restants proviennent de l'achat d'eau auprès des services de distribution voisins. Depuis plusieurs années, la tension sur les deux ressources alluvionnaires est en constante accentuation, du fait des sécheresses de plus en plus longues et fréquentes. Par ailleurs, en contexte de changement climatique global (Hoesung L. *et al.*, 2024), une intensification des épisodes de sécheresse est très probable. La communauté d'agglomération du Grand Belfort a donc entrepris une démarche de renforcement de ses capacités de production d'eau potable à partir des eaux souterraines.

Il a, pour cela, sollicité le BRGM en 2019 afin de réaliser un état des connaissances exhaustif de la ressource en eau souterraine de son territoire et identifier quels types d'aquifères pourraient être intéressants pour son alimentation en eau potable (Doney et Lacquement, 2020 - BRGM/RP-70184-FR). Les principales conclusions de la première étude mettaient en évidence que les entités hydrogéologiques présentant un intérêt pour une exploitation AEP sont :

- Les cailloutis du Sundgau (Pliocène) ;
- Les calcaires du jurassique supérieur (MALM) affleurants ou sous couverture.

L'entité hydrogéologique des cailloutis du Sundgau est identifiée par l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC) comme à préserver pour l'alimentation en eau potable. Cette ressource est déjà bien sollicitée et compte tenu de son rôle important dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques et dans le maintien des zones humides, il a été décidé de ne pas poursuivre les reconnaissances en vue de l'implantation d'un forage de reconnaissance.

En 2021, Grand Belfort a une nouvelle fois sollicité le BRGM pour caractériser, à partir d'observations de surface, le contexte particulier des calcaires du jurassique sur son territoire. Outre l'amélioration des connaissances sur ce secteur, l'objectif principal était de préciser les secteurs à investiguer par des méthodes géophysiques, en vue par la suite d'y réaliser des campagnes de prospection par forage. Les conclusions de cette étude (Doney et Lacquement, 2022 - BRGM/RP-71882-FR) ont permis de mettre en évidence que la nappe des calcaires affleurants semble posséder une ressource vulnérable aux variations climatiques et à d'éventuelles pollutions de surface. Il a donc été recommandé de continuer les recherches au droit des calcaires sous couverture, dont la nappe est mieux protégée face aux effets de la sécheresse et face aux pollutions de surface.

La présence d'eaux souterraines au sein des formations calcaires sous couverture est donc probable mais dépendante de : 1) la nature lithologique des formations ; 2) la continuité et la géométrie des aquifères ; 3) la géométrie et la densité des failles ; 4) l'altération et la karstification.

Ainsi, en 2023 le BRGM a poursuivi ses investigations sur le territoire du Grand Belfort avec deux objectifs principaux :

- Imager par sismique réflexion la géométrie et la structure des formations géologiques susceptibles d'être exploitées pour la production d'eau potable ;
- Construire un modèle géologique 3D dans le but d'intégrer l'information existante, d'améliorer la compréhension du milieu pour, in fine, proposer des sites pour l'implantation de forages de reconnaissance hydrogéologique ;
- Fournir un cahier des charges (CDC).

Les résultats de ces travaux sont exposés dans le présent document.

Le contexte géologique, les entités géologiques, les géométries et les caractéristiques des séries sont explicités dans le rapport Doney et Lacquement, 2020 (BRGM/RP-70184-FR). L'ensemble de ces informations ne seront pas reprises ici, le lecteur se référera à ce rapport. Les synthèses des travaux antérieurs sont disponibles en Annexe 1.

## 2. Méthodologie

### 2.1. LE LOGICIEL DE MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D « GEOMODELLER » (BRGM)

Le modèle géologique 3D de Belfort a été réalisé à l'aide du logiciel de modélisation 3D « GeoModeller ». Créé et développé par le BRGM depuis le milieu des années 90, ce logiciel permet de construire l'architecture géologique du sous-sol, c'est-à-dire de déterminer quelles formations lithologiques et failles sont en présence, mais aussi leur géométrie et leurs interactions.

Basé sur un travail incrémental, cet outil permet :

- De prendre en compte le modèle numérique de terrain dans le processus de modélisation ;
- D'intégrer et de mettre en cohérence des données hétérogènes en nature (données géologiques, géophysiques, hydrogéologiques, minières, etc.) comme en distribution spatiale (mesures ponctuelles, forages, cartes et coupes 2D, grilles 3D, etc.) dans un espace de travail unique ;
- D'interpoler l'ensemble de ces données à partir de méthodes géostatistiques performantes (champs de potentiel) en tout point de l'espace 3D (Lajaunie C. *et al.*, 1997), Calcagno *et al.*, 2008) ;
- D'interpréter les résultats de différentes thématiques de manière cohérente grâce à une vision partagée de l'ensemble des spécialistes autour d'un même objet 3D.
- D'interroger, extraire et communiquer les données résultantes du modèle final en tout point du volume 3D et sur l'ensemble de la zone d'étude, y compris de les exporter vers d'autres logiciels.

Le logiciel de modélisation 3D « GeoModeller » permet ainsi d'obtenir des surfaces et des volumes à géométrie complexe et est parfaitement adapté aux projets impliquant plusieurs disciplines et intervenants tels que l'étude géologique, géophysique et hydrogéologique du Grand Belfort pour la prospection de nouvelles ressources en eau potable.

### 2.2. OBJECTIFS ET ÉTAPES DE CONSTRUCTION DU MODÈLE GÉOLOGIQUE 3D

Le projet « Grand Belfort » vise à déterminer le ou les meilleurs emplacements pour implanter un ou plusieurs forages d'alimentation en eau potable de l'agglomération du Grand Belfort.

Pour ce faire, il est nécessaire de reconnaître et de caractériser les formations aquifères du sous-sol mais aussi de déterminer leur extension, leur épaisseur et leur profondeur.

La particularité géologique de la région de Belfort est d'être affectée par de nombreuses failles subverticales généralement continues et plurikilométriques (Bailly *et al.*, 1985 ; Chauve *et al.*, 1985 ; Contini *et al.*, 2000a et b ; Kerrien *et al.* 1972 a et b ; Théobald et Devantoy, 1963). Or, dans la zone ciblée pour l'implantation des forages proposée à l'issue de la première phase du projet (Doney et Lacquement, 2022), ces failles sont recouvertes par d'épais dépôts sédimentaires d'âges tertiaire et quaternaire. La présence de telles failles, leur géométrie et leur impact sur le décalage en profondeur des aquifères constitue donc un enjeu majeur pour cette deuxième phase du projet.

Les premiers objectifs de la modélisation géologique 3D du sous-sol du Grand Belfort étaient donc d'identifier et de déterminer la géométrie en profondeur : i) des aquifères susceptibles d'être exploités pour l'alimentation en eau potable du Grand Belfort, et ii) des failles qui les affectent.

Trois étapes de construction du modèle ont été nécessaires pour atteindre ces objectifs :

- La première étape visait à construire une première version du modèle géologique 3D, appelée « modèle préliminaire ». Ce modèle est construit à partir des données existantes (MNT<sup>1</sup>, cartes et coupes géologiques, forages), complétées par les mesures structurales acquises lors de la reconnaissance géologique de terrain (Doney et Lacquement, 2022). La construction de ce modèle préliminaire a permis d'affiner la compréhension structurale profonde et en 3 dimensions de la zone d'étude, et de formuler des propositions d'implantation des profils sismiques à acquérir (nombre, positionnement, orientation, longueur). Cela, tout en tenant compte des contraintes techniques, administratives et financières ;
- La seconde étape consistait à acquérir de nouvelles données de sismique réflexion, selon les recommandations faites à l'étape précédente, afin de mieux contraindre le modèle géologique 3D en profondeur. Une interprétation des images sismiques acquises a été réalisée après traitement géophysique sur les images non converties en profondeur (temps double) ;
- La troisième étape avait pour but d'intégrer les profils d'acquisitions sismiques et leurs interprétations, au modèle géologique 3D. Ce dernier a ainsi été actualisé et ajusté au vu des résultats. De nouveaux éléments (épaisseur, profondeur, orientation, pendage) permettant de préciser la géométrie en profondeur des couches géologiques et des failles déjà identifiées ont été apportés et de nouvelles failles identifiées en sismique ont été modélisées. L'intégration de l'ensemble de ces éléments dans le modèle 3D a permis de :
  - Affiner la géométrie des formations, notamment aquifères (extension, profondeur, épaisseur, orientation, pendage) ;
  - Lever les incertitudes sur la prolongation vers le Nord des failles déjà identifiées ;
  - Identifier de nouveaux couloirs de failles principales ;
  - Préciser la géométrie des failles en profondeur (extension, orientation, pendage, rejet).

L'objectif final de la modélisation géologique 3D des formations et failles principales de la zone d'étude était de proposer un ou plusieurs sites d'implantation des forages de reconnaissance, au vu des résultats obtenus.

Plusieurs propositions ont été faites en concertation avec l'ensemble des thématiciens (géologues, modélisatrice, géophysiciens, hydrogéologues) pour répondre aux critères et attentes du Grand Belfort en tenant compte des contraintes de connaissance du milieu, environnementales et foncières.

Le modèle géologique 3D du Grand Belfort est un outil de connaissance géologique du sous-sol de ce secteur et pourra être valorisé dans études hydrogéologiques ultérieures (essais par pompage, protection de la ressource en eau...) mais aussi pour d'autres thématiques comme la géothermie par exemple.

---

<sup>1</sup> Modèle Numérique de Terrain

### 3. Modélisation géologique 3D préliminaire à partir des données disponibles (étape 1)

Pour affiner la compréhension structurale des calcaires sous-couverture de la zone d'étude et positionner au mieux le tracé des profils sismiques à acquérir, un modèle géologique 3D préliminaire a été réalisé à partir des données disponibles.

La construction du modèle s'appuie sur une succession de tâches indispensables pour structurer les données avec rigueur et construire de manière itérative une géométrie respectant l'ensemble des données. Les travaux menés pour construire ce modèle préliminaire sont les suivants :

- Synthèse et analyse des données disponibles à partir de la bibliographie et notamment du rapport reconnaissance géologique menée par le BRGM en octobre de 2021 (Doney et Lacquement, 2022. Rapport BRGM/RP-71882-FR), mais aussi à partir des bases de données mises à disposition par l'IGN (Cartes topographiques et Modèles Numériques de Terrain) et le BRGM (Banque de données du Sous-Sol pour les cartes géologiques et les forages) ;
- Définition de l'extension du modèle en fonction de la qualité, quantité et répartition spatiale des données disponibles, des contraintes géologiques et hydrogéologiques du projet (formations aquifères ciblées et failles susceptibles de les affecter) ;
- Traitement (mise en forme, géoréférencement et harmonisation) des données les plus pertinentes sous SIG (logiciel ArcMap®, *version 10.5.1*) ;
- Création d'un Modèle numérique de Terrain (MNT) continu sur l'ensemble de l'emprise du modèle géologique 3D ;
- Import et mise en cohérence 3D des données dans le logiciel de modélisation BRGM GeoModeller ;
- Construction d'une pile lithostratigraphique des principales formations présentes à l'affleurement et sous-couverture. Il s'agit d'une étape importante au cours de laquelle sont identifiés les principaux aquifères, semi-aquifères et aquitards.
- Modélisation 3D des formations géologiques et failles retenues, identification et ajustement/correction des incohérences entre les cartes géologiques, les forages et le modèle, interprétation des résultats en 3D ;
- Positionnement des profils d'acquisition sismique en fonction de la géométrie 3D obtenue par modélisation des formations aquifères ciblées, mais également en fonction des contraintes administrative (limites du Grand Belfort) et logistiques de terrain (routes, conduites de gaz, etc.).

#### 3.1. SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES

Une synthèse des données disponibles a été réalisée à partir de la bibliographie, de l'étude de première phase du projet menée par le BRGM menée entre 2021 et 2022 (Doney et Lacquement, 2022), mais aussi à partir des bases de données mises à disposition par l'IGN (Cartes topographiques et Modèles Numériques de Terrain) et le BRGM (Banque de données du Sous-Sol et les cartes géologiques).

Les données les plus pertinentes ont été recueillies, traitées et géoréférencées pour être intégrées par la suite dans le logiciel de modélisation 3D BRGM GeoModeller. Le système de coordonnées utilisé pour l'ensemble des données est le RGF 93 / Lambert 93.

L'origine et le format de ces données sont détaillés ci-après.

### 3.1.1. Modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé dans le cadre de ce projet est le résultat de la fusion de 8 fichiers issus du référentiel à grande échelle RGE ALTI® (Tableau 1), mis à disposition par l'IGN ([RGE ALTI® Géoservices \(ign.fr\)](http://RGEALTI.Geoservices.ign.fr)).

Tableau 1 : Liste des fichiers fusionnés pour obtenir le modèle numérique de terrain (MNT intégré dans le processus de modélisation géologique 3D du Grand Belfort. Base de données RGE ALTI® (IGN). Système de coordonnées en RGF93/Lambert 93. Précision de 5 m. Format ascii.

Fichiers du référentiel RGE ALTI® utilisés
D090_RGEALTI_5M_FXX_0990_6715_MNT_LAMB93_IGN69.asc
D090_RGEALTI_5M_FXX_0990_6720_MNT_LAMB93_IGN69.asc
D090_RGEALTI_5M_FXX_0990_6725_MNT_LAMB93_IGN69.asc
D090_RGEALTI_5M_FXX_0990_6730_MNT_LAMB93_IGN69.asc
D090_RGEALTI_5M_FXX_0995_6715_MNT_LAMB93_IGN69.asc
D090_RGEALTI_5M_FXX_0995_6720_MNT_LAMB93_IGN69.asc
D090_RGEALTI_5M_FXX_0995_6725_MNT_LAMB93_IGN69.asc
D090_RGEALTI_5M_FXX_0995_6730_MNT_LAMB93_IGN69.asc

Le MNT représente la surface topographique du modèle géologique 3D, avec une résolution de 5 m. Il a été intégré dans le GeoModeller (Figure 1) sous forme de grille ascii.

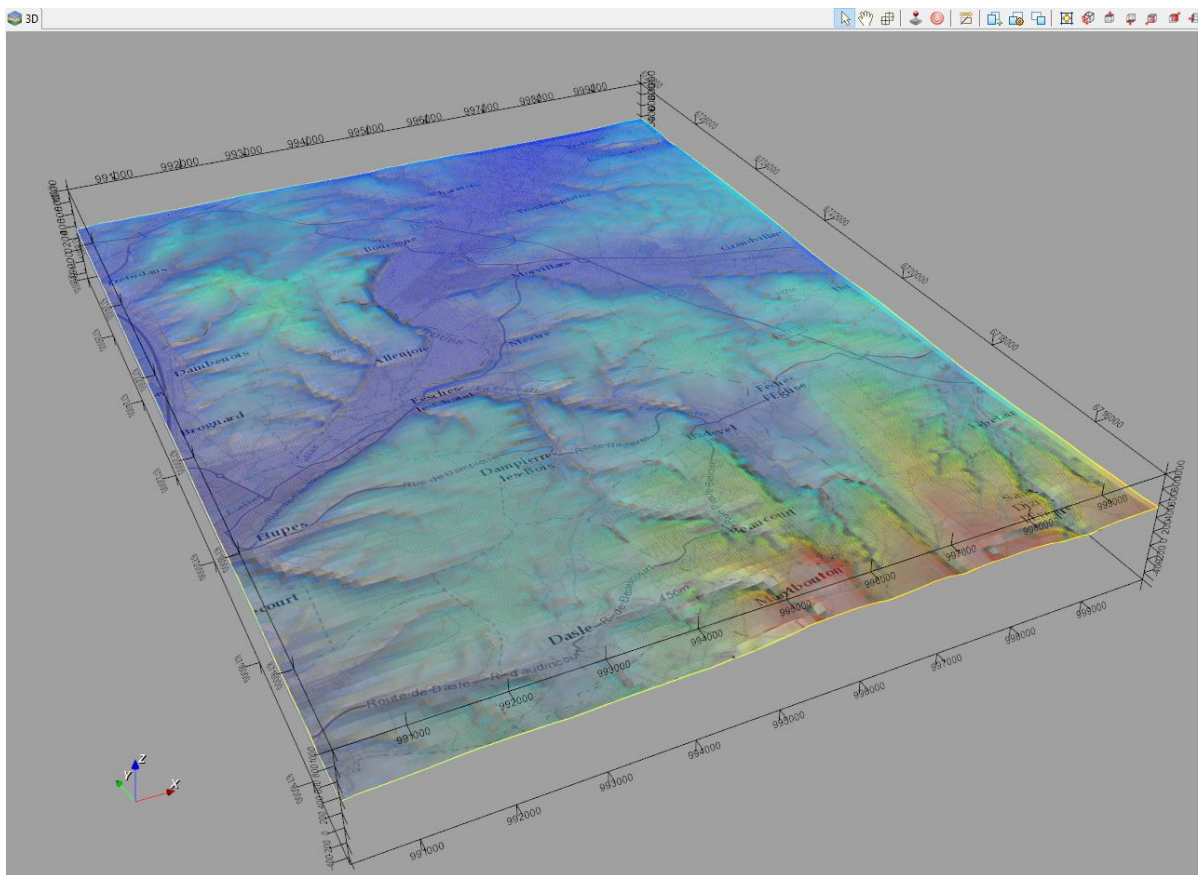


Figure 1. Visualisation 3D du MNT intégré dans GeoModeller. Le nord est indiqué par la flèche "y" verte.

L'altitude de la zone d'étude varie entre 320 m et 580 m. Les zones les plus basses se situent au niveau de la vallée SO-NE de l'Allan et de la Bourbeuse, ainsi que des vallées ouest-est de l'Allaine et de la Feschotte. Les reliefs se trouvent dans la partie sud-est de la zone d'étude vers Beaucourt et Montbouton (Figure 2).

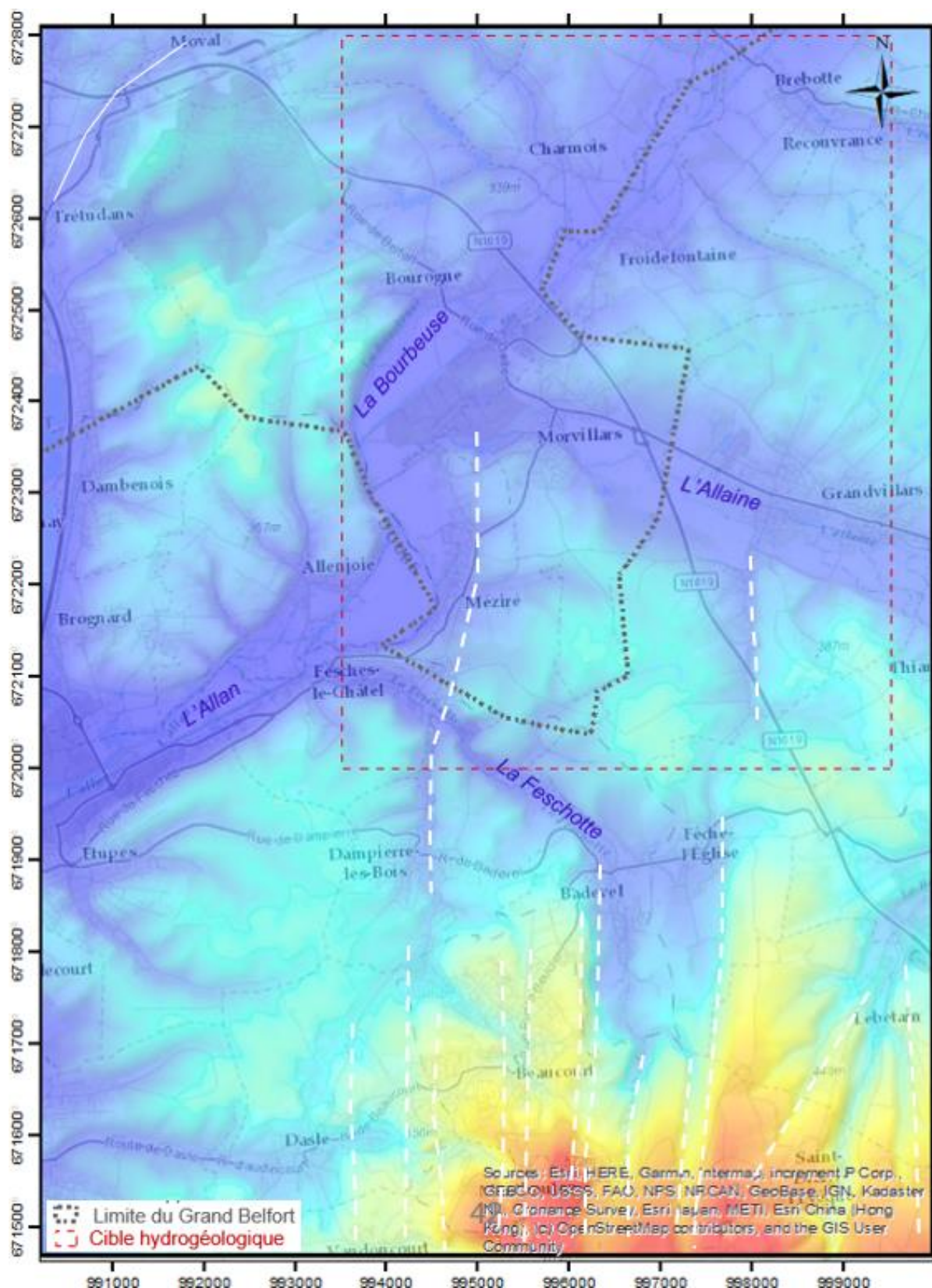


Figure 2. Modèle numérique de terrain du modèle géologique 3D du Grand Belfort. Base de données RGE ALTI® (IGN). Système de coordonnées en RGF93/Lambert 93. Précision de 5 m. Format ascii. Tirets blancs : failles issues de la carte géologique.

### 3.1.2. Cartes topographiques

Les cartes topographiques, au 1 :25 000, éditées par l'IGN ([SCAN 25® Géoservices \(ign.fr\)](https://www.ign.fr)) au format GeoTIFF, qui recourent l'extension du modèle géologique ont également été chargées dans le logiciel BRGM GeoModeller, afin de permettre le repérage notamment nécessaire pour la planification de l'acquisition sismique.

Le Tableau 2 détaille les cartes chargées.

Tableau 2 : Liste des SCAN25® (IGN) fusionnés et intégrés dans le GeoModeller. Système de coordonnées en RGF93/Lambert 93. Format GeoTIFF.

Fichiers du référentiel SCAN25® utilisés
SC25_TOPO_0980_6730_L93.grf
SC25_TOPO_0980_6740_L93.grf
SC25_TOPO_0980_6750_L93.grf
SC25_TOPO_0980_6760_L93.grf
SC25_TOPO_0990_6720_L93.grf
SC25_TOPO_0990_6730_L93.grf
SC25_TOPO_0990_6740_L93.grf
SC25_TOPO_0990_6750_L93.grf
SC25_TOPO_1000_6720_L93.grf
SC25_TOPO_1000_6730_L93.grf
SC25_TOPO_1000_6740_L93.grf
SC25_TOPO_1000_6750_L93.grf
SC25_TOPO_1010_6720_L93.grf
SC25_TOPO_1010_6730_L93.grf

### 3.1.3. Cartes géologiques

La zone d'étude se trouve à cheval sur les départements du Doubs (25) et du Territoire de Belfort (90), en région Bourgogne-Franche-Comté. Quatre cartes géologiques à l'échelle 1:50 000 éditées et géoréférencées par le BRGM couvrent l'emprise du modèle 3D (Figure 3). Ces cartes sont disponibles sous format numérique et accessibles sur le site Infoterre (<https://infoterre.brgm.fr>) :

- Deux cartes géologiques ont été recueillies sous format papier scanné et vectorisé :
  - o Carte géologique de la France à 1/50 000. Feuille de Belfort (n°444), et notice explicative associée (Théobald *et al.*, 1963) ;
  - o Carte géologique de la France à 1/50 000. Feuille de Delle (n°475) (Bailly *et al.*, 1985), et notice explicative associée (Chauve *et al.*, 1985).
- Deux cartes départementales harmonisées (Bd Charm-50) ont été recueillies sous format vectorisé :
  - o Carte du département du Doubs (HARM025) et son rapport (Lagié et Nagel, 2008) ;
  - o Carte du département du Territoire de Belfort (HARM090) et son rapport (Berthier, 2008).

Les cartes géologiques de Belfort et de Delle constituent les documents représentatifs des levés géologiques de terrain d'origine selon les observations de terrain réalisées, les concepts géologiques et l'état des connaissances des géologues de l'époque. Elles fournissent des informations sur la nature et la distribution des roches ainsi que des structures géologiques identifiées dans la région. Elles correspondent aux documents les plus complets donnant accès à une description détaillée des formations (contours, orientations/pendages, âges, lithologies, épaisseurs) ainsi que des failles.

Les cartes départementales harmonisées du Doubs et du Territoire de Belfort sont issues d'un travail d'harmonisation qui consiste à rendre cohérentes entre elles les coupures (feuilles) à 1/50 000 existantes à l'intérieur de chaque département. Pour le département du Doubs, ce sont 20 cartes publiées entre 1930 et 2000 qui ont été harmonisées, et pour le Territoire de Belfort se sont 5 cartes publiées entre 1963 et 2000.

Toutes les informations exploitables (contours des formations géologiques, failles, nature des terrains, ...) contenues dans ces cartes géologiques ont été extraites et exploitées dans le processus de modélisation géologique 3D. Les données ponctuelles telles que les mesures structurales ont été importées sous forme de fichiers .csv tandis que les images des cartes géologiques ont été importées sous format d'image GeoTIFF.

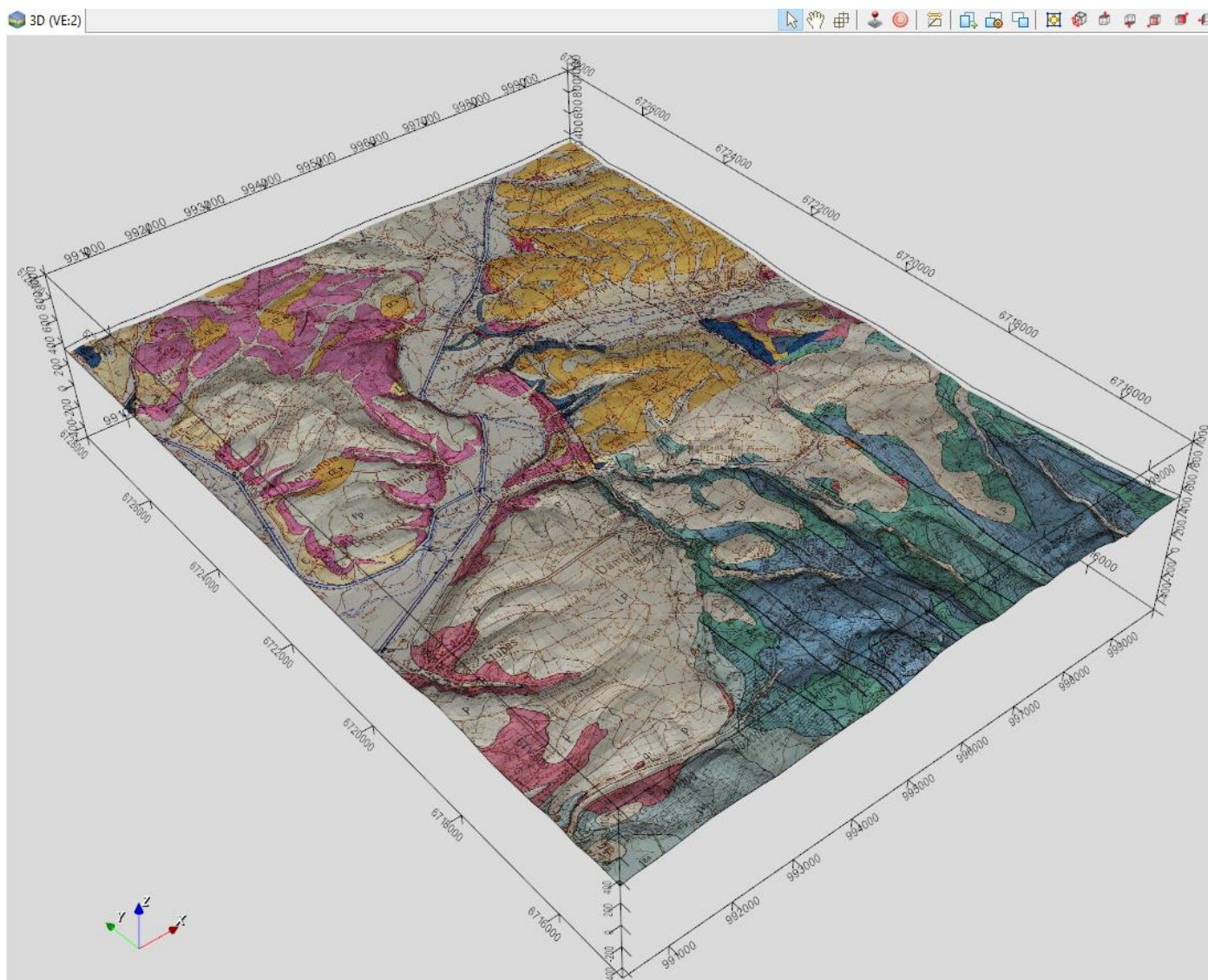


Figure 3. Visualisation 3D des cartes géologiques de Belfort (Feuille n°444) et de Delle (Feuille n° 475) intégrées dans GeoModeller. Le nord est indiqué par la flèche "y" verte.

### 3.1.4. Forages

À ce jour environ 200 ouvrages/forages ont été recensés dans la Base de données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM sur le secteur de l'étude (<https://infoterre.brgm.fr/page/banque-sol-bss>). Seuls les forages les plus pertinents ont été sélectionnés en fonction de leur profondeur, des métadonnées associées, de leur proximité avec les failles et les profils sismiques, de leur présence dans le secteur de la cible hydrogéologique, pour contraindre le modèle géologique 3D en profondeur.

Vingt-trois forages géoréférencés de la BSS ont ainsi été retenus, interprétés, mis en forme, puis importés, dans le modèle géologique 3D. Il s'agit des forages suivant (Figure 4) :

- Les plus profonds et donc recoupant un maximum de formations tels que le forage de Charmois (BSS001EMED) au nord qui atteint les formations du Trias jusqu'à 1019 m de profondeur, et le forage BSS001GEEG au sud qui atteint 600 m de profondeur ;
- Localisés à proximité de failles pour en déterminer le rejet, tels que BSS001EMEF, BSS001EMEE et BSS001ELDJ ;
- Situés dans la zone recouverte par les formations plio-quadernaires permettant d'atteindre les roches du jurassique sous-couverture tels que les sondages BSS001ELEC, BSS001ELFD, BSS001ELFE, BSS001ELFF, BSS001ELFJ, BSS001ELFK et BSS001EMJC ;
- Situés à proximités des profils sismiques permettant d'interpréter les réflecteurs en termes de lithologie : BSS001EMEF, BSS001EMED, BSS001EMJH.

Les logs lithologiques de ces forages fournis dans les rapports de fin de sondage ou les logs validés de la BSS ont été interprétés et retranscrits selon les termes de la pile lithologique du modèle, dans des tableaux sous forme de fichiers .csv.

La liste exhaustive de ces forages ainsi que leurs coordonnées (x, y et z) est donnée dans le Tableau 5. Leur localisation cartographique est représentée sur la Figure 4.

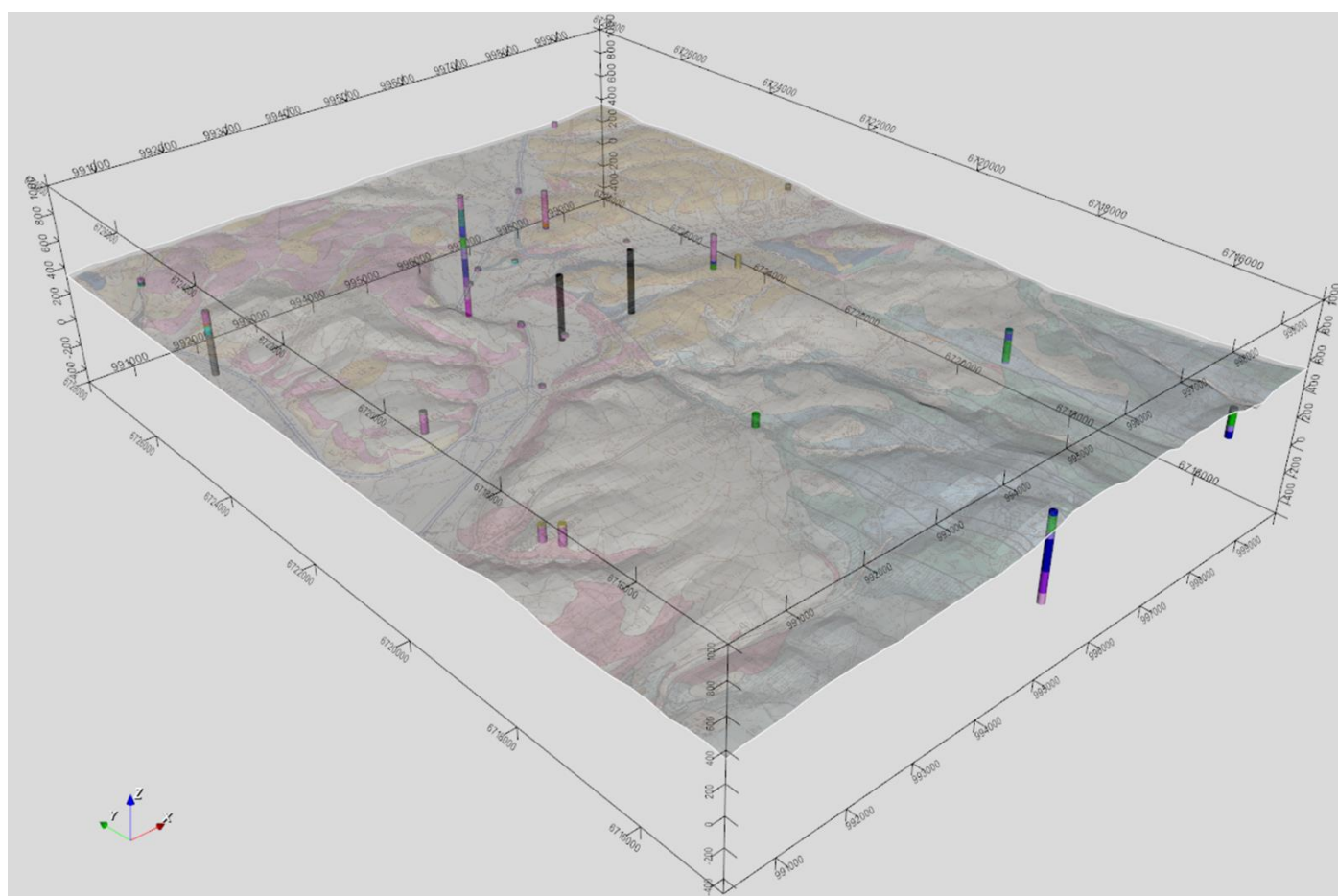


Figure 4. Visualisation 3D des 23 forages intégrés dans le GeoModeller sur fond de carte géologique. Le nord est indiqué par la flèche "y" verte.

### 3.1.5. Mesures structurales et observations de terrain

L'ensemble des données structurales disponibles sur l'emprise du modèle 3D ont été géoréférencées sur SIG (ArcMap®) et intégrées dans le modèle 3D (GeoModeller) sous forme de tableaux de fichier .csv. Il s'agit des données d'orientation et de pendage, mesurées sur le terrain : i) sur les plans de stratification pour les formations, et ii) sur les plans de failles. Deux sources de données étaient disponibles dans le cadre de ce projet :

- 27 données d'orientation et de pendage des formations ont été récupérées sur les cartes géologiques harmonisées départementales. À noter que certaines d'entre elles ne comportaient que l'orientation des couches sans valeur de pendage (dans ce cas, la valeur de pendage est notée « 999 » dans les fichiers des cartes harmonisées afin de spécifier qu'il s'agit d'une valeur inconnue) ;
- 17 données sur l'orientation et le pendage des formations et les 13 données sur les plans de faille ont été acquises dans le secteur d'étude lors de la mission de terrain menée en 2020 dans le cadre de ce projet (Doney et Lacquement, 2022).

Ces données étant rattachées au MNT dans le GeoModeller, elles permettent de contraindre l'orientation et le pendage des couches géologiques et des failles sur la surface topographique, mais aussi de propager l'information en profondeur tout en tenant compte du relief topographique.

## 3.2. DÉFINITION DE L'EMPRISE DU MODÈLE

L'emprise du modèle 3D du Grand Belfort a été définie en tenant compte des recommandations faites à l'issue de la première étude géologique et hydrogéologique du projet (Doney et Lacquement, 2022).

Elle tient également compte des contraintes géologiques imposées pour recueillir un maximum d'information sur les formations aquifères et les failles qui les affectent, de la qualité des données disponibles synthétisées dans le chapitre précédent, ainsi que les contraintes administratives, techniques, et financières du projet de forage pour l'AEP.

L'extension horizontale du modèle intègre :

- Les limites de la cible hydrogéologique déterminée à l'issue de la première phase d'étude géologique et hydrogéologique du projet (Doney et Lacquement, 2022). Elles encadrent une synforme de type fossé d'effondrement géologique, axée sur la vallée de la Bourbeuse entre les villes d'Allenjoie et de Charmois, et orientée SO-NE. La forme de cuvette devrait favoriser la présence d'eau dans les calcaires aquifères du jurassique ;
- L'ensemble des formations géologiques affleurantes sur les cartes géologiques au 1/50000<sup>ème</sup> ou présentes jusqu'à environ 500 m de profondeur, hors formations du quaternaire. Ces formations sont celles du Pliocène, de l'éocène-oligocène et du jurassique. Les calcaires aquifères du jurassique sont particulièrement visés pour alimenter en eau potable l'agglomération du Grand Belfort (Doney et Lacquement, 2022);
- Les failles susceptibles d'avoir un impact sur la géométrie et la perméabilité des calcaires aquifères du jurassique. La fracturation joue un rôle prépondérant dans la structuration profonde et la circulation des eaux profondes. Or la cible hydrogéologique visée se situe dans un secteur où les calcaires du jurassique et les failles sont recouverts par des dépôts tertiaires et quaternaires. Il est donc essentiel d'étendre l'emprise du modèle vers le sud, afin d'obtenir des informations sur cette fracturation (tracé, orientation, pendage) là où ces failles et les calcaires qu'elles affectent affleurent ;
- Les forages profonds ou d'intérêt permettant de mieux contraindre la profondeur des formations traversées ;

- Les mesures géologiques structurales (orientations/pendages) présentent sur les cartes géologiques au 1/50 000<sup>ème</sup> ou acquises lors de la mission de terrain de la première phase d'étude du projet.

La Figure 5, présente l'extension horizontale (vue plan) du modèle.

L'extension verticale du modèle prend en compte :

- L'amplitude de l'altitude topographique du secteur d'étude (altitudes minimale et maximale) ;
- La profondeur atteinte par les forages les plus profonds ;
- La profondeur maximale techniquement et financièrement visée pour l'exploitation par forage de la ressource en eau potable, estimée à 300-400 m dans le cas de ce projet.

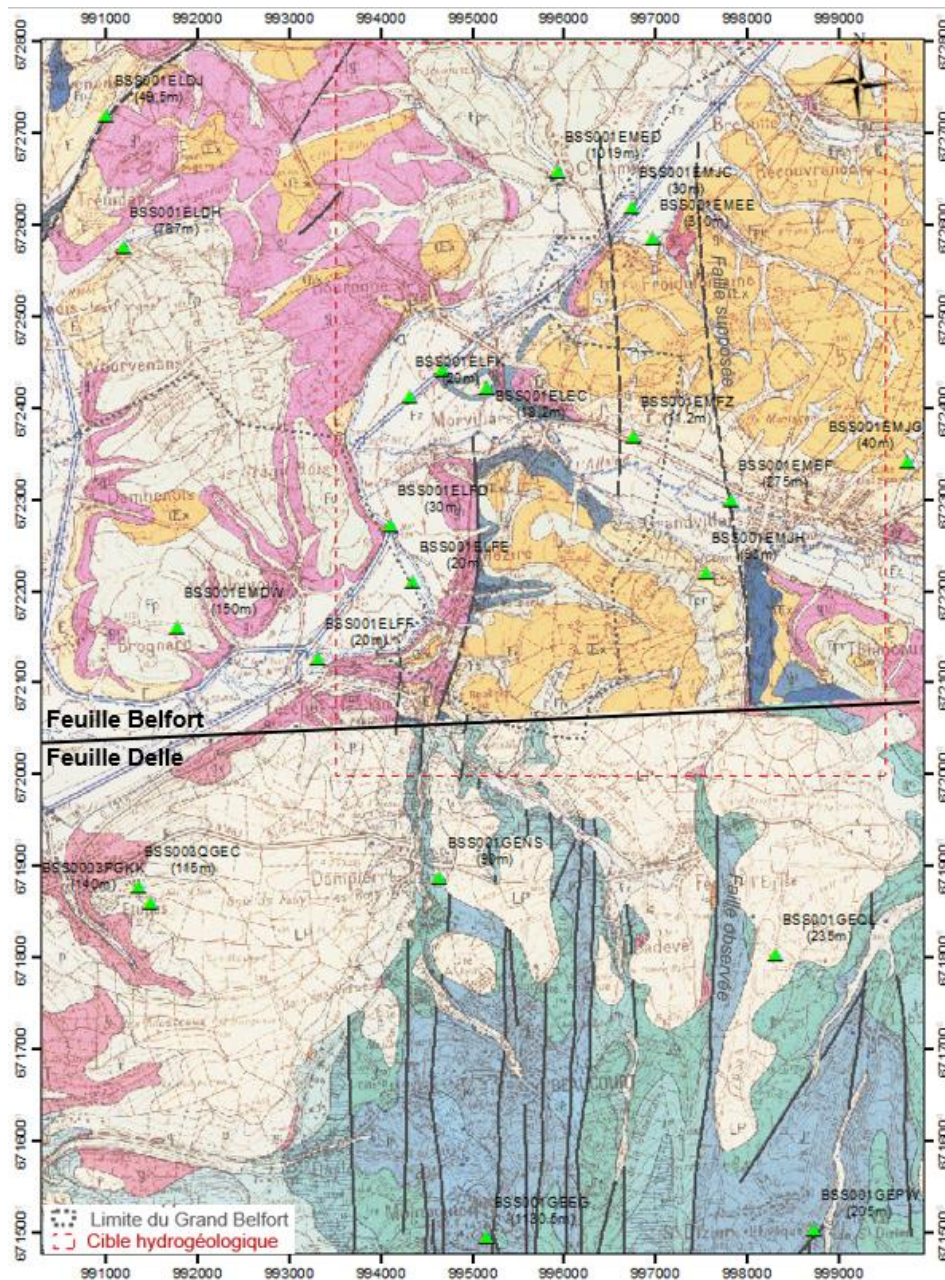


Figure 5. Emprise du modèle 3D de Belfort (Extension horizontale) sur fond de cartes géologiques au 1/50 000 de Belfort (Feuille de Belfort n°444) sur la moitié nord, et de Delle (Feuille de Delle n°475) sur la moitié sud.

Finalement, l'emprise du modèle géologique 3D du Grand Belfort forme une « boîte » rectangulaire de 13,2 km du nord au sud, sur 9,6 km d'ouest en est, et entre -500 et + 1000 m d'altitude NGF. L'emprise et les coordonnées en système RGF/Lambert 93 du modèle sont détaillées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Coordonnées et extension de du modèle géologique 3D du Grand Belfort.

Coordonnées (m) [RGF93 / Lambert 93]				Extension du modèle (m)	
X min.	990300,0	X max.	999900,0	X Extent.	9600,0
Y min.	6714800,0	Y max.	6728000,0	Y Extent.	13200,0
Z min.	-500,0	Z max.	1000,0	Z Extent.	1500,0

### 3.3. CONSTRUCTION DU MODÈLE PRÉLIMINAIRE

Le modèle géologique 3D préliminaire est construit à partir des données disponibles et synthétisées dans le chapitre précédent (MNT, cartes géologiques, forages, mesures structurales).

La première étape de construction consiste à sélectionner les formations pertinentes pour l'enjeu hydrogéologique du projet et à définir la manière dont elles s'empilent. Cette étape consiste à construire « la pile lithostratigraphique du modèle », en ciblant notamment les formations aquifères du jurassique.

Les étapes suivantes visent à mettre en cohérence les données de la carte géologique ainsi que les données de forage avec la pile du modèle.

Enfin, les failles susceptibles d'avoir un impact sur la géométrie des formations du jurassique sont sélectionnées et interprétées en termes d'orientation, pendage et rejet, d'après l'analyse des cartes géologiques.

Ce modèle géologique 3D préliminaire vise à obtenir une première ébauche de la géométrie 3D de la zone d'étude. Il constituera ainsi une aide à la décision pour préciser l'emplacement, l'orientation et la longueur des profils sismiques à acquérir.

#### 3.3.1. Contexte géologique structural de la zone d'étude

D'un point de vue régional, le secteur du Grand Belfort se trouve dans une zone de relai entre 3 grands domaines, ci-dessous par ordre chronologique de mise en place (Figure 6) :

- Le massif des Vosges au nord-ouest, vestige de la chaîne hercynienne et essentiellement constitué par les terrains les plus anciens, d'âge paléozoïque ;
- Le fossé Rhénan au nord-est, orienté N-S à NE-SW, étroitement lié à l'ouverture du rift ouest Africain durant l'éocène-oligocène. Son remplissage est essentiellement constitué de sédiments d'âge tertiaire et quaternaire (cénozoïque) ;
- Les monts du Jura, au sud, qui correspondent au front des Alpes. Ils se sont formés durant l'orogénèse alpine, entre la fin Miocène et le début du Pliocène, qui déforme les séries mésozoïques selon un axe orienté ENE-OSO.

À l'échelle de l'emprise du modèle 3D, on retrouve (Figure 7) :

- Au nord-est : les formations tertiaires (oligocène, pliocène) et quaternaires de l'extrémité sud du fossé Rhénan.
- Au nord-ouest et surtout au sud-est : les formations du jurassique (mésozoïque), ici légèrement plissés mais intensément faillés des monts du Jura.

La structuration géologique du secteur modélisé du Grand Belfort résulte donc d'une histoire tectonique complexe qui se traduit notamment par 2 jeux de failles (Figure 7) :

- Un jeu de failles normales (extensif), en horst et graben, orienté N-S et très dense. Il marque visiblement les reliefs du sud-est de la zone d'étude. En revanche, il est masqué au nord par les séries tertiaires et quaternaires.
- Un jeu de failles normales avec parfois une composante décrochante, orienté NE-SO et plus discret. Il est essentiellement représenté au nord et au SE de la zone d'étude.

L'ensemble de ce réseau de failles est probablement hérité de l'orogénèse hercynienne qui affecte et préstructure le socle paléozoïque (Vallet *et al.*, 2019). Elles ont ensuite été sollicitées à de nombreuses reprises enregistrant ainsi les déformations associées dans les formations mésozoïques et tertiaires :

- Pendant la période éocène-oligocène marquée par l'ouverture du bassin Rhéan selon une extension NO-SE, elles ont été réactivées en failles normales (Nussbaum *et al.*, 2017). Elles sont étroitement associées aux dépôts syntectoniques qui s'organisent durant cette période et accompagnent la transgression marine oligocène ;
- Au cours de la période fin Miocène à début Pliocène, lors de la mise en place des Alpes responsable des plis et chevauchements du Jura, elles ont été réactivées en failles normales, parfois décrochantes, et s'expriment par des basculements en « ciseaux » et des embranchements (failles secondaires qui se branchent sur une faille principale).

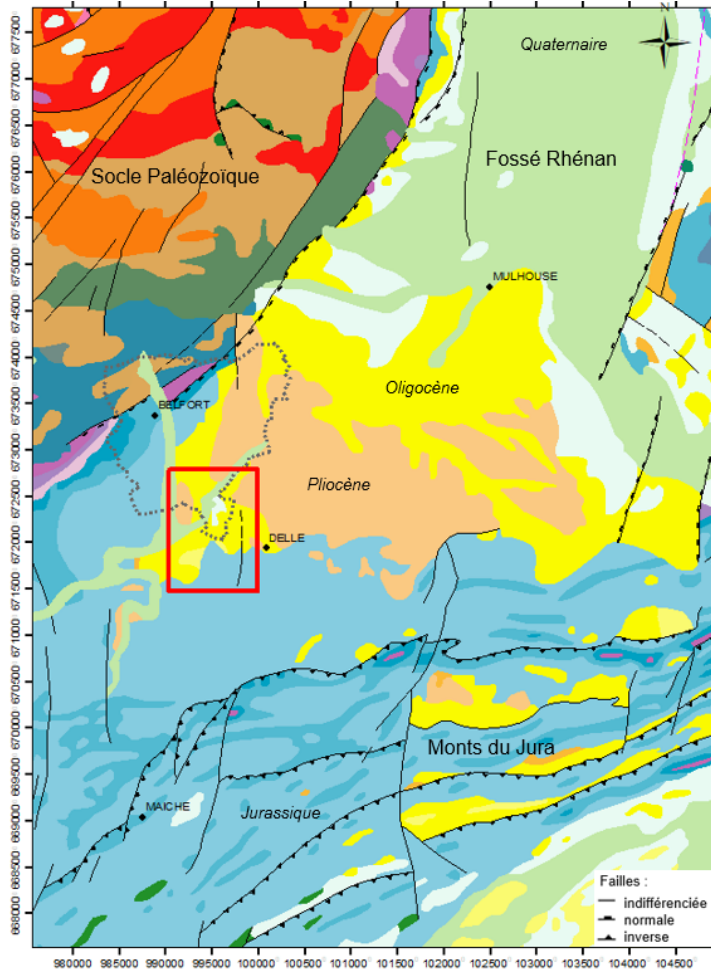


Figure 6 (à gauche). Contexte structural à grande échelle de la zone d'étude. Le rectangle rouge correspond à l'emprise du modèle 3D du Grand Belfort. Le fond cartographique est issu de la carte géologique de la France à 1/1 000 000 (6ème édition révisée).

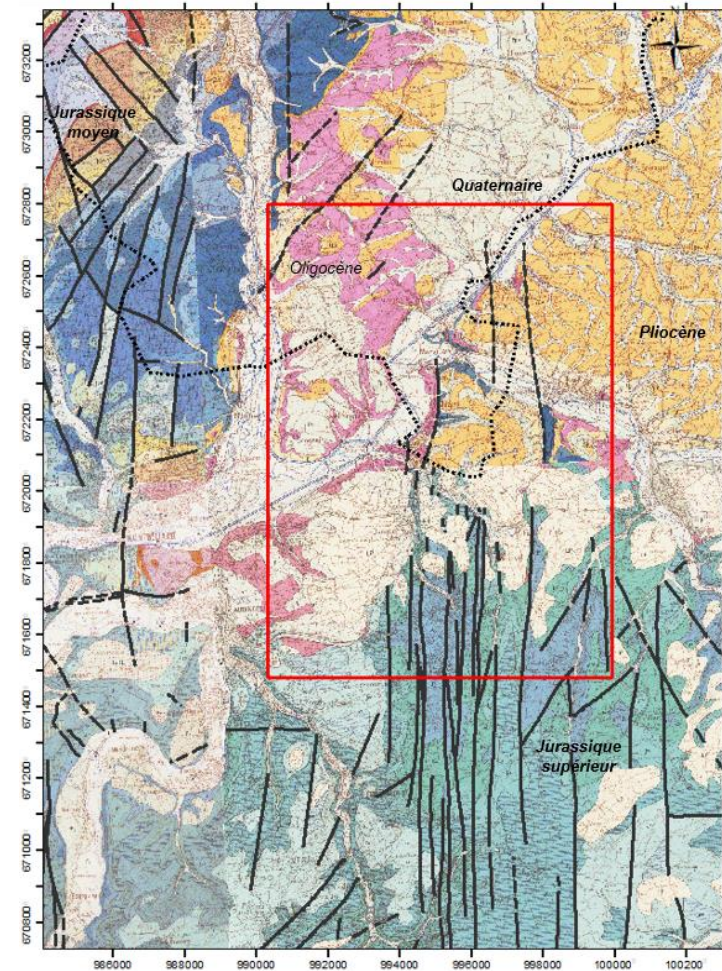


Figure 7 (à droite). Orientations des failles à l'échelle régionale : orientation principale N-S. Orientation secondaire NE-SO. Toutes deux sont probablement héritées de l'orogénèse hercynienne et réactivées durant l'ouverture du fossé Rhénan (éocène-oligocène puis l'orogénèse alpine (Miocène à Pliocène)).



### 3.3.2. Construction de la pile lithostratigraphique du modèle

La pile lithostratigraphique construite pour le modèle doit permettre de répondre au mieux à l'enjeu hydrogéologique de ce projet. Cette pile est donc focalisée sur la succession des formations aquifères et aquitards susceptibles d'être présentes jusqu'à 400 m de profondeur, avec une attention particulière pour les calcaires du jurassique.

La pile lithostratigraphique a été construite à partir d'une analyse croisée des différentes descriptions de faciès accompagnant les quatre cartes géologiques utilisées lors de cette étude. L'objectif était d'identifier les correspondances entre les différents documents, comme par exemple pour la formation oligocène :

- Carte géologique Feuille Delle / Feuille de Belfort/ Carte harmonisée de Belfort / Carte harmonisée du Doubs
  - o **Code** = g1 / g1 / g1a-b, g1a / g1, gM
  - o **Lithologie** = Conglomérats, marnes et calcaires. Faciès côtiers avec Poudingues calcaires à la base à intercalations molassique. Passage à alternance de marnes et calcaire, puis à nouveau conglomérats, marnes. / Marnes, grés, conglomérats, calcaires lacustres / g1a-b : Marnes micacées argileuses à *Eugaleus latus* (Marnes à Mélettes), schistes papyracés bitumineux à *Cetorhinus parvus* (Schistes à Amphysiles), marnes bleues à *Plecanium carinatum* (Marnes à Foraminifères) / gM : Marnes jaunes ou brunes à granules de fer, remaniées à la base. g1 : Conglomérat côtier, marnes et calcaires lacustres du Système de Bourogne. g1a : Conglomérats, marnes, calcaires lacustres.
  - o **Épaisseur** = Jusqu'à 45 à 50 m / Plus de 100 m au sondage de Charmois
  - o **Âge** = oligocène (stampien inf. - sannoisien) / oligocène inf. / g1a-b: stampien inférieur à moyen. g1a : Faciès sannoisien ; stampien inférieur / oligocène et oligocène inf.

Une partie du travail de compilation du log lithostratigraphique est présenté dans le Tableau 4. La version complète de ce travail de correspondance des caissons des cartes géologiques est disponible en Annexe 2.

Seules les formations accessibles par forages et susceptibles de faire l'objet d'une investigation pour une recherche en eau potable sont représentées. Les formations présentent au-delà de 300-400 m de profondeur, telles que celles du jurassique moyen et inférieur, ne sont donc pas concernées. Ainsi, la pile lithostratigraphique retenue pour le modèle préliminaire (Figure 8) est caractérisée du sommet vers la base par les séries et formations suivantes :

- La série/formation Pliocène (notée p\_Pliocene) essentiellement représentée par la formation des Cailloutis du Sundgau. On notera que cette série est généralement recouverte par les formations loessiques (éoliennes) du quaternaire dont elles ne sont pas différenciées ici ;
- La série/formation oligocène (notée g\_Oligocene) essentiellement représentée par des conglomérats, marnes et calcaires lacustres. Elle intègre également les formations sidérolitiques (minerai de fer) de l'éocène qui remplissent très localement des poches karstiques au sommet des calcaires jurassiques. Les terrains tertiaires de l'éocène et de l'oligocène sont synchrones de la mise en place du fossé Rhénan ;
- La série du jurassique découpée en 6 formations, du sommet vers la base :
  - o j6b (kimméridgien sup.) : Calcaires et marnes à *Exogyra virgula*, Calcaires et marnes à Ptérocères, calcaires à Corbis ;
  - o j6a (kimméridgien inf. ; faciès séquanien sup.) : Calcaires à térébratrules et Calcaires crayeux à *Cardium* ;
  - o j5c6aM (oxfordien sup. - kimméridgien inf.; faciès séquanien sup.) : Marnes à *Astartes* ;
  - o j5c6aC (oxfordien sup. - kimméridgien inf. ; faciès séquanien inf. à sup.) : Calcaires fins et marnes à *Astartes* ;

- j5bP (oxfordien moy.- sup. ; faciès rauracien) : Calcaires oolithiques ;
- j5 (oxfordien inf. et moy., respectivement faciès marneux et faciès argovien) : marnes grises puis des marnes à chailles et des alternances de calcaires et marno-calcaires .

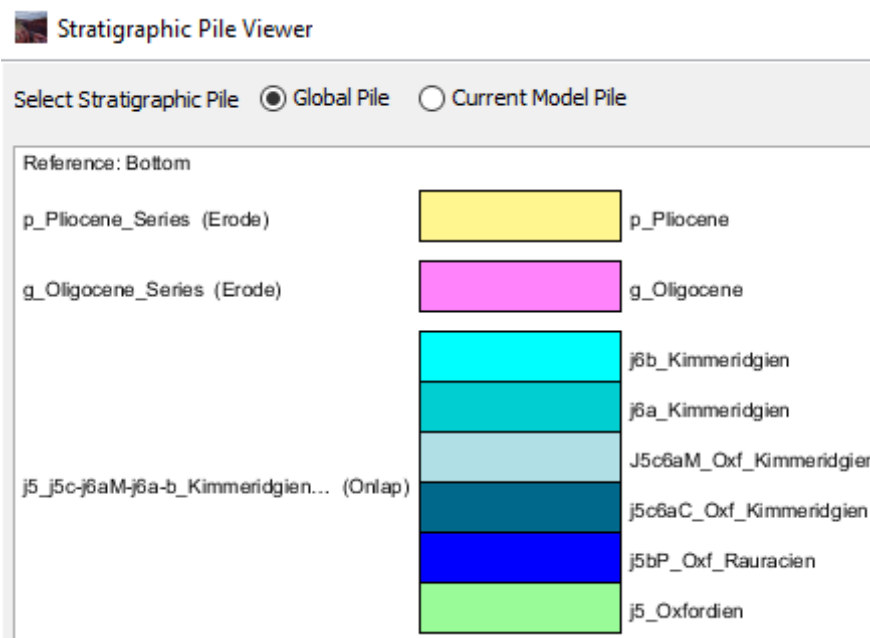


Figure 8. Pile lithostratigraphique du modèle géologique 3D préliminaire (extrait du logiciel GeoModeller). Colonne de gauche : nom des Séries. Colonne de droite : Formations (parfois regroupées dans une même série)

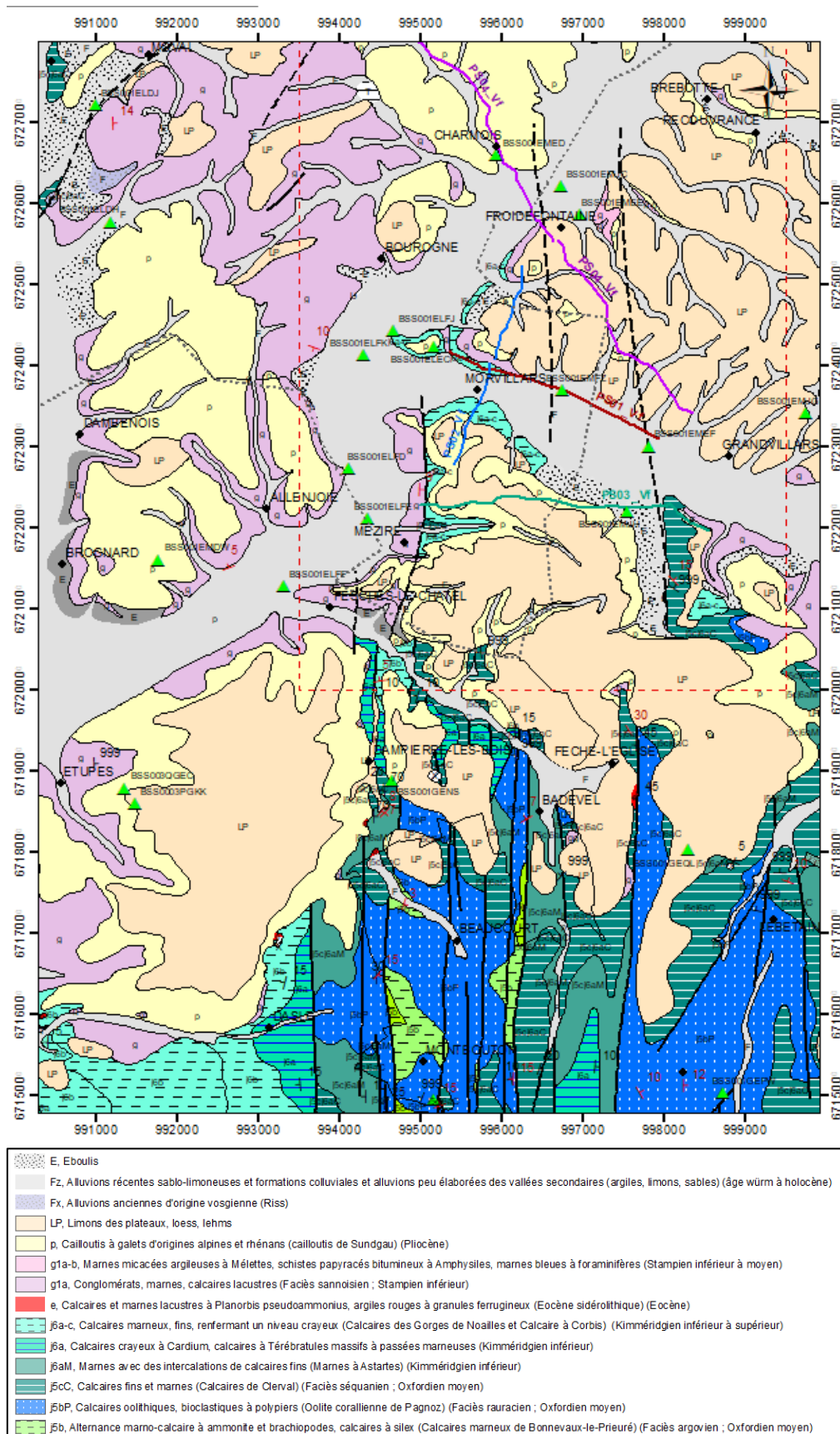
Tableau 4. Construction de la pile lithostratigraphique du modèle géologique 3D préliminaire, à partir de l'analyse et de la mise en correspondance des différentes cartes géologiques utilisées.

AGE	NOTATION	LITHOLOGIE	NOT	NOT	NOT	NOT	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	EPAISSEUR	EPAISSEUR
Mod geol 3D	Mod geol 3D	Mod geol 3D	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Dobubs	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Dobubs	C50K_Delle	C50K_Belfort
QUATERNAIRE	p	Limon des plateaux, loess, lehms	LP	OEx	LP	OEx	Limon des plateaux, loess, lehms	Loess et loesslehm anciens	Limon des plateaux, loess, lehms	Loess et loesslehm anciens pulvérulents renfermant Helix arbustorum et des poupées	Epaisseur métrique	Jusqu'à 15 m
PLIOCENE	Plio-Quaternaire	Cailloutis de Sundgau	p	Fp	p	Fp	Cailloutis à galets d'origines alpines et rhénans (cailloutis de Sundgau)	Alluvions anciennes, dites cailloutis ou graviers du Sundgau	Cailloutis à galets d'origines alpines et rhénans (cailloutis de Sundgau)	Alluvions anciennes dites cailloutis ou graviers du Sundgau en nappe à matériel vosgien ou rhénan (Villafranchien)	non renseigné	Epaisseur variable (10 à 20 m max.)
OLIGOCENE	g Oligocene	Alternance de conglomérats, marnes et calcaires. Poudingues calcaires à la base.	g1	g1	g1a-b, g1a	g1, gM	Conglomérats, marnes et calcaires. Faciès côtiers avec Poudingues calcaires à la base à intercalations molassique. Passage à alternance de marnes et calcaire, puis à nouveau conglo, marnes,...	Marnes, grés, conglomérats, calcaires lacustres	g1a-b : Marnes micacées argileuses à Eugaleus latus (Marnes à Mélettes), schistes papyracés bitumineux à Cetorhinus parvus (Schistes à Amphysiles), marnes bleues à Plecanium carinatum (Marnes à Foraminifères). g1a : Conglomérats, marnes, calcaires lacustres.	gM : Marnes jaunes ou brunes à granules de fer, remaniées à la base. g1 : Conglomérat côtier, marnes et calcaires lacustres du Système de Bourgne.	Jusqu'à 45 à 50 m	Plus de 100 m au sondage de Charmois
EOCENE	e Eocene	Minerai de fer sidérolithique, calcaires lacustres	e	e	e	e6	Minerai de fer pisolithique (sidérolithique)	Minerai de fer sidérolithique, calcaires lacustres	Calcaires et marnes lacustres à Planorbis pseudoammonius, argiles rouges à granules ferrugineux	Argiles rouges à pisolithes ferrugineux (exploités) : argiles du sidérolithique	Discontinue en remplissage de poches kartiques dans les calcaires du Kimméridgien	non renseigné
Kim. sup. MALM	j6b Kimmeridgien sup.	Calcaires et marnes à Exogyra virgula, Calcaires et marnes à Ptérocères, calcaires à Corbis	J8b	j8	-	j6b2	Calcaires et marnes à Exogyra virgula, Diceras	Marnes, Calcaires marneux, grumeleux ou compacts, parfois glauconieux à Harpagodes, Terebratules, ....	-	Calcaires parfois dolomitiques et marnes à Exogyra virgula, Diceras	30 à 35 m	10 à 15 m
			J8a		j6a-c	j6b1	Calcaires et marnes à ptérocères. Calcaires à Corbis		Calcaires marneux, fins, renfermant un niveau crayeux (calc. des Gorges de Noailles et Calc. à Corbis)	Calcaires noduleux glauconieux ou fins et marnes (à Ptérocères)	65 à 75 m	
Kim inf. (faciès Séquanien sup.) MALM	j6a Kimmeridgien inf.	Calcaires à térébratules et Calcaires crayeux à Cardium	j7c-d	j7	j6a	j6a1	Calcaires à térébratules et Calcaires crayeux à Cardium	Ensemble de calcaires souvent compacts et de Marnes avec du haut vers le bas : Calc. à Cardium (18m), Calc. à Térébratules (27 m),	Calcaires crayeux à Cardium, calcaires à térébratules massifs à passées marneuses	Calcaires à Cardium et térébratules	40 à 45 m	45 m
Oxf. sup. / Kim. Inf. (faciès Séquanien moy.) MALM	j5c6aM Oxf_Kimmeridgien	Marnes et calcaires à Astartes	j7b.		j6aM	j5c2-6aM	Marnes à Astartes. Intercalations de calc fins, plaquettes oolithiques et calcaires gréseux.	Marnes et calc. à Astartes (28m),	Marnes avec intercalations de calcaires fins (Marnes à Astartes)	Marnes grises et calcaires gréseux, oolithiques, lumachelliques ou argileux bioclastiques	20 à 30 m	28 m
Oxf. sup. / Kim. Inf. (faciès Séquanien moy.-inf.) MALM	j5c6aC Oxf_Kimmeridgien	Calcaires fins et marnes à Astartes	j7a		j5cC	j5c2-6aC	Calcaires à Astartes et Natices. Calcaires fins en gros bancs laissant apparaître des interbancs marneux vers le sommet	Calc. à Natices (15 m), Calcaires à Astartes (15 à 18 m).	Calcaires fins et marnes (Calcaires de Clerval)	Calcaires de Séquanien moy. et sup. indifférenciés	20 à 30 m	30 à 33 m
Oxf. moy-sup. (faciès Rauracien) MALM	j5bP Oxf_Rauracien	Calcaires oolithiques	j6	j6	j5bP	j5c1R	Faciès récifal : Calcaires bioclastiques, oolithiques, Craie de Sainte-Ursanne au sommet	Calcaires compacts, blancs, crayeux ou sacharoides à Diceras (20-25m), surmontant des calcaires oolithiques blancs, gris ou rosés à Nérinées et Polypiers (24 m)	Calcaires oolithiques, bioclastiques à polypiers (Oolithe corallienne de Pagnoz)	Calcaires oolithiques et calcaires à polypiers, calcaires récifaux, calcaires noduleux, oolithiques (-de Pagnoz), pisolithiques	50 à 60 m	44 à 49 m
Oxfordien moy.-inf. (faciès Argovien) MALM	j5 Oxfordien	Alternance marno-calcaires	j5	j5	j5b	j5bA, j5bA	Marnes et marno-calcaires à sphérites	Calcaires marneux compacts moirs bleuâtres ou gris de fumée, parfois jaunes en bancs épais de 1 à 2 m séparés par des marnes terreuses noires, épaisses de 0.20 à 0.30 m et renfermant des polypiers souvent silicifiés, des crinoïdes, des oursins,....	Alternance marno-calcaire à ammonite et brachiopodes, calcaires à silex (Calcaires marneux de Bonnevaux-le-Prieuré)	j5bA : Marnes et marno-calcaires (couche d'Effingen et du Geissberg), Astartes, calcaires hydrauliques et couches à sphérites. j5bA : Marnes bleues pyriteuses plastiques à entroques, calcaires argilo-siliceux gris.	quelques mètres à 25 m	20 m
Oxfordien inf. (faciès marneux) MALM		Marnes grises	j4	j4	j4-5	j5a	Marnes grises	Faciès essentiellement marneux, à sphérites calcareo-siliceuses voire chailles, dans sa partie supérieure (30 à 40m). Nombreux fossiles pyritisés dont amonites, lamellibranches, echnodermes,...	Alternance de calcaires et de marnes à Rengeri. Argiles bleues à amonites pyriteuses	j5a, Marnes gris-noir à ammonites pyriteuses, Creniceras renggeri.	35 à 70 m. Variable selon déformations tectoniques	30 à 40 m

### **3.3.3. Mise en cohérence de la carte géologique avec la pile du modèle**

À l'issue de travail de compilation et de construction de la pile lithostratigraphique une mise en cohérence de la carte géologique avec la pile du modèle a été réalisée (Figure 9). Le fond de carte géologique utilisé a été modifié afin de rendre homogène les contours des cartes géologiques départementales harmonisées à l'échelle 1 : 50 000 du Territoire de Belfort (90) et du Doubs (25).

Acquisition sismique et construction d'un modèle géologique 3D pour préciser l'implantation de forages de reconnaissance hydrogéologique dans les calcaires du jurassique du Grand Belfort



Acquisition sismique et construction d'un modèle géologique 3D pour préciser l'implantation de forages de reconnaissance hydrogéologique dans les calcaires du jurassique du Grand Belfort

*Figure 9. Carte géologique synthétique du projet Grand Belfort, réalisée à partir de la mise en cohérence des cartes géologiques harmonisées au 1 :50 000 avec la pile lithologique du modèle 3D. Traits noirs : failles observées (trait plein), supposées (tirets).*

### 3.3.4. Mise en cohérence des forages avec la pile du modèle

Les logs détaillés de 23 forages géoréférencés de la BSS ont été préalablement analysés avant d'être codés selon la pile lithostratigraphique du modèle et mis en forme pour être intégrés dans le GeoModeller. Le détail de ce codage est fourni dans le tableau ci-après (Tableau 5). Certains réajustements d'altitude, profondeur de passe ou formation ont parfois été nécessaires entre le modèle géologique 3D préliminaire et le modèle final. Le tableau présenté ici est donc extrait du modèle géologique 3D final (et non préliminaire) afin d'éviter toute redondance dans le rapport.

### 3.3.5. Sélection des failles retenues pour la modélisation

Les failles prises en compte dans le modèle géologique 3D préliminaire présentent deux orientations principales, N-S et NE-SO que l'on retrouve à l'échelle régionale (Figure 7) :

- Les failles orientées nord-sud affleurent essentiellement au sud-est de la zone d'étude, mais il est fortement probable qu'elles se prolongent vers le nord, sous les terrains éocènes à oligocènes et les dépôts plio-quadernaires (Figure ). Il s'agit des failles normales subverticales FF, F2, FC, FB et FA. Ces failles sont subparallèles au bassin Rhénan et perpendiculaires à l'extension NO-SE associée (Figure 6). Elles sont considérées comme subverticales avec des rejets de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres (Nussbaum *et al.*, 2017) ;
- Les failles orientées nord-est – sud-ouest affleurantes aux extrémités Nord-ouest et Sud-est de la zone d'étude (Figure ). Il s'agit des failles normales FE, FD et FI. Ces failles montrent également un jeu légèrement décrochant et senestre N60°E qui marque une transtension possiblement liée à la réactivation lors de l'orogénèse alpine. Elles sont considérées comme subverticales avec des rejets de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres (Nussbaum *et al.*, 2017).

Tableau 5. Liste des 23 forages codés selon la pile du modèle géologique 3D et mis en forme pour intégration dans le GeoModeller. Colonne 1 : identifiant. Colonne 2 : numéro BSS du forage. Colonnes 3 et 4 : coordonnées X et Y en système RGF93/RF93. Colonne 5 : Altitude du forage. Colonne 6 : passe du mur de la formation. Colonne 7 : formation telle que codée dans le GeoModeller.

<b>Id</b>	<b>Num BSS</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>Z (altitude)</b>	<b>To</b>	<b>Formation</b>
1	BSS001ELDH	991189	6725768	345	0.4	Quaternaire
	BSS001ELDH	991189	6725768	345	90	g_Oligocene
	BSS001ELDH	991189	6725768	345	110	e_Eocene
	BSS001ELDH	991189	6725768	345	139	j6b_Kimmeridgien
	BSS001ELDH	991189	6725768	345	487	J_indif
2	BSS001ELDJ	991002	6727208	344	17	g_Oligocene
	BSS001ELDJ	991002	6727208	344	28	j5c6aC_Oxf_Kimmeridgien
	BSS001ELDJ	991002	6727208	344	33.6	j5bP_Oxf_Rauracien
	BSS001ELDJ	991002	6727208	344	49.5	j5_Oxfordien
3	BSS001ELEC	995163	6724234	345	0.5	Quaternaire
	BSS001ELEC	995163	6724234	345	3.8	p_Pliocene
	BSS001ELEC	995163	6724234	345	18.2	j6b_Kimmeridgien
4	BSS001ELFD	994110	6722732	329.3	5.8	Quaternaire
	BSS001ELFD	994110	6722732	329.3	30	g_Oligocene
5	BSS001ELFE	994345	6722111	328.42	5.4	Quaternaire
	BSS001ELFE	994345	6722111	328.42	20	g_Oligocene
6	BSS001ELFF	993312	6721276	325.9	5	Quaternaire
	BSS001ELFF	993312	6721276	325.9	20	g_Oligocene
7	BSS001ELFJ	994664	6724430	332.15	6.5	Quaternaire
	BSS001ELFJ	994664	6724430	332.15	23.5	g_Oligocene
8	BSS001ELFK	994309	6724130	331.88	7	Quaternaire
	BSS001ELFK	994309	6724130	331.88	20	g_Oligocene
9	BSS001EMDW	991775	6721605	370.19	14	Quaternaire
	BSS001EMDW	991775	6721605	370.19	140	g_Oligocene
	BSS001EMDW	991775	6721605	370.19	150	J_indif
10	BSS001EMED	995933	6726596	339	4	Quaternaire
	BSS001EMED	995933	6726596	339	112.9	g_Oligocene
	BSS001EMED	995933	6726596	339	250	j5c6aC_Oxf_Kimmeridgien
	BSS001EMED	995933	6726596	339	340	j5bP_Oxf_Rauracien
	BSS001EMED	995933	6726596	339	430	j5_Oxfordien
	BSS001EMED	995933	6726596	339	520	j4_Callovien
	BSS001EMED	995933	6726596	339	680	j2_Bajocien
	BSS001EMED	995933	6726596	339	760	j1_Aalenien
	BSS001EMED	995933	6726596	339	868.5	l_Lias
	BSS001EMED	995933	6726596	339	1019	t_trias
11	BSS001EMEE	996965	6725858	342	9	Quaternaire
	BSS001EMEE	996965	6725858	342	254	g_Oligocene
	BSS001EMEE	996965	6725858	342	299	e_Eocene
	BSS001EMEE	996965	6725858	342	310	j5bP_Oxf_Rauracien

<b>Id</b>	<b>Num BSS</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>Z (altitude)</b>	<b>To</b>	<b>Formation</b>
12	BSS001EMEF	997820	6723002	341	10	Quaternaire
	BSS001EMEF	997820	6723002	341	207	g_Oligocene
	BSS001EMEF	997820	6723002	341	226	j5bP_Oxf_Rauracien
	BSS001EMEF	997820	6723002	341	275	j5_Oxfordien
13	BSS001EMFZ	996757	6723691	341	3	Quaternaire
	BSS001EMFZ	996757	6723691	341	4.7	p_Pliocene
	BSS001EMFZ	996757	6723691	341	11.2	g_Oligocene
14	BSS001EMJA	998859	6727975	340.5	7	Quaternaire
	BSS001EMJA	998859	6727975	340.5	40	g_Oligocene
15	BSS001EMJC	996739	6726207	332.13	8.6	Quaternaire
	BSS001EMJC	996739	6726207	332.13	30	g_Oligocene
16	BSS001EMJG	999752	6723415	380	5	Quaternaire
	BSS001EMJG	999752	6723415	380	8	p_Pliocene
	BSS001EMJG	999752	6723415	380	40	J_indif
17	BSS001EMJH	997543	6722205	360	96	p_Pliocene
18	BSS001GEEG	995161	6714949	551.35	22	j5bP_Oxf_Rauracien
	BSS001GEEG	995161	6714949	551.35	130	j5_Oxfordien
	BSS001GEEG	995161	6714949	551.35	166	j4_Callovien
	BSS001GEEG	995161	6714949	551.35	336	j3_Bathonien
	BSS001GEEG	995161	6714949	551.35	380	j2_Bajocien
	BSS001GEEG	995161	6714949	551.35	523	j1_Aalenien
	BSS001GEEG	995161	6714949	551.35	600	l_Lias
19	BSS001GENS	994644	6718877	381	90	j5_Oxfordien
20	BSS001GEPW	998730	6715030	455	24	Quaternaire
	BSS001GEPW	998730	6715030	455	117	j5_Oxfordien
	BSS001GEPW	998730	6715030	455	151	j4_Callovien
	BSS001GEPW	998730	6715030	455	187	j3_Bathonien
	BSS001GEPW	998730	6715030	455	205	j2_Bajocien
21	BSS001GEQL	998307	6718032	455	20	j5c6aC_Oxf_Kimmeridgien
	BSS001GEQL	998307	6718032	455	67	j5bP_Oxf_Rauracien
	BSS001GEQL	998307	6718032	455	220	j5_Oxfordien
	BSS001GEQL	998307	6718032	455	235	j4_Callovien
22	BSS003PGKK	991482	6718599	390.7	10	p_Pliocene
	BSS003PGKK	991482	6718599	390.7	140	g_Oligocene
23	BSS003QGEC	991348	6718786	372.18	10	p_Pliocene
	BSS003QGEC	991348	6718786	372.18	115	g_Oligocene

### **3.4. PREMIERS RÉSULTATS ET RECOMMANDATIONS POUR LES ACQUISITIONS SISMQUES**

La région de Beaucourt-Montbouton (sud de la zone d'étude) constitue la partie la plus élevée du plateau d'Ajoie. Elle correspond à une structure complexe avec la présence d'un grand nombre de failles N-S décrivant un horst d'échelle kilométrique. De part et d'autre de ce horst, le plateau s'abaisse régulièrement selon des gradins de failles (Chauve *et al.*, 1985). Le horst se prolonge vers le nord pour disparaître progressivement sous les dépôts récents d'âge tertiaire puis quaternaire. Les dépôts récents (éocène et oligocène) scellent la géométrie en horst préexistante. Les dépôts d'âge tertiaire forment une couverture irrégulière dont l'épaisseur est contrôlée par la réactivation de failles N-S du horst sous-jacent et leur fonctionnement en failles normales synsédimentaires. La puissance des dépôts oligocène s'accroît rapidement vers le Nord pour atteindre plusieurs centaines de mètres. Les acquisitions sismiques devraient permettre de clarifier les variations géométriques et de quantifier les déplacements sur les plans de faille.

#### **3.4.1. Géométrie des formations**

Les observations de terrain réalisées dans le cadre de l'étude portant sur la caractérisation géologique et hydrogéologique des calcaires du jurassique du Grand Belfort (BRGM/RP-71882-FR) permettent de mettre en évidence des séries peu déformées où les pendages des couches décrivent un vaste synclinal ouvert de direction E-W. Dans la zone d'intérêt, les séries sont globalement pentées vers le nord.

Le tertiaire (éocène et oligocène) repose en discordance sur les terrains sous-jacents. Il recouvre les terrains du jurassique qui n'affleurent que dans la partie méridionale. Là où ils affleurent, les terrains du jurassique sont fortement affectés par des failles subverticales de direction N-S. Au sein des blocs limités par les failles, les pendages des couches géologiques restent faibles et sont en généralement cohérents avec le pendage régional vers le nord de quelques degrés (10° au maximum). Localement des blocs basculés avec des pendages jusqu'à une quinzaine de degrés peuvent être observés, témoignant d'un fonctionnement extensif local des failles.

Les terrains du tertiaire s'épaississent progressivement depuis le sud vers le nord-est en relation directe avec le remplissage du fossé rhénan. Le nombre de forages profonds étant limité, il est difficile d'en avoir une estimation précise. À partir de Morvillars les terrains d'âge jurassiques disparaissent complètement. Dans la zone de transition, la carte géologique montre un lien important entre les failles de direction nord-sud et la présence de terrain du tertiaire. En effet, les terrains d'âge tertiaire sont systématiquement présents à l'ouest des failles N-S alors qu'à l'est on retrouve des terrains d'âge jurassique qui disparaissent rapidement sous la discordance. Les failles N-S contrôlent la mise en place des dépôts d'âge tertiaire sont donc synsédimentaires. Vers le nord de la zone d'étude, les géométries sont similaires et organisées selon des blocs basculés de direction N-S, toutefois le développement de la puissante série d'âge oligocène ne permet pas de cartographier aisément les accidents.

#### **3.4.2. Géométrie des failles**

Pour la zone d'étude, 7 failles principales ont été modélisées. Il s'agit des failles FA, FB, FC, FE, FF, F2 et F3 (Figure ). Les analyses des profils sismiques, de la carte géologique et des affleurements de terrain indiquent que la majorité d'entre elles sont de direction N-S. Pour chaque faille, l'orientation, le pendage et le rejet sont analysés et des chronologies relatives établies afin de bien établir les géométries du bâti structural.

Le résultat des failles modélisées sur la carte géologique synthétique montre que le tracé de certaines de ces failles diffère de celui des cartes géologiques au 1:50 000. C'est là tout l'enjeu de l'interprétation des données en 3 dimensions qui oblige à mettre en cohérence les données de surface (carte) mais aussi profondes (forage).

Par exemple, il a été nécessaire d'ajuster le tracé de la Faille FA pour mettre en cohérence l'interprétation en 3 dimensions de la carte géologique et les données du forage BSS001EMEF, au nord de la vallée de l'Allaine, entre Morvillars et Grandvillars (Figure 10). En effet, d'après la carte géologique au 1 / 50 000<sup>ème</sup>, le sondage BSS001EMEF se trouve exactement positionné sur le tracé d'une faille (FA dans le modèle géologique 3D), ce qui est peu probable. La question s'est donc posée de prolonger vers le nord la faille FA, plutôt à l'ouest ou plutôt à l'est de ce sondage. Le choix a été fait de faire passer la faille FA à l'est du sondage. En effet, la grande épaisseur d'oligocène relevée dans ce sondage est plus en accord avec la géométrie d'un graben (approfondissement des couches) que celle d'un horst (point haut). Le graben marqué par les failles FB (à l'ouest) et FA (à l'est) est une solution géologiquement acceptable (Figure ).

On peut imaginer que faire passer un profil sismique à proximité de ces sondages sera tout à fait pertinent pour lever le doute sur la position et la géométrie des failles.

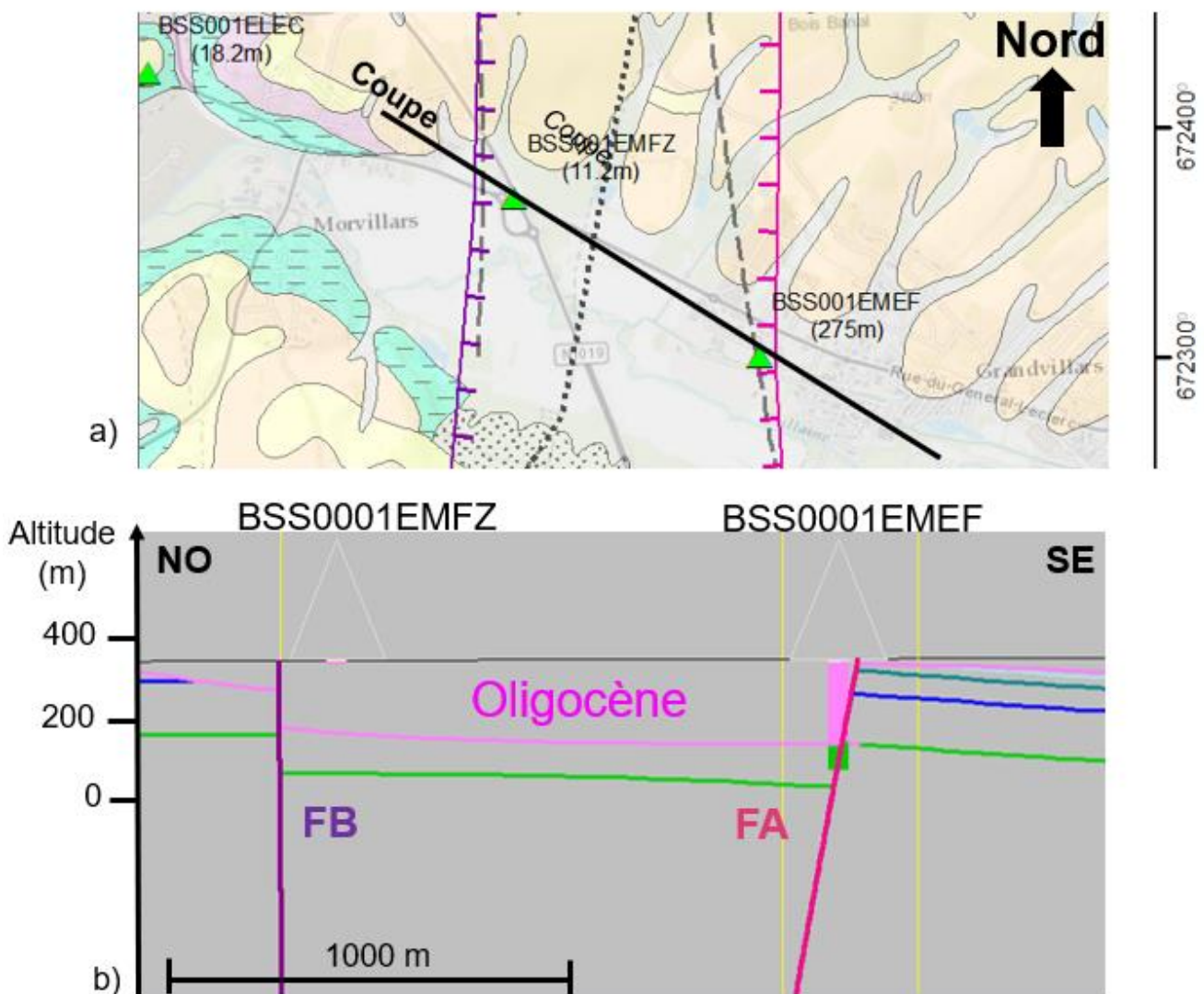


Figure 10. Exemple d'ajustement des failles lors du processus de modélisation 3D. Positionnement de la faille FA par rapport au sondage BSS001EMEF lors de la construction du modèle géologique 3D préliminaire du Grand Belfort.

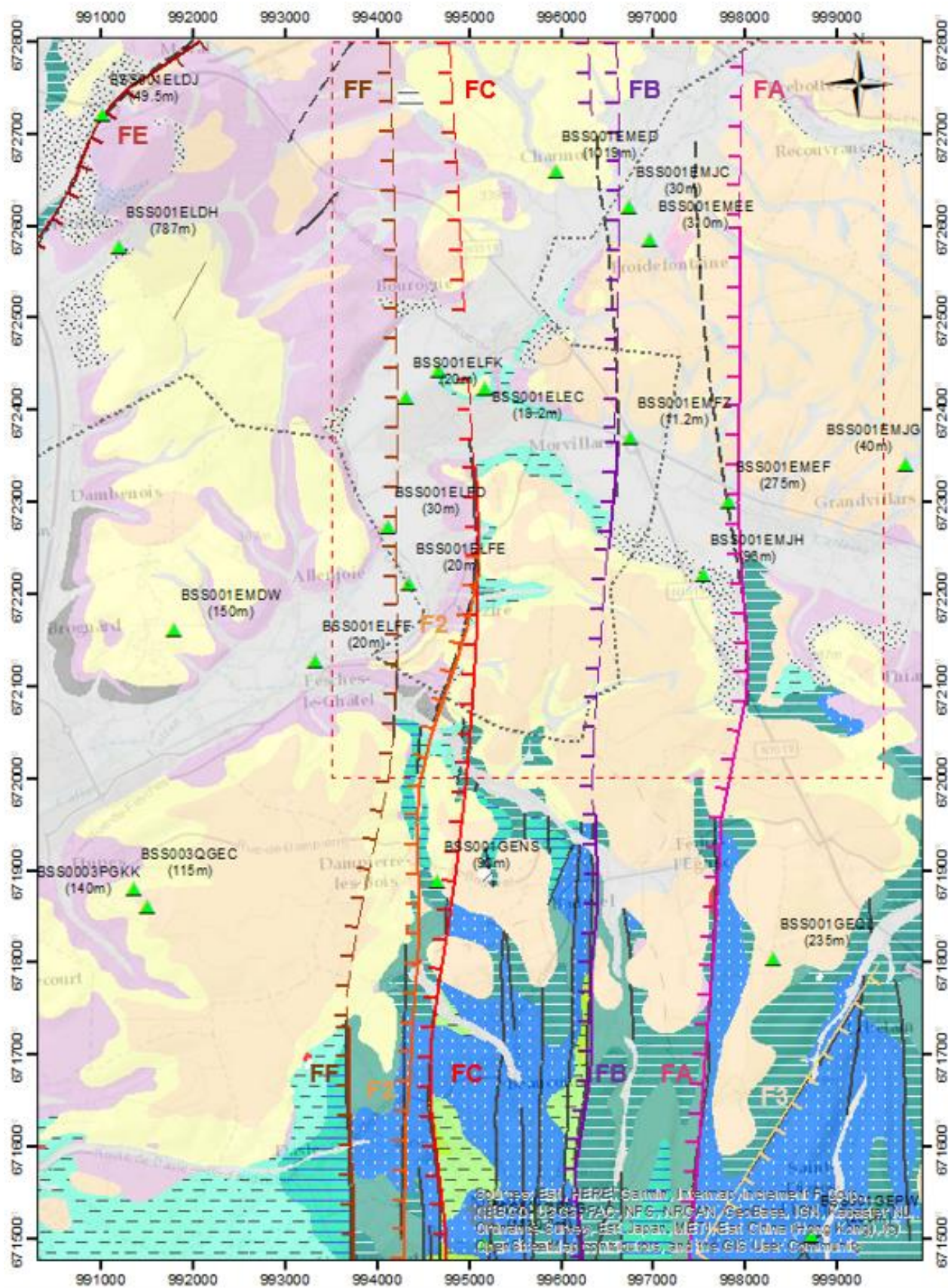


Figure 11. Carte des failles modélisées à l'issue du modèle géologique 3D préliminaire du Grand Belfort.

### 3.4.3. Recommandations pour la sismique

La réalisation d'acquisitions sismiques complémentaires a pour but de lever les incertitudes sur les formations et failles susceptibles d'être présentes sous couverture dans le secteur de la cible hydrogéologique. Il s'agit donc i) de vérifier et valider leur présence là où elles ont déjà été identifiées et interprétées dans le modèle géologique 3D préliminaire, ii) de préciser leur géométrie en profondeur, et iii) d'en identifier éventuellement de nouvelles.

Pour rappel, la profondeur limite visée pour atteindre la cible hydrogéologique des calcaires aquifères du jurassique est de moins de 300 - 400 m. Cette limite a été établie dans le cadre de ce projet en tenant compte des contraintes techniques et économiques généralement imposées pour l'implantation d'un forage AEP. Il sera donc nécessaire que les acquisitions géophysiques fournissent une image, *a minima*, jusqu'à ces profondeurs.

De plus, les acquisitions sismiques devront imager des structures tectoniques de direction N-S dominantes sur la zone d'étude. L'acquisition des profils d'orientation E-O sera donc privilégiée tout en gardant à l'esprit l'importance d'acquérir également des profils qui se recoupent pour pouvoir caractériser de proche en proche les réflecteurs sismiques. Un des profils au moins devra donc avoir une orientation perpendiculaire aux autres.

Enfin, le tracé de ces profils sismiques devra, dans la mesure du possible, passer le plus près possible d'un ou plusieurs forages profonds afin de faciliter le calage des formations en profondeur.

Ainsi, 4 profils sismique ont été définis (Figure 12) :

- Profil sismique 1 recommandé (PS01\_V2) : Le long de la rivière de l'Allaine, orienté ouest-est. Ce profil a été positionné le long de la rivière de l'Allaine entre les villes de Morvillars à l'ouest et de Grandvillars à l'est. Il vise à recouper les failles orientées nord-sud, notamment celles nommées ici FC, FB et FA. Il se trouve dans l'alignement de 3 sondages qu'il recoupera dans la mesure du possible afin de bien caler le profil sismique en profondeur. Le sondage qui se trouve à l'extrémité ouest du profil (BSS001ELEC) et celui qui se trouve dans l'alignement au centre du profil (BSS001EMFZ) sont peu profonds (respectivement 18,2 m et 11,2 m), tandis que celui situé à l'extrémité est du profil (BSS001EMEF) atteint 275 m. La longueur estimée pour le profil sismique PS02\_V2 recommandé est de 2,8 km ;
- Profil sismique 2 recommandé (PS02\_V2) : Passant par Morvillars, orienté nord-sud. Il vise à recouper perpendiculairement la vallée de l'Allaine afin d'écartier toute possibilité de présence de faille dans l'axe de cette vallée orientée nord-ouest – sud-est. Bien que cette orientation de faille ne soit pas tectoniquement reconnue dans cette région, la présence d'une telle faille, parallèle à l'orientation du profil sismique 1 recommandé, serait un réel handicap pour l'interprétation de ce dernier. Il a été positionné dans le bloc en horst (point haut) de Morvillars délimité par les failles FC à l'ouest et FB à l'est, dans un secteur lacunaire en termes de forages profonds. 3 variantes du profil sismique 2 ont été proposées. La variante « a » (PS02\_V2a) vise également à recouper les failles FC et FB afin de vérifier et mieux contraindre leur prolongement vers le nord. La variante « b » (PS02\_V2b), la plus longue, vise de plus à recouper les profils sismiques 3 et 4 afin d'augmenter la cohérence de leur calage en profondeur. Enfin, la variante « c », la plus courte n'a pour seul objectif que de lever le doute sur l'existence d'une faille orientée ouest-est, subparallèle à la vallée de l'Allaine. Les longueurs proposées pour les profils sismiques recommandés sont de : 2,6 km pour PS02\_V2a, 4,5 km pour PS02\_V2b, et 2,5 km pour PS02\_V2c ;
- Profil sismique 3 recommandé (PS03\_V2) : Passant par Méziré au sud de la vallée de l'Allaine, orienté ouest-est.

Il vise à mieux contraindre la partie sud de la cible hydrogéologique. Il recoupe ainsi perpendiculairement les 3 failles FC, FB et FA dans le but de vérifier leur existence et d'affiner leur géométrie. Il devrait permettre notamment de déterminer le rejet de la faille FC qui borde un demi-graben oligocène à vergence ouest et le décale des calcaires jurassiques affleurants à l'est. Seul le forage BSS001EMJH profond de 96 m permettra de caler le profil 3 dans sa partie est. La longueur proposée pour le profil sismique PS03\_V2 recommandé est de 3,8 km ;

- Profil sismique 4 recommandé (PS04\_V2) : Passant par Charmois au nord de la zone cible, orienté nord-ouest – sud-est.  
Ce profil passe le long du ruisseau de l'Étang au nord-ouest, puis par les villes de Charmois et de Froidefontaine vers le sud-est. Il vise à recouper les failles orientées N030 (NE-SO), notamment celle suspectée dans l'axe de la rivière de la Bourbeuse. Il s'agit également de vérifier le prolongement et la géométrie des failles orientées nord-sud, notamment concernant les failles FB et FA déjà identifiées dans le modèle géologique 3D préliminaire. Il passera, dans la mesure du possible, à proximité de deux forages existants : le forage de Charmois (BSS001EMED) au nord-ouest, le plus profond de la zone (1019 m), ainsi que celui de Froidefontaine (BSS001 EMEE) au sud-est (310 m), afin d'être calé en profondeur. La longueur proposée pour le profil sismique PS04\_V2 recommandé est de 6,1 km.

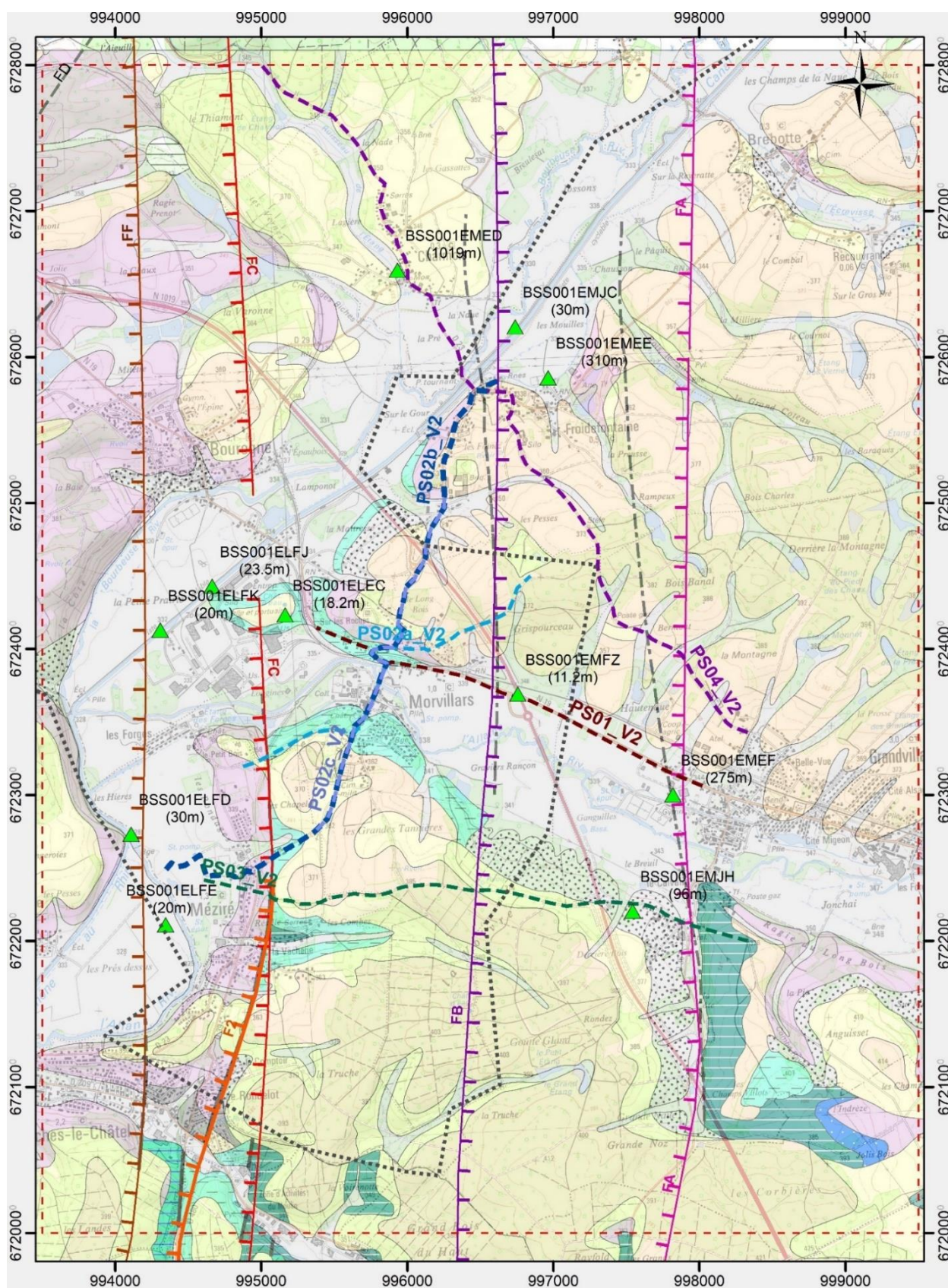


Figure 12. Carte de localisation des tracés recommandés pour les 4 profils sismiques à acquérir. Fonds de carte géologique synthétique au 1 :50 000 du projet Grand Belfort (Figure 9) et cartes topographiques au 1 :25 000 (SCAN 25®, Géoservices (ign.fr)).

## 4. Acquisition des profils sismiques et premières interprétations (étape 2)

### 4.1. ACQUISITION DES PROFIL SISMQUES

Réalisées à partir des recommandations faites par les géologues dans le chapitre précédent, l'acquisition de nouvelles données de sismique réflexion avait pour objectif de mieux contraindre le modèle géologique 3D préliminaire en profondeur. Il s'agissait notamment d'affiner la géométrie des formations en profondeur et de mieux caler leurs limites, vérifier l'existence et la géométrie des failles déjà identifiées, voire d'en identifier de nouvelles.

Les acquisitions sismiques ont été réalisées par GEO2X au printemps 2023 (22 au 26 mai 2023) sous le contrôle du BRGM et ont fait l'objet d'un rapport complet en juin 2023. Les paramètres d'acquisition, d'inversion et les profils vitesses et temps produits sont consultables dans le rapport d'acquisition situé en Annexe 3.

Le plan d'acquisition des profils géophysiques a nécessité une prise en compte des contraintes administratives et techniques du terrain, avec notamment l'agencement du réseau routier ou encore la présence de réseaux de gaz enterrés. Les propositions de tracés faites dans un premier temps par les géologues, ont donc été ajustées en accord avec les géophysiciens.

Quatre profils sismiques ont finalement été définis. L'orientation et le positionnement de leur tracé (Figure ) ainsi que l'objectif de leur acquisition sont les suivants :

- **Profil sismique 1 acquis (PS01\_Vf) :** Le tracé de ce profil suit la rivière de l'Allaine selon une direction ouest-est (plus précisément O-NO – E-SE). Il suit principalement la rue du Lieutenant Rusconi et des combattants d'Indochine de Morvillars, et se poursuit sur la route nationale N19. À l'ouest, le profil PS01\_Vf n'atteint pas le forage BSS01ELEC. Par contre, il est recoupé au centre par le forage peu profond de Morvillars (BSS001EMFZ) qui traverse le plio-quatenaire et l'oligocène jusqu'à 11,2 m de profondeur. Dans son extrémité est, il passe 150 m au nord du forage profond de Grandvillars (BSS001EMEF) profond de 275 m et qui atteint les formations du jurassique. La longueur totale du profil PS01\_Vf est de 2845 m. Il correspond et vise les objectifs du profil sismique 1 recommandé ;
- **Profil sismique 2 acquis (PS02\_Vf) :** Son tracé passe par Morvillars et recoupe perpendiculairement la vallée de l'Allaine. Il suit principalement la route départementale D23. Son orientation est globalement sud-nord (plus précisément S-SO – N-NE). Sa longueur totale est de 2610 m. Il correspond et vise les objectifs du profil sismique 2c recommandé, notamment d'écarter toute possibilité de présence de faille dans l'axe de cette vallée. Le profil PS02\_Vf ne passe à proximité d'aucun forage permettant de le caler en profondeur, mais il recoupe le profil PS01 qui permettra de vérifier son calage ;
- **Profil sismique 3 acquis (PS03\_Vf) :** Ce profil se situe au sud de la vallée de l'Allaine en passant au nord de Méziré. Son tracé est orienté ouest-est. Il correspond et vise les objectifs du profil sismique 3 recommandé. À l'est, il passe 50 m au nord du forage BSS001EMJH qui reste dans les formations plio-quatennaires jusqu'à 96 m de profondeur. Sa longueur totale est de 3738 m ;
- **Profil sismique 4 acquis (PS04\_Vf) :** Le tracé nord-ouest – sud-est de ce profil se situe au nord du secteur de la cible hydrogéologique. Il passe le long du ruisseau de l'Étang au nord-ouest, puis par les villes de Charmois, Froidefontaine et Grandvillars vers le sud-est. Il passe 65 m à l'ouest du forage de Charmois (BSS001EMED) le plus profond, qui traverse l'ensemble des terrains de l'oligocène et

du jurassique jusqu'à 868,5 m de profondeur. Vers le sud-est, il passe à 435 m du forage peu profond BSS001EMJC qui ne traverse que les terrains du quaternaire et de l'oligocène jusqu'à 30 m de profondeur. Il passe également 445 m au sud-est du forage profond de Froidefontaine (BSS001EMEE) reconnu pour avoir traversé une grande épaisseur d'oligocène (jusqu'à 254 m) ainsi qu'une dizaine de mètres du jurassique jusqu'à 310 m de profondeur. La longueur totale du profil PS04\_Vf est de 6087 m (Figure 13).

Seules deux lignes sismiques se croisent (PS01 et PS02) au niveau du village de Morvillars. Ce recoupement est cependant essentiel pour vérifier et valider le calage des différents profils entre eux.

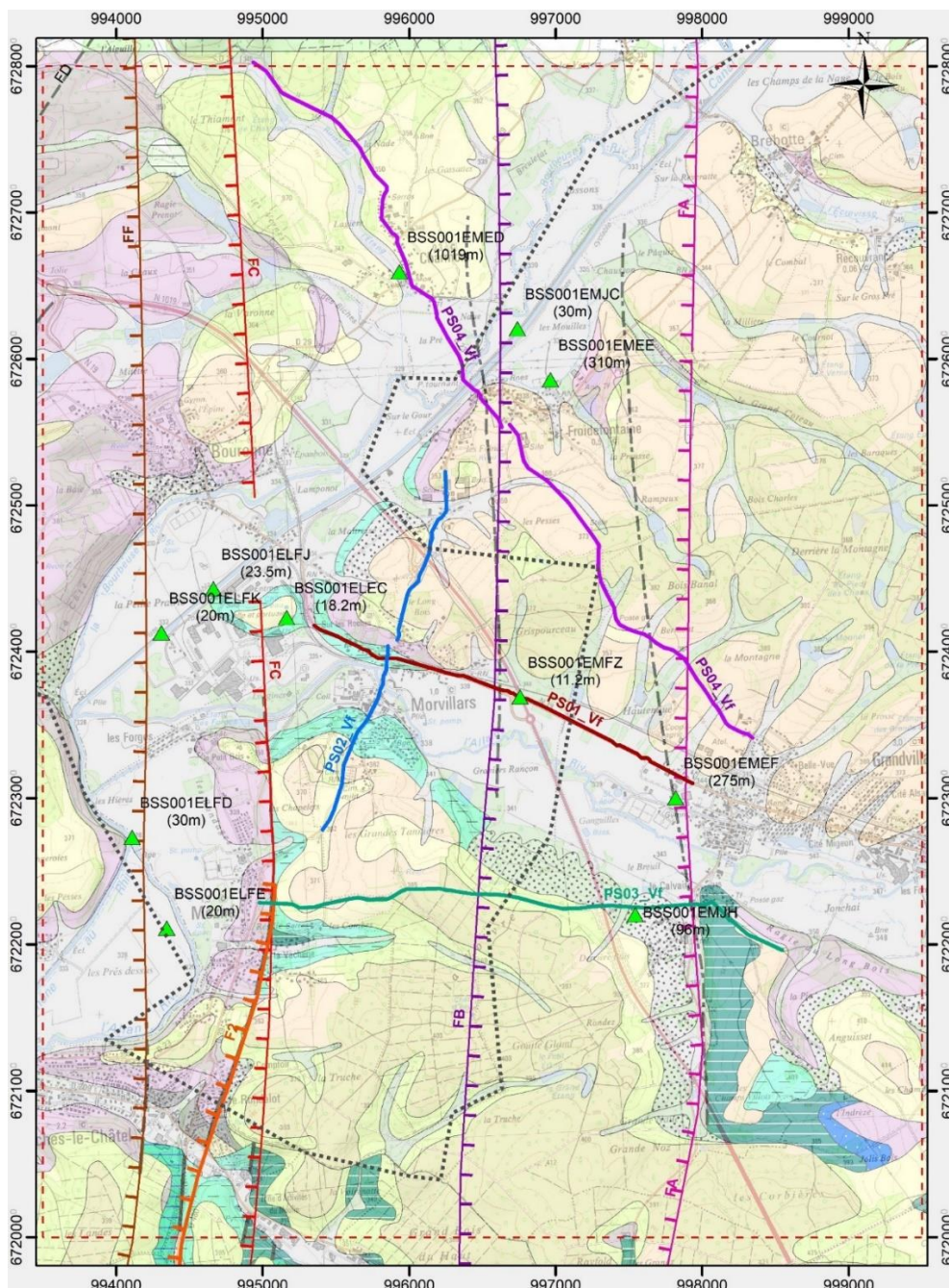


Figure 13. Carte de localisation des 4 profils sismiques acquis. Fonds de carte géologique synthétique au 1 :50 000 du projet Grand Belfort (Figure 7) et cartes topographiques au 1 :25 000 (SCAN 25®, Géoservices (ign.fr)). Les triangles verts représentent les forages issus de la BSS du BRGM.

## 4.2. INTERPRÉTATION PRÉLIMINAIRE DES PROFILS SISMIQUES

Les 4 profils de sismique réflexion acquis sont interprétés en termes de géométrie. Dans un premier temps, et indépendamment des résultats issus du modèle géologique 3D préliminaire, sont identifiés et sans *a priori* :

- Les différents réflecteurs sismiques (contraste d'impédance acoustique) et leurs caractéristiques sismiques ;
- Les zones de discontinuités correspondant à des failles ou couloirs de failles ;

L'intensité des déplacements verticaux le long des couloirs de failles.

L'identification des réflecteurs et la caractérisation sismique des objets géologiques sont effectuées par la suite lors de l'intégration des données dans GeoModeller des profils sismiques inversés en profondeur et de leur croisement avec les données de forage.

Pour observer une meilleure continuité des réflecteurs, les interprétations ont été faites sur les profils dont l'échelle verticale est en temps double (temps de trajet aller-retour des ondes acoustiques), donc non encore migrée en profondeur (conversion temps-profondeur).

Les interprétations des profils en temps double sont rassemblées sur la Figure 14. L'ensemble des profils vierges et interprétés, en temps double et en profondeur, sont présentés en Annexe 4.

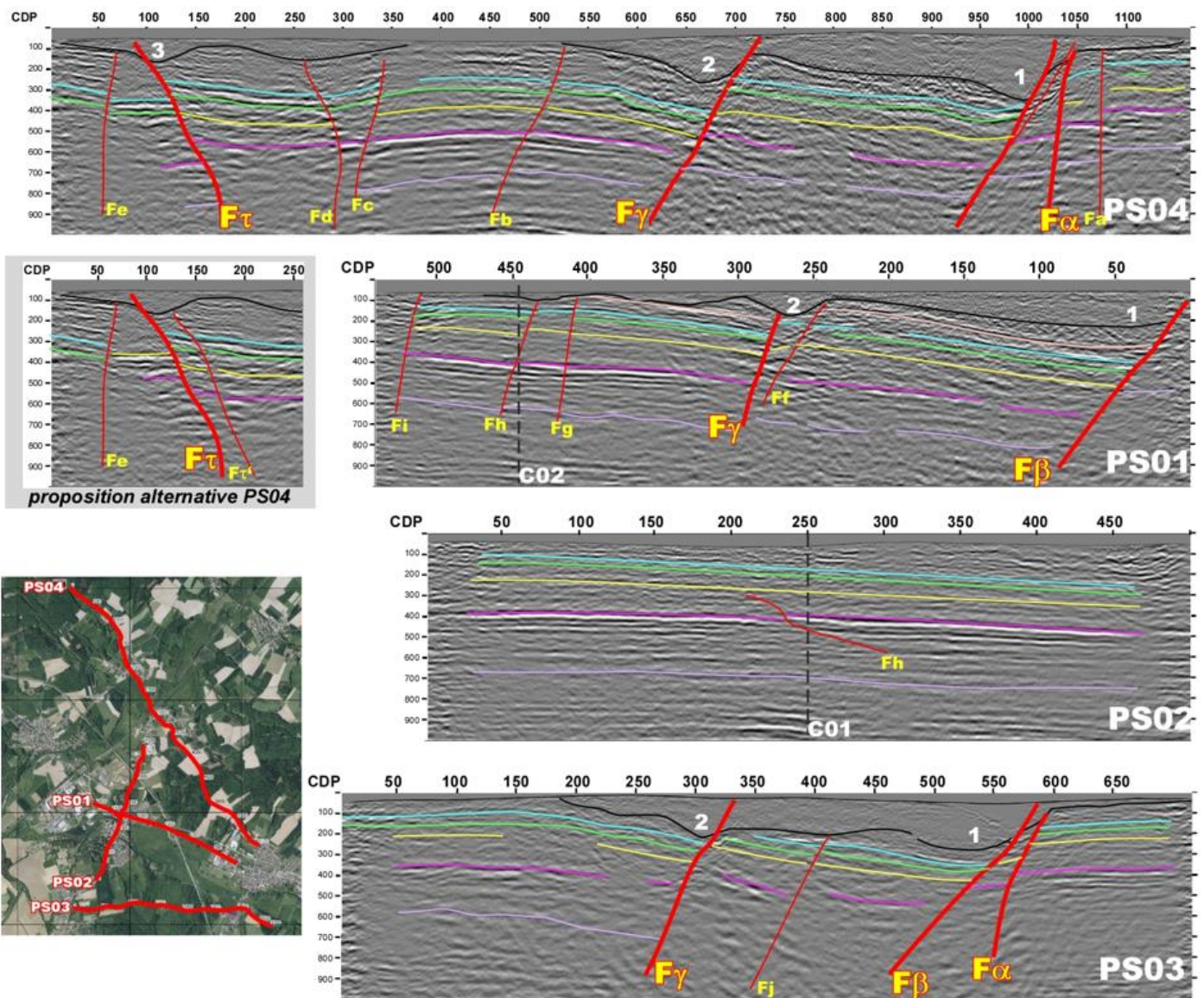


Figure 14. Profils sismiques en temps double interprétés en termes de réflecteurs remarquables. **Légende** : Le trait noir continu marque le passage entre une unité sismiquement transparente (au-dessus) et une unité sismique présentant des réflecteurs bien marqués, superposés et discontinus. Le trait en pointillé noir sur les profils C01 et PS02 indique l'intersection entre les profils. Les chiffres en blanc de 1 à 3 correspondent au centre-dépôt des principaux héli-grabens, Le profil encadré en gris correspond à une proposition d'interprétation alternative de la partie nord du profil C04. Deux familles de failles sont identifiées, les failles principales notés F et numérotées de « 1 » à « 4 » et les failles mineures notées F et numérotées de « a » à « i ».

#### 4.2.1. Interprétation des réflecteurs sismiques

Sans préjuger de la nature des différents horizons géologiques correspondant aux réflecteurs sismiques remarquables, plusieurs éléments structuraux ont été mis en exergue :

- Un empilement de réflecteurs globalement bien visible et d'intensité variable est facilement repérable sur l'ensemble des profils sismiques ;
- Les profils PS04, PS01, et PS03 sont caractérisés dans leur partie supérieure par un faciès sismique transparent dont la surface de base oscille entre 0 et 350 mètres (trait noir sur la Figure 14). Sous cette surface, les horizons sismiques sont plus réguliers et d'épaisseur continue ;
- L'unité sismique de surface, identifiable sur les 4 profils, varie fortement en épaisseur (entre 0 et 350 mètres). La morphologie de sa surface de base (trait noir sur la Figure 14) suit globalement la géométrie

des réflecteurs sismiques de l'ensemble inférieur. Toutefois, une légère obliquité et la troncature de quelques réflecteurs traduit l'aspect discordant des terrains sus-jacent sur l'unité sismique présentant des réflecteurs bien marqués ;

- Sur les profils PS04, PS01, et PS03, les réflecteurs profonds sont discontinus car découpés par plusieurs failles. Compte tenu de la méthode employée, seules les failles présentant un rejet vertical faible, c'est-à-dire de moins d'une dizaine de mètres, ne sont pas visibles. Les profils ne permettent pas de déterminer la direction des failles. Toutefois les données de surface montrent une structuration essentiellement N-S (Doney et Lacquement, 2022, fig.11 zone A), en cohérence avec la carte géologique du secteur (Bailly et al., 1985 et Chauve et al., 1985). Par conséquent si les failles identifiées sur les profils sont de direction N-S, la largeur moyenne des compartiments est de l'ordre de 500 à 1000 mètres. Le plus grand compartiment est situé dans la partie ouest du profil PS03 ;
- Sur le profil PS02, la sismique montre un empilement de réflecteurs continu et légèrement penté vers le nord. Il n'y a qu'au niveau de l'intersection avec le profil C01 qu'une petite discontinuité affecte une série de réflecteurs dans la partie inférieure du profil (trait rose sur la *Figure 14*). Cette discontinuité se retrouve également sur le profil PS01, mais affecte sur ce dernier tous les réflecteurs. Cette discontinuité correspond à une faille normale de direction N-S dénommée « **Fh** » sur les profils sismiques (du fait de la relation géométrique identifiée sur les profils) et présente un pendage fort vers l'ouest (75°). L'intensité du rejet sur le plan de faille est faible avec un déplacement apparent d'une dizaine de mètres ;
- Les failles sont majoritairement à pentes inclinées vers l'ouest avec un pendage supérieur à 60°, ce qui est cohérent avec les observations et mesures de terrain (Doney et Lacquement, 2022) ;
- Les décalages apparents sur les plans de failles sont quasi-systématiquement de type failles normales avec un affaissement du compartiment occidental par rapport au compartiment oriental ;
- Toutes les failles identifiées sur les profils sismiques ne présentent pas la même intensité de rejet vertical. La majorité des décalages apparents sont de l'ordre de quelque dizaine de mètres tout au plus (failles notée « F » avec comme indice une lettre minuscule de « a » à « i »). Quelques failles ont un rejet apparent bien plus important, nettement supérieur à la centaine de mètres, ces failles sont distinguées avec un indice en lettres grecques ;
- Sur les coupes PS04, PS02, et PS03 trois failles se retrouvent systématiquement avec la même géométrie et intensité. Si on considère que les failles principales sont de direction N-S, il est alors possible de corréliser les failles observées sur les trois profils et de les nommer de la même manière. Les Failles **F $\alpha$**  et **F $\beta$**  seraient situées à l'extrémité est des coupes, et la Faille **F $\gamma$**  au centre. Ces failles correspondent aux principaux accidents de valeur régionale. Leur localisation en carte sera abordée dans le chapitre suivant ;
- Dans la partie occidentale du profil PS04, l'interprétation proposé indique la présence d'une faille F4 à rejet apparent inverse avec un pendage vers le sud ou l'est. Une interprétation alternative de cette partie du profil peut être proposée avec deux failles **F $\tau$**  et **F $\tau'$**  avec rejet apparent normal. La présence de la faille **F $\tau$**  est certaine mais la caractérisation des déplacements n'est pour le moment pas évidente, compte tenu de la qualité des informations contenu dans le profil sismique. Le calage avec la carte géologique et les forages devront lever l'ambiguïté ;
- Sur les profils PS01 et PS03, et la moitié sud-est du profil PS04, les réflecteurs sont systématiquement inclinés vers l'est avec un léger pendage (5-10°) permettant l'approfondissement progressif de l'ensemble de la série. La moitié N-W du profil PS04 se caractérise par une ondulation avec au premier degré une zone globalement plane, ces ondulations sont associées à la présence des failles dont certaines sur ce profil sont à regard vers l'est ;
- Les épaisseurs maximales de la série sismique de surface se trouvent systématiquement dans le compartiment effondré au toit des failles normales principales (**F $\alpha$ /F $\beta$** , **F $\gamma$**  et **F $\tau$** ). Toutefois on note

une homogénéité dans les inclinaisons des réflecteurs sous-jacents qui sont tous parallèles les uns aux autres ;

- La cohérence entre les géométries (présence de failles normales, basculements des couches du substrat et remplissages de la série asismique) suggère un fonctionnement en d'hémi-grabens des failles lors d'une extension syn à post sédimentation de la série supérieure. Ces basculements permettent d'avoir les épaisseurs de séries asismiques les plus importantes le long des couloirs de failles (zone 1, 2 et 3 sur les coupes).

Les principaux éléments à retenir de l'interprétation des profils sismiques sont la présence de deux séries sismiques bien distinctes et affectées par de nombreuses failles. La série sismique présente dans la partie supérieure des profils est asismique et montre de fortes variations d'épaisseur. La série sismique présente dans la partie inférieure des profils est bien litée avec des réflecteurs sismiques subparallèles entre eux. Ces deux séries sismiques sont affectées par des failles majoritairement pentées vers l'ouest (pendage supérieur à 60°) avec des rejets apparents pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres.

#### 4.2.2. Corrélation structurale entre les profils

Les objets définis sur les coupes sismiques présentent des pendages apparents et ne permettent pas d'identifier la direction des objets observés (failles ou stratigraphie). Pour pouvoir identifier les directions des différents objets, il est indispensable d'avoir une vision en plan et que les profils sismiques se recoupent et que les objets interprétés puissent correspondre à des structures observées en surface.

Pour les principales failles identifiées sur les profils sismiques acquis, des corrélations entre les profils sont faites du fait des géométries (failles et importance des décalages) et de l'implantation des profils sismiques. Le passage en carte est indispensable pour confirmer la correspondance établie sur les profils. Sur la carte Figure 15 sont indiqués les positions des failles identifiées sur les profils. Les failles **F $\alpha$** , **F $\beta$** , **F $\gamma$**  des profils PS04, PS01 et PS03 s'alignent selon des droites de direction N-S et correspondent bien aux mêmes objets structuraux. Les directions de ces failles sont cohérentes avec les observations faites en surface lors de l'étude préliminaire (Doney et Lacquement, 2022 - Figure 5, secteur B). Les failles **F $\alpha$**  et **F $\beta$**  correspondent à un couloir de failles avec un affaissement du compartiment occidental de 200 à 250 mètres. La faille **F $\gamma$**  se caractérise également par l'affaissement du compartiment occidental d'environ 100 à 150 mètres.

Nous avons vu précédemment que la faille **F $h$** , seule faille présente sur le profil PS02, présente également une direction N-S du fait de ses relations géométriques avec les profils PS02 et PS01.

Les failles identifiées dans la partie occidentale du profil sismique PS01 sont forcément subparallèles au profil PS02 puisqu'elles n'affectent pas les réflecteurs présents sur ce profil. Les failles **F $i$**  et **F $g$**  sont donc également de direction N-S. Au nord, le profil PS04 présente plusieurs failles dans sa partie centrale avec des caractéristiques similaires aux failles **F $i$**  et **F $g$** . Du fait de leur direction, il est fortement probable que les failles **F $c$**  et **F $b$**  correspondent respectivement aux failles **F $i$**  et **F $g$**  avec des directions N-S.

La partie occidentale du profil PS03 ne présente pas de faille majeure, par conséquent les failles **F $i$** , **F $b$**  et **F $g$**  doivent s'amortir avant d'atteindre ce profil sismique.

Pour les failles **F $4$**  et **F $d$**  de la partie NW du profil PS04, il n'y a pas d'autre profil sismique permettant de préciser leur direction. Elles pourraient être subparallèles aux failles identifiées ci-dessus, soit de direction N-S. Néanmoins, les observations de surface suggèrent la présence de plusieurs familles de failles de directions différentes (Figure 16). Par conséquent les directions de ces failles ne peuvent pas être caractérisées en direction du fait d'un manque d'information.

Les failles **F $a$** , **F $j$**  et **F $f$**  sont des failles mineures qui ne sont identifiées que sur le profil sismique où elles sont indiquées, aux vues de leur position, elles sont très certainement de direction méridienne.

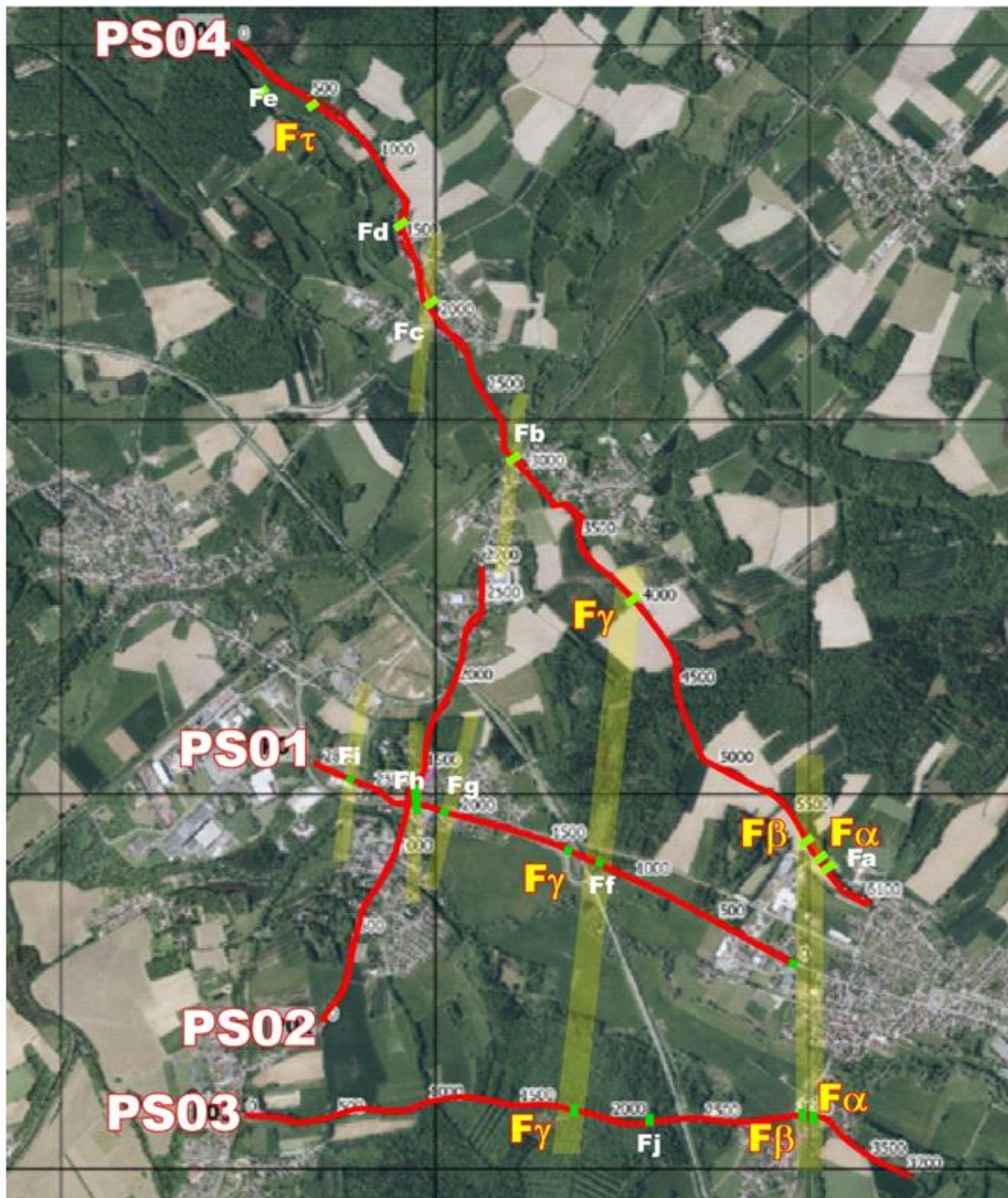


Figure 15. Photographie aérienne avec localisation des failles identifiées (traits vert) sur les profils sismiques (rouge), En bandes transparente jaune : proposition de corrélation de failles déduites des profils sismiques.

**En conclusion :** les éléments à retenir sur les structures tectoniques affectant les séries sont :

- la présence de couloirs de déformations principales de direction N-S cohérente avec les observations de surface réalisées en 2020 ;
- Les failles de moindre importance présentent également des directions N-S ;

- Ces observations sont cohérentes avec les données géologiques de la carte géologique à 1/50 000 publiées (Bailly et al., 1985) qui indique la présence d'un faisceau de failles de direction N-S situé dans le secteur (zone A - Figure 16) ;
- Seules les failles situées dans la partie NW de la coupe sismique PS04 ne peuvent être correctement imagé du fait de l'absence de contraintes géométriques suffisantes.

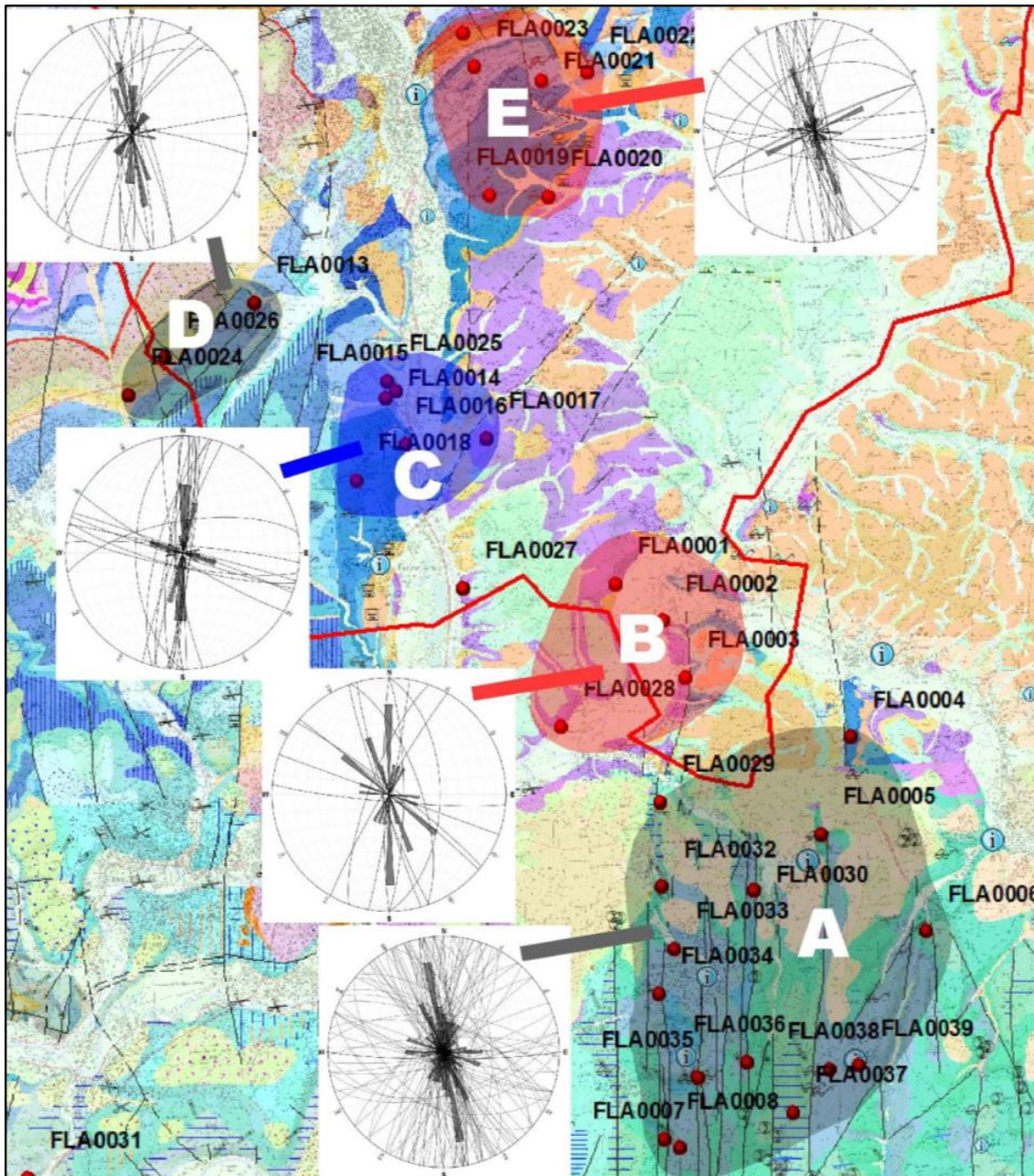


Figure 16. fig.11 du rapport Doney et Lacquement, 2022 avec la carte géologique à 1/50 000 et représentation stéréographique des failles dans le secteur de la zone d'acquisition des profils sismiques réflexion. Le secteur B et la partie nord de A correspondent à la zone d'intérêt

#### 4.2.3. Corrélation structurale entre les profils et les cartes géologiques

À l'issue de l'interprétation des données géophysiques, une série de failles est identifiée et leur continuité cartographique est proposée. Cette identification a été réalisée sans tenir compte de la connaissance géologique afin d'éviter les aprioris sur la géométrie géologique.

Une extraction des failles présentes sur la carte géologique à 1/50 000<sup>ème</sup> de Delle a été réalisée afin de mettre en regard des interprétations issues des profils sismiques (Figure 17). Les failles de la carte géologique présentent des direction N-S (N170), linéaires, elles correspondent à des failles subverticales. Ces failles sont légèrement obliques par rapport à celles proposées dans l'interprétation des profils sismiques dont la direction est N005-N010.

Dans le détail : La faille **F $\alpha$**  ne recoupe que le profil PS03 est n'y est sismiquement pas caractérisée. La faille 2 traverse les profils C01 et C04, elle pourrait correspondre à deux failles mineures vu sur les profils dont la faille **Fb**. En carte, la faille **F $\beta$**  n'atteint pas la coupe sismique PS03 alors qu'elle pourrait très bien correspondre à la faille **F $\gamma$**  identifiée en sismique. La faille **F $\gamma$**  recoupe les profils PS03, PS01 et PS04. Sur les deux premières lignes sismiques, là où passe la faille cartographique sont identifiés des discontinuités sismiques avec sur le C03 une des failles majeures **F $\beta$** .

Les acquisitions géophysiques démontrent la présence d'un plus grand nombre de failles sur le territoire que celles décrites par la carte géologique. La divergence d'orientation est faible mais suffisante pour que le tracé des failles soit très différent.



## 5. Modélisation géologique 3D consolidée par la sismique (étape 3)

L'actualisation du modèle géologique 3D du Grand Belfort par les données sismiques nouvellement acquises a été réalisée en 3 temps. L'interprétation des profils acquis a d'abord été réalisée indépendamment des résultats du modèle géologique 3D préliminaire. Dans un deuxième temps, les images des profils vierges et interprétés ont été géoréférencées, calées en profondeur et intégrées dans le modèle géologique 3D préliminaire. Enfin, les résultats de ce modèle préliminaire ont été confrontés aux profils sismiques interprétés et réajustés en conséquence.

### 5.1. INTÉGRATION DES PROFILS SISMIQUES DANS LE GEOMODELLER

L'intégration des profils sismiques dans le GeoModeller permet de confronter directement les résultats du modèle géologique 3D préliminaire à l'interprétation préliminaire des profils. Elle permet ainsi d'affiner le calage des formations en profondeur en s'appuyant sur celui des forages profonds déjà intégrés, d'ajuster la géométrie des formations et des failles déjà modélisées mais aussi de reconsidérer l'existence même de certaines failles ou la nécessité d'en ajouter de nouvelles. Les 4 profils sismiques ont été préalablement géoréférencés en surface avant d'être intégrés sous forme d'images et calés en profondeur le long de 4 coupes brisées dans le GeoModeller (Figure 18 et Figure 19).

L'interprétation préalable des profils sismiques, avant intégration dans le GeoModeller, a été réalisée sur les profils acquis en temps double (MIG TIME). Or, pour être intégrés et calés dans GeoModeller, les profils en temps double ont dû être convertis en domaine profondeur (MIG DEPTH-Rev1). Le lien permettant cette conversion est le modèle de vitesse. Des décalages peuvent cependant être induits par le choix du modèle de vitesse.

Les images intégrées et faisant référence pour la modélisation 3D sont celles des profils convertis en temps/profondeur tandis que les images préalablement interprétées ont été intégrées en tant que support pour faciliter l'interprétation et les ajustements en 3 dimensions.

Un exemple de géoréférencement et de calage de profil sismique vierge avant intégration dans le GeoModeller est donné à la Figure 20. L'intégration du profil dans le GeoModeller se fait ensuite par le biais de deux points de calage topographique et d'un point de calage en profondeur. Un exemple de calage et d'intégration dans le GeoModeller de profil sismique interprété est donné *via* la Figure 21.

L'ensemble des paramètres et coordonnées utilisées pour l'intégration des 4 profils sismiques dans le GeoModeller sont fournis dans l'Annexe 4. Les paramètres sont identiques pour les profils sismiques vierges ou préalablement interprétés.

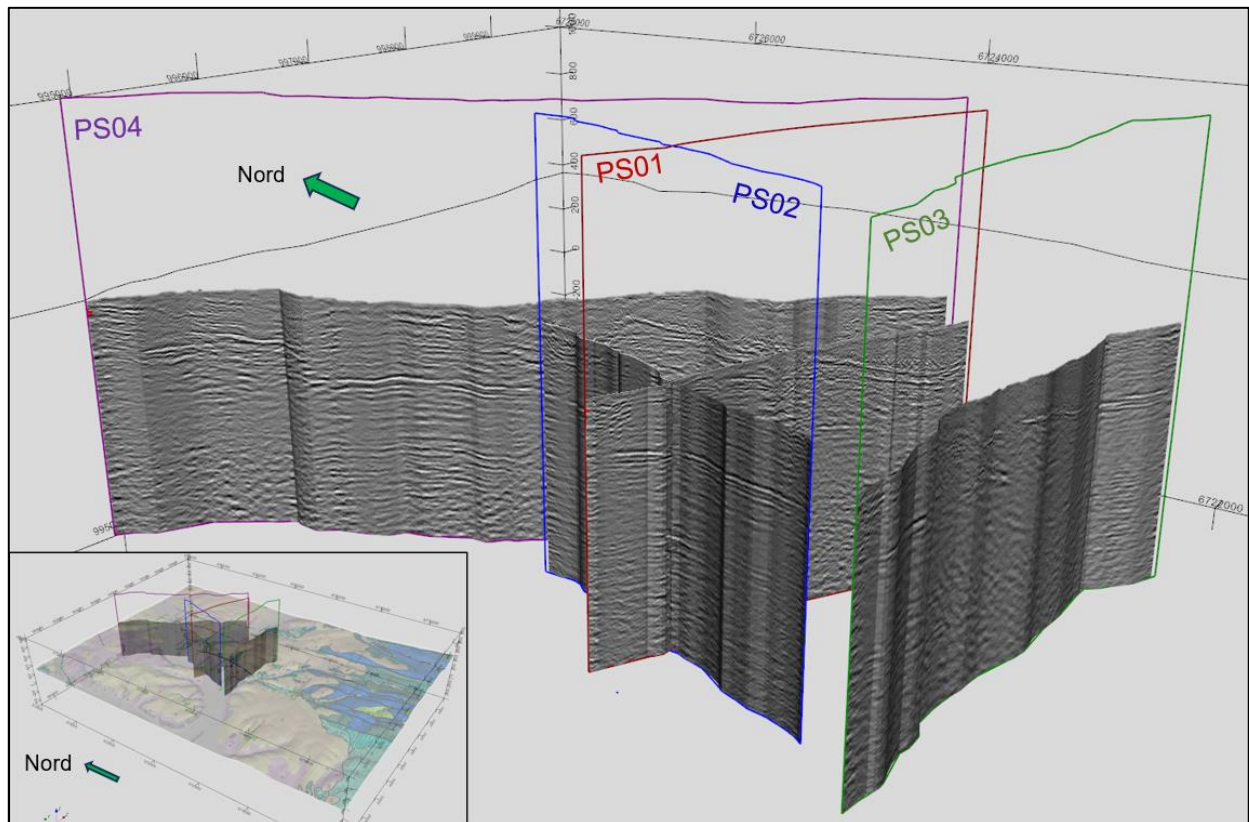


Figure 18. Profils sismiques vierges intégrés dans GeoModeller (profils convertis en temps/profondeur).

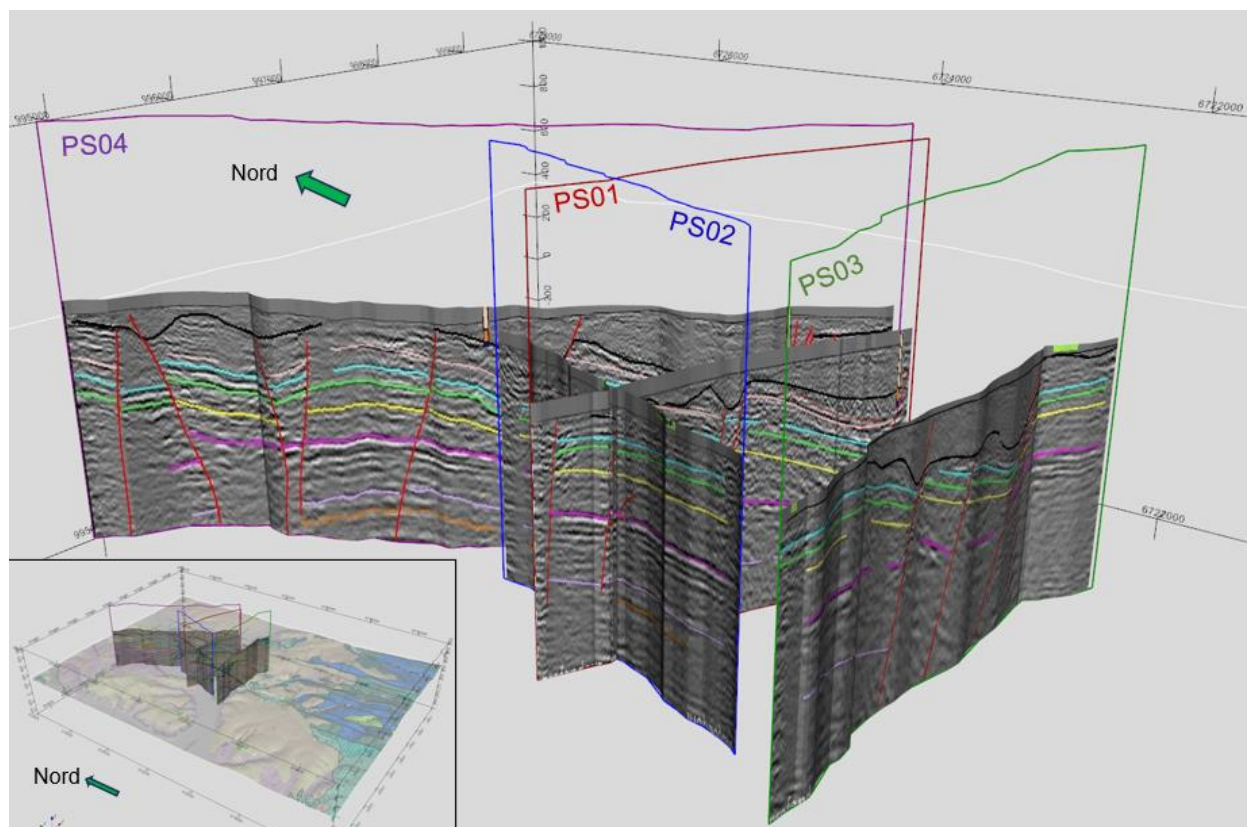


Figure 19. Profils sismiques préalablement interprétés et intégrés dans GeoModeller (profils en temps double).

Acquisition sismique et construction d'un modèle géologique 3D pour préciser l'implantation de forages de reconnaissance hydrogéologique dans les calcaires du jurassique du Grand Belfort

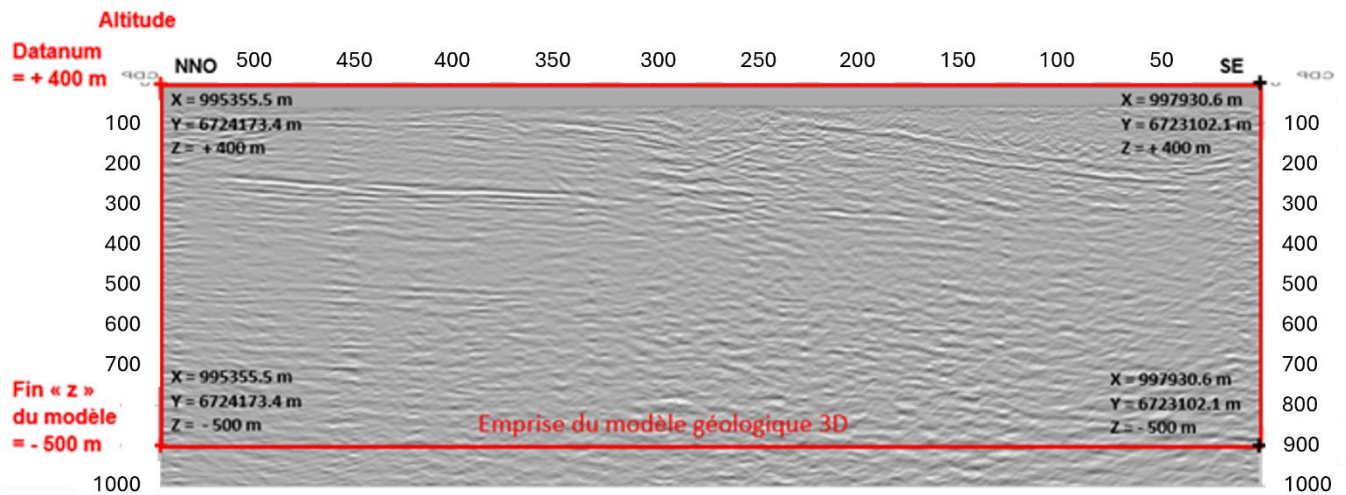


Figure 20. Géoréférencement du profil sismique PS01 vierge, avant intégration dans le GeoModeller. Le système de coordonnées est en RGF93/Lambert 93.

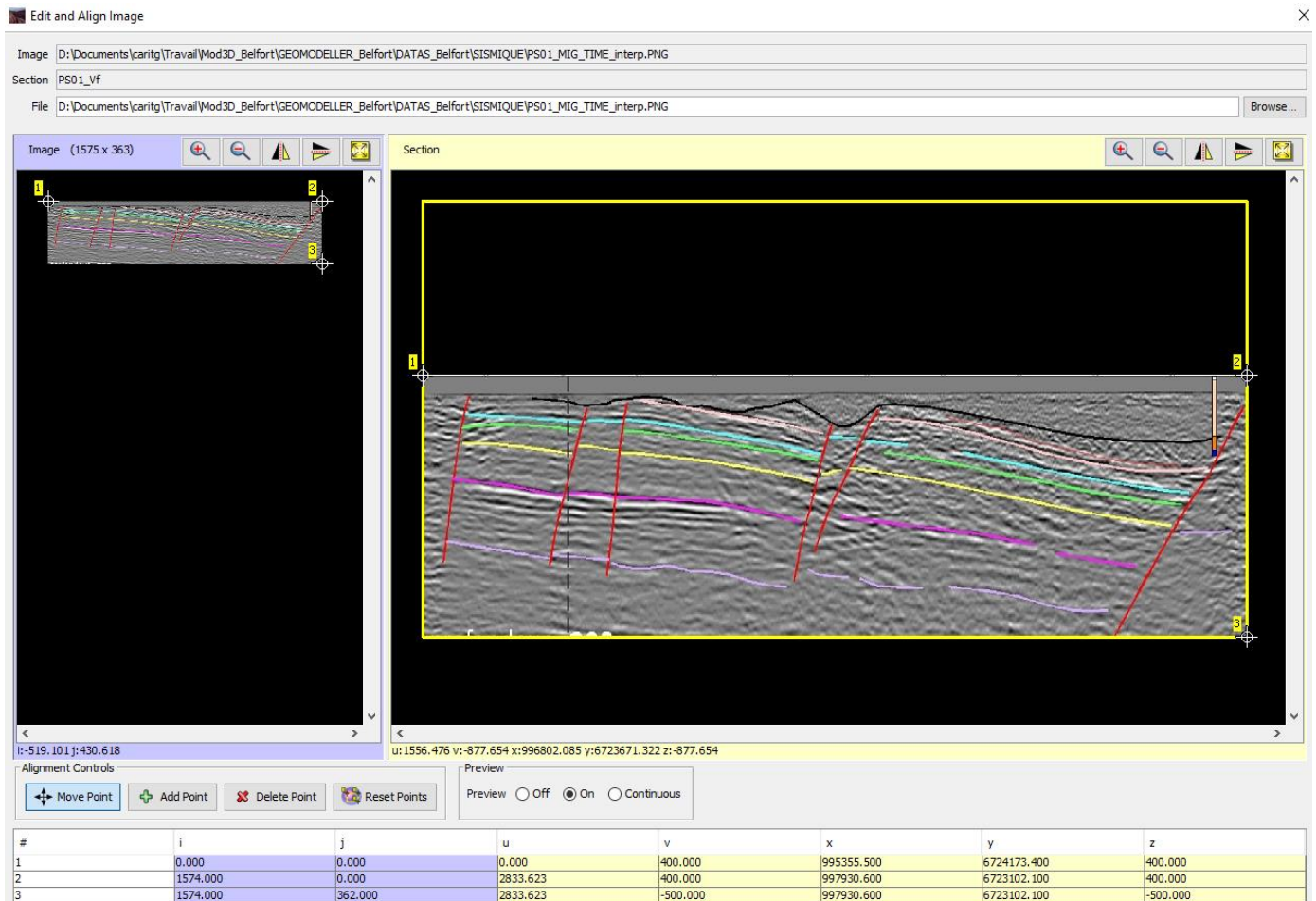


Figure 21. Intégration et calage du profil sismique PS01 préalablement interprété, dans le GeoModeller. Le système de coordonnées est en RGF93/Lambert 93 ; x, y et z sont en mètres.

## 5.2. INTERPRÉTATION DES PROFILS SISMIQUES DANS LE GEOMODELLER

### 5.2.1. Caractérisation des réflecteurs sismiques à partir des forages profonds

Plusieurs réflecteurs sont clairement identifiables sur les 4 profils sismiques acquis, jusqu'à des profondeurs dépassant 800 mètres. L'empilement des faciès sismiques est hétérogène avec deux ensembles :

- Un ensemble supérieur ne contenant pas de réflecteurs (faciès asismique) ;
- Un ensemble inférieur caractérisé par de nombreux réflecteurs subparallèles d'énergie variable<sup>2</sup>.

Il y a relativement peu de forages dans le secteur et seul l'un d'entre eux est suffisamment profond et proche d'un profil pour traverser une grande partie des formations ciblées dans le cadre du projet. Lors du choix des implantations des lignes sismiques il a été volontairement choisi de faire passer une ligne le plus proche possible de ce forage afin de pouvoir caler les réflecteurs sismiques au regard de la pile géologique. Ce forage est situé sur la commune de Charmois et est référencé dans la BSS (Base de données du Sous-Sol): BSS001EMED. Le profil sismique n°4 passe à 50 mètres au nord du forage au niveau du CDP1900 (*Common Depth Point*).

Le forage a atteint la profondeur de 1019 mètres. Il débute dans les terrains du quaternaire puis traverse les terrains de l'oligocène pour ensuite passer par les calcaires du jurassique et se terminer dans le Keuper (Trias). Sa base n'atteint pas la discordance du Trias sur les terrains sous-jacents. Il n'y a pas de redoublement de série ni de pendages particuliers témoignant de structures plicatives ou faillées. La série traversée est en position normale subhorizontale. Une coupe simplifiée du forage est fournie dans la BSS (Figure 22). L'ensemble des descriptions lithologiques sont disponibles dans la Banque du Sous-Sol à la page : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=BSS001EMED>.

Le forage permet d'établir une colonne lithologique continue du jurassique en prenant en compte les variations de la nature lithologique et les épaisseurs des formations rencontrées (Figure 23). Ces variations lithologiques formeront les réponses sismiques en se caractérisant par des réflecteurs sismiques d'énergie variable suivant les contrastes lithologiques de la pile sédimentaire.

---

<sup>2</sup> Énergie variable signifie que certains réflecteurs possèdent des pics larges et d'autres plus serrés.

DÉPARTEMENT : TERRITOIRE de BELFORT Pièce n° 1

COMMUNE : CHARMOIS Indice de classement : 444 6 1

DÉSIGNATION : Sondage de CHARMOIS Cote du sol (z) = + 339

Coupe établie par : MEYER (coupe résumée)  
Interprétation de : M. MEYER

PROFONDEURS DE 0 m A 1019 m	NATURE DES TERRAINS	INTERPRÉTATION	COTE DU TOIT
0 m - 4,00 m	Argile, cailloux quartzeux	BASSE TERRASSE	
4,00 m 112,90	Calcaire - marne - conglomérats	OLIGOCENE MOYEN	
112,90 m 225 m	Calcaire marno-calcaire	SEQUANIEN	J7
225,00 m 250,00 m	Calcaire gris marneux	SEQUANIEN INFÉRIEUR	J7
250,00 m 340 m	Calcaire et marno-calcaire :	RAURACIEN et OXFORDIEN SUPÉRIEUR	J6
340 m 430 m	Marne	OXFORDIEN	J4
430 m 520 m	Calcaire gris et marnes	CALLOVIEN	
520 m 680 m	Calcaire	BATHONIEN et BAJOCIEN	
680 m 760 m	Marne et calcaire	AALÉNIEN	J6
760 m 780 m	Marne, schisteuse à la base	TOARCIEN	
780 m 831 m	Calcaire et marne	CHARMOUTHIEN	I4
831 m 868,10	Calcaire et marne	SINEMURIEN	I3
868,10 m 868,50	Argile fine, grise	HETTANGIEN	? I2
868,50 868,70	Marnes dites de LEVALLOIS		
868,70 873,70	Rhétien inférieur		I1
873,70 1019 m		KEUPER MOYEN	tg-2
(coupe très détaillée dans Publication MEYER)			

Figure 22. Fiche descriptive simplifiée des terrains du forage de Charmois BSS001EMED

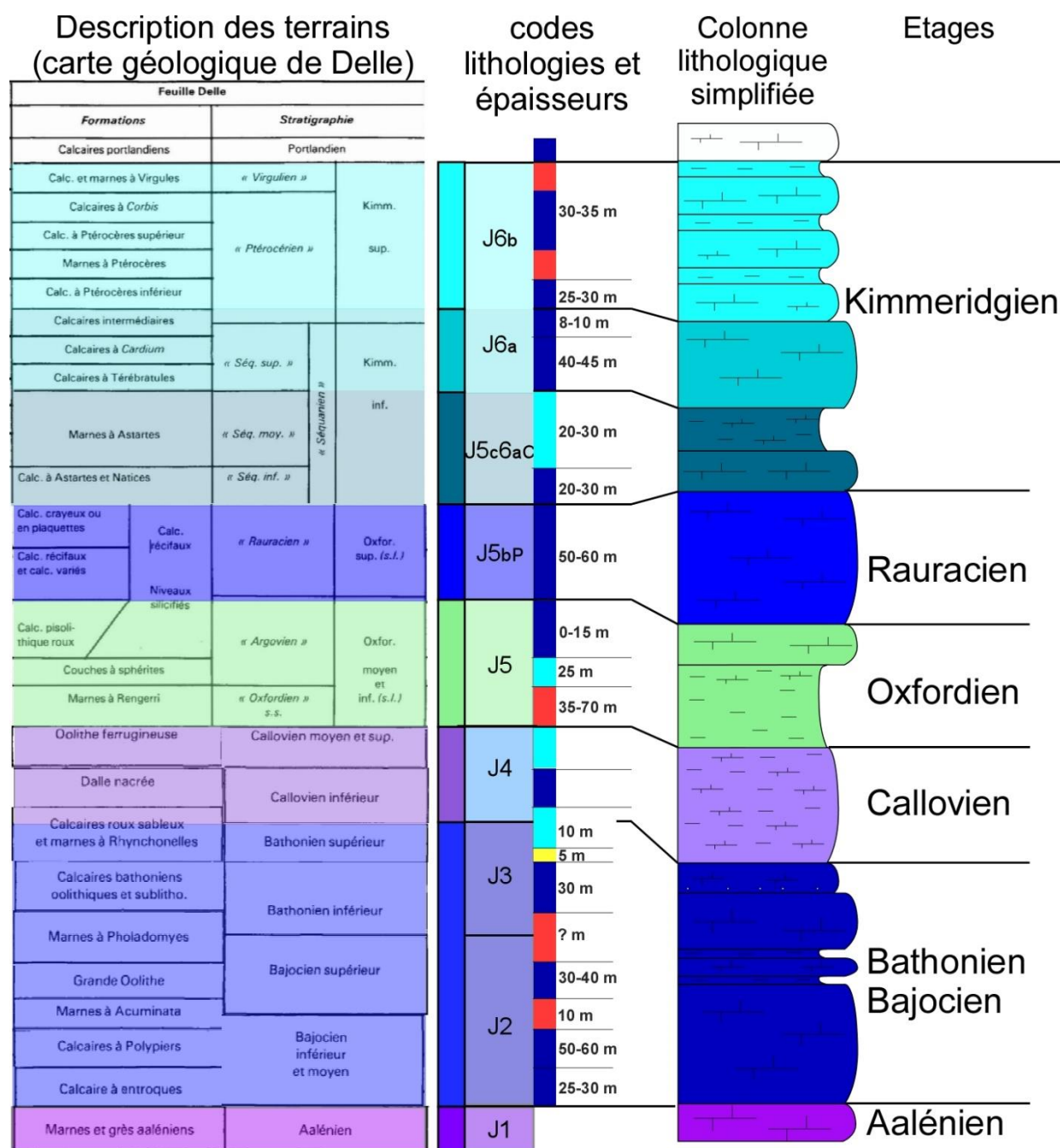


Figure 23. Caractérisation lithologique des terrains du jurassique à partir des renseignements issus de la notice de la carte géologique de Delle et des informations du forage de Charmois (BSS001EMED). La colonne lithologique en bleu, cyan, rouge et jaune renseigne la nature lithologique principale de l'étage correspondant respectivement aux calcaires, marnes, argiles et grès.

À partir de l'ensemble de ces informations, la colonne lithologique produite est mise en regard du profil sismique n°4 ce qui permet de caractériser les réflecteurs d'un point de vue lithostratigraphique (Figure 24). Sans rentrer dans le détail, et pour faire le lien avec les principaux réflecteurs identifiés lors de l'interprétation des profils sismiques dans le chapitre 4.2.1 les principaux éléments sont :

- L'oligocène est sismiquement transparent ;

- Les réflecteurs les plus énergétiques situés entre 0 et 100 m (cote NGF) correspondent aux calcaires du rauracien. Le réflecteur bien marqué de couleur rose foncé caractérisé lors de l'interprétation des profils sismiques marque très certainement le sommet des calcaires du rauracien ;
- Le réflecteur rose clair, se situe une vingtaine de mètres sous la limite oxfordien/callovien, à une altimétrie de 160 mètres NGF. Peu marqué, il peut être attribué à cette limite peu contrastée entre les marnes de l'oxfordien et celles du callovien ;
- Le passage du callovien au bathonien semble correspondre au réflecteur bien marqué de couleur orange. Il est situé à -180 mètres NGF. Il marque le passage bien contrasté des marnes du callovien aux calcaires du bathonien.
- Le passage du bathonien à l'aalénien se situe au-dessus d'un réflecteur net mais discontinu qui n'a pas été identifié sur l'ensemble des profils, ici situé à -330 mètres NGF.

Dans le kimméridgien, plusieurs réflecteurs avaient été identifiés (jaune, vert et cyan), ils ne semblent pas correspondre à une limite d'étage. La correspondance entre les réflecteurs identifiés lors de l'interprétation des profils sismiques (4.2.1) et la lithostratigraphie issue du forage de Charmois montre qu'à part pour le rauracien, il n'est pas possible de caractériser chaque étage du jurassique par un signal sismique particulier. Toutefois, le calage entre la pile sédimentaire et les réflecteurs identifiés lors de l'interprétation des profils sismique permet d'habiller, d'un point de vue lithologique, l'ensemble des profils sismiques et de proposer des coupes géologiques pour chaque profil.

À partir des éléments caractérisés sur le profil, il est alors possible d'interpréter l'ensemble des profils sismiques en terme géologique. Ce travail est réalisé directement dans le GeoModeller afin de passer à une visualisation 3D des objets géologiques.

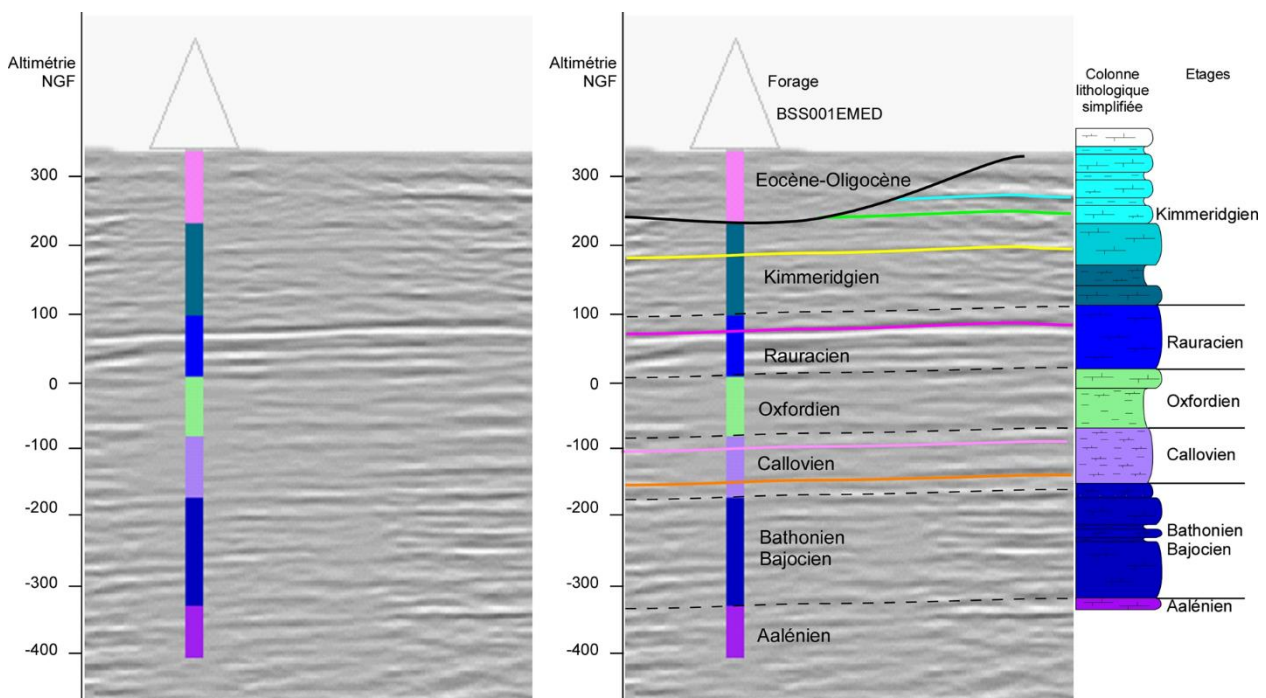


Figure 24. Identification des réflecteurs sismiques (coupe n°4) à partir du forage du Charmois projeté sur la coupe à 55 m de distance. Sur le profil, les traits de couleurs correspondent aux lignes caractérisées sur les interprétations sismiques. Les traits noirs en pointillés correspondent aux contacts stratigraphiques des différents étages du jurassique.

### 5.2.2. Ajustement de la pile géologique du modèle

Les formations marneuses (j5c6aM) et calcaires (j5c6aC) de l'oxfordien supérieur – kimmeridgien inférieur (jurassique supérieur), distinguées dans le modèle géologique 3D préliminaire ont été regroupées dans le modèle actualisé par la sismique. En effet, la formation marneuse j5c6aM apparait sous forme de lentilles au sein de la formation calcaire j5c6aC. Son épaisseur est donc variable, voire inexistante, à l'échelle de la zone d'étude. De plus, la distinction entre ces deux formations s'est avérée imperceptible d'un point de vue réponse/marqueurs sismique. Cet ensemble unique est noté j5c6C dans le modèle géologique 3D consolidé par la sismique.

La correspondance entre les deux piles du modèle géologique 3D préliminaire (avant acquisitions sismiques) et du modèle final (consolidé par les acquisitions sismiques) est présentée sur la Figure 25.

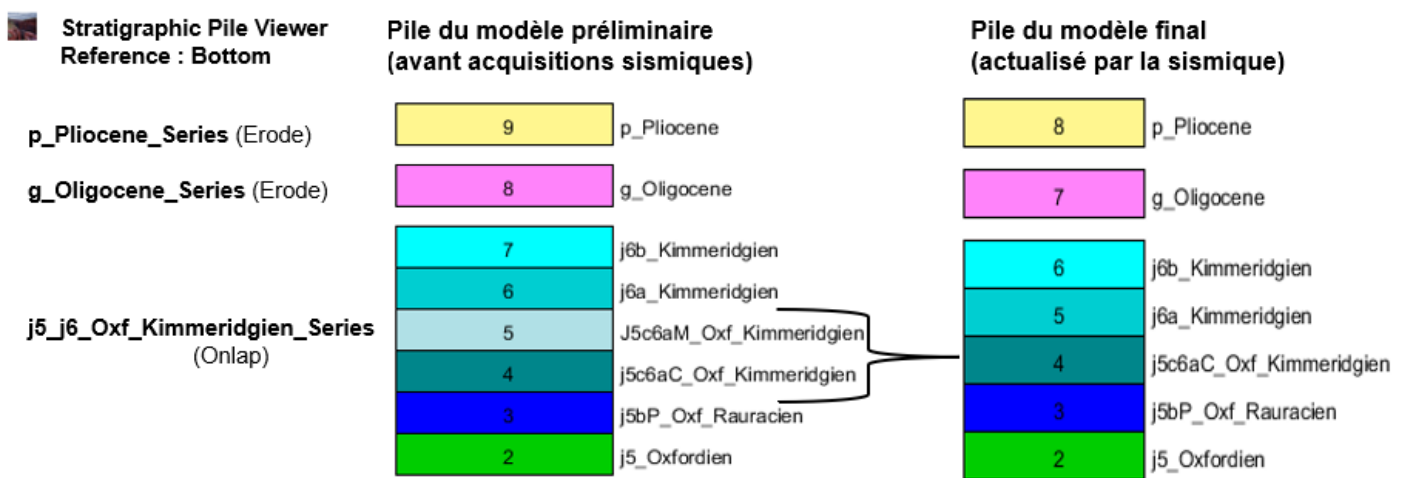


Figure 25. Ajustement de la pile GeoModeller du modèle actualisé par la sismique. Correspondance avec la pile du modèle géologique 3D préliminaire.

### 5.2.3. Ajustement de l'interprétation de certains forages

L'interprétation première de certains forages a été réajustée ou détaillée grâce à l'interprétation des profils sismiques dans le GeoModeller.

On notera à titre d'exemple :

- le forage BSS001EMEF initialement codé en jurassique indifférencié entre 207 m et 275 m, a pu être recodé en Calcaires du rauracien (j5bP) de 207 m à 226 m et en Marnes de l'argovien (j5) de 226 à 275 m, en accord avec la description lithologique d'origine ;
- le forage BSS001GEQL également initialement codé en jurassique indifférencié jusqu'à 154 m de profondeur, a pu être fractionné en Calcaires et Marnes du kimmeridgien (j5c6aC) jusqu'à 20 m, Calcaires oolithiques du rauracien (j5bP) de 20 à 67 m, Mes de l'oxfordien inférieur (j5) de 67 à 220 m et Calcaires biodétritiques du callovien (j4) de 220 à 235 m.

### 5.2.4. Ajustement des formations

L'ajustement de la profondeur, de l'épaisseur et de l'extension des formations a été réalisée sur les 4 profils sismiques. Il s'est appuyé sur l'interprétation préliminaire de ces derniers (chapitre 4.2) mais est fortement contraint dans le GeoModeller par l'ensemble des données du modèle (MNT, contours des formations et failles en surface, mesures structurales, forages et profils sismiques acquis). Un travail d'interprétation intégrant tout le volume 3D est donc nécessaire avant d'arriver aux résultats du modèle final.

L'ajustement des formations réalisé dans le GeoModeller ne peut donc pas être décorrélé de celui des failles (Chapitre 5.2.5) et impacte le résultat du modèle (Chapitre 5.2.6).

Un exemple est présenté ci-après (Figure 26).

#### **a) Ajustement de la Série pliocène**

L'épaisseur et la profondeur de la formation du pliocène a été fortement diminuée à la suite de l'acquisition des profils sismiques. Généralement pelliculaire sur l'ensemble du modèle, son épaisseur atteint jusqu'à 110 m sur le profil PS03. Elle avait déjà été bien contrainte dans le modèle 3D préliminaire grâce au forage BSS001EMJH qui traverse l'ensemble de la formation pliocène sur 96 m sans en atteindre le mur. En revanche, l'épaisseur du pliocène a été réduite à l'ouest du profil PS04, passant de 115 m d'épaisseur (et donc de profondeur) dans le modèle préliminaire à une trentaine de mètres dans le modèle actualisé (Figure 26).

#### **b) Ajustement de la série oligocène**

La géométrie en demi-graben de la formation oligocène est particulièrement marquée et reconnaissable sur les profils sismiques acquis. Elle a donc été grandement améliorée et ajustée en profondeur grâce à l'interprétation et l'intégration de ces profils dans le GeoModeller.

Elle confirme que la dissymétrie, l'épaisseur et le dépôt en éventail de ces formations est étroitement lié aux failles N-S synsédimentaires qui les bordent (Figure 26). Le bloc effondré qui engendre l'épaississement de l'oligocène se trouve systématiquement à l'ouest des failles.

L'épaisseur maximale de l'oligocène obtenu dans le modèle géologique 3D préliminaire était de 290 m à l'est du profil PS04. Elle a été réajustée à 165 m dans le modèle actualisé par la sismique.

#### **c) Ajustement de la Série jurassique**

Les formations du jurassique supérieur ont également été ajustées en épaisseur et en profondeur grâce à l'intégration des profils sismiques acquis.

L'épaisseur des formations, et plus particulièrement celle du kimméridgien (j6b, j6a, j5c6aM et j5c6aC), a été réévaluée à la hausse sur l'ensemble des profils. Par exemple sur le profil PS04, elle passe de 125 m dans le modèle préliminaire à 250 m dans le modèle actualisé (Figure 26).

En revanche, l'épaisseur des formations jurassiques les plus profondes (calcaires rauraciens j5bP et Marnes argoviennes j5) n'avaient été que très légèrement surestimés dans le modèle préliminaire. Les calcaires rauraciens (j5bP) n'ont ainsi été ajustés que de 65 m d'épaisseur à 50 m d'épaisseur dans le modèle actualisé, et les Marnes argoviennes (j5) de 135 m à 120 m.

Une géométrie légèrement ondulée/plissée de la série jurassique a été mise en évidence par l'interprétation des profils sismiques. Elle retranscrit l'histoire tectonique complexe de la zone d'étude affectée par des périodes d'extension et de compression successives (cf. chapitre 4.2).

De plus, l'approfondissement de l'ensemble des formations vers le Nord est confirmé. En effet, pour une même altitude topographique autour de 350 m (NGF), l'altitude de la base de la série jurassique (mur du j5) se situe au-dessus du niveau géographique de référence (0 m) sur le profil PS03 (le plus au sud), tandis qu'elle est de - 100 m (NGF) sur le profil PS04 (le plus au nord).

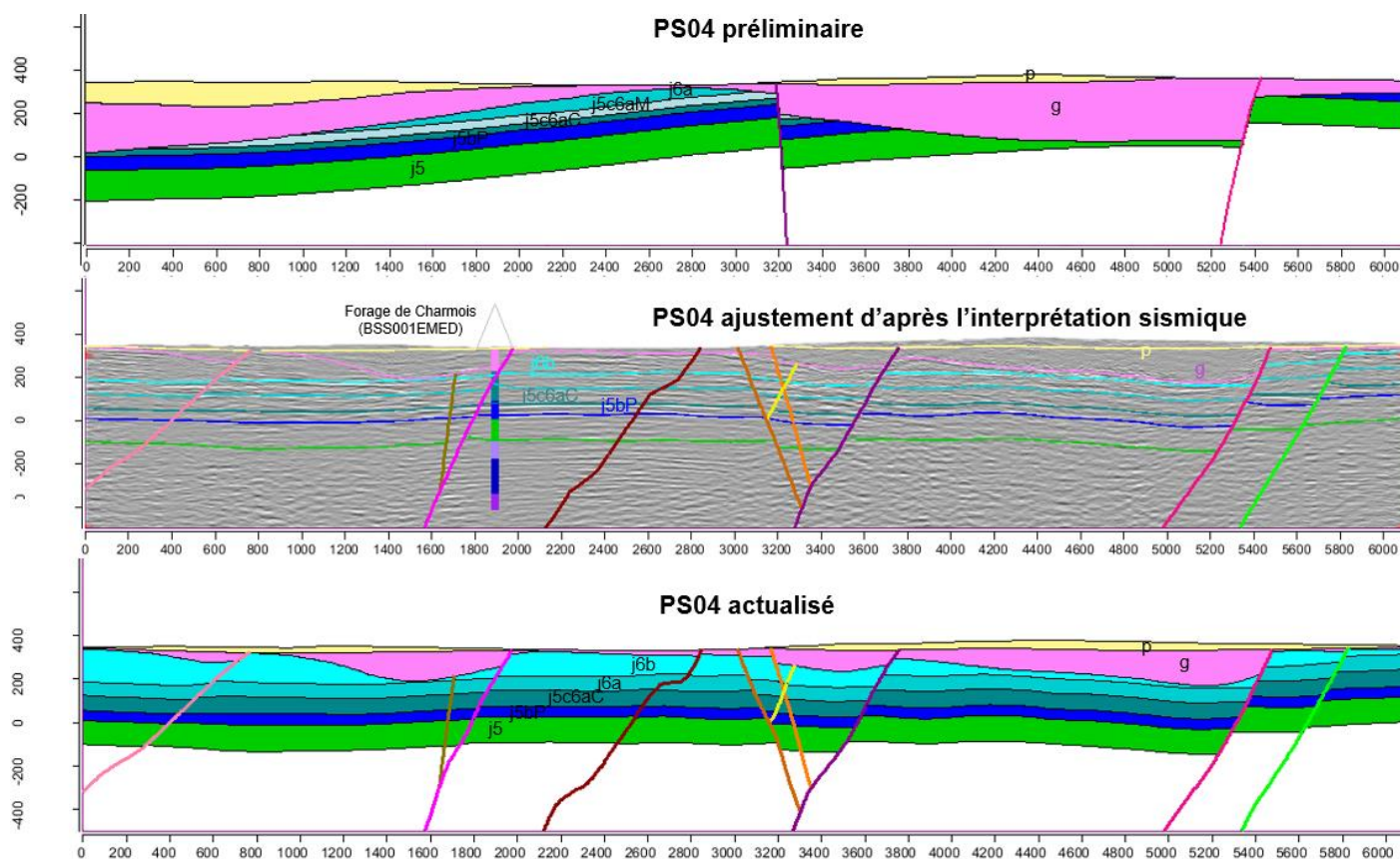


Figure 26. Ajustement de la géométrie (épaisseur, profondeur, extension) des formations suite à l'intégration et l'interprétation des profils sismiques dans le GeoModeller. Exemple du profil PS04 avant intégration des profils sismiques (modèle préliminaire) et après (modèle actualisé).

### 5.2.5. Ajustement des failles

Seize failles ont finalement été interprétées et prises en compte dans le modèle géologique 3D consolidé par la sismique. Sept d'entre elles avaient déjà été identifiées et modélisées dans le modèle géologique 3D préliminaire, 8 autres ont été relevées par l'acquisition des profils sismiques et 1 seule a été ajoutée à partir de la carte géologique.

Dans ce chapitre, la notion de faille majeure ou mineure n'a pas été détaillée car leur rejet varie d'un endroit à l'autre, à l'échelle du modèle 3D (le rejet d'une faille peut, par exemple, être important au nord du modèle et s'atténuer vers le sud).

La géométrie de ces failles a été ajustée dans un premier temps sur les 4 profils sismiques. Elle a ensuite été mis en cohérence et réajustée aussi bien en surface qu'en profondeur sur l'ensemble du volume 3D du modèle consolidé afin de tenir compte aussi bien de l'impact de ces failles sur les séries modélisées que des interactions entre elles (Figure 27).

Un exemple de processus d'ajustement complet d'un des 4 profils sismiques est présenté sur la Figure 32. L'ensemble des processus d'ajustements et résultats sont détaillés en Annexe 6 pour chacun des 4 profils sismiques.

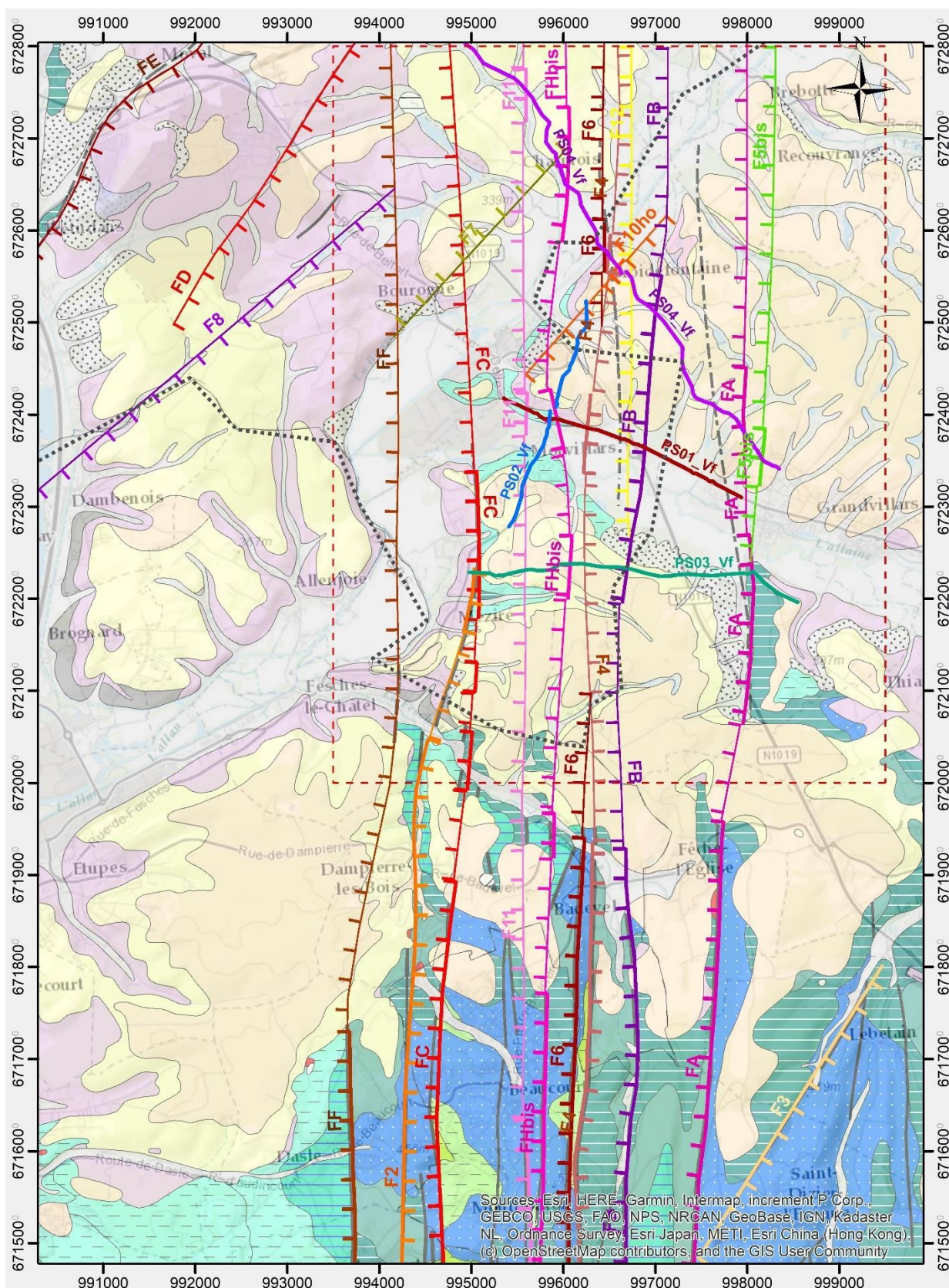


Figure 27. Carte des failles ajustées d'après l'intégration et l'interprétation des profils sismiques dans GeoModeller et modélisées à l'issue du modèle géologique 3D actualisé du Grand Belfort. Fond de carte synthétique du projet (Figure 9).

### a) Ajustement des failles déjà identifiées dans le modèle préliminaire

Sept failles avaient déjà été identifiées lors de l'étude géologique de première phase du projet (Doney et Lacquement, 2022) et prises en compte dans le modèle géologique 3D préliminaire (Figure 29 et Figure 11). Il s'agit des failles FA, FB, FC, FE, FF, F2 et F3 (notées dans certains cas avec la mention « \_maj » en référence à leur appellation dans le modèle 3D).

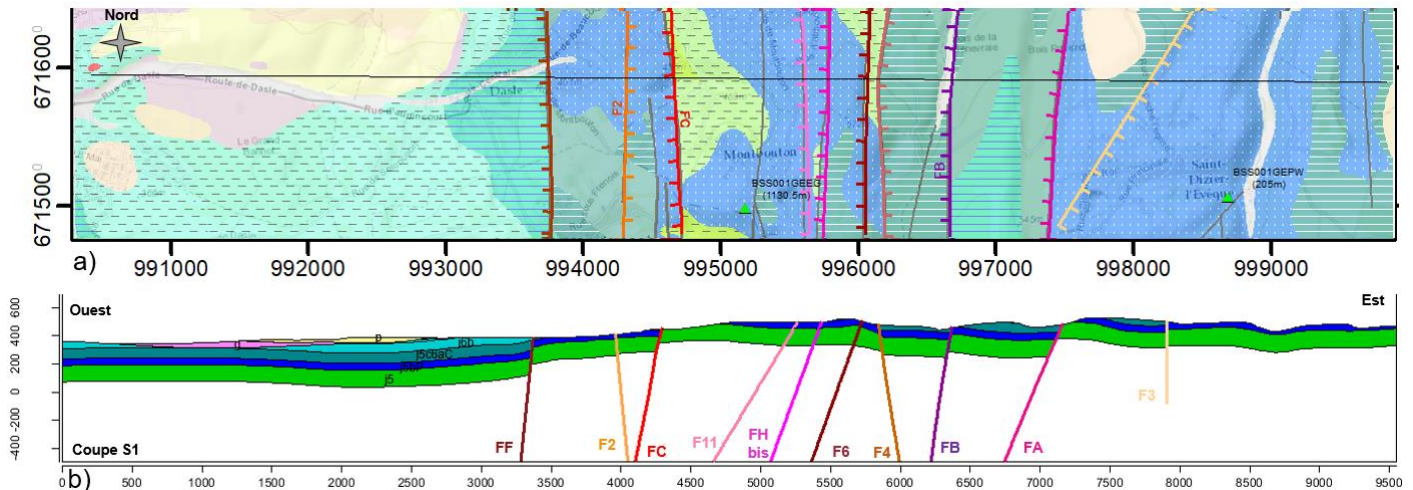


Figure 28. a) Coupe S1 au sud de la zone d'étude issue du modèle géologique 3D final du Grand Belfort (GeoModeller). b) Localisation en carte de la coupe S1 sur fond de carte géologique synthétique du projet.

Trois d'entre elles ont été recoupées par les profils sismiques, confirmant ainsi leur existence. Il s'agit des failles FA, FB, et dans une moindre mesure FC (en limite de profil). Leur géométrie 3D a été ajustée en tenant compte de l'interprétation préliminaire des profils mais aussi de l'ensemble des contraintes du volume 3D du modèle.

#### - Faille FA (ou « FA\_maj »)

La faille FA avait déjà été identifiée sur les cartes géologiques au 1/50 000<sup>ème</sup>, et nommée faille A dans l'étude géologique de première phase du projet. Elle a ensuite été repérée lors de l'interprétation préliminaire des profils sismiques sous le nom de faille **Fβ**.

Orientée N-S, elle fait partie des failles qui recoupent toute l'emprise du modèle 3D et affectent aussi bien les séries oligocènes que jurassiques.

Son tracé est identique à celui des cartes géologiques dans toute la partie sud de l'emprise du modèle (au sud de la vallée de l'Allaine). En revanche, il est décalé d'environ 280 m vers l'est dans la partie nord, après ajustement dans le modèle actualisé.

Son pendage est estimé à environ 55° vers l'ouest sur les 3 profils sismiques qu'elle recoupe, à savoir PS01, PS03 et PS04. Il apparaît plus faible que celui supposé vertical lors de l'étude géologique de première phase du projet.

Elle marque la bordure est d'un demi-graben oligocène avec un rejet de 120 m sur PS04 à 175 m sur PS01.

#### - Faille FB (ou « FB\_maj »)

La faille FB, déjà identifiée dans le modèle préliminaire, a été entièrement modifiée dans le modèle 3D aussi bien d'un point de vue tracé que d'un point de vue pendage et mouvement relatif.

Elle avait notamment été interprétée comme étant à pendage vers l'est dans la partie sud lors de l'étude géologique de la phase 1 du projet alors qu'elle apparaît clairement à pendage ouest dans les 3 profils sismiques PS04, PS01 et PS03. Son tracé a donc été décalé de 500 m vers l'est dans la partie sud du modèle et son pendage inversé vers l'ouest, en cohérence avec l'interprétation de la carte géologique au 1/50 000<sup>ème</sup> et des profils sismiques. Son ancien tracé et pendage dans la partie sud de la zone d'étude, correspond à celui de la faille F4 dans le modèle actualisé.

Il s'agit d'une faille normale orientée nord-sud et à pendage d'environ 60 à 70° vers l'ouest, qui recoupe l'ensemble du modèle 3D sur plus de 13 km d'extension. Elle borde un demi-graben oligocène avec un bloc affaissé vers l'ouest. Son rejet est d'environ, 110 m au niveau du bassin oligocène (au nord de l'emprise du modèle) et de 40 m dans les sédiments jurassiques (au sud).

#### - **Faille FC (ou FC\_maj)**

Située à l'ouest de la zone d'étude, la faille FC avait déjà été identifiée (faille C) lors de la première phase du projet. Elle correspond également à la faille  $F_{\tau}$  interprétée sur les profils sismiques avant modélisation.

Orientée nord-sud, il s'agit d'une faille qui traverse l'ensemble de l'emprise du modèle 3D. Son extension longitudinale, du nord au sud, est donc d'au moins 13,2 km.

Son tracé final est quasiment similaire à celui déjà proposé lors de la première phase du projet. Seul un décalage d'environ 400 m vers l'est a été nécessaire dans le secteur de Dampierre-les-Bois et d'environ 550 m au nord de Charmois. Son tracé en surface a été calé et mis en cohérence en profondeur à partir des profils sismiques PS03 et PS04 qu'elle recoupe à l'ouest.

Son pendage, en revanche, interprété vers le sud-est sur le profil PS04, s'est avéré incohérent avec l'interprétation en 3D de l'ensemble des formations et failles du modèle. Cette faille limite en effet un demi-graben oligocène dont le compartiment affaissé se trouve vers l'ouest, comme l'ensemble des bassins oligocènes du secteur. Un pendage vers l'ouest a donc été retenu pour cette faille.

La valeur de son pendage a été ajustée (verticalisée) autour de 80 à 85° vers l'ouest, après modélisation 3D.

Le rejet obtenu après modélisation 3D varie entre 30 et 60 m dans les formations du jurassique, respectivement sur les profils PS04 et PS03. Il est cohérent avec la carte géologique au 1/50 000 sur laquelle cette faille décale les formations du jurassique au sud vers Montbouton et borde les limites d'un demi-graben oligocène vers Méziré.

#### - **Faille FD (ou FD\_maj)**

La faille FD a été conservée d'un point de vue cartographique (dessinée sur les cartes) mais n'a finalement pas été modélisée car aucune donnée ne permet de la contraindre suffisamment (non observée à l'affleurement, pas de forages de part et d'autre ...). Elle a été remplacée par la faille F8, de même orientation mais potentiellement marquée par une incision de vallée, au nord de Dambenois.

#### - **Faille FE (ou FE\_maj)**

La faille FE avait déjà été identifiée dans l'étude géologique de première phase du projet et prise en compte dans le modèle géologique 3D préliminaire.

Située dans le coin Nord-ouest du modèle et hors zone imagée par la sismique, son tracé, son orientation et son pendage n'ont pas été modifiés dans le modèle actualisé.

Il s'agit d'une faille normale orientée NE-SO avec un pendage vers le sud-est de 65°. Elle borde un important bassin oligocène qui s'étale vers l'est sur plus de 9 km de long au nord de la zone d'étude (Figure 29).

Seule la valeur de son rejet dans la série jurassique a été modifiée, passant de 120 m dans le modèle préliminaire à plus de 250 m dans le modèle actualisé, mais sans aucune contrainte en profondeur (pas de forage profond ni de profil sismique à proximité) pour l'étayer.

#### - **Faille FF (ou FF\_maj)**

La faille FF est la faille orientée N-S située la plus à l'ouest de la zone d'étude. Elle a été identifiée au sud de carte géologique de Delle où elle décale les formations du jurassique. Elle a été prise en compte dès le début du projet et modélisée dans le modèle préliminaire.

Il s'agit d'une faille normale à pendage de 80° vers ouest qui traverse l'ensemble de la zone d'étude. Elle affecte les séries du jurassique et de l'oligocène. Seule la série pliocène n'est pas affectée conformément à l'interprétation de la carte géologique de Delle.

La faille FF affecte la série oligocène avec un rejet normal d'environ 130 m, et la série jurassique de 65 m vers l'ouest, sur la coupe F14. Ces données sont issues des résultats du modèle 3D mais restent très peu contraintes car situées dans la partie nord-ouest de l'étude où les formations jurassiques sont entièrement recouvertes par l'oligocène et les forages sont inexistantes.

La faille F2 est une faille dont l'orientation N-S avait déjà été interprétée dans le modèle préliminaire. En revanche, son pendage subvertical considéré vers l'ouest a été réévalué à 80° vers l'est dans le modèle géologique 3D final (Figure 28). Bien qu'elle affecte l'ensemble de la série du jurassique sur la moitié sud de la zone modélisée, son rejet vertical est quasi nul.

La faille F2 est située en dehors de la zone prospectée par la géophysique. Elle n'a donc pas été recoupée par les profils sismiques. Elle a été interprétée uniquement à partir de la carte géologique de Delle et contrainte par l'ensemble des données du modèle. Elle constitue une branche de faille secondaire et antithétique qui rejoint la faille FC dans le secteur de Méziré.

#### - **Faille « F3 »**

La faille F3 fait partie des rares failles NE-SO observées dans la zone d'étude. Située à l'extrémité sud du modèle, elle se trouve en dehors de la zone cible et n'a donc été interprétée qu'à partir de la carte géologique de Delle.

Il s'agit d'une faille normale à pendage subvertical d'environ 85° vers le sud-est dont le rejet vertical est quasi nul (Figure 28).

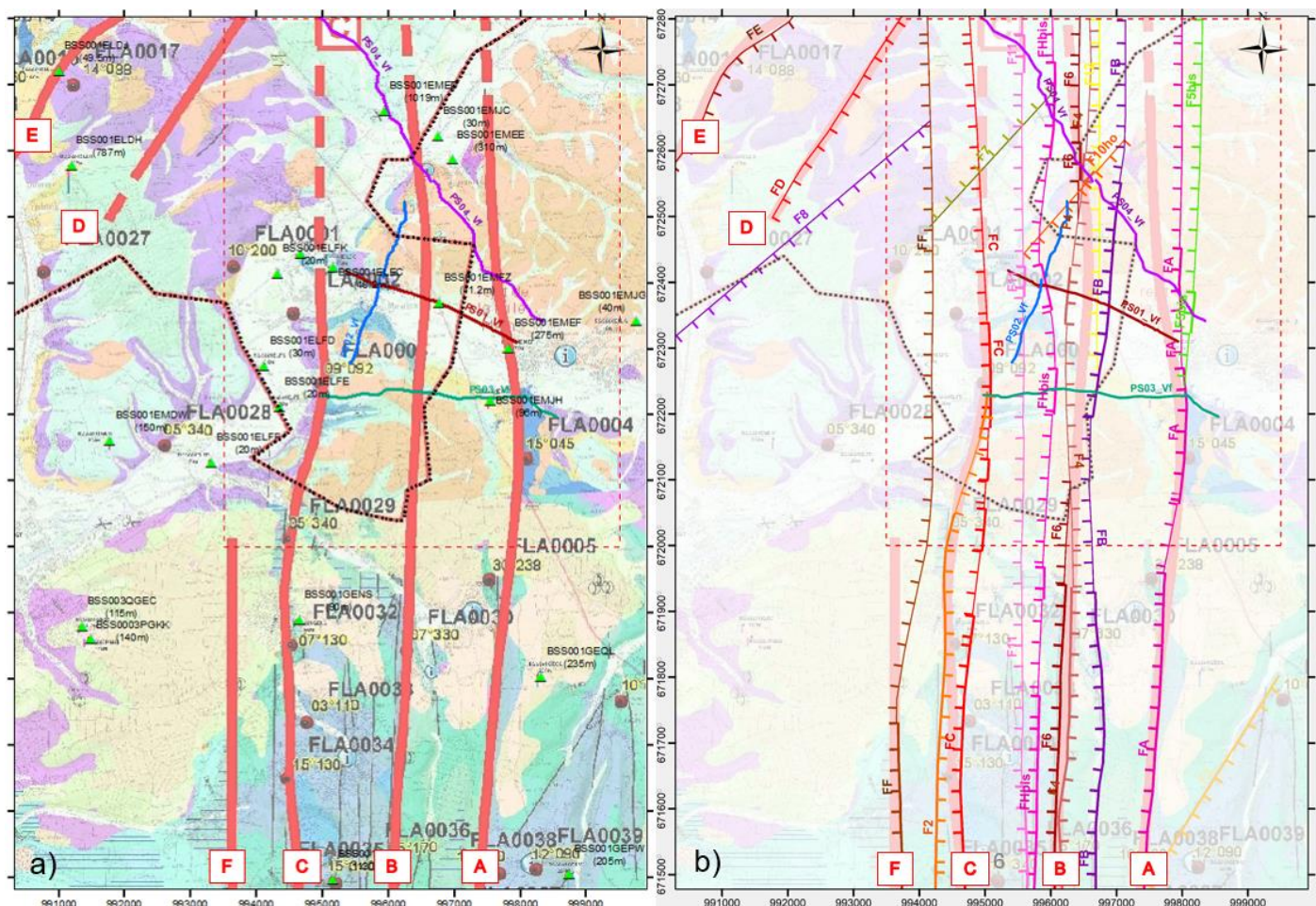


Figure 29. Carte de comparaison entre a) le tracé des failles proposé lors de l'étude géologique de première phase du projet (Doney et Lacquement, 2022) et b) le résultat du modèle géologique 3D consolidé par la sismique du Grand Belfort (logiciel BRGM GeoModeller).

**b) Ajout des nouvelles failles identifiées dans les 4 profils sismiques**

Huit nouvelles failles ont été identifiées grâce à l'acquisition des profils sismiques. Il s'agit des failles F10\_horst, F11, F4, F5\_bis, F6 et FH\_bis, F12 et F7 (Figure 30, et Tableau 7).

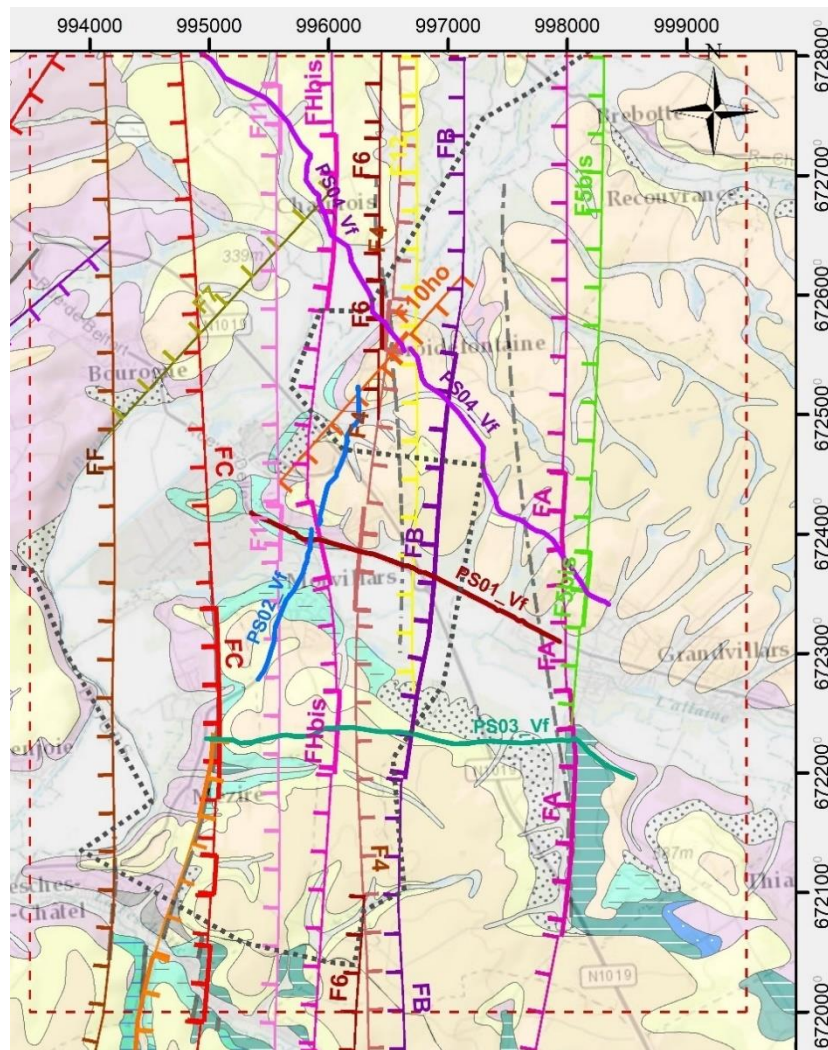


Figure 30 : Carte zoomée sur la cible hydrogéologique (encadrée en traits tillés rouges), des failles ajustées d'après l'intégration et l'interprétation des profils sismiques dans GeoModeller et modélisées à l'issue du modèle géologique 3D actualisé du Grand Belfort. Fond de carte synthétique du projet (Figure 9).

#### - Failles « F5\_bis » ou « F5 »

La faille « F5\_bis » a été identifiée et interprétée avant modélisation 3D, sur les profils sismiques PS04 (correspond à Fa) et PS03 (correspond à F $\alpha$ ). Si son pendage apparent est fortement penté vers le nord-ouest, la détermination de son orientation reste interprétative. Elle peut en effet aussi bien être orientée N-S comme la majorité des failles du secteur d'étude, que NE-SO comme le sont quelques failles minoritaires.

Les deux hypothèses ont été testées :

- Hypothèse 1 (F5-bis dans le modèle) : La faille est orientée N-S. Dans ce cas, elle est subparallèle à la faille FA sur le profil sismique PS04 et correspond à la faille « Fa » sur le profil interprété avant modélisation. Ces deux failles restent parallèles vers le nord du secteur d'étude. En revanche la faille F5-bis vient se brancher sur la faille FA au sud de la vallée de l'Allaine où ces deux failles ne font plus qu'une. La terminaison de ce branchement est bien identifiée sur le profil PS03 où la faille F5-bis correspond à la faille F1 interprétée avant modélisation ;
- Hypothèse 2 (F5 dans le modèle) : La faille est orientée NE-SO. Dans ce cas elle vient s'arrêter sur la faille FA, au nord du profil PS01 et ne recoupe pas ce dernier. Son pendage est très vertical, de 85° vers le NO. L'existence d'une telle faille est tout à fait plausible. En effet, une faille de même orientation NE-SO est mentionnée sur la carte géologique à 1/50 000<sup>ème</sup>, dans la même partie est du

secteur d'étude, mais plus au sud. Cette dernière, hors profils sismiques, est nommée FI dans le modèle final.

Dans l'hypothèse 1 où la faille est orientée nord-sud, on la retrouve sur 3 profils (PS04, PS03 et PS01), avec une grande similitude de comportement et de rejet une fois modélisée. En revanche, dans la deuxième hypothèse, elle ne recoupe que le profil PS04 et oblige à créer de nouvelles failles pour interpréter les autres profils. C'est ce qui a motivé notre choix pour conserver la faille F5-bis, d'orientation N-S.

#### - **Faille « F4 »**

La faille F4 n'a pas été identifiée via l'interprétation préalable des profils sismiques. Elle a été ajoutée à la suite des modifications faites sur la faille FB dans le modèle géologique 3D actualisé. Cette dernière a en effet été décalée vers l'est et son pendage rectifié vers l'ouest pour être en accord avec la carte géologique et les profils sismiques. La faille F4 reprend donc le tracé et le pendage de l'ancienne faille FB, dans la partie sud du modèle uniquement. Elle a ensuite été prolongée vers le nord et interprétée directement dans le modèle 3D actualisé (point de passage et pendage contraints à partir des réflecteurs du profil PS01).

Il s'agit d'une faille normale orientée N-S à pendage vers l'est d'environ 75°. Elle n'affecte pas les séries oligocènes et pliocènes mais affecte les séries jurassiques sous-jacentes avec un rejet d'environ 35 à 45 m. Elle s'arrête sur la faille FB de pendage opposé (antithétique) avec laquelle elle délimite un graben bien identifié sur les 3 profils PS04, PS01 et PS03.

#### - **Faille « F6 »**

La faille normale F6 a été ajoutée directement dans le modèle 3D actualisé, à partir de l'interprétation de la carte géologique au sud de la zone d'étude.

Il s'agit d'une faille orientée N-S, située à moins de 250 m à l'ouest de la faille F4.

Orientée N-S, son tracé est subparallèle à la faille F4 au sud et au nord du modèle mais est confondu avec cette dernière au centre du modèle. En effet, sa prolongation vers le nord montre qu'elle recoupe les profils PS03, PS02 et PS01 sans qu'elle puisse être différenciée de la faille F4. D'un point de vue cartographie, on considère donc que la faille F6 vient se brancher sur la faille F4 avant d'atteindre la vallée de l'Allaine. En revanche, dans la partie Nord du modèle, elle réapparaît sur le profil PS04 selon la faille Fb déjà repérée lors de l'interprétation préliminaire des profils sismiques.

Son pendage, opposé à la faille F4, est d'environ 70° vers l'ouest. Son rejet, de quelques mètres seulement, montre un mouvement en faille normale.

#### - **Faille « F10\_horst »**

Elle est déduite de l'interprétation du profil PS04 migré en profondeur. Elle recoupe les 3 profils PS01, PS02 et PS04. Un premier test de modélisation a été réalisé avec une orientation NE-SO et un pendage de 65° vers le SE, perpendiculairement au profil. Un deuxième test a ensuite été réalisé avec une orientation N-S plus classique pour le secteur. Celui-ci s'est avéré non concluant car les recoupements engendrés par une telle orientation sur les autres profils étaient incohérents. Son orientation et son pendage finalement retenus est N-E-SO avec un pendage en moyenne de 70° vers le SE. Elle fait donc partie de l'ensemble des failles secondaires globalement orienté NE-SO. D'un point de vue cartographique, elle s'arrête sur la faille FB.

#### - **Faille « F12 »**

La faille F12 a été identifiée lors de l'interprétation du profil sismique PS01. Elle affecte toutes les séries du jurassique mais pas celles de l'oligocène et du pliocène sus-jacentes. Un pendage apparent de 65° vers l'ouest lui a été associé dans le modèle. Elle est subparallèle à FB au nord de la vallée de l'Allaine où elle

recoupe les profils sismiques PS04 et PS01, puis vient se brancher sur elle au sud de la vallée (n'apparaît plus sur le profil PS03). Elle s'arrête sur la faille conjuguée F4.

- **Faille « FH\_bis »**

La faille FH\_bis n'avait pas été retenue ni lors de l'étude de phase 1, ni pour la construction du modèle préliminaire. En revanche, elle a été repérée sur les profils PS04 (faille nommée Fc) et PS01 (faille nommée Fh), sous un bassin oligocène.

La modélisation de cette faille a montré qu'il s'agissait d'une faille normale orientée N-S, qui recoupe l'ensemble des 4 profils sismiques. Sa localisation et son pendage ont été réajustés sur l'ensemble des profils et mis en cohérence avec la carte géologique en surface. Son tracé a notamment été décalé de 200 m vers l'est sur le profil PS04, et prolongé vers le sud en cohérence avec une faille existante de la carte géologique.

Le pendage estimé après modélisation est moins penté que celui de l'interprétation préliminaire. Il varie entre 60 et 80° vers l'ouest.

Cette faille normale borde un demi-graben oligocène sur le profil PS04, avec un rejet estimé à une quinzaine de mètres dans les formations jurassiques sous-jacentes.

- **Faille « F11 »**

La faille F11 n'avait pas été retenue lors de l'étude de phase 1, et de fait, pour la construction du modèle préliminaire. En revanche, elle a été repérée sur les profils PS04 (faille nommée Fc) et PS01 (faille nommée Fh) lors de l'interprétation préalable des profils hors GeoModeller, ainsi que sur le profil PS02 après intégration dans le GeoModeller.

Il s'agit d'une faille normale pentée d'environ 60° vers l'ouest. Elle affecte la série oligocène dans la partie nord du modèle, à l'extrémité ouest du profil PS04, avec un rejet d'environ 85 m vers l'ouest. En revanche, elle n'affecte que très faiblement (~20 m) la série jurassique, quel que soit le profil sismique considéré.

- **Faille « F7 »**

La faille F7 a été identifiée sous le nom de faille Fc sur le profil sismique PS04 lors de l'interprétation préliminaire des profils, sous un bassin oligocène (son éventuel impact sur le bassin oligocène n'est du moins pas détectable sur le profil). En revanche, elle n'a été retrouvée sur aucun des autres profils. Son orientation a donc été interprétée dans le modèle actualisé comme possiblement NE-SO, comme celle des failles F10\_horst, F8 et F3. Son pendage subvertical sur le profil PS04 a été estimé à environ 80° vers le NO dans le modèle actualisé. Son rejet est négligeable. Cette faille a été considérée comme secondaire dans le modèle actualisée et limitée à l'ouest par la FF\_maj, et à l'est par la faille Fh\_bis, sur lesquelles elle vient se brancher.

**c) Autre faille ajoutée, hors profils sismiques**

- **Faille « F8 »**

La faille F8 est la seule faille ajoutée pour affiner le modèle actualisé en dehors des zones imagées par la sismique. La géométrie de cette faille a été interprétée en profondeur, uniquement à partir de l'interprétation des données de surface fournies par les cartes géologiques (Figure 27).

Il s'agit d'une faille normale orientée NE-SO, à pendage de 70° vers le SE. Non observée à l'affleurement, elle semble souligner deux vallées au nord de Dambenois et Bourogne sans affecter, a priori, les séries oligocène et pliocène. En revanche, d'après le résultat de la modélisation 3D, elle affecterait la série

jurassique avec un rejet vers le SE de plus de 250 m. Aucune donnée profonde ou de surface ne permet cependant d'étayer l'existence même de cette faille.

#### d) Formations affectées par les failles

La série pliocène, recouvre l'ensemble des séries sous-jacentes et masquent les failles qui y sont associées. Cette série est donc considérée comme non affectée par les failles dans le processus de modélisation.

En revanche, la majorité des failles de la zone d'étude affecte l'ensemble des séries oligocène et jurassique, en particulier les failles qui bordent les grabens oligocènes (failles F10\_horst, F11, F2, F3, F4, , F6, FA\_maj, FB\_maj, FC\_maj, FE\_maj, FF\_maj et FH\_bis).

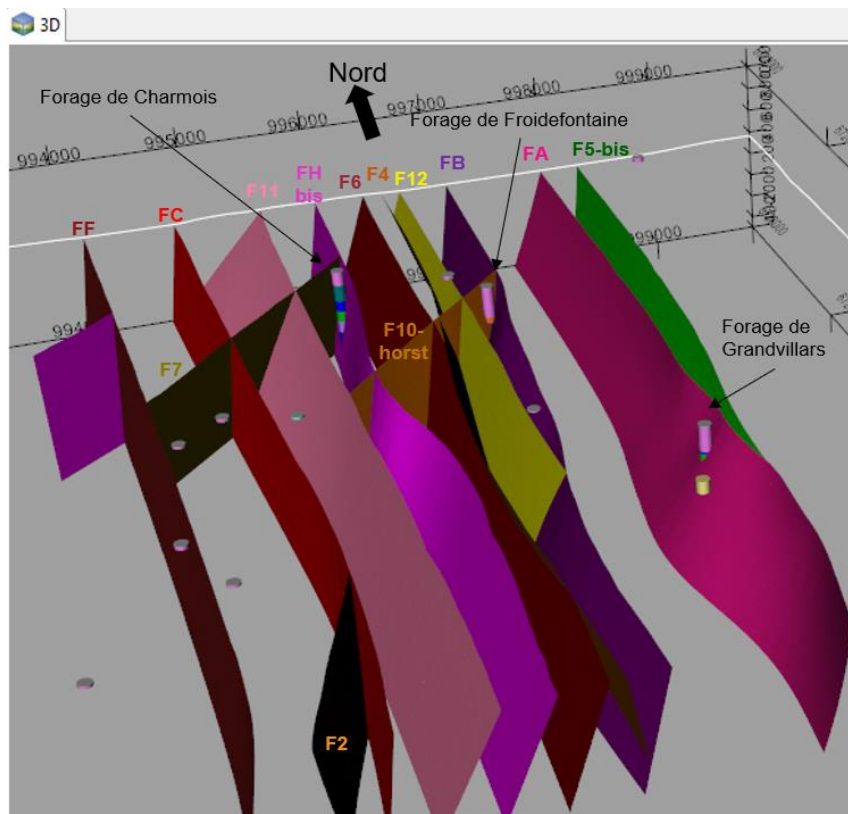
Le détail des relations entre chaque faille et chaque série de formations est présenté dans le Tableau 6.

#### e) Interaction/Relation entre les failles

À grande échelle, le schéma géologique structural montre que les failles orientées N-S sont majoritaires et dominantes sur l'ensemble de la région (Figure 6). C'est également le cas sur la zone d'étude, sur laquelle 11 failles orientées N-S ont été modélisées (Figure 27). Il s'agit, de l'ouest vers l'est, des failles FF, F2, FC, F11, FHbis, F6, F4, F12, FB, FA et F5bis.

Il existe également une deuxième orientation de faille, NE-SO, présente dans le secteur de la cible hydrogéologique (Figure 31). À l'échelle régionale, ces failles s'arrêtent généralement sur les failles orientées N-S (Figure 7). C'est donc la tendance qui a été retenue pour la modélisation 3D des 5 failles NE-SO interprétées sur l'emprise du modèle (Figure 27). Il s'agit, du nord-ouest vers le sud-est, des failles FE, F8, F7, FH10\_horst, et F3.

Le tableau définissant la relation entre les failles du modèle est présenté ci-après (Tableau 7). Lorsqu'une faille de la colonne de gauche s'arrête sur une autre faille de la colonne de droite, cette dernière est marquée par une coche verte. La représentation géométrique 3D des failles au sein du Géomodèleur est illustrée en Figure 31. Vue 3D de l'interaction/Relation entre les failles modélisées dans l'emprise de la cible hydrogéologique. Modèle géologique 3D final du Grand Belfort (logiciel BRGM GeoModeller).Figure 31.



Acquisition sismique et construction d'un modèle géologique 3D pour préciser l'implantation de forages de reconnaissance hydrogéologique dans les calcaires du jurassique du Grand Belfort

*Figure 31. Vue 3D de l'interaction/Relation entre les failles modélisées dans l'emprise de la cible hydrogéologique. Modèle géologique 3D final du Grand Belfort (logiciel BRGM GeoModeller).*

Tableau 6. Tableau de relation entre les failles du modèle géologique 3D final du grand Belfort (extrait du GeoModeller).

Link Faults with Faults

Stops on	F10_horst	F11	F12	F2	F3	F4	F5_bis	F6	F7	F8	FA_maj	FB_maj	FC_maj	FE_maj	FF_maj	FH_bis
F10_horst		✓										✓				
F11																
F12						✓						✓				
F2													✓			
F3																
F4												✓				✓
F5_bis											✓					
F6						✓							✓			
F7															✓	✓
F8													✓		✓	
FA_maj																
FB_maj																
FC_maj																
FE_maj																
FF_maj																
FH_bis																

Tableau 7. Tableau de relation entre les failles et les série de formations du modèle géologique 3D final du grand Belfort (extrait du GeoModeller)

Link Faults with Series

Series \ Faults	F10_horst	F11	F12	F2	F3	F4	F5_bis	F6	F7	F8	FA_maj	FB_maj	FC_maj	FE_maj	FF_maj	FH_bis
p_Pliocene_Series																
g_Oligocene_Series	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
j5_j6_Oxf_Kimeridgien_Series	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

### **5.2.6. Résultat des ajustements sur les profils sismiques**

Différents ajustements de la géométrie sous couverture des formations et des failles ont été réalisés grâce à l'intégration et l'interprétation des 4 profils sismiques acquis lors de ce projet.

Ils ont notamment permis d'actualiser la géométrie des 7 formations modélisées en termes d'extension, profondeur, épaisseur, discontinuité, plissement) ainsi que celle de 17 failles en termes d'orientation, pendage et rejet (décalage des formations de part et d'autre de la faille).

Plusieurs étapes d'ajustements ont été nécessaires depuis la réalisation du modèle géologique 3D préliminaire à partir des données disponibles, l'acquisition et l'interprétation préalable des profils sismiques en 2D, l'intégration de ces profils et leur réinterprétation en 3D contrainte par l'ensemble des données disponibles et acquises (MNT, contours des formations et failles en surface, mesures structurales, forages et profils sismiques acquis). Un exemple de processus d'ajustement est donné pour le profil sismique PS03 (Figure 32).

La force de ce travail d'interprétation intégrant tout le volume 3D et les structures géologiques du modèle a permis d'obtenir les résultats en coupes rassemblées ainsi que le résultat en carte présentée sur la Figure 33.

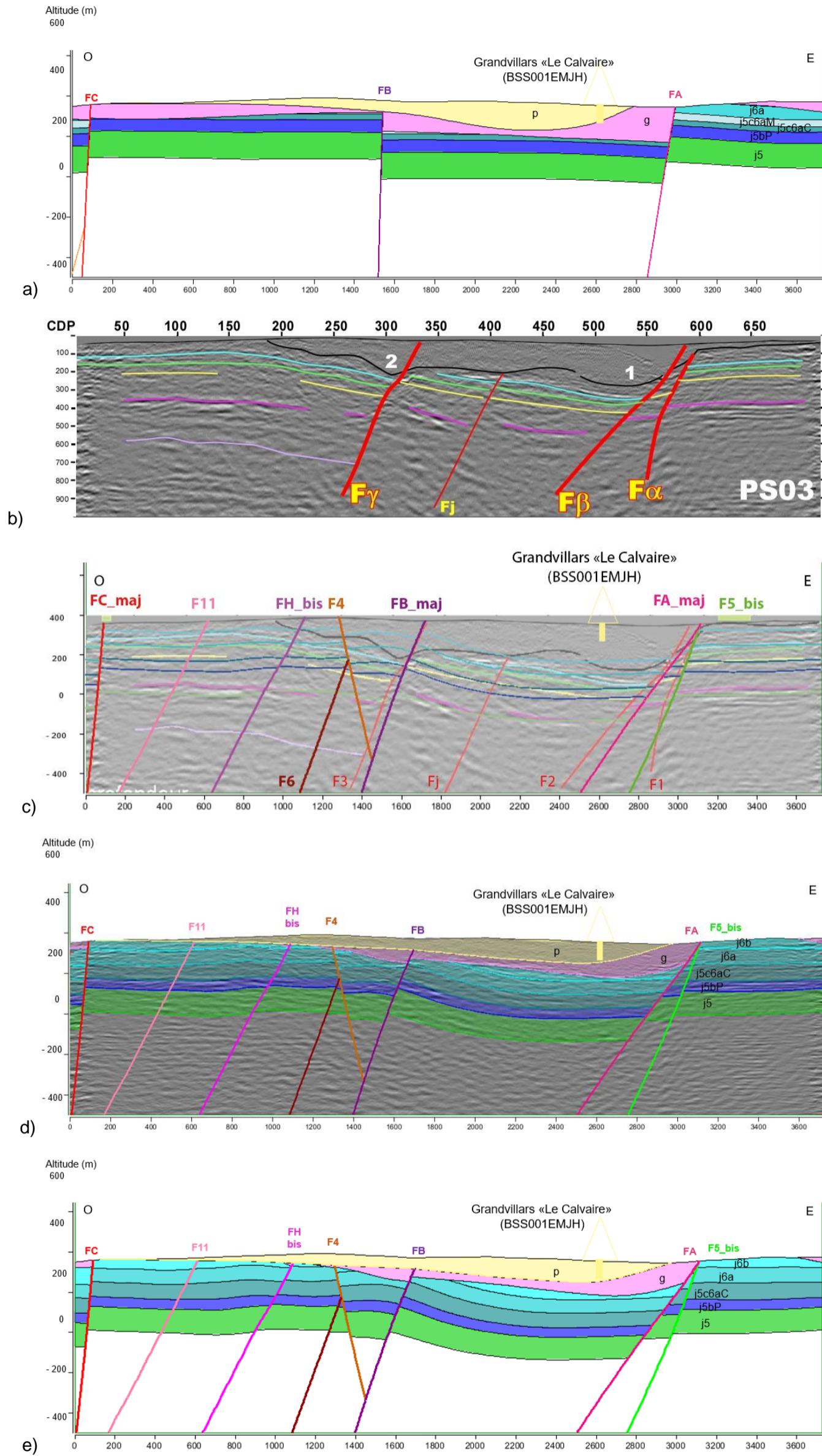


Figure 32. Étapes d'ajustement du modèle géologique 3D et résultat des interprétations sur le profil sismique PS03.

a) Modèle préliminaire avant acquisitions sismiques. b) Interprétation préalable du profil sismique avant intégration dans le modèle. c) Ajustement des limites de formation et des failles interprétés dans le modèle. d) et e) Résultats des interprétations 3D dans le modèle final.

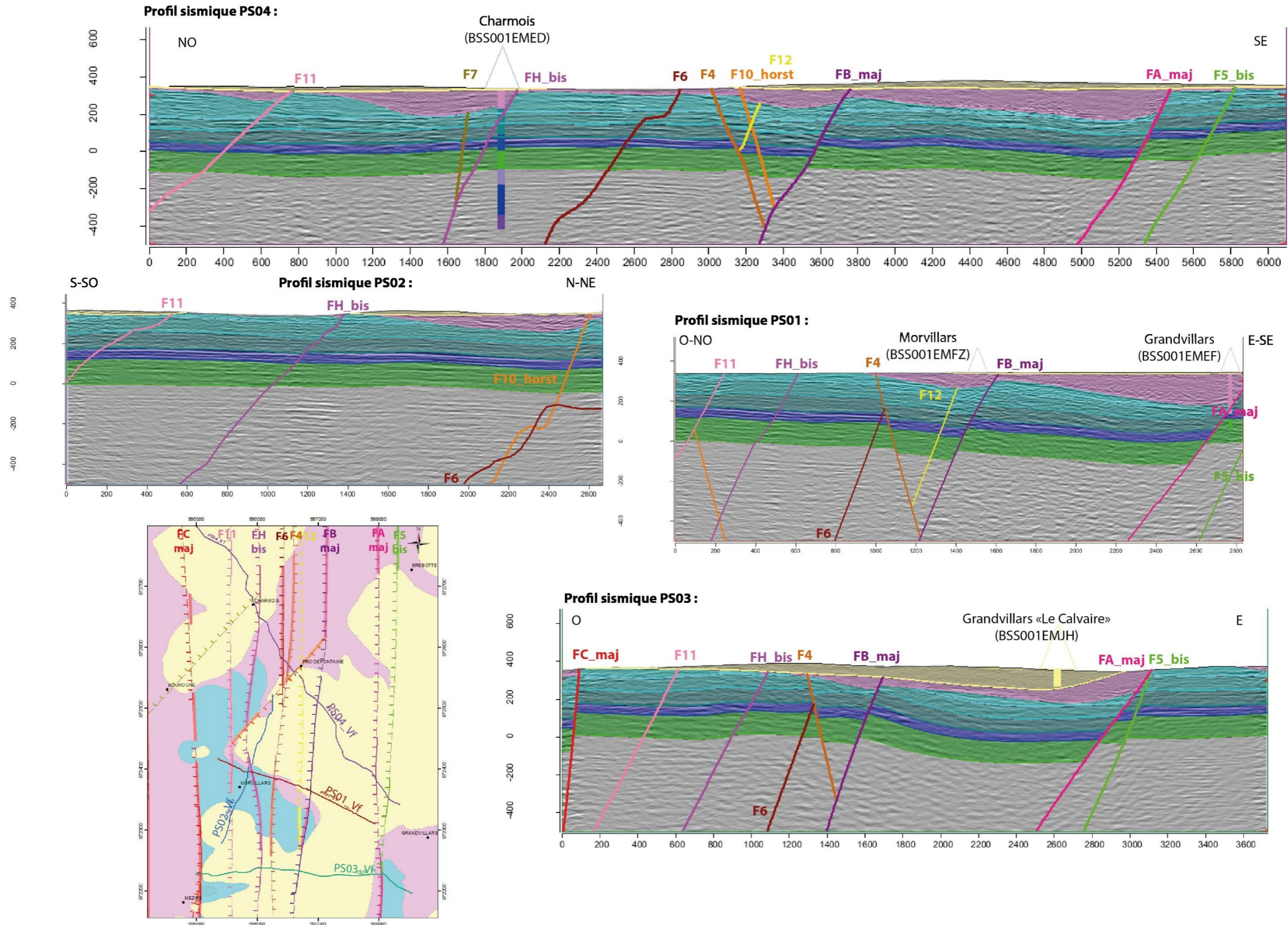


Figure 33. Profils sismiques interprétés d'après le résultat du modèle géologique 3D final



### 5.3. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION DU MODÈLE GÉOLOGIQUE 3D CONSOLIDÉ

L'intégration dans le logiciel GeoModeller permet de passer à une modélisation 3D des objets géologiques, d'identifier les incohérences et d'affiner les interprétations afin d'obtenir un modèle cohérent rendant compte des géométries des couches géologiques et des failles les affectants. Les données de la carte géologique couplées aux interprétations des profils sismiques calés sur les forages à proximité fournissent un cadre de données de qualité permettant d'interpréter et d'actualiser la géométrie 3D.

La construction du modèle géologique 3D du Grand Belfort, réalisée à l'aide du logiciel BRGM « GeoModeller », a permis d'intégrer l'ensemble des données déjà disponibles (1 MNT, 4 cartes, 23 forages, 57 mesures structurales) mais aussi celles nouvellement acquises (4 profils sismiques). Il a donc été nécessaire de mettre en cohérence et d'interpréter en 3 dimensions les résultats obtenus après modélisation, de manière itérative, tout au long du projet et sur l'ensemble du volume 3D du modèle

Le modèle géologique 3D final correspond au modèle actualisé obtenu après intégration et interprétation des profils sismiques et mise en cohérence avec l'ensemble des données du modèle géologique préliminaire (Figure 34).

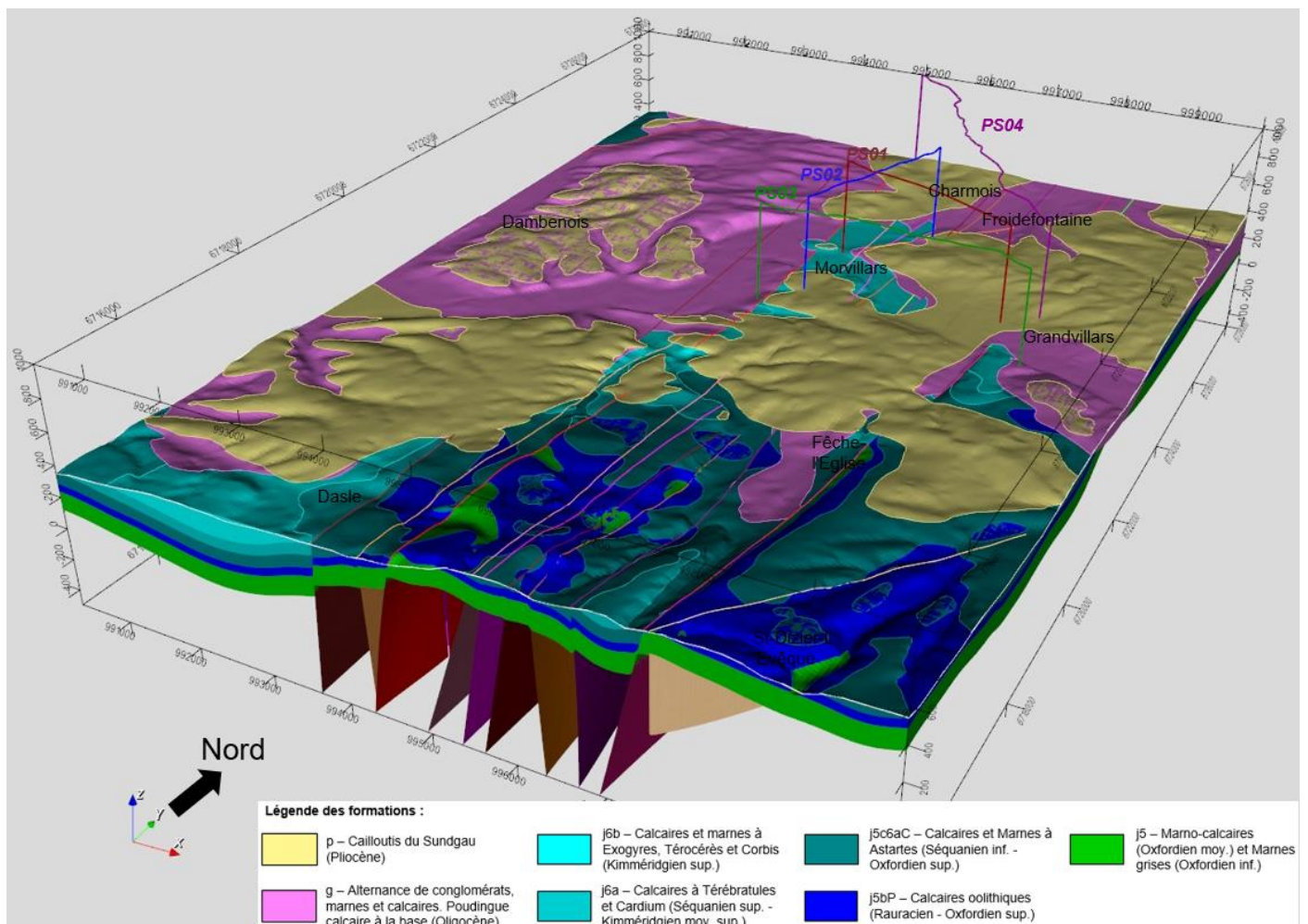


Figure 34. Vue 3D du modèle géologique 3D final du Grand Belfort (logiciel BRGM GeoModeller), réalisé des données de MNT, cartes géologiques, mesures structurales, forages et profils sismiques. Exagération verticale X2.



### 5.3.1. Pile géologique finale du modèle actualisé

À la suite de la modélisation 3D de l'ensemble des formations et failles du modèle intégrant l'interprétation des 4 profils sismiques acquis dans le cadre de ce projet, la pile lithologique du modèle géologique 3D a été actualisée Figure 25.

La pile lithostratigraphique du modèle géologique 3D final prend en compte les formations de la couverture pliocène et oligocène qui recouvre les formations jurassiques ainsi que toutes les formations carbonatées de la série jurassique présentes jusqu'à 400 m de profondeur. Les limites des formations jurassiques ont été définies selon 3 groupes de nature plus ou moins aquifères : Calcaires (plutôt aquifères), Calcaires et Marnes (plutôt semi-aquifères), et Marnes (plutôt imperméables).

La pile lithostratigraphique comprend, de la plus récente à la plus ancienne Figure 35) :

- La série pliocène (p) représentée par les Cailloutis dits du « Sundgau ». Son épaisseur modélisée varie de 30 à 100 m ;
- La série de l'oligocène (g) essentiellement constituée d'une alternance de conglomérats, marnes et calcaires. Elle est généralement marquée par un niveau de poudingues calcaires à la base. Son épaisseur modélisée varie de 85 à 300 m ;
- La série du jurassique supérieur regroupant 5 formations :
  - o La formation du kimméridgien supérieur (j6b), constituée de calcaires et Marnes à Exogyra virgula, calcaires et marnes à Ptérocères et de calcaires à Corbis. Elle est la plus épaisse des calcaires jurassiques. Son épaisseur est estimée dans le modèle 3D final entre 50 m lorsqu'elle est érodée par l'oligocène mais peut atteindre jusqu'à 100 m d'épaisseur à proximité des failles qui limitent les demi-grabens ;
  - o La formation du kimméridgien inférieur (j6a), constituée de calcaires à térébratrules et de calcaires crayeux à Cardium. Son épaisseur modélisée varie entre 60 et 70 m d'épaisseur en moyenne ;
  - o La formation du kimméridgien inférieur – oxfordien supérieur (faciès séquanien (j5c6aC), constituée de calcaires fins et de Marnes à Astartes. Son épaisseur moyenne obtenue après modélisation est de 70 m à 80 m au maximum ;
  - o La formation de l'oxfordien supérieur (faciès rauracien) (j5bP), constituée de calcaires oolithiques. Elle est la formation aquifère ciblée pour le projet. Son épaisseur modélisée est de l'ordre de 50 m d'épaisseur ;
  - o La formation de l'oxfordien moyen et inférieur (j5), représentée par un niveau de marno-calcaires au sommet, mais essentiellement constituée de marnes grises sur 100 à 140 m d'épaisseur d'après le modèle final. Elle constitue l'aquitard de la formation sus-jacente (j5bP).
  - o Pour rappel, les formations du Dogger (jurassique moyen) n'ont pas été modélisées car en deçà de la limite des 300 à 400 m de profondeur maximale souhaitée pour l'implantation du forage d'exploration de l'aquifère.

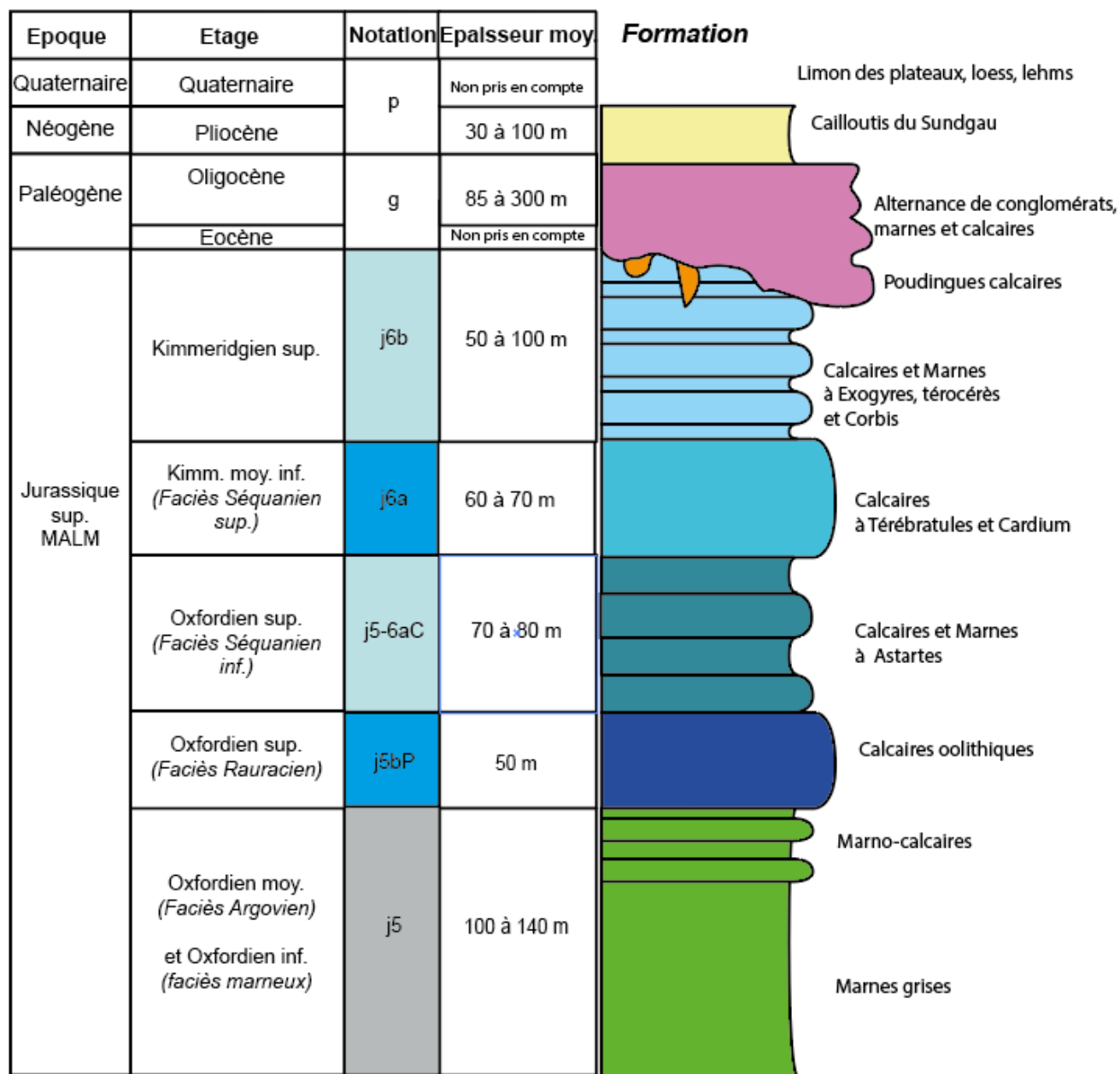


Figure 35. Pile lithostratigraphique finale d'après les résultats du modèle géologique 3D actualisé par la sismique. Dans la colonne « notation, la couleur bleue indique une formation à tendance « aquifère », bleu pâle une formation à tendance « semi-aquifère » et grise une formation à tendance « aquitard ».

### 5.3.2. Géométrie des formations géologiques

La géométrie des formations géologiques obtenue à l'issue du modèle géologique 3D final du Grand Belfort est présentée ici, soit à travers des coupes directement extraite du GeoModeller, soit en s'appuyant sur des cartes d'épaisseur et de profondeur du mur des formations. Les épaisseurs et profondeurs y sont représentées à travers des grilles de valeurs, extraites du GeoModeller puis importées et mise en forme dans un SIG (ArcMap).

Les résultats du modèle géologique 3D final montrent que l'ensemble des formations modélisées plongent de manière régulière vers le nord avec une légère ondulation (Figure 36).

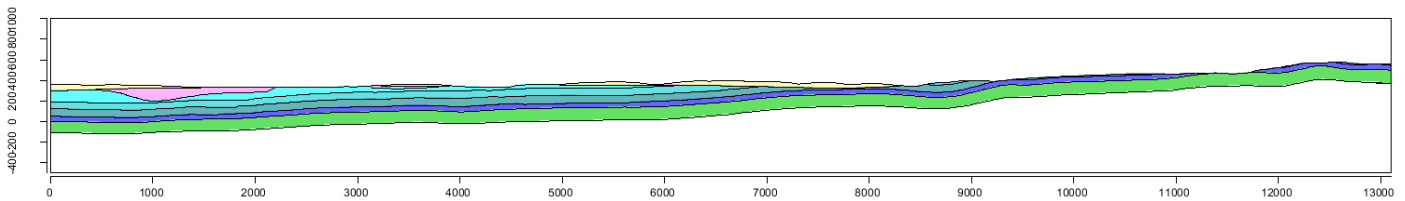


Figure 36. Coupe N-S montrant le plongement vers le nord de l'ensemble des formations du modèle géologique 3D final du Grand Belfort (extrait GeoModeller).

La série pliocène (p) se répartie selon deux larges bandes orientées NE-SO de part et d'autre de la vallée de l'Allan et de la Bourbeuse (Figure 38). Elle recouvre une grande partie des sédiments oligocènes et repose parfois directement sur la série jurassique (Figure 37). Son épaisseur est en moyenne de 30 m. Elle atteint plus de 100 m au sud de l'Allaine juste à l'ouest du forage BSS001EMJH entre les failles FB et FA, ou encore à 2 km au nord-est de Fêche l'Eglise, et à 1 km au nord-ouest de Dasle (Annexe 7).

La série oligocène (g) couvre les ¾ nord-ouest de la zone d'étude, masquant une grande partie des séries jurassique sous-jacentes (Figure 41). Elle se répartit globalement selon deux grands bassins d'axes N-S, délimités par deux failles antithétiques (FC et F4) qui forment un horst (haut géologique) au centre de la zone d'étude (Annexe 7). Le bassin occidental se prolonge jusqu'au sud tandis que celui à l'est reste cantonné dans la zone définie par la cible hydrogéologique). De manière plus locale, il forme plusieurs demi-graben bordés par les failles N-S. Sa géométrie en éventail, caractéristique d'un remplissage synsédimentaire, est étroitement liée au jeu de ces failles normales, généralement à vergence ouest (Figure 37). L'épaisseur de l'oligocène est donc plus importante à proximité des failles qui l'affectent. C'est particulièrement le cas au nord de Froidefontaine où l'oligocène atteint 300 m à l'ouest de la faille FA (Figure 37). L'épaisseur de l'oligocène est en moyenne de 85 m si l'on considère l'ensemble de la zone d'étude.

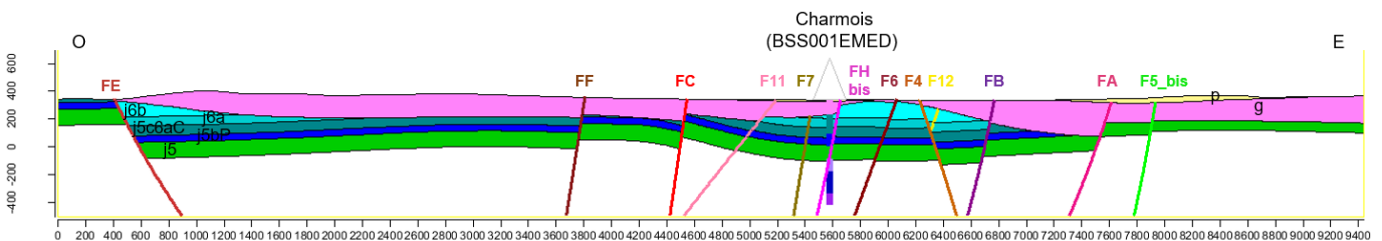


Figure 37. Coupe à travers les 2 grands bassins oligocènes, au nord de la zone d'étude du Grand Belfort. Résultat issu du modèle géologique 3D final (Extraction GeoModeller). À noter que l'épaisseur de l'oligocène modélisée au niveau de la faille FA sur cette coupe est probablement exagérée car peu contrainte en bordure NE du modèle.

Les formations calcaires de la série jurassique (j6b à J5bP) sont formées de calcaires alternants avec des marnes jusqu'à atteindre la formation aquifère des calcaires du rauracien (j5bP, oxfordien sup.) ciblée pour le projet. Elles sont généralement érodées par la série oligocène qui la recouvre et n'affleurent qu'au sud de la zone d'étude (Figure 9). La présence, la répartition ainsi que l'épaisseur de ces formations varient donc en fonction de cette couverture tertiaire.

En revanche, la formation marneuse (j5, oxfordien inf.) qui constitue la base aquitard de la série jurassique, est présente sur l'ensemble du sous-sol de la zone d'étude, avec une épaisseur relativement constante (Annexe 7). Elle n'est en effet que très rarement impactée par l'érosion.

Le détail de la géométrie de l'ensemble des formations de la série jurassique est donné ci-dessous :

- les calcaires et marnes j6b du kimméridgien supérieur n'affleurent que dans la partie sud-ouest de la zone d'étude (Figure 9). On les retrouve notamment à l'ouest de la faille FF, au sud de Dampierre les Bois entre les failles FC et F11, et au centre de l'emprise de la cible hydrogéologique Morvillars – Méziré) entre les failles FC à l'ouest et FB à l'est (Annexe 7). De 50 m d'épaisseur en moyenne, cette

formation atteint plus de 100 m à Fesches le Châtel et le Rondelot au centre de la zone d'étude, ainsi que vers Charmois au nord ;

- les calcaires j6a du kimméridgien inférieur sont présents sur la moitié nord-ouest de la zone d'étude. Seules deux trouées liées à l'érosion de cette formation par l'oligocène, apparaissent au nord et au sud de ce secteur (Annexe 7). L'absence du j6a sur la moitié sud-est s'explique également par son érosion, soit par l'oligocène sus-jacente, soit par la géomorphologie actuelle (relief). L'épaisseur du j6a varie entre 60 et 70 m ;
- les calcaires et marnes du séquanien j5c6aC (kimméridgien inférieur - oxfordien supérieur) sont quasi présents sur l'ensemble du sous-sol la zone d'étude. Tout comme la formation j6a sus-jacente, leur absence s'explique par l'érosion (oligocène et/ou quaternaire). L'épaisseur du j5c6C varie autour de 70 m (Annexe 7). Seuls quelques points très localisés atteignent 80 m d'épaisseur, notamment au sud de Morvillars et le long du profil sismique PS03 ;
- les calcaires du rauracien j5bP (oxfordien supérieur) sont présents sur l'ensemble du sous-sol de la zone d'étude. Seule une trouée à l'extrémité nord-est de la zone atteste de son érosion par oligocène (Annexe 7). L'épaisseur de cette formation est constante autour de 50 m ;
- les marnes et marno-calcaires de l'argovien j5 (oxfordien moyen et inférieur) sont présents sur l'ensemble de la zone d'étude avec une épaisseur relativement constante. Elle varie entre 120 et 140 m sur les  $\frac{3}{4}$  sud-est de la zone d'étude, et entre 100 et 120 m sur le reste de la zone (Annexe 7).

Deux cartes d'épaisseurs cumulées ont été réalisées afin de distinguer la couverture pliocène-oligocène de l'aquifère carbonaté des calcaires jurassiques. Elles ont été obtenues en additionnant les grilles de valeur des formations concernées :

- la carte d'épaisseur cumulée de la couverture pliocène et oligocène montre des épaisseurs de recouvrement importantes, atteignant plus de 150 m entre les failles FB et FA et jusqu' à 300 m au nord-est de Froidefontaine (Figure 38). Ces épaisseurs associées à une lithologie complexe constituée de conglomérats, marnes et calcaires, seront à considérer lors pour la réalisation du forage ;
- la carte d'épaisseur cumulée des calcaires jurassiques (j6b, j6a, j5c6aC, et j5bP), hors formation marneuse (j5), montre que les épaisseurs cumulées des calcaires aquifères et calcaires et marnes semi-aquifères peut atteindre plus de 200 m sur une grande partie de la moitié ouest de la zone cible, et donc de la limite du Grand Belfort (Figure 39).

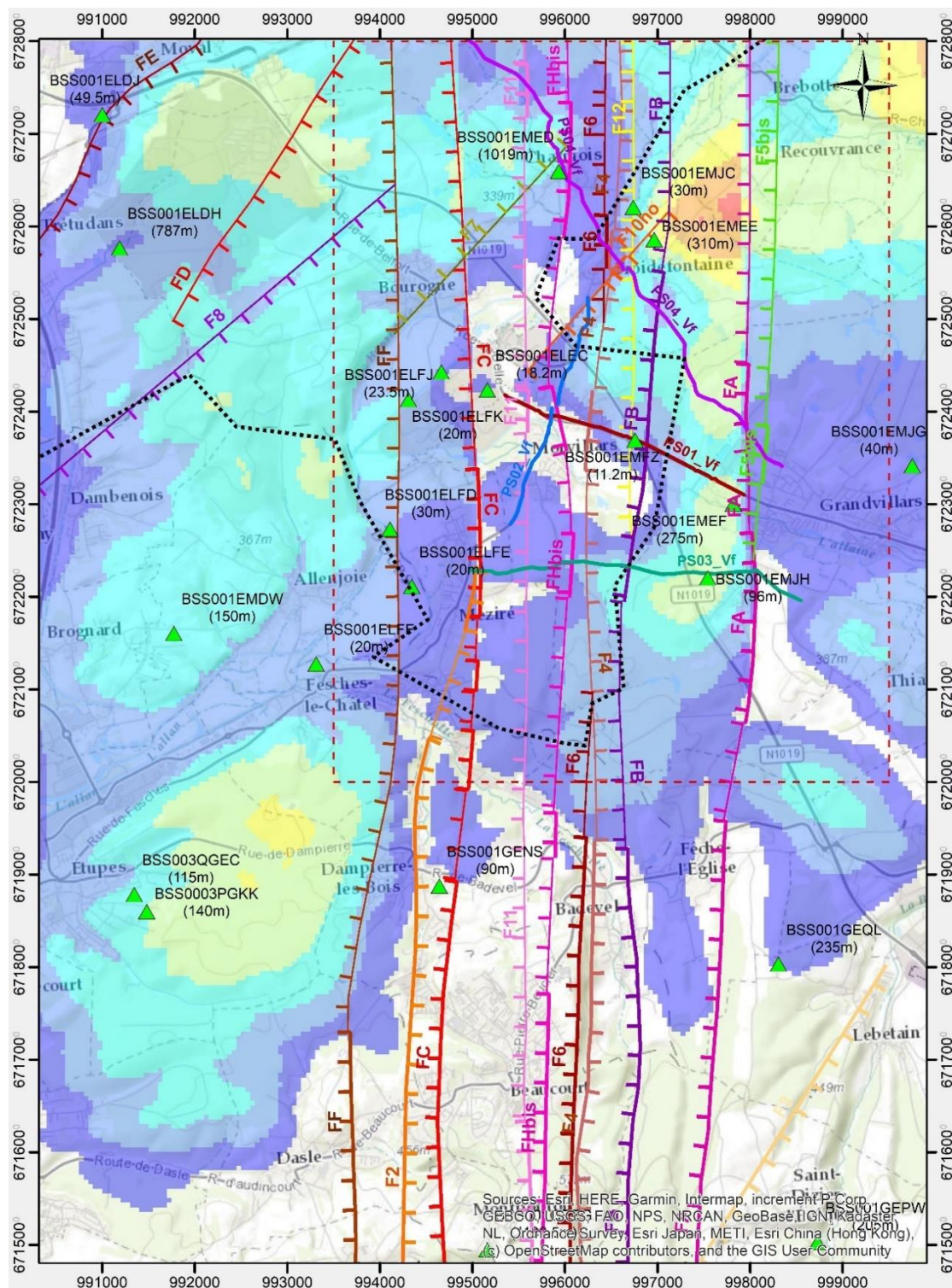


Figure 38 : Carte d'épaisseur cumulée de la couverture pliocène et oligocène issue du modèle géologique 3D final du Grand Belfort.

Acquisition sismique et construction d'un modèle géologique 3D pour préciser l'implantation de forages de reconnaissance hydrogéologique dans les calcaires du jurassique du Grand Belfort

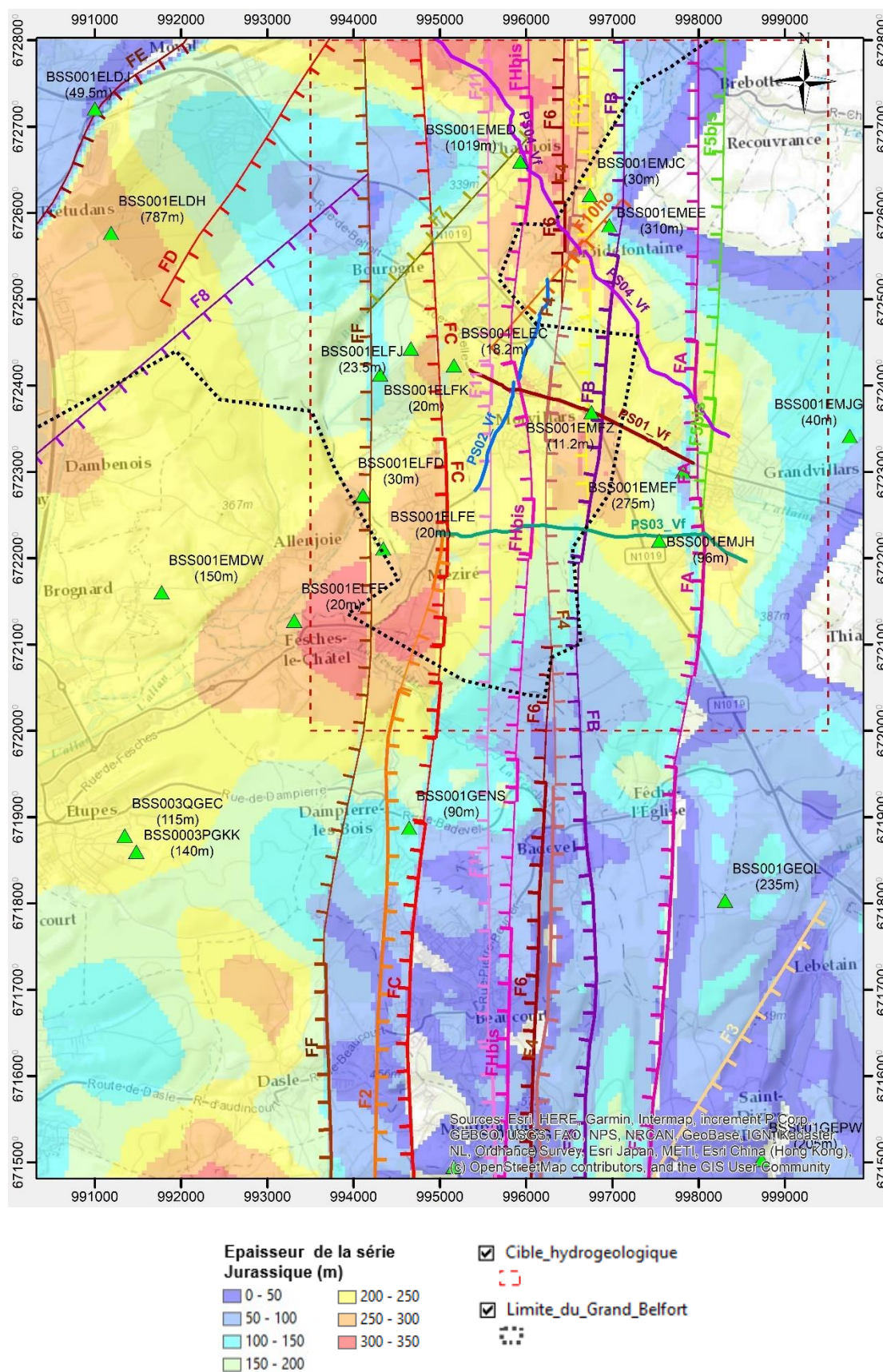


Figure 39 : Carte d'épaisseur des calcaires de la série jurassique (j6b, j6a, j5c6aC, et j5bP), hors formation marneuse (j5), issue du modèle géologique 3D final du Grand Belfort (logiciel BRGM GeoModeller)

### 5.3.3. Géométrie des failles

La modélisation géologique 3D du Grand Belfort, réalisée dans un premier temps à partir des données existantes (MNT, cartes géologiques, mesures structurales et forages) a permis d'identifier et d'ébaucher la géométrie 3D de 7 failles, dont 5 orientées N-S et 2 orientées NE-SE). Si l'orientation et le jeu tectonique des 5 failles orientées N-S était relativement bien contrainte dans la partie sud du modèle par la carte géologique de Delle, leur prolongation vers le nord restait incertaine.

L'actualisation du modèle préliminaire par l'acquisition l'intégration dans le GeoModeller de 4 profils sismiques a permis de conforter la prolongation vers le nord des 5 failles N-S et de préciser leur géométrie sous couverture. Elle a également permis d'en identifier 8 supplémentaires dont 5 orientées N-S et 3 orientées NE-SO.

Au final, ce ne sont pas moins de 16 failles qui ont été interprétées et modélisées dans le modèle géologique 3D final du Grand Belfort (Figure 41). Celles-ci confirment l'importance du rôle des failles dans la structuration géologique du sous-sol de la région et leur impact sur la profondeur et la continuité des formations qu'elles affectent (Figure 34).

Toutes les failles de la zone d'étude sont des failles normales à pendage subvertical.

La majorité de ces failles est orientée N-S et se prolonge, du sud vers le nord du modèle, de manière très linéaire. Leur pendage est généralement subvertical (entre 75 et 85°) à vergence vers l'ouest. Seule la faille F4 est à pendage vers l'est. Elle marque, au centre de la zone d'étude, l'extrémité E d'un horst orienté N-S (bloc tectoniquement surélevé), limité à l'ouest par la faille FC antithétique (Figure 40).

Le rejet de ces failles a été estimé sur les coupes du modèle final entre 85 à 150 m pour la série oligocène. Il est beaucoup plus variable pour les formations jurassiques, allant d'un rejet de quelques mètres à 30 – 60 m en moyenne, et jusqu'à 130 m pour la faille FB.

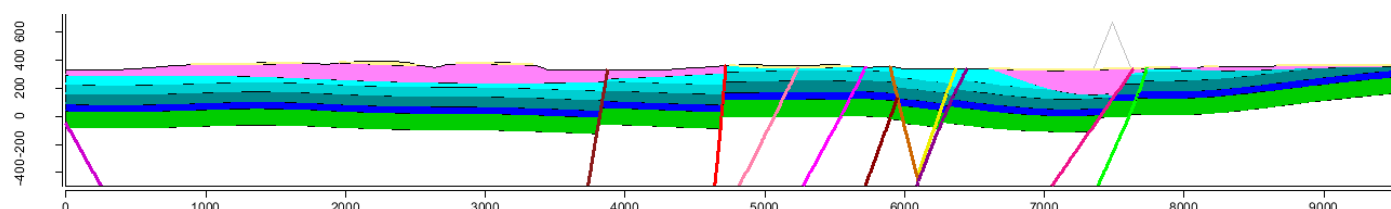


Figure 40. Coupe Ouest-est au centre de la zone d'étude passant par Allenjoie à l'ouest et le forage de Grandvillars – Le calvaire (BSS001EMJH) à l'est.

La vue en 3 dimension extraite du modèle géologique 3D final, montre l'impact du rejet des failles sur la géométrie et le décalage des formations, notamment jurassiques, en profondeur (Figure 34).



## 6. Recommandations pour le positionnement du ou des forages de reconnaissance AEP

### 6.1. RAPPEL DES BESOINS

La modélisation géologique 3D des calcaires du jurassique sous-couverture, notamment à partir des données collectées lors de la campagne sismique, permet d'identifier les zones du territoire où le potentiel aquifère est le plus favorable pour l'implantation de forages de reconnaissance et de définir un projet de dimensionnement de l'ouvrage prévisionnel.

Ce chapitre décrit à partir des résultats du modèle présenté dans le « *chapitre 5 - Modélisation géologique 3D consolidée par la sismique (étape 3)* » les zones cibles identifiées et les caractéristiques nécessaires pour la création du ou des forages de reconnaissance. En accord avec la liste des livrables du projet, un Cahier des Charges (CDC) est disponible en Annexe 8.

### 6.2. CRITÈRES D'IMPLANTATION

La définition de l'endroit le plus adapté pour la réalisation d'un forage de reconnaissance est le résultat d'une analyse croisée de plusieurs critères interdépendants.

Deux principaux champs de critères sont à considérer : i) les paramètres naturels (géologiques et hydrogéologiques) – en jaune sur la Figure 42 ; ii) les contraintes opérationnelles et administratives (en orange).

Le programme de travail du présent projet co-construit par la communauté d'Agglomération du Grand Belfort et le BRGM, avait pour objectif principal « *l'approfondissement de la compréhension structurale et hydrogéologique de la zone d'étude [...] pour in fine, aboutir à une proposition d'implantation de forage de reconnaissance* ».

C'est pourquoi, le BRGM a d'abord axé son travail sur la définition des zones d'intérêts selon un critère scientifique et naturaliste avant d'y apposer un certain nombre de contraintes externes défini conjointement avec le Grand Belfort dans un second temps.

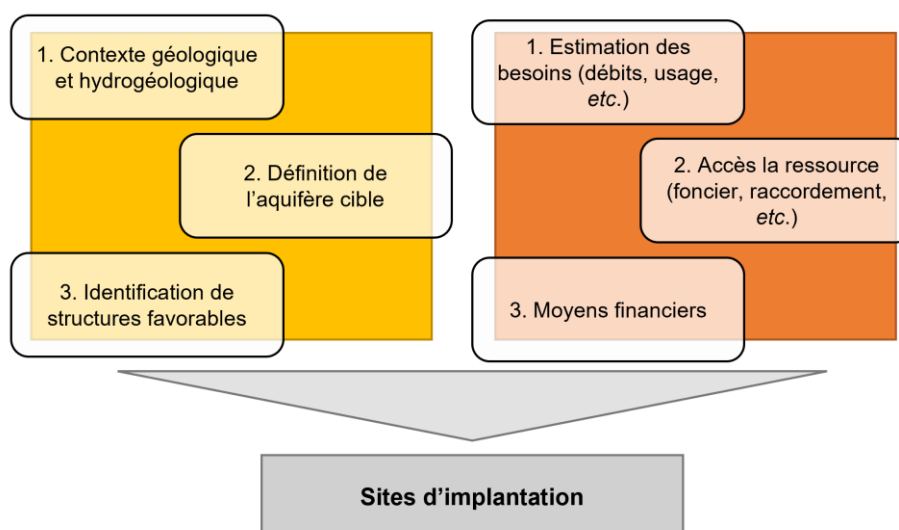


Figure 42. Synoptique simplifié pour la définition de sites d'implantation de forages de reconnaissance.

### 6.3. DÉTERMINATION DES ZONES D'INTÉRÊTS HYDROGÉOLOGIQUE

Les résultats du modèle géologique 3D montrent que les principales failles d'orientation nord-sud affectent les formations jurassiques en horst et graben.

Un horst et un graben sont des blocs de formations géologique qui ont été respectivement soulevés et abaissés entre deux failles normales présentant des orientations similaires.

Ce phénomène bien visible sur la coupe le long du profil sismique PS03 (Figure 41), créé une zone d'approfondissement des calcaires du jurassique (j6 à j5) à l'ouest de chacune des failles majeurs (zones rouge sur la Figure 41). Dans le cas des failles F4 et FB, il est même possible d'observer une sorte de gouttière géologique (zone violet sur la Figure 41).

La formation des calcaires du rauracien (j5bP) est considérée comme la formation cible à atteindre par le forage de reconnaissance. Le forage recoupera ainsi l'ensemble des dépôts du jurassique supérieur potentiellement aquifère, et s'arrêtera au contact de la formation marneuse semi-perméable de l'oxfordien (j5), mur de l'aquifère. Une reconnaissance de chacune des formations calcaires du jurassique supérieur permettra d'identifier les principaux niveaux producteurs d'eau et fournira de précieux indices en vue d'une exploitation. Une attention particulière sera nécessaire au niveau de l'interface tertiaire/jurassique du fait des nombreux indices de présence de karst (Doney & Lacquement, 2002 ; Jauffret D., 1996) ainsi qu'au sein du faciès oolitique rauracien (Figure 44), possédant une probable meilleure porosité intergranulaire et une fine fissuration du fait de la disparition des intercalations marneuses. Enfin, les nombreux passages marneux au sein des dépôts du jurassique supérieur confèrent au réservoir du rauracien une couverture, qui limite le phénomène de drainance verticale, le protégeant ainsi des effets de sécheresse et de pollutions de surface.

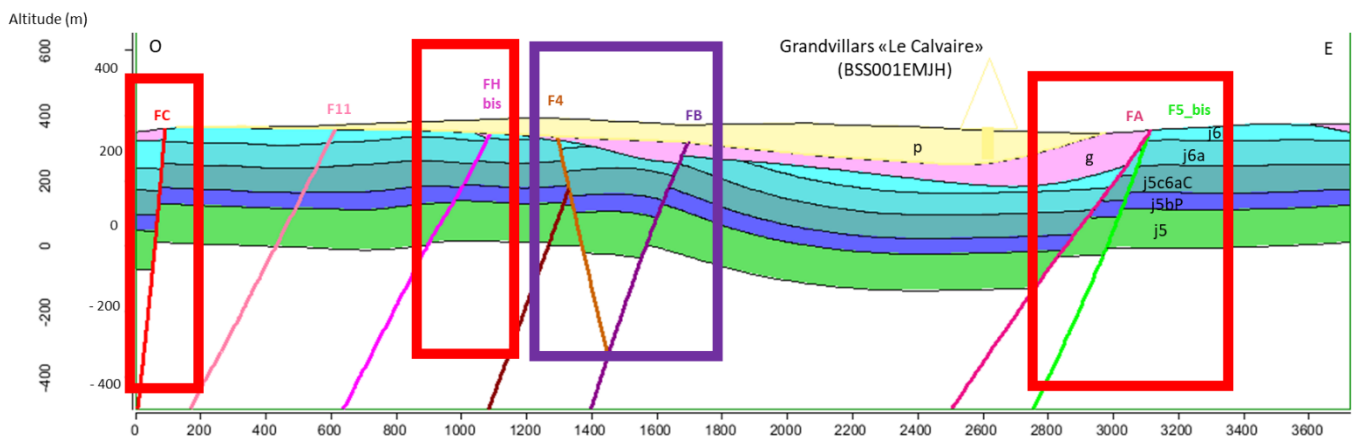


Figure 43. Horsts et grabens observés le long du profil sismique PS03.

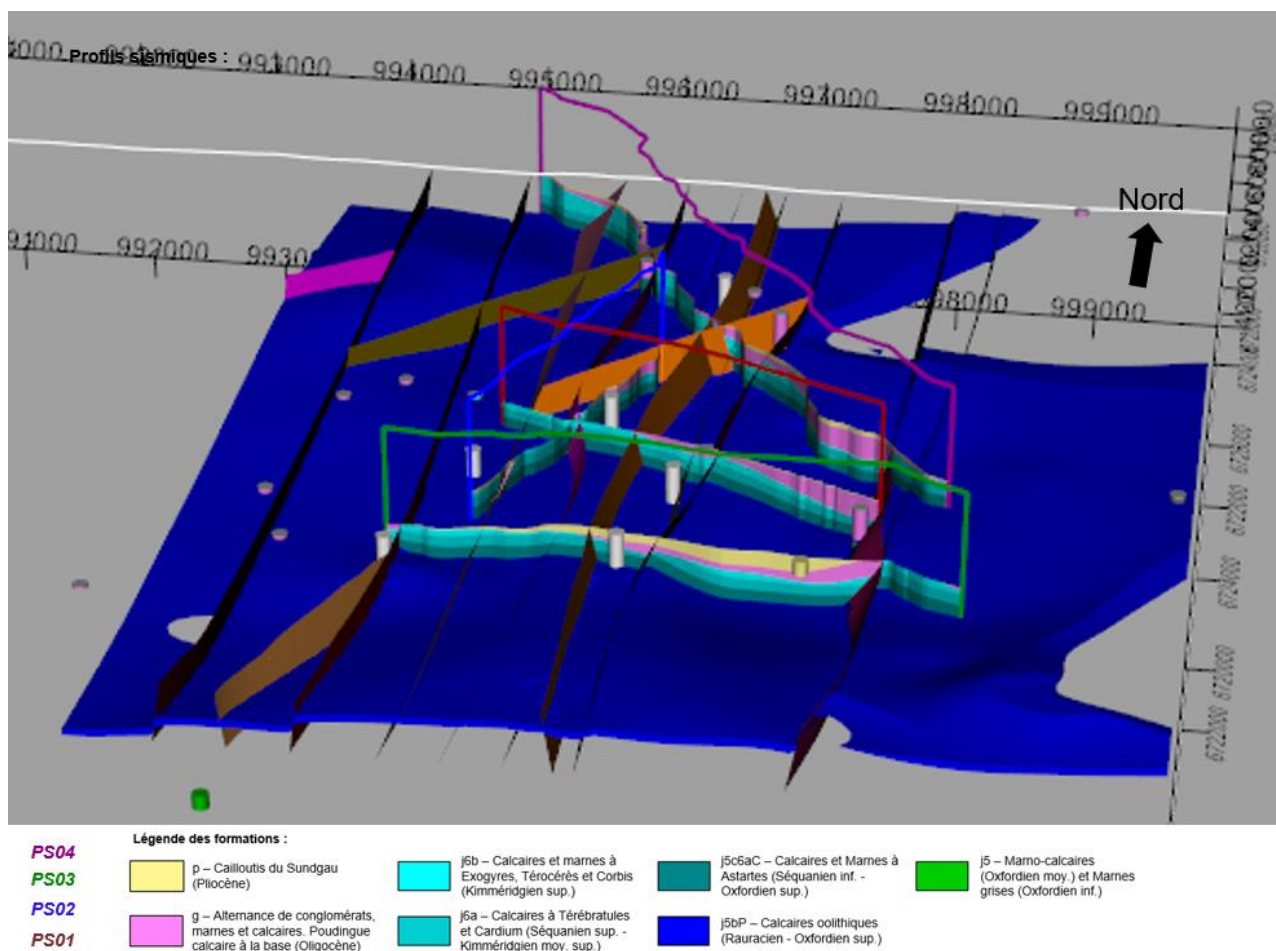


Figure 44. Vue 3D du modèle géologique 3D final du Grand Belfort (logiciel BRGM GeoModeller), focalisée sur la formation des calcaires du rauracien (j6bP) dans la zone de la cible hydrogéologique.

Trois principaux critères géologiques et hydrogéologiques ont permis de déterminer les zones d'intérêt pour l'implantation du forage de reconnaissance :

1. **Le système de failles** (Figure 45 - gauche). Les failles sont susceptibles d'avoir un impact sur la géométrie du réservoir (extension latérale limitée). Cependant les observations faites aux cours des précédentes études tendent à montrer que la fracturation pourrait jouer un rôle prépondérant dans la structuration profonde et la circulation des eaux profondes. Les failles seraient des structures favorisant l'écoulement de l'eau (Doney et Lacquement, 2022). L'implantation d'un forage de reconnaissance proche de ces failles régionales, permettra de valider cette hypothèse.
2. **L'épaisseur de la série jurassique** (Figure 45 - gauche), qui permet de sélectionner les secteurs où les formations sont les plus puissantes. Trois zones peuvent être identifiées :
  - secteur nord de la cible hydrogéologique (Charmois) - profondeurs importantes comprises entre 250 et 400 m ;
  - bordure est du territoire du Grand Belfort : située entre les communes de Morvillars et Grandvillars - profondeurs du mur du rauracien comprises entre 250 et 350 m ;
  - partie ouest de la cible hydrogéologique : selon un axe nord-sud entre Méziré et Bourgogne - profondeurs comprises entre 250 et 350 m.

3. **L'épaisseur de la couverture pliocène-oligocène** (Figure 45 - droite) garantissant aux formations jurassiques une couverture les protégeant ainsi des effets de sécheresse et de pollutions de surface.

La Figure 45, présente les résultats obtenus à l'issue de la compilation de ces trois critères.

Grâce à l'outil SIG, une série d'intersections est effectuée entre les différentes zones d'intérêt issues de chaque critère. Ce processus permet de réduire progressivement la zone étudiée, jusqu'à isoler les emplacements les plus appropriés pour l'implantation d'un ouvrage de reconnaissance.

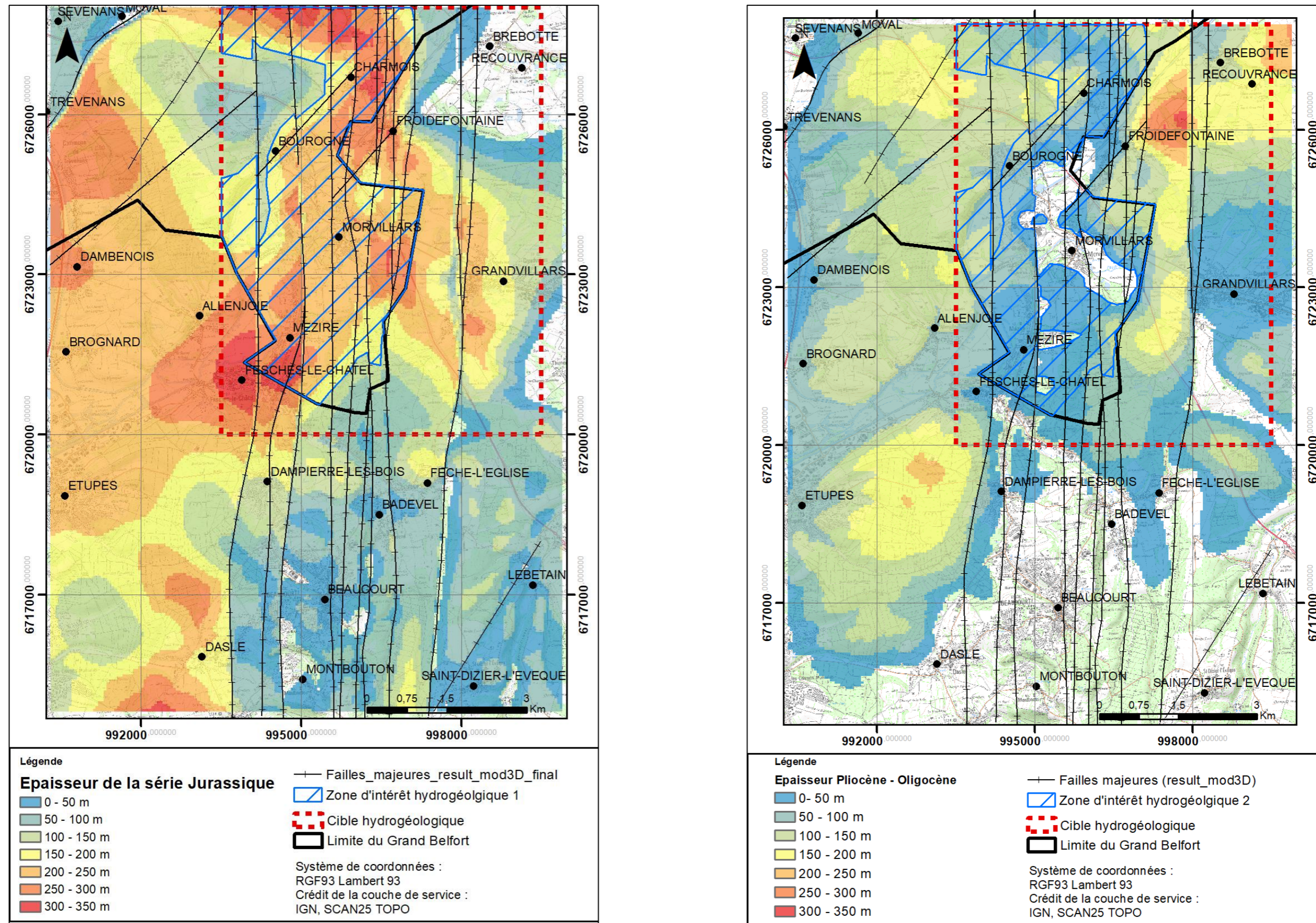


Figure 45. À gauche – sélection des secteurs d'intérêt à partir de la carte d'épaisseur de la série jurassique. À droite – ajustement des secteurs d'intérêt selon la présence ou non de couverture pliocène-oligocène.

#### **6.4. COMPATIBILITÉ DES ZONES D'INTÉRÊTS HYDROGÉOLOGIQUE AVEC LES SPÉCIFICITÉS DU TERRITOIRE DU GRAND BELFORT**

Les zones d'intérêt identifiées à partir des critères géologiques et hydrogéologiques (Figure 45 - droite) doivent ensuite être corrélées avec d'autres paramètres essentiels pour la réalisation des travaux.

Tout d'abord, la profondeur maximale de l'ouvrage est limitée à environ 300 mètres en accord Grand Belfort pour des raisons de coût financier des travaux.

Ainsi, seules les zones où la profondeur du mur du rauracien ne dépasse pas cette limite ont été retenues (Figure 46). En appliquant ce critère, les zones d'intérêt peuvent être affinées comme suit :

- Secteur nord de la cible hydrogéologique (Charmois) : Seules les parties de cette zone où les profondeurs sont inférieures à 300 mètres sont retenues ;
- Bordure est du territoire du Grand Belfort (entre Morvillars et Grandvillars) : Cette zone présente des profondeurs comprises entre 250 et 350 mètres. Seules les parties avec des profondeurs inférieures à 300 mètres sont considérées ;
- Partie ouest de la cible hydrogéologique (axe nord-sud entre Méziré et Bourgogne) : Les profondeurs de cette zone sont également comprises entre 250 et 350 mètres. Seules les sections avec des profondeurs inférieures à 300 mètres sont retenues.

De plus, l'implantation du forage doit être réalisée dans la mesure du possible sur une parcelle publique. Ce critère supplémentaire est essentiel pour garantir la faisabilité administrative et juridique du projet, ainsi que pour faciliter la gestion et l'accès au site. Par conséquent, les zones d'intérêt identifiées doivent également être croisées avec les données cadastrales du référentiel foncier public (RFP) fourni par Grand Belfort.

En appliquant une sélection spatiale des parcelles cadastrales avec les zones d'intérêt hydrogéologique, seuls 204 des 7028 parcelles se révèlent intéressantes pour l'implantation du ou des forages de reconnaissance (Figure 47).

La sélection du site d'implantation final doit également prendre en compte dans la mesure du possible la proximité avec le profil sismique. Cela pour plusieurs raisons :

1. réduction des incertitudes du modèle : en choisissant un site proche du profil sismique, les incertitudes liées à la modélisation géologique sont minimisées ;
2. meilleure appréciation des profondeurs : la proximité avec le profil sismique permet une évaluation plus précise des profondeurs des formations géologiques ;
3. identification plus précise des interfaces : les données sismiques permettent de mieux identifier les interfaces entre les différentes formations géologiques. Cette précision est vitale pour la planification des travaux de forage, car elle assure une compréhension claire des couches à traverser et des éventuelles difficultés à anticiper.

En appliquant une sélection spatiale des parcelles cadastrales avec les tracés des profils sismiques, 113 parcelles forment la sélection finale (Figure 48).

À l'issu de ce travail de sélection, le BRGM réalise un dernier arbitrage pour définir 4 cibles d'implantation (Figure 49).

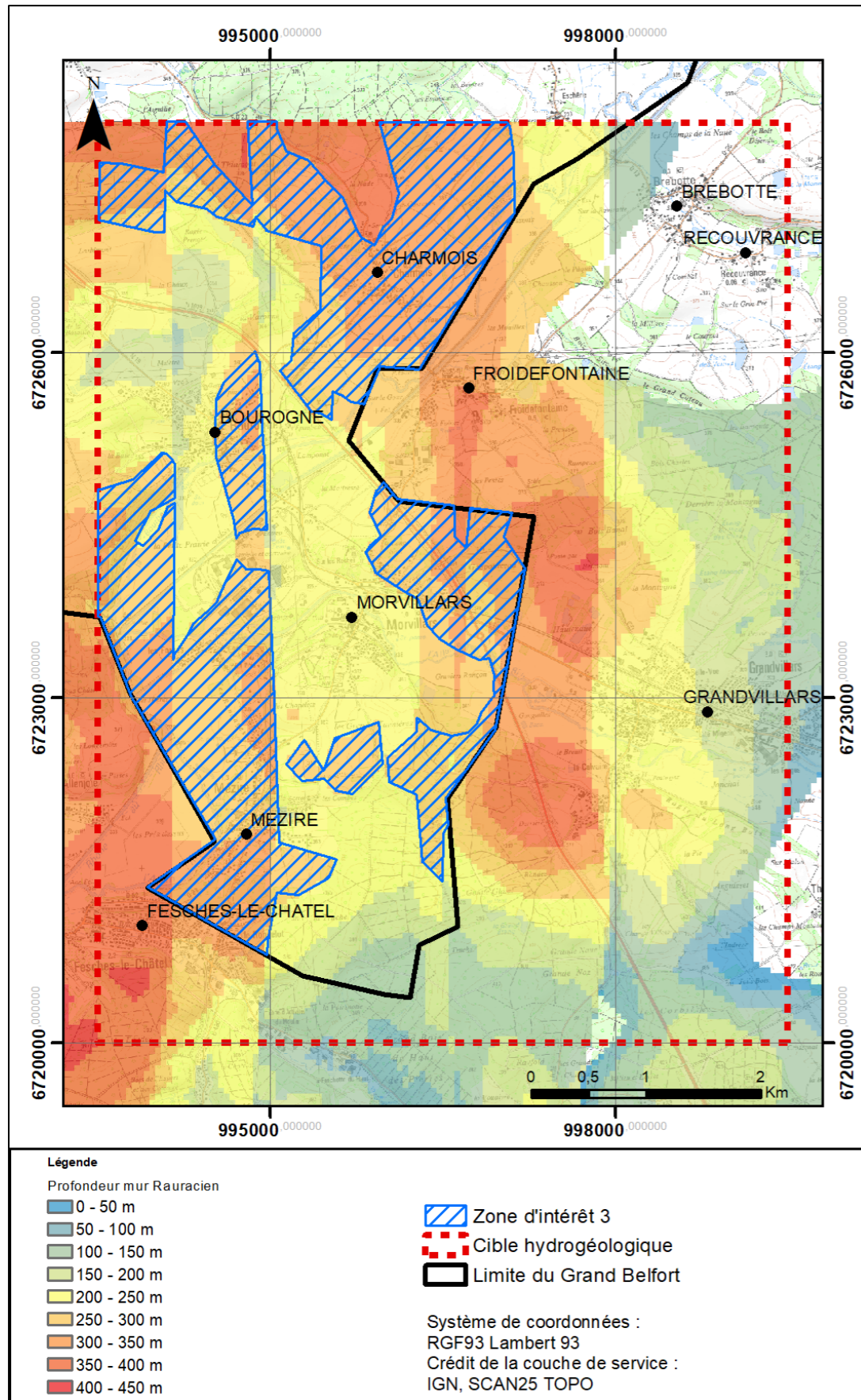


Figure 46. Profondeur du mur du faciès rauracien 250 m et 350 m.

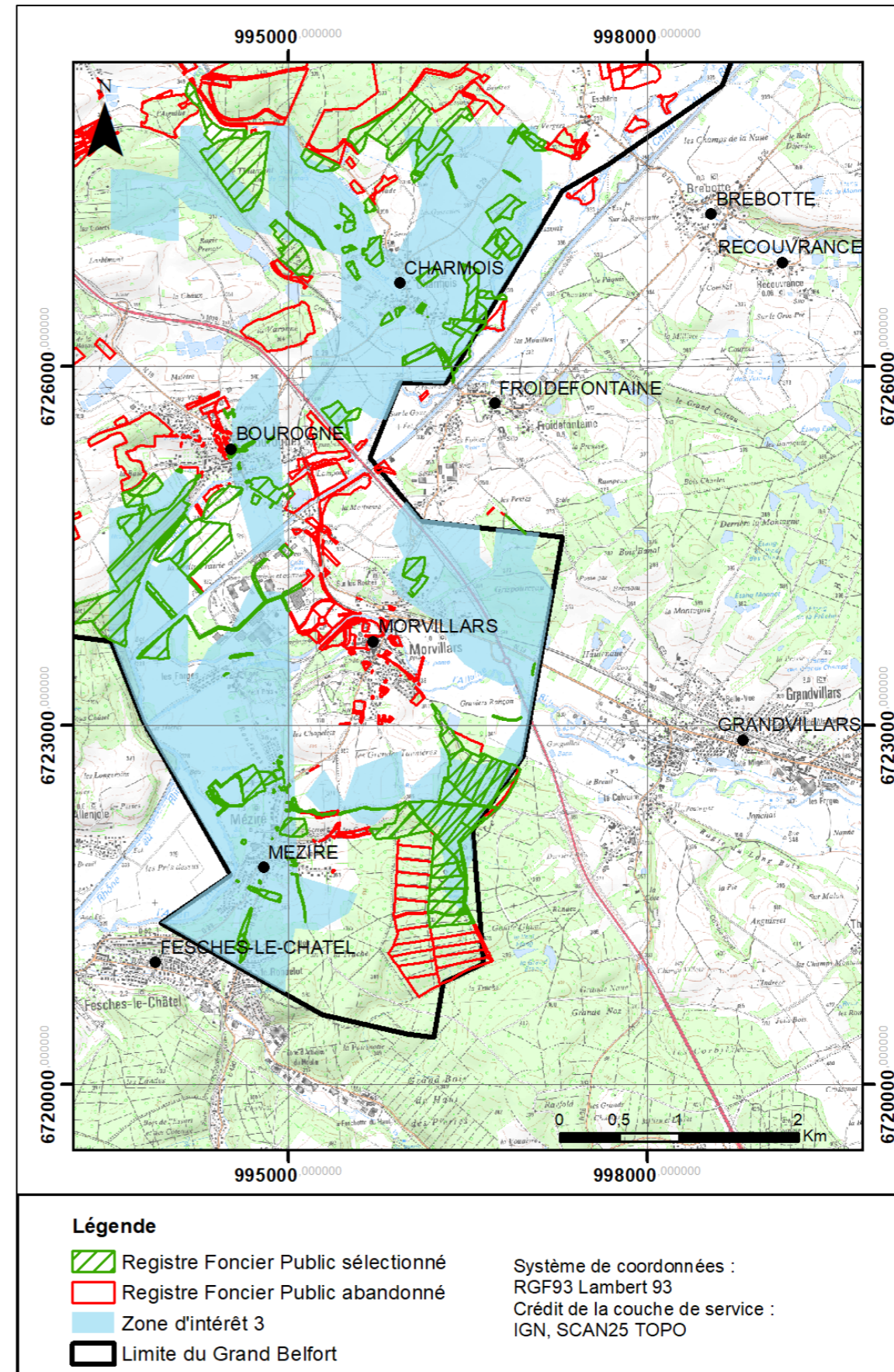


Figure 47. Parcelles du RFP qui intersectent la zone d'intérêt 3

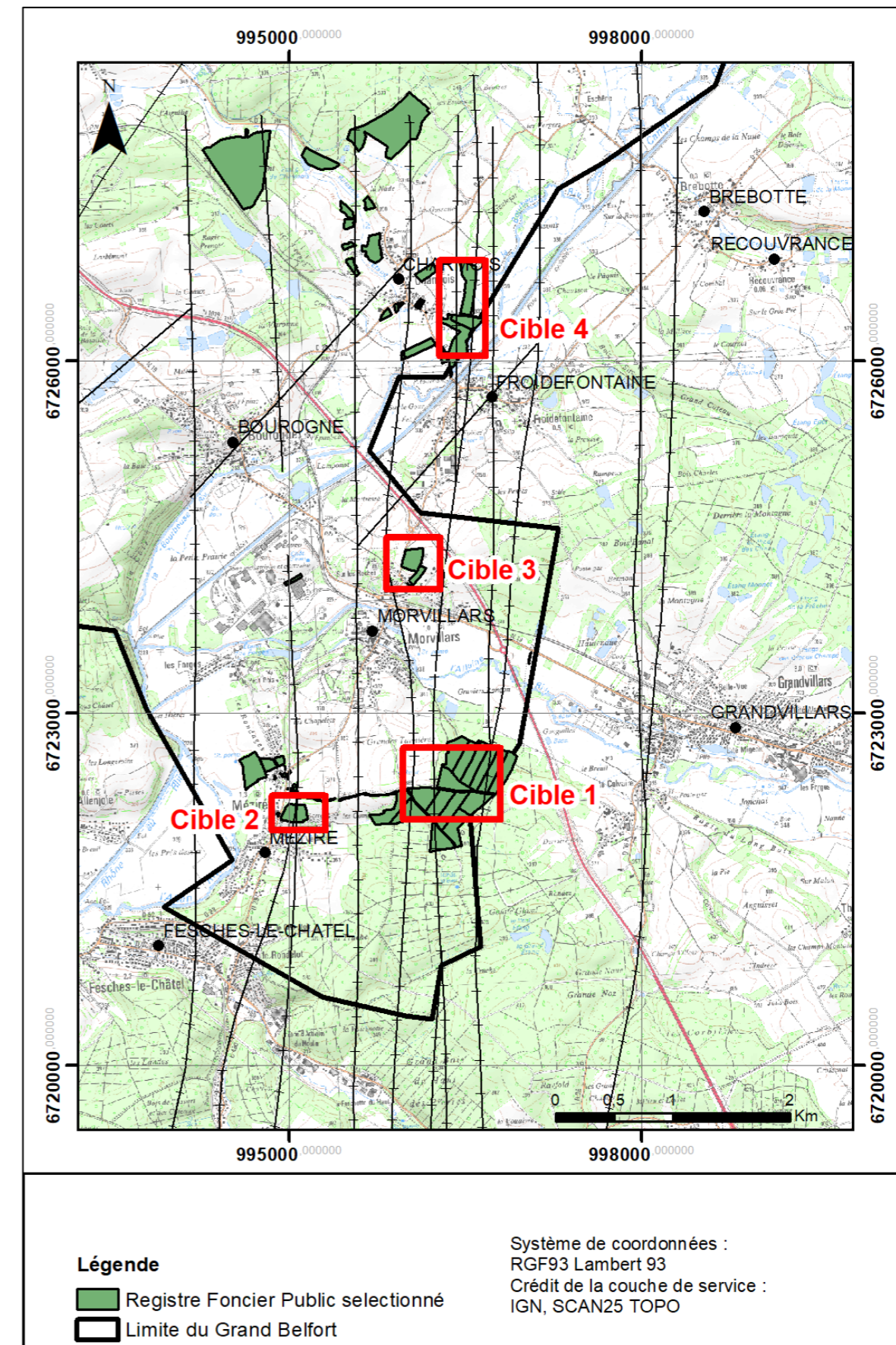
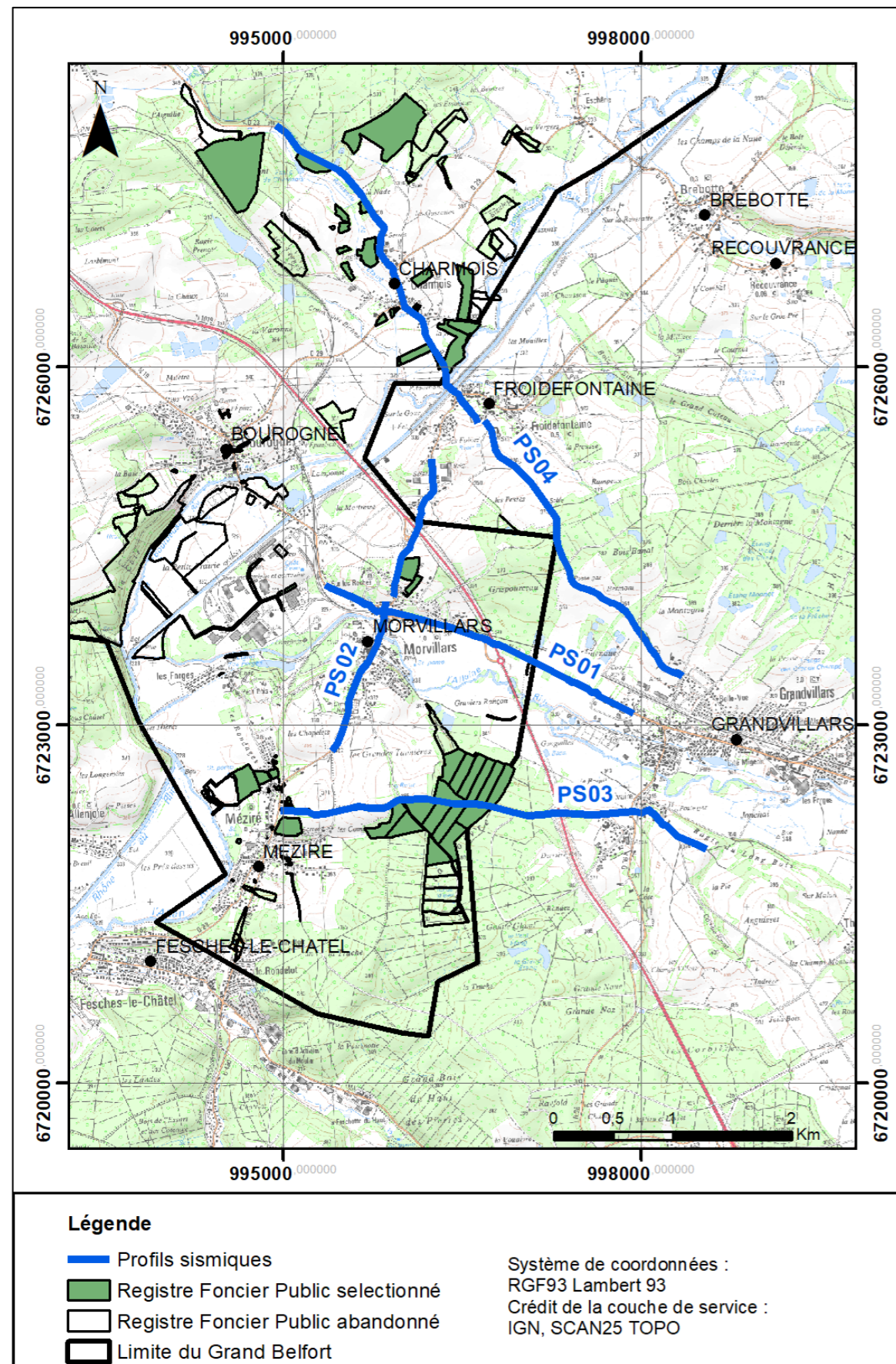


Figure 48. Sélection des parcelles du RFP à proximité des profils sismiques réalisés (300 m environ)

Figure 49. Identification finale des zones d'intérêts

## 6.5. COLONNES LITHOSTRATIGRAPHIQUES DES CIBLES SÉLECTIONNÉES

Une fois la sélection des secteurs d'intérêt pour l'implantation d'un forage de reconnaissance obtenue, une interrogation du modèle géologique 3D a été réalisée afin de connaître la coupe géologique prévisionnelle des forages.

### 6.5.1. Cible 1

La cible 1 se situe sur la commune de Morvillars, au sud-est du département du Territoire de Belfort. La zone d'implantation de l'ouvrage se trouve au sud du bourg de Morvillars, proche du lieu-dit « Les Grandes Tannières ».

D'un point de vue géologique, la cible recoupe un graben orienté nord-sud (Figure 43), où le réseau de failles est dense et où la couverture tertiaire est importante (90 m).

La réalisation d'un forage de reconnaissance dans ce secteur permettra de tester, par essai de pompage, le rôle des failles en profondeur, c'est-à-dire déterminer si elles jouent le rôle de barrières perméables ou étanches.

La Figure 50 présente les caractéristiques de la cible 1.

Il est important de mentionner ici que le secteur d'implantation de la cible 1 est volontairement situé proche d'un point haut topographique local. Ce choix est motivé par la présence des formations tertiaires, qui disparaissent plus au nord. Ces formations sont intéressantes car elles recouvrent les calcaires du Jurassique, réduisant ainsi la vulnérabilité de la ressource, tant durant le chantier que pour une future exploitation (infiltration, écoulements, contaminations, etc.). De plus, une implantation plus au nord du site, placerait l'ouvrage dans la vallée de l'Allaine, soit à la limite ou à l'intérieur du périmètre de protection du captage de Morvillars ainsi que dans une zone de protection spéciale Natura 2000 « Étangs et vallées du Territoire de Belfort » (Figure 51).

### 6.5.2. Cible 2

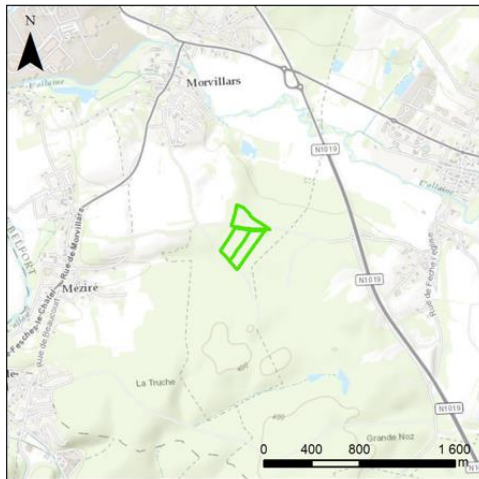
La cible 2, se situe sur la commune de Méziré en bordure ouest département du Territoire de Belfort. La zone d'implantation de l'ouvrage se situe au nord-est du bourg de Méziré proche de l'intersection entre la rue de Granvillars et la route départementale D23.

La Figure 52, présente les caractéristiques de la cible 2. Ce site d'implantation se trouve dans une zone avec un réseau de failles moins dense, favorisant une extension latérale du réservoir vers l'est. Si les résultats obtenus au niveau de la cible 1 montrent que le rôle de la fracturation n'est pas déterminant, alors cette zone pourrait faire l'objet d'une reconnaissance.

### 6.5.3. Cibles 3 et 4

Deux autres zones d'intérêt ont été identifiées lors de ce travail. Elles se situent plus au nord de la zone d'étude : au nord de la commune de Morvillars (cible 3) et au sud-est de la commune de Charmois (cible 4). La Figure 53 et la Figure 54, présentent les caractéristiques de ces cibles.

# Cible 1



- Parcelles:
- 900072 – K0096,
  - 900072 – L0002,
  - 900072 – L 0003

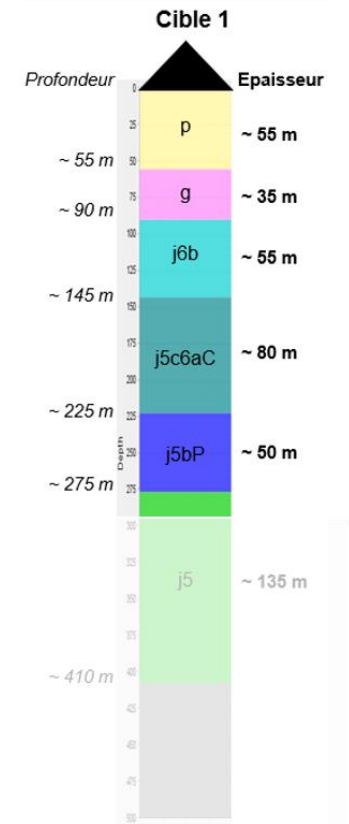
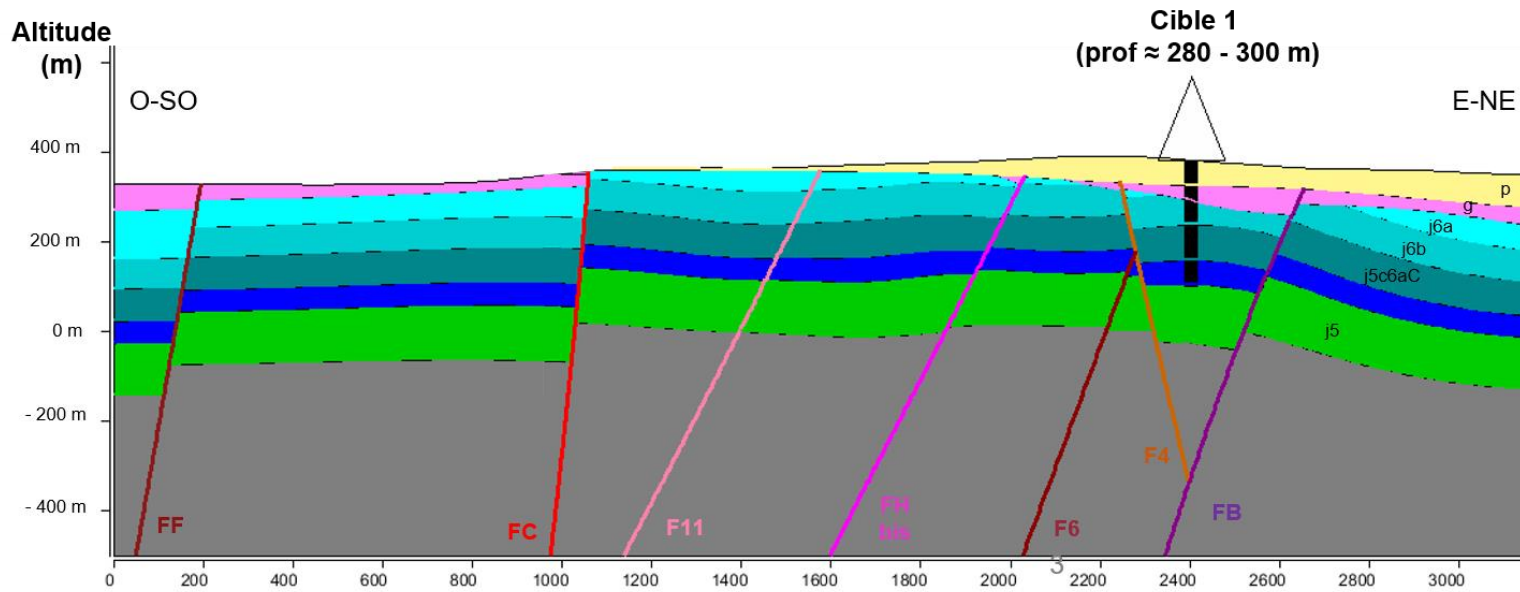


Figure 50. Caractéristiques de la cible 1



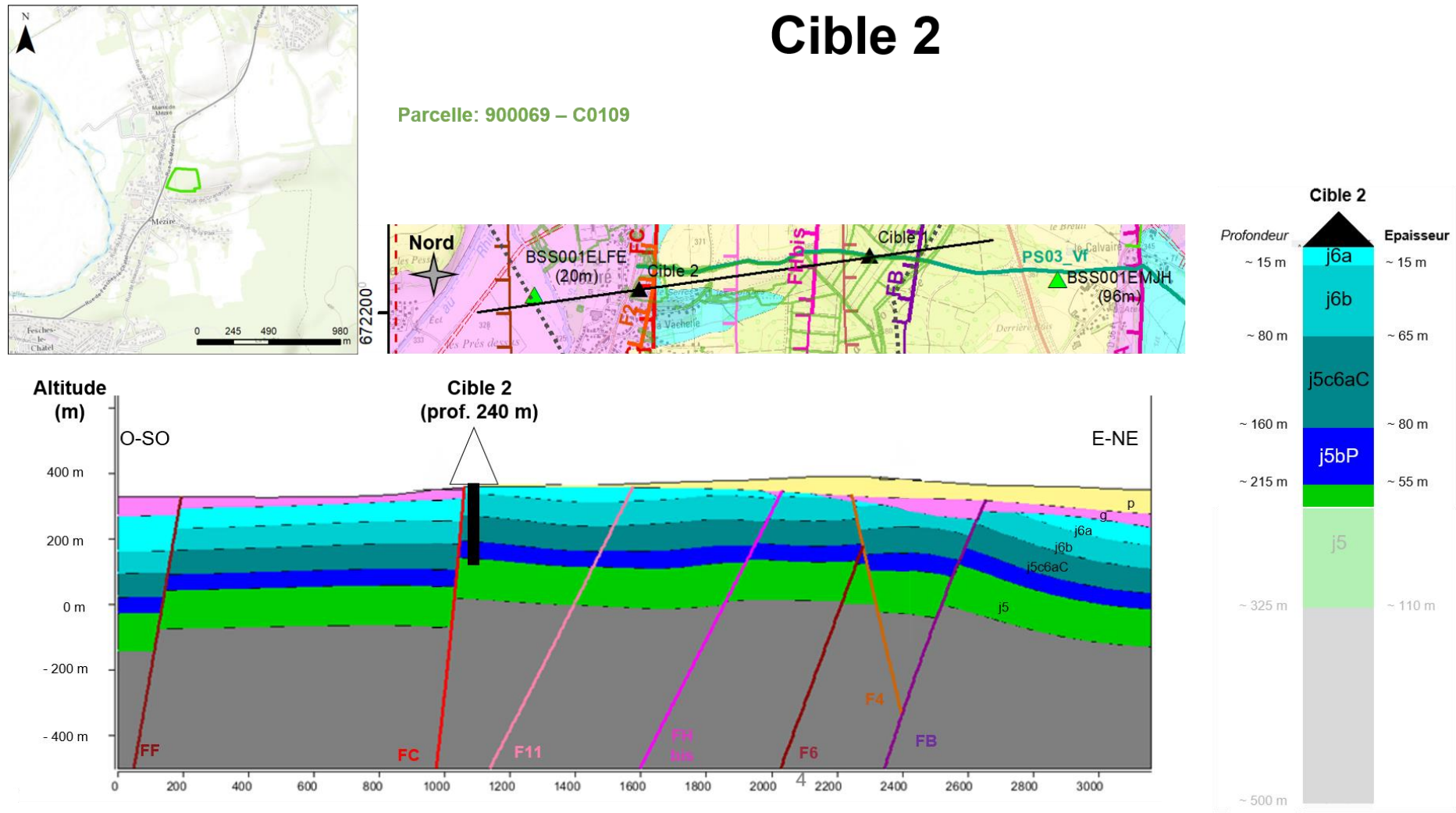


Figure 52. Caractéristiques de la cible 2.

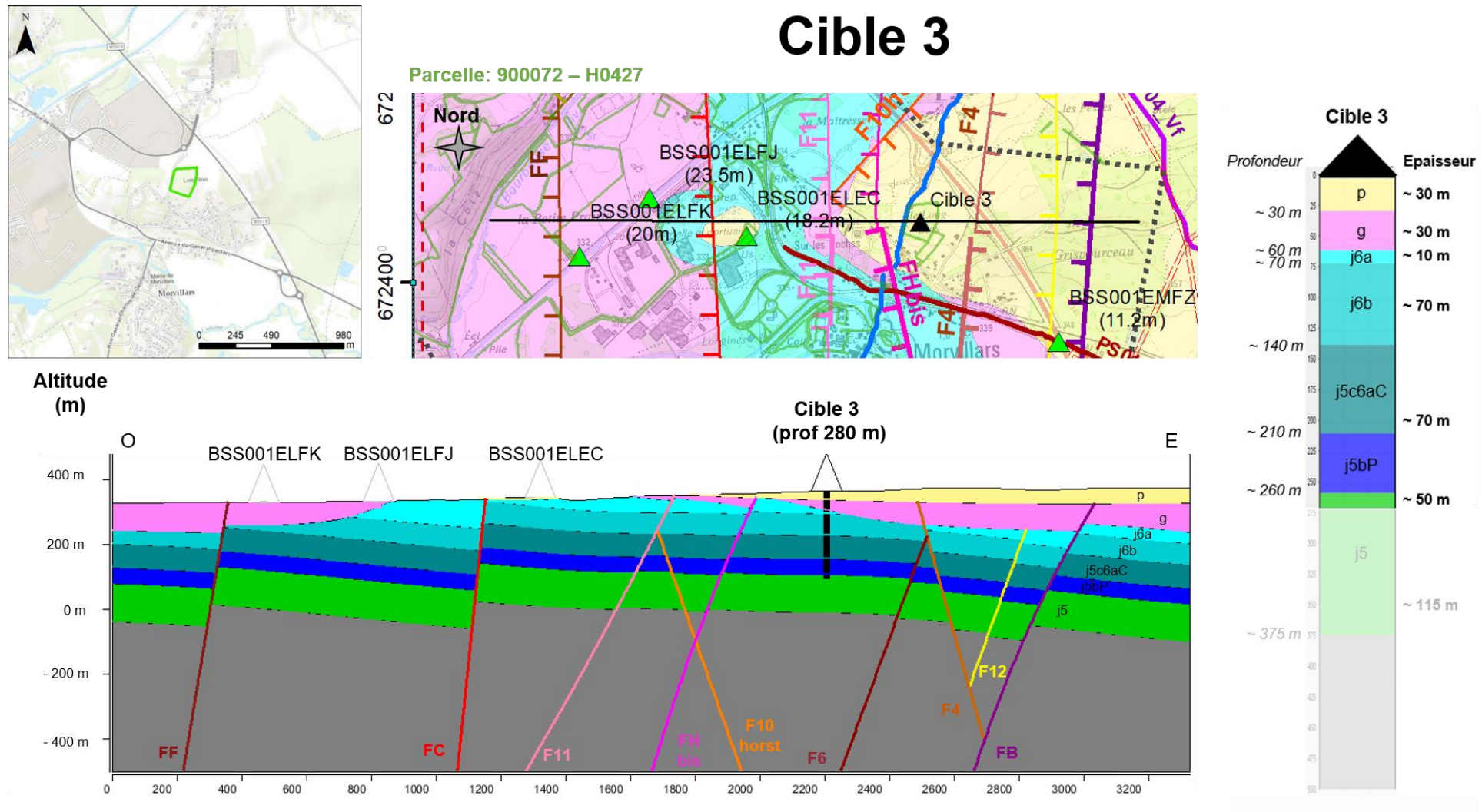


Figure 53. Caractéristiques de la cible 3.

# Cible 4

Parcelle: 900021 – ZC0051

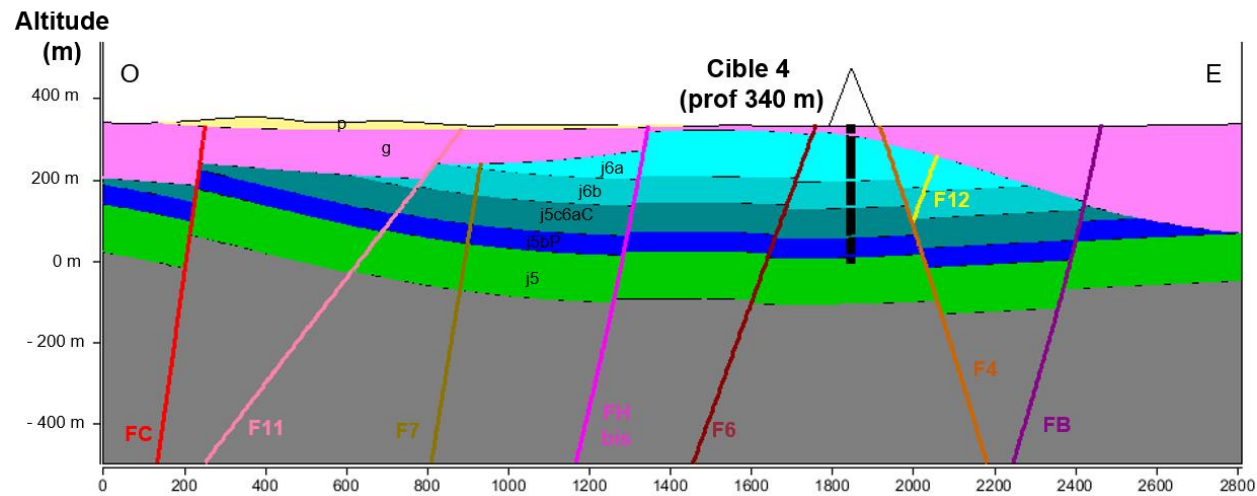
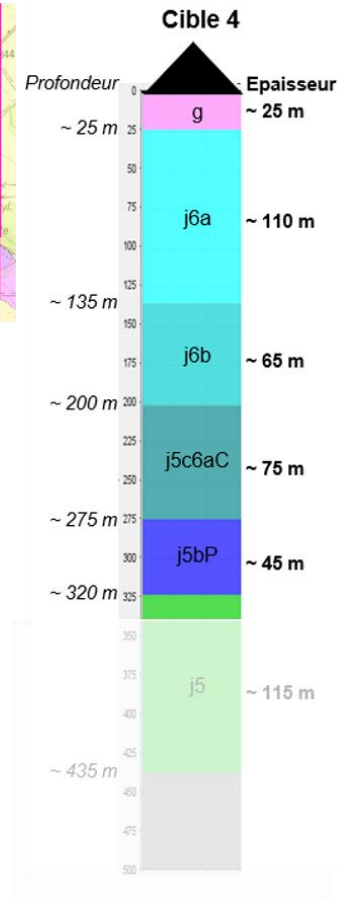
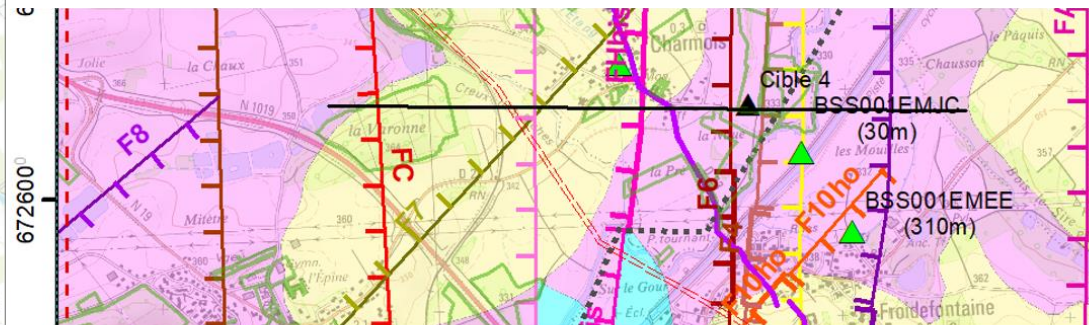
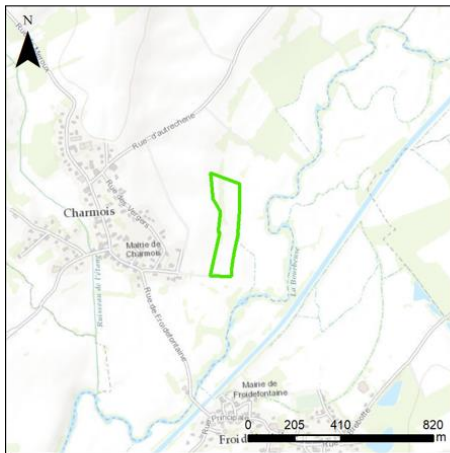


Figure 54. Caractéristiques de la cible 4.

## 7. Conclusions et perspectives

### 7.1. CONCLUSIONS

Le modèle géologique 3D final (Figure 55) réalisé dans la zone sud du territoire de Belfort, démontre tout l'intérêt de la modélisation géologique 3D itérative et incrémentale dans le cadre ce projet à l'aide du logiciel GeoModeller.

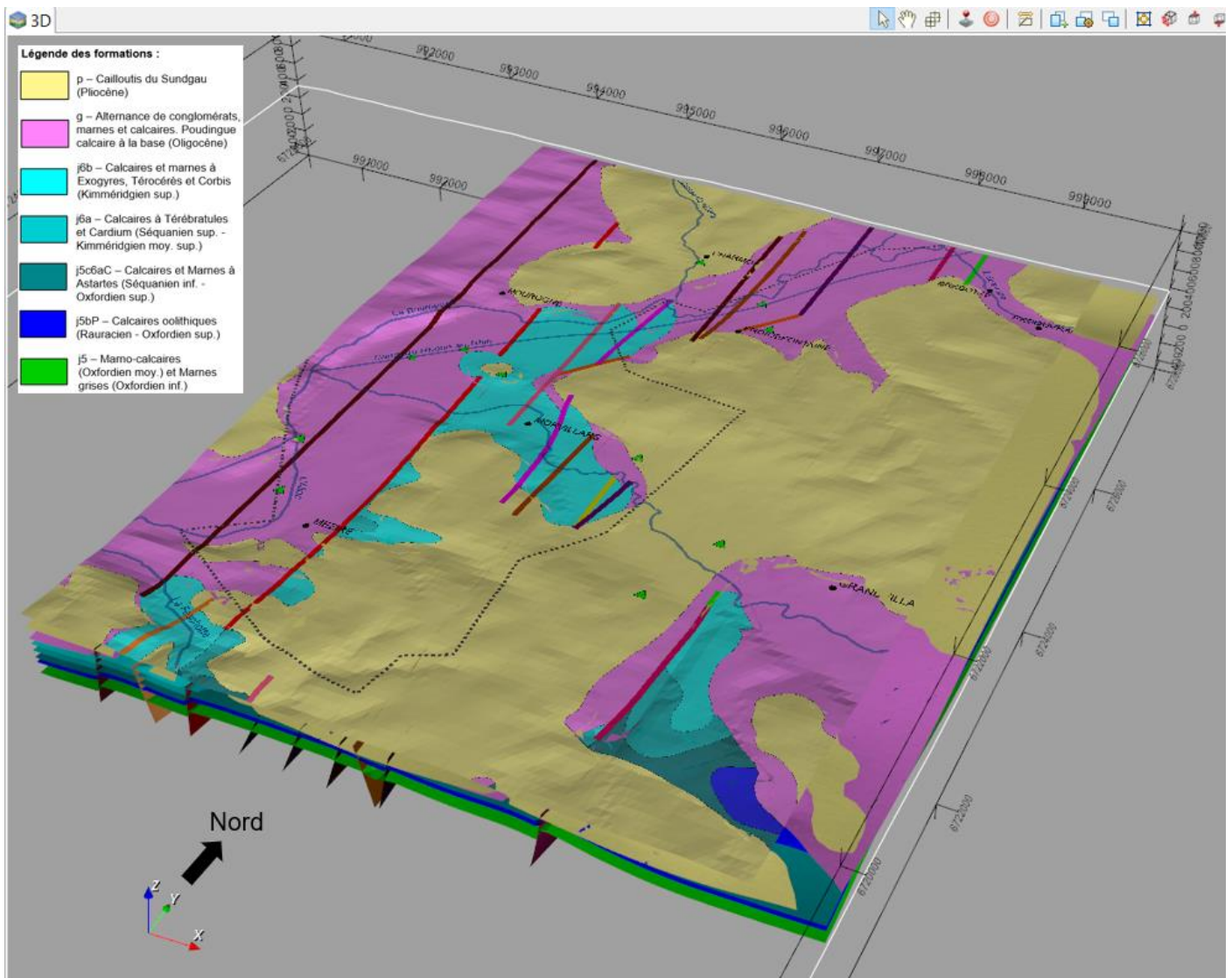


Figure 55. Vue 3D du modèle géologique 3D final du Grand Belfort (logiciel BRGM GeoModeller), focalisée sur la cible hydrogéologique.

L'intégration progressive des données géologiques issues de la bibliographie, des résultats de campagne de terrain (étape 1) et des résultats de l'acquisition de nouveaux profils sismiques (étape 2 et 3), s'est avérée efficace pour contraindre la géométrie des formations jurassiques et failles en profondeur dans les secteurs où celles-ci étaient recouvertes par des dépôts tertiaires.

La pile lithostratigraphique du modèle géologique 3D final prend en compte les formations de la couverture pliocène et oligocène qui recouvre les formations jurassiques ainsi que toutes les formations carbonatées de la série jurassique présentes jusqu'à 400 m de profondeur.

La formation de l'oxfordien supérieur (faciès rauracien) (j5bP), constituée de Calcaires oolithiques a été définie comme la formation aquifère ciblée pour ce projet.

Les formations calcaires de la série jurassique (j6b à J5bP) sont formées de calcaires alternants avec des marnes jusqu'à atteindre la formation aquifère des calcaires du rauracien (j5bP, oxfordien sup.). Elles sont généralement érodées par la série oligocène qui les recouvre et n'affleurent qu'au sud de la zone d'étude. La présence, la répartition ainsi que l'épaisseur de ces formations varient donc en fonction de cette couverture tertiaire.

En revanche, la formation marneuse (j5, oxfordien inf.) qui constitue la base aquitard de la série jurassique supérieur, est présente sur l'ensemble du sous-sol de la zone d'étude, avec une épaisseur relativement constante. Elle n'est en effet que très rarement impactée par l'érosion.

Seize failles qui ont été interprétées et modélisées dans le modèle géologique 3D final du Grand Belfort. La majorité de ces failles sont orientée N-S et se prolongent, du sud vers le nord du modèle, de manière très linéaire. Leur pendage est généralement subvertical (entre 75 et 85°) à vergence vers l'ouest. La faille F4, à pendage vers l'est marque, au centre de la zone d'étude, l'extrémité E d'un horst orienté N-S (bloc tectoniquement surélevé), limité à l'ouest par la faille FC antithétique.

La compilation des résultats du modèle géologique 3D avec les paramètres naturels (géologiques et hydrogéologiques), et les paramètres anthropiques et administratifs définis conjointement avec Grand Belfort, a permis de sélectionner 4 secteurs « cible » pour l'implantation d'un forage de reconnaissance. Ils se situent sur la commune de Morvillars (x2), Méziré et Charmois.

## 7.2. PERSPECTIVES

La démarche de renforcement des capacités de production d'eau potable à partir des eaux souterraines de la communauté d'agglomération du Grand Belfort passe à présent par la réalisation d'un ou plusieurs forages de reconnaissance dans les zones identifiées par le BRGM.

En raison du caractère très exploratoire de ce projet, les opérations de forage se révèlent essentielles pour plusieurs raisons :

- La confirmation de la pile géologique : les forages permettront de valider la pile géologique issue du modèle géologique 3D aussi bien d'un point de vue succession lithologique que d'un point de vue profondeur des passes. Il convient de mentionner sur ce point qu'une rétro alimentation du modèle à partir des coupes géologiques de forages obtenues serait un plus ;
- L'estimation du potentiel de production de l'aquifère jurassique : grâce à des essais par pompage, il sera possible d'obtenir un ordre de grandeur de la capacité de production de l'aquifère jurassique, déterminant ainsi sa viabilité pour l'approvisionnement en eau potable ;
- L'évaluation de la qualité de l'eau : les analyses des eaux extraites permettront de préciser la qualité de l'eau de l'aquifère.

## 8. Bibliographie

BAILLY C., CHAUVE P. ET MARTIN J., 1985. Carte géologique de Delle à 1/50 000. Feuille n°475 Editions du BRGM, Service géologique National.

BERTHIER H., 2008. Carte géologique harmonisée du département du Territoire de Belfort. BRGM/RP-56272-FR, 129 p., 3 fig., 2 tab., 2 pl., hors-texte.

BRGM, 2003. Carte géologique de la France à 1:1 000 000 – 6eme édition. ISBN : 2-7159-2158-6

CALCAGNO P., CHILES J. P., COURRIOUX G. et GUILLEN G., 2008. A. Geological modelling from field data and geological knowledge: Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. Phys. Earth Planet. Inter. 171, pp.147–157. CHAUVE P., MARTIN J., BAILLY C., avec la collaboration de BAMBIER A., 1985. Notice explicative de la feuille de Delle à 1/50 000.

CHAUVE P., MARTIN J. ET BAILLY C., 1985. Notice explicative de la feuille de Delle à 1/50 000. Editions du BRGM, Service géologique National.

CONTINI D., BOULLIER A. ET MORIN D., 2000. Notice explicative de la feuille de Lure à 1/50 000. Editions du BRGM, Service géologique National.

CONTINI D., CREUZOT J., DRESSLER M., THEOBALD N. 2000. Carte géologique de Lure à 1/50 000. Editions du BRGM, Service géologique National.

DONEY C. avec la contribution de NEVEUX A. et BRUGERON A. (2020). Connaissances de la ressource en eau souterraine du Grand Belfort et perspectives. Rapport final. BRGM/RP-70184-FR, 90 p., 38 ill., 4 tabl., 3 ann., CD.

DONEY C. & LACQUEMENT F., 2022. Caractérisation géologique et hydrogéologique des calcaires du Jurassique du Grand Belfort. Rapport final V1. BRGM/RP-71882-FR, 77 p.

HOESUNG LEE (Chair), Katherine Calvin (USA), Dipak Dasgupta (India/USA), Gerhard Krinner (France/Germany), Aditi Mukherji (India), Peter Thorne (Ireland/United Kingdom), Christopher Trisos (South Africa), José Romero (Switzerland), Paulina Aldunce (Chile), Ko Barrett (USA), Gabriel Blanco (Argentina), William W. L. Cheung (Canada), Sarah L. Connors (France/United Kingdom), Fatima Denton (The Gambia), Aïda Diongue-Niang (Senegal), David Dodman (Jamaica/United Kingdom/Netherlands), Matthias Garschagen (Germany), Oliver Geden (Germany), Bronwyn Hayward (New Zealand), Christopher Jones (United Kingdom), Frank Jotzo (Australia), Thelma Krug (Brazil), Rodol Lasco (Philippines), June-Yi Lee (Republic of Korea), Valérie Masson-Delmotte (France), Malte Meinshausen (Australia/Germany), Katja Mintenbeck (Germany), Abdalah Mokssit (Morocco), Friederike E. L. Otto (United Kingdom/Germany), Minal Pathak (India), Anna Pirani (Italy), Elvira Poloczanska (UK/Australia), Hans-Otto Pörtner (Germany), Aromar Revi (India), Debra C. Roberts (South Africa), Joyashree Roy (India/Thailand), Alex C. Ruane (USA), Jim Skea (United Kingdom), Priyadarshi R. Shukla (India), Raphael Slade (United Kingdom), Aimée Slangen

(The Netherlands), Youba Sokona (Mali), Anna A. Sörensson (Argentina), Melinda Tignor (USA/Germany), Detlef van Vuuren (The Netherlands), Yi-Ming Wei (China), Harald Winkler (South Africa), Panmao Zhai (China), Zinta Zommers (Latvia) with collaboration : Jean-Charles Hourcade (France), Francis X. Johnson (Thailand/Sweden), Shonali Pachauri (Austria/India), Nicholas P. Simpson (South Africa/Zimbabwe), Chandni Singh (India), Adelle Thomas (Bahamas), Edmond Totin (Benin) and contribution of Andrés Alegría (Germany/Honduras), Kyle Armour (USA), Birgit Bednar-Friedl (Austria), Kornelis Blok (The Netherlands) Guéladio Cissé (Switzerland/Mauritania/France), Frank Dentener (EU/Netherlands), Siri Eriksen (Norway), Erich Fischer (Switzerland), Gregory Garner (USA), Céline Guivarch (France), Marjolijn Haasnoot (The Netherlands), Gerrit Hansen (Germany), Matthias Hauser (Switzerland), Ed Hawkins (UK), Tim Hermans (The Netherlands), Robert Kopp (USA), Noémie Leprince-Ringuet (France), Debora Ley (Mexico/Guatemala), Jared Lewis (Australia/New Zealand), Chloé Ludden (Germany/France), Zebedee Nicholls (Australia), Leila Niamir (Iran/The Netherlands/Austria), Shreya Some (India/Thailand), Sophie Szopa (France), Blair Trewin (Australia), Kaj-Ivar van der Wijst (The Netherlands), Gundula Winter (The Netherlands/Germany), Maximilian Witting (Germany), 2024. Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6).

KERRIEN Y., CONTINI D., KUNTZ G., ANGELY B., LAFFLY J.L., KERRIEN Y., LANDRY J., THÉOBALD N., 1972. Carte géologique de Montbéliard à 1/50 000. Editions du BRGM, Service géologique National.

KERRIEN Y., CONTINI D., KUNTZ G., ANGELY B., LAFFLY J.L., KERRIEN Y., LANDRY J., THEOBALD N., 1972. Notice explicative de la feuille de Montbéliard à 1/50 000. Editions du BRGM, Service géologique National.

LAGIE B. et NAGEL J.L., 2008. Carte géologique harmonisée du département du Doubs. BRGM/RP-55929-FR, 143 p., 6 fig., 2 tab., 2 pl., hors-texte.

LAJAUNIE C., COURRIOUX G. et MANUEL L., 1997. Foliation Fields an 3D Cartography in Geology : Principles of a Method Based on Potential Interpolation. *Mathematical Geology* 29(4), pp. 571-584.

NUSSBAUM C., KLOPPENBURG A., Typhaine CAER T., BOSSART P., 2017. Tectonic evolution around the Mont Terri rock laboratory, northwestern Swiss Jura: constraints from kinematic forward modelling. *Swiss J Geosci* (2017) 110:39–66. DOI 10.1007/s00015-016-0248-x.

THEOBALD N. DEVANTOY J., 1963. Carte géologique de Lure à 1/50 000. Feuille n° 444. Editions du BRGM, Service géologique National.

VALLET A., NOURY G., RABIN M. et HUSSON E., 2019. Cartographie des aléas effondrement/affaissement lié au karst, glissement de terrain et chute de blocs sur la commune de Belfort (90). Rapport final. BRGM/RP-69009-FR. 200 p., 66 ill., 8 ann., 1 USB.

## **Annexe 1 Synthèses des rapports antérieurs**

DONEY C. avec la contribution de NEVEUX A. et BRUGERON A. (2020). Connaissances de la ressource en eau souterraine du Grand Belfort et perspectives. Rapport final. BRGM/RP-70184-FR, 90 p., 38 ill., 4 tabl., 3 ann., CD.

DONEY C. & LACQUEMENT F., 2022. Caractérisation géologique et hydrogéologique des calcaires du Jurassique du Grand Belfort. Rapport final V1. BRGM/RP-71882-FR, 77 p.

Document public



# CONNAISSANCES DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE DU GRAND BELFORT ET PERSPECTIVES

Rapport final

BRGM/RP-70184-FR  
Septembre 2020

1.89 3740.46 -625.5



## Synthèse

L'agglomération du Grand Belfort a mandaté la Direction régionale BRGM Bourgogne – Franche-Comté pour réaliser l'état des connaissances scientifiques sur les ressources en eau souterraine présentes sur le Territoire de Belfort, plus précisément sur l'emprise de l'agglomération du grand Belfort, et identifier celles intéressantes pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP).

Le Territoire de Belfort présente une géologie très variée avec des caractéristiques hydrogéologiques hétérogènes. D'après le référentiel hydrogéologique BDLisa (niveau 3), 12 entités hydrogéologiques (= aquifères) sont présentes sur le Territoire de Belfort.

L'eau alimentant le Grand Belfort provient à hauteur de 70 % des nappes alluvionnaires de la Savoureuse (Champ captant de Sermamagny) et de l'Allaine (Champ captant de Morvillars). Les 30 % restant proviennent de l'achat d'eau auprès des services en eaux voisins. La tension sur les deux ressources alluvionnaires est de plus en plus forte depuis ces 3 dernières années du fait des sécheresses de plus en plus longues et fréquentes. D'autre part, en contexte de changement climatique, une accentuation du phénomène est probable.

Le Grand Belfort est donc à la recherche de nouvelles ressources pour renforcer et diversifier sa capacité de production en eau potable à partir des eaux souterraines.

Pour mieux connaître les différentes entités hydrogéologiques présentes sur le secteur, un recensement des connaissances déjà acquises sur le département a été réalisé.

133 rapports ont pu être collectés auprès de l'ensemble des producteurs potentiels (organismes nationaux et locaux). Ces rapports ont fait l'objet d'une analyse et ont été qualifiés selon 5 classes d'intérêt

Les différentes banques de données existantes (BSS, ADES...) ont également été consultées.

Ce travail a permis de recenser et d'organiser les données sur les ressources en eau dans une base de données de telle sorte que le Grand Belfort puisse avoir une vision des connaissances existantes au droit du département. À cette base de donnée, une représentation cartographique a été associée.

L'analyse de ces données bibliographiques a permis de mettre en évidence 5 entités hydrogéologiques d'intérêt pour l'alimentation en eau potable :

- les alluvions de la Savoureuse ;
- les Alluvions de l'Allaine ;
- les cailloutis du Sundgau ;
- les calcaires du Jurassique affleurants ;
- les calcaires du Jurassique sous-couvertures.

Connaissances de la ressource en eau souterraine du Grand Belfort et perspectives

Les nappes des alluvions de la Savoureuse et de l'Allaine sont déjà exploitées par le Grand Belfort et présentent une forte vulnérabilité aux périodes de sécheresses. Elles ne peuvent donc pas être considérées comme de nouvelles ressources à prospecter. Par contre, **la mise en place d'une gestion optimisée de ces nappes alluvionnaires** est nécessaire ; elle pourra s'appuyer sur :

- un suivi de la ressource en eau dans son ensemble (eau souterraine – eau de surface) de façon pérenne ;
- une modélisation hydrodynamique couplée « eaux souterraines – eaux de surface »

L'entité hydrogéologique des cailloutis du Sundgau se situe en dehors des limites du Grand Belfort. Elle est exploitée par la communauté de communes du Sud Territoire. Cette ressource est identifiée par l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC) comme zone à préserver pour l'alimentation en eau potable. Les secteurs Bretagne et l'axe Faverois - Lepuix-Neuf sont les zones les plus favorables à la prospection d'après les informations disponibles. Toutefois, cette ressource est déjà bien sollicitée. De plus, elle joue un rôle important dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques et dans le maintien de zones humides. **Il est donc nécessaire d'être vigilant sur les risques de surexploitation en mettant en place une gestion optimisée au droit de cette entité hydrogéologique.**

Les entités hydrogéologiques des calcaires du Jurassique affleurant et sous-couverture sont peu ou pas exploitées dans le Territoire de Belfort. Or ces entités sont identifiées, dans la bibliographie, comme des ressources à fort potentiel.

**Les entités des calcaires du Jurassique semblent être les ressources en eaux souterraines les plus intéressantes par rapport aux besoins du Grand Belfort.** Cependant, ces entités sont parmi les milieux souterrains les plus difficiles à caractériser.

**Des zones de prospections ont toutefois pu être identifiées à partir des données bibliographiques mettant en évidence les secteurs les plus fracturés et potentiellement les plus productifs :**

1. au droit des calcaires du Jurassique affleurants au niveau des communes de Botans/Bavillars/Urcerey ;
2. au droit des calcaires du Jurassique sous-couverture au niveau des communes de Morvillars/Grandvillars et des communes de Andelnans/Vézelois.

Un plan d'action a été élaboré, intégrant des opérations techniques permettant d'acquérir, de valider ou de renforcer les connaissances sur les entités hydrogéologiques considérées. Ce plan d'action s'organise autour des thèmes suivants :

- une gestion et une optimisation de la ressource en eau actuellement exploitée ;
- le développement et la prospection de nouvelles ressources en eau.

Ce plan d'action présente les objectifs, les coûts et la durée de réalisation des investigations complémentaires.

Document à accès immédiat

## Caractérisation géologique et hydrogéologique des calcaires du Jurassique du Grand Belfort

Rapport final

**BRGM/RP-71882-FR**

Version 1 du 27 juin 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

**Doney Clément, Lacquement Frédéric**

**Vérificateur :**

Nom : JB Charlier

Fonction : Hydrogéologue

Date : 05/07/2022

Signature :



**Approbateur :**

Nom : D. Salquebre

Fonction : Directeur du BRGM Alsace

Date : 08/07/2022

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM  
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.  
Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

## Synthèse

A la demande du Grand Belfort et dans le cadre de la prospection de nouvelles ressources en eau, le BRGM propose dans ce rapport de caractériser le contexte géologique et hydrogéologique des calcaires du Jurassique en proposant un projet se découpant en deux grandes phases d'étude :

- la caractérisation et l'acquisition de données géologiques au droit des calcaires du Jurassique affleurant et sous couverture ;
- la caractérisation et l'acquisition de nouvelles données hydrogéologiques au droit des calcaires du Jurassique affleurant.

L'acquisition des données géologiques a permis d'identifier :

- la présence de zones faillées (N-S et NE-SW) pouvant être des zones préférentielles d'écoulement d'eau vertical reliant la surface du sol et le milieu souterrain ;
- Des traces de circulation d'eaux horizontales entre les bancs calcaires qui suivent l'inclinaison des couches ;
- La présence d'altération de la roche calcaire liée à la circulation d'eau à travers les formations calcaires ;
- la structure géométrique globale des calcaires décrit une vaste synforme à fond plat. L'axe de la synforme (point bas du fond plat) correspondrait globalement, à la vallée de l'Allan et de la Bourbeuse tandis que les calcaires affleurants (au niveau des rives de la Savoureuse et au sud de la vallée de l'Allaine) en seraient les bordures.

Les aquifères calcaires présentant le plus gros potentiel en eau seraient potentiellement des calcaires affectés par de nombreuses failles qui recouperaient des interbancs altérés/karstifiés au niveau de l'axe de la synforme.

Pour mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude, la seconde phase a été de caractériser les circulations des eaux souterraines au droit de ces aquifères calcaires à travers la mesure :

- De jaugeages de débits sur plusieurs sections de cours d'eau ;
- Des mesures de débits au droit des sources et des mesures piézométriques au droit des puits et forages ;
- La mesure de conductivités électriques (= minéralisation des eaux) des cours d'eau, des sources et fontaines.

Les campagnes de mesures de terrain ont été réalisées :

- du 20 au 23 septembre 2021 pour les basses eaux,
- du 22 au 24 février 2022 pour les hautes eaux.

Les campagnes de mesures au droit des calcaires affleurant, en rive droite de la Savoureuse, mettent en évidence un hydrosystème de type karstiques qui se caractérise par :

- des variations importantes des débits entre les basses et hautes eaux ;

Caractérisation géologique et hydrogéologique des calcaires du Jurassique du Grand Belfort

- des fortes interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface (zone d'apports en eaux souterraines et de pertes d'eau de surface) mises en évidence à travers les mesures de débits et de conductivités.

La nappe est donc vulnérable aux variations météorologiques et aux pollutions de surface. Cette nappe des calcaires affleurant ne répond pas pleinement aux attentes du Grand Belfort qui recherche une nouvelle ressource de qualité et qui puisse pallier à des manques d'eau liés à d'éventuelles sécheresses.

Il est donc recommandé de continuer les recherches au droit des calcaires sous couverture dont la nappe est mieux protégée face aux effets de la sécheresse et face aux pollutions de surface.

Pour pouvoir implanter un forage dans cette zone, il est recommandé par ailleurs d'affiner l'analyse structurale du sous-sol à l'aide de prospections géophysiques et d'une modélisation 3D.

## Annexe 2 Log des correspondances entre les cartes géologiques ayant permis d'obtenir la pile lithostratigraphique du modèle

Marqueurs sismiques	Aquifère/Aquitard	AGE	NOTATION	LITHOLOGIE	NOT	NOT	NOT	NOT	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	EPAISSEUR	EPAISSEUR	AGE	AGE	AGE	AGE
Mod geol 3D	Mod geol 3D	Mod geol 3D	Mod geol 3D	Mod geol 3D	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Doubs	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Doubs	C50K_Delle	C50K_Belfort	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Doubs
		QUATERNAIRE	p Plio-Quaternaire	Limon des plateaux, loess, lehms	LP	OEx	LP	OEx	Limon des plateaux, loess, lehms	Loess et loesslehm anciens	Limon des plateaux, loess, lehms	Loess et loesslehm anciens renfermant Helix arbutorum et des poupées	Epaisseur métrique	Jusqu a 15 m	Quaternaire	Quaternaire	Quaternaire	Quaternaire
		PLIOCENE		Cailloutis de Sundgau	p	Fp	p	Fp	Cailloutis à galets d'origines alpines et rhénans (cailloutis de Sundgau)	Alluvions anciennes, dites cailloutis ou graviers du Sundgau	Cailloutis à galets d'origines alpines et rhénans (cailloutis de Sundgau)	Alluvions anciennes dites cailloutis ou graviers du Sundgau en nappe à matériel voggien ou rhénan (Villafranchien)	non renseigné	Epaisseur variable (10 à 20 m max.)			Pliocène	Pliocène
Vitesse lente <u>Base bien marquée</u> (vitesse lente vers rapide) N-B-N	Alternance de conglomérats, marnes et calcaires (conglomérats carbonatés à la base)	OLIGOCENE	g Oligocene	Alternance de conglomérats, marnes et calcaires. Poudingues calcaires à la base.	g1	g1	g1a-b, g1a	g1, gM	Conglomérats, marnes et calcaires. Faciès côtiers avec Poudingues calcaires à la base à intercalations molassique. Passage à alternance de marnes et calcaire, puis à nouveau conglomérats, marnes,...	Marnes, grés, conglomérats, calcaires lacustres	g1a-b : Marnes micacées argileuses à Eugaleus latus (Marnes à Mélettes), schistes papyracés bitumineux à Cetorhinus parvus (Schistes à Amphysiles), marnes bleues à Plecanium carinatum (Marnes à Foraminifères). g1a : Conglomérats, marnes, calcaires lacustres.	gM : Marnes jaunes ou brunes à granules de fer, remaniées à la base. g1 : Conglomérat côtier, marnes et calcaires lacustres du Système de Bourgne.	Jusqu'à 45 à 50 m	Plus de 100 m au sondage de Charmois	Oligocène (stampien inf. - Sannoisien)	Oligocene inf	g1a-b : Stampien inférieur à moyen g1a : Faciès sannoisien ; Stampien inférieur	Oligocène et Oligocène inf.
	Non pris en compte (remplissage karstique anecdotique)	EOCENE	e Eocene	Minerai de fer sidérolithique, calcaires lacustres	e	E	e	e6	Minerai de fer pisillithique (sidérolithique)	Minerai de fer sidérolithique, calcaires lacustres	Calcaires et marnes lacustres à Planorbis pseudoammonius, argiles rouges à granules ferrugineux	Argiles rouges à pisolithes ferrugineux (exploités) : argiles du sidérolithique	Discontinue en remplissage de poches karstiques dans les calcaires du Kimméridgien	non renseigné	Eocène sidérolithique	Eocene	Eocène sidérolithique	Eocène continental
Vitesse moy. <u>Base peu marquée</u> (vitesse moy. vers rapide)	Calcaires et marnes	Kim. sup. MALM	j6b Kimmeridgien sup.	Calcaires et marnes à Exogyra virgula, Calcaires et marnes à Ptérocères, calcaires à Corbis	J8b	j8	—	j6b2	Calcaires et marnes à Exogyra virgula, Dicerias	Marnes, Calcaires marneux, grumeleux ou compacts, parfois glauconieux à Harpagodes, Terebratules, ...	—	Calcaires parfois dolomitiques et marnes à Exogyra virgula, Dicerias	30 à 35 m	10 a 15 m	Kimmeridgien sup.	Kimmeridgien	—	Kimmeridgien sup. (Virgulien)
				Calcaires et marnes à ptérocères. Calcaires à Corbis	J8a		j6a-c	j6b1	Calcaires et marnes à ptérocères. Calcaires à Corbis	Calcaires marneux, fins, renfermant un niveau crayeux (calc. des Gorges	Calcaires noduleux glauconieux ou fins et marnes (à Ptérocères)	65 à 75 m	Kimmeridgien sup.		Kimmeridgien inf. à sup.		Kimmeridgien sup. (Ptérocérien)	

Marqueurs sismiques	Aquifère/Aquitard	AGE	NOTATION	LITHOLOGIE	NOT	NOT	NOT	NOT	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	EPAISSEUR	EPAISSEUR	AGE	AGE	AGE	AGE
Mod geol 3D	Mod geol 3D	Mod geol 3D	Mod geol 3D	Mod geol 3D	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Doubs	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Doubs	C50K_Delle	C50K_Belfort	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Doubs
											de Noailles et Calc. à Corbis							
Vitesse rapide. <i>Base bien marquée (vitesse rapide vers + lent) B-N-B</i>	Calcaires	Kim inf. (faciès Séquanien sup.) à Kim sup. MALM	<b>j6a</b> <b>Kimmeridgien inf.</b>	Calcaires à térébratules et Calcaires crayeux à Cardium	j7c-d		j6a	j6a1	Calcaires à térébratules et Calcaires crayeux à Cardium	Ensemble de calcaires souvent compacts et de Marnes avec du haut vers le bas : Calc. à Cardium (18m), Calc. à Térébratules (27 m),	Calcaires crayeux à Cardium, calcaires à térébratules massifs à passées marneuses	Calcaires à Cardium et térébratules	40 à 45 m	45 m	Kimmeridgien inf. (Faciès Séquanien sup.)	Séquanien	Kimmeridgien inf.	Séquanien sup., Kimmeridgien inf.
Vitesse lente	Marnes	Oxf. sup. / Kim. Inf. (faciès Séquanien moy.) MALM	<b>j5c6aM</b> <b>Oxf_Kimmeridgien</b>	Marnes et calcaires à Astartes	j7b.	j7	j6aM	j5c2-6aM	Marnes à Astartes. Intercalations de calc fins, plaquettes oolithiques et calcaires gréseux.	Marnes et calc. à Astartes (28m),	Marnes avec intercalations de calcaires fins (Marnes à Astartes)	Marnes grises et calcaires gréseux, oolithiques, lumachelliques ou argileux bioclastiques	20 à 30 m	28 m	Kimmeridgien inf. (Faciès Séquanien moy.)		Kimmeridgien inf.	Séquanien moy., Oxfordien terminal-Kimmeridgien basal
Vitesse moy.	Calcaires et marnes	Oxf. sup. / Kim. Inf. (faciès Séquanien inf.) MALM	<b>j5c6aC</b> <b>Oxf_Kimmeridgien</b>	Calcaires fins et marnes à Astartes	j7a		j5cC	j5c2-6aC	Calcaires à Astartes et Natices. Calcaires fins en gros bancs laissant apparaître des interbancs marneux vers le sommet	Calc. à Natices (15 m), Calcaires à Astartes (15 à 18 m).	Calcaires fins et marnes (Calcaires de Clerval)	<i>Calcaires de Séquanien moy. et sup. indifférenciés</i>	20 à 30 m	30 à 33 m	Kimmeridgien inf. (Faciès Séquanien inf.)		Oxfordien moyen (Séquanien)	Oxfordien terminal-Kimmeridgien inf. (Séquanien moy. et sup.)
Vitesse rapide	Calcaires	Oxf. Sup. (faciès Rauracien) MALM	<b>j5bP</b> <b>Oxf_Rauracien</b>	Calcaires oolithiques	j6	j6	<u>j5bP</u>	j5c1R	Faciès récifal : Calcaires bioclastiques, oolithiques, Craie de Sainte-Ursanne au sommet	Calcaires compacts, blancs, crayeux ou sacharoides à Dicerias (20-25m), surmontant des calcaires oolithiques blancs, gris ou rosés à Nérinées et Polypiers (24 m)	Calcaires oolithiques, bioclastiques à polypiers (Oolithe corallienne de Pagnoz)	Calcaires oolithiques et calcaires à polypiers, calcaires récifaux, calcaires noduleux, oolithiques (-de Pagnoz), pisolitiques	50 à 60 m	44 à 49 m	Oxfordien sup. (Argovien et Rauracien)	Rauracien	Oxfordien moyen (Rauracien)	Oxfordien sup. (Rauracien)
Vitesse moy.	Marno-calcaires	Oxfordien moy. (faciès Argovien) MALM	<b>j5</b> <b>Oxfordien</b>	Alternance marno-calcaires	j5	j5	<u>j5b</u>	j5bA, j5abA	Marnes et marno-calcaires à sphérites	Calcaires marneux compacts moirs bleutres ou gris de fumée, parfois jaunes en bancs épais de 1 à 2 m séparés par des marnes terreuses noires, épaisses de 0.20 à 0.30 m et renfermant des polypiers souvent silicifiés, des crinoïdes, des oursins,....	Alternance marno-calcaire à ammonite et brachiopodes, calcaires à silex (Calcaires marneux de Bonnevaux-le-Prieuré)	j5bA : Marnes et marno-calcaires (couche d'Effingen et du Geissberg), Astartes, calcaires hydrauliques et couches à sphérites. j5abA : Marnes bleues pyriteuses plastiques à entroques, calcaires argilo-siliceux gris.	quelques mètres à 25 m	20 m	Oxfordien moy. (Argovien)	Argovien	Oxfordien moyen (Argovien)	Oxfordien inférieur et moyen (Argovien)

Marqueurs sismiques	Aquifère/Aquitard	AGE	NOTATION	LITHOLOGIE	NOT	NOT	NOT	NOT	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	EPAISSEUR	EPAISSEUR	AGE	AGE	AGE	AGE
Mod geol 3D	Mod geol 3D	Mod geol 3D	Mod geol 3D	Mod geol 3D	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Doubs	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Doubs	C50K_Delle	C50K_Belfort	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Doubs
Vitesse lente	Marnes	Oxfordien inf. (faciès marneux) MALM		Marnes grises	j4	j4	j4-5	j5a	Marnes grises	Faciès essentiellement marneux, à spherites calcareo-siliceuses voire chailles, dans sa partie supérieure (30 à 40m). Nombreux fossiles pyritisés dont amonites, lamellibranches, echnodermes,...	Alternance de calcaires et de marnes à Rengeri. Argiles bleues à amonites pyriteuses	j5a, Marnes gris-noir à ammonites pyriteuses, Creniceras renggeri.	35 à 70 m. Variable selon déformations tectoniques	30 à 40 m	Oxfordien inf.	Oxfordien	Callovien moy. (Dogger) À oxfordien inf. (Malm)	Oxfordien inférieur
Vitesse rapide	Calcaires sur Delle mais Marnes sur Belfort	Callovien DOGGER	j4 Callovien	Dalle nacrée : calcaires bidétritiques à rares oolithes	j3a	j3	j4	j4-5, j4b, j4a, j3-4b	Faciès Dalle nacrée : calcaires biodétritiques à rares oolithes, en bancs minces et strati entrecroisée. Hardground au sommet.	Essentiellement marneux, le callovien sup. participe aux zones déprimées et imperméables constituées par l'oxfordien. Le callovien moy. Est peu épais (2.5m) et représenté par des marno-calc à oolithes ferrugineuses.	Dalle nacrée : Calcaires bioclastiques à lits marneux et oolithiques. Oolithes ferrugineuses.	j4-5 : Calcaires argileux oolithiques et marnes à Creniceras renggeri. j4b : Calcaires argileux, oolithes ferrugineuses, Reineckeia anceps (Anticlinal du Larmont, Pontarlier) j4a : Calcaires localement oolithiques, lumachelles, marnes, "Dalle nacrée", lacunes, j3-4b : Calcaires.	non renseigné	17,5 m	Callovien inf.	Callovien	Callovien inf. à moy. (Dogger)	j4-5 : Callovien-Oxfordien indifférenciés j4b : Callovien supérieur. J4a : Callovien inférieur j3-4b : Callovien inférieur et Bathonien non différenciés
Vitesse moy.	Calcaires et marnes	Bathonien DOGGER	j3 Bathonien	Marnes à Rhynchonelles au sommet et Calcaires à la base	j2b	j2	j3-5, j3	j3	Calcaires roux sableux à la base et Marnes à Rhynchonelles.	Marnes à Rhynchonelles (16m) au sommet.	j3-5 : Marnes de Bavilliers et Calcaires de Mailley : Marnes à Parkinsonia alternant avec de petits bancs calcaires à térébratules. Calcaires à polypiers. J3 : Marnes à rhynchonelles (Marnes de Belfort)	j3 : Calcaires compacts, parfois bicolores, oolithiques, spathiques, marnes, calcaires à Momies, calcaires à silex. J3bc : Marnes à Rhynchonelles (-de Belfort), calcaires compacts (-de la citadelle), calcaires oolithiques, spathiques	13 m.	16 m	Bathonien sup. - Callovien basal.	Bathonien	j3-5 : Bathonien inf. à Callovien (Dogger) j3 : Bathonien inférieur à supérieur	j3 : Bathonien j3bc : Bathonien moyen à supérieur
Vitesse rapide	Calcaires			Calcaires oolithiques	j2a	j2	-	j3a	Calcaires sublithographiques et oolithes. Hardground au sommet.	Calcaires oolithiques en dalles, calcaires marneux et marnes à Térébratules à la base	-	Calcaires oolithiques, bioclastiques à tâches, calcaires marneux en dalles fines, hard-ground au sommet, calcaires de	35 m.	-	Bathonien inf.	Bathonien	-	Bathonien inférieur

Marqueurs sismiques	Aquifère/Aquitard	AGE	NOTATION	LITHOLOGIE	NOT	NOT	NOT	NOT	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	LITHOLOGIE	EPAISSEUR	EPAISSEUR	AGE	AGE	AGE	AGE
Mod geol 3D	Mod geol 3D	Mod geol 3D	Mod geol 3D	Mod geol 3D	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Doubs	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Doubs	C50K_Delle	C50K_Belfort	C50K_Delle	C50K_Belfort	HARM50K_Belfort	HARM50K_Doubs
Vitesse rapide	Calcaires	Bajocien sup. DOGGER	j2 Bajocien	Grande Oolithe : Calcaires oolithiques au sommet , intercalations de calcaires et marnes à la base	j1b	j1b	j2c	j2b	Grand Oolithe au sommet : Calcaires oolithiques bicolores en bancs épais. Calcaires et marnes à Ostrea.	Grande Oolithe : Calcaires oolithiques au sommet, Intercalations de marnes et calcaires marneux à Huîtres à la base.	Alternance de calcaires argileux et de marnes (Marnes vésuliennes), calcaire oolitique et bioclastique (Grande oolite)	Calcaires oolithiques (Grande oolithe) à entroques, petites huîtres, marnes à O. acuminata (Vésulien), subfurcatum, Garantia, Parkinsonia, lacunes	30 à 40 m de calcaires oolithiques 10 m de calcaires et marnes à la base	35 à 40 m	Bajocien sup.	Bajocien sup.	Bajocien supérieur	Bajocien supérieur
Vitesse rapide	Calcaires	Bajocien moy. et inf. DOGGER		Calcaires à entroques et Polypiers	j1a	j1a	j2a-b	j2ab, j2a, j1-2	Calcaires à entroques et Polypiers	Calcaires à Polypiers et calcaires oolithiques (35 m). Calcaires à entroques (35 m)	j2a-b : Calcaire argileux à Polypiers et à oolithes (Calcaire à Polypiers de Frotey, Calcaires oolithiques de Dampvalley, Calcaires compacts de Courchaton) j2a : Calcaires bioclastiques à entroques à stratifications obliques (Calcaires à entroques de Vesoul)	j2a b : Calcaires à polypiers de Frotey, calcaires oolithiques de Dampvalley, calcaires compacts de Courchaton j2a : Calcaires à entroques (-de Vesoul) au nord, polypiers, calcaires à silex (-de Messia), calcaires spathiques (à Sowerby) j1-2 : Oolithes ferrugineuses, calcaires à silex, calcaires à entroques (Petit Granite)(calcaires de Conliège)	80 à 118 m	70 m	Bajocien moy. et inf..	Bajocien moy. et inf..	j2a-b : Bajocien inférieur à moyen j2a : Bajocien inférieur	j2a b : : Bajocien inférieur j2a : Bajocien inférieur j1-2 : Aalénien-Bajocien inférieur
Vitesse moy.	Calcaires et marnes	Aalénien LIAS	j1_Aalénien	Calcaires marneux et marnes	l	l6	j1	j1b, j1, l4-j1	-	Calcaires marneux et marnes gris bleu (10-12m), calcaires gréseux gris bleu (> 50 m). Marnes à nodules calcaires à la base (15-20 m)	Calcaires marno-sableux d'Aresches à Leioceras opalinum, Calcaires oolithiques de Vellefaux, Minerai de fer supra-liasique	j1b : Calcaire et minerai de fer, mines de Laissey, Deluz j1 : calcaires ferrugineux inférieurs, calcaires roux sableux, calcaires oolithiques, puis minerai de fer et calcaires supérieurs de Tournans et Rougemont l4-j1 : Marnes	-	75 à 82 m	Aalénien	Aalénien	Aalénien	j1b : Aalénien supérieur j1 : Aalénien l4-j1 : Toarcien - Aalénien indifférenciés



## Annexe 3 Rapport Geo2X Reconnaitances géophysiques par sismique réflexion

RÉFÉRENCE PROJET : 2023P23020

### RECONNAISSANCES GÉOPHYSIQUES PAR SISMIQUE RÉFLEXION BELFORT (FRANCE)



RAPPORT FINAL

Juin 2023



**GEO2X SA**

Rue de Chamblon 34  
1400 Yverdon-les-Bains  
Suisse  
info@geo2x.com  
www.geo2x.com



**BRGM**

3 Avenue Claude Guillemin  
45100 Orléans  
France

BRGM  
2023P23020



## Révisions

Status	Date	Rédaction	Relecture	Approbation
Draft	7 juin 2023	Chloé Nicaty	Giuseppe Cocchiararo	David Dupuy



## Table des matières

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>9</b>
<b>2.</b>	<b>DÉROULEMENT DES OPÉRATIONS .....</b>	<b>11</b>
2.1.	Chronologie.....	11
2.2.	Conditions de terrain.....	11
<b>3.</b>	<b>HSE.....</b>	<b>12</b>
<b>4.</b>	<b>TOPOGRAPHIE .....</b>	<b>15</b>
4.1.	Système de coordonnées .....	15
4.2.	Ressources .....	15
4.2.1	Equipement.....	15
4.3.	Paramètres et procédure d'acquisition.....	15
4.4.	Contrôle de qualité et traitement des données.....	15
4.5.	Résultats .....	16
<b>5.</b>	<b>SISMIQUE RÉFLEXION .....</b>	<b>18</b>
5.1.	Objectifs de l'acquisition.....	18
5.2.	Ressources .....	18
5.2.1	Equipement.....	18
5.3.	Paramètres d'acquisition .....	19
5.4.	Contrôle de qualité.....	19
5.4.1	Choix des paramètres .....	19
5.4.2	Logiciels.....	19
5.4.3	Qualité des données brutes .....	19
5.5.	Traitement des données .....	20
<b>6.</b>	<b>RÉSULTATS .....</b>	<b>24</b>

## Liste des figures

Figure 1: Situation générale de la zone d'étude .....	9
Figure 2: Mesures topographiques .....	16
Figure 3: Position des géophones et des tirs déportés .....	17
Figure 4 : Camion vibreur Envirovibe IVI Mark II .....	18
Figure 5: Exemple de tir .....	20
Figure 6: Position des midpoints et numérotation CDP Profil 1 .....	21
Figure 7: Verification de la géométrie Profil 1 .....	21
Figure 8: Construction du modèle de vitesses .....	22
Figure 9: Section sismique P01 – Stack temps .....	25
Figure 10: Section sismique P01 _ Migration Profondeur .....	26
Figure 11: Section sismique P02 – Stack temps .....	27
Figure 12: Section sismique P03 _ Migration Profondeur .....	28
Figure 13: Section sismique P03 – Stack temps .....	29
Figure 14: Section sismique P03 _ Migration Profondeur .....	30
Figure 15: Section sismique P04 – Stack temps .....	31
Figure 16: Section sismique P04 _ Migration Profondeur .....	32

## Liste des tables

Table 1: Quantitatifs par ligne .....	10
Table 2: Résumé des opérations.....	11
Table 3: Synthèse des positions des lignes (coordonnées Lambert 93) .....	16
Table 4: Paramètres d'acquisition. ....	19

# Partie I : Résumé des opérations



Table 1: Quantitatifs par ligne

Ligne	Géophones	Sources	Distance linéaire
1	271	268	2836m
2	248	246	2684m
3	358	356	3751m
4	582	564	6163m
<b>Total</b>	<b>1461</b>	<b>549</b>	<b>15434m</b>

Ce rapport regroupe les résultats obtenus pour cette étude ainsi que les spécifications techniques nécessaires à sa réalisation.

- La partie I fournit des informations sur le déroulement des opérations ;
- La partie II détaille les ressources, paramètres et procédures de traitement de données pour chacune des méthodes employées ;
- La partie III présente l'ensemble des résultats. Des recommandations pour de futures études sont également fournies ;
- Les annexes regroupent l'ensemble des cartes nécessaires à cette étude ainsi que les spécifications techniques de l'équipement employé.

## 2. DÉROULEMENT DES OPÉRATIONS

### 2.1. Chronologie

Le tableau ci-dessous résume le déroulement des opérations, du lancement du permittage à la démobilitation.

Table 2: Résumé des opérations

Date	Réalisation
<b>Avant 22.05</b>	Préparation de l'implantation, design des lignes (BRGM/Geo2X) Préparation et mobilisation de l'équipement (Geo2X) Recensement des propriétaires des parcelles traversées (BRGM) Préparation et impression des supports de communications (BRGM) DT/DICT, arrêté de voirie (BRGM)
<b>Lundi 22.05</b>	Mobilisation du personnel et de l'équipement de mesure, test sur la ligne 4 Déploiement du profil 02
<b>Mardi 23.05</b>	Acquisition profil 02, déploiement du profil 04, acquisition profil 04 ramassage profil 02
<b>Mercredi 24.05</b>	Acquisition profil 04, déploiement du profil 04, ramassage profil 04
<b>Jeudi 25.05</b>	Déploiement et acquisition profil 03 et ramassage du profil 03
<b>Vendredi 26.05</b>	Déploiement acquisition et ramassage du profil 01- démobilitation

### 2.2. Conditions de terrain

L'ensemble de l'acquisition, incluant les mesures topographiques, s'est déroulée dans des conditions météorologiques bonnes, sauf une petite pluie les premiers deux jours. Le planning prévisionnel a pu être respecté. Les lignes sismiques traversaient différents environnements, zones village, route.

### 3. HSE

Au vu des risques spécifiques identifiés dans le cadre de ces acquisitions au moyen de gros engins, un système de HSE adapté a été mis en place. Afin de minimiser les dangers rencontrés et l'impact du travail sur les riverains et l'environnement, les éléments suivants ont été mis en place :

- Une réunion générale de lancement de mission expliquant à chacun :
  - Les buts et enjeux des acquisitions ;
  - Les risques spécifiques au projet et la façon de s'en prémunir ;
  - Les règles de comportements avec les riverains.
- Des réunions quotidiennes avec les équipes de lignes et de tirs. Ces réunions visaient à rappeler chaque jour les règles de sécurité ainsi que des ajustements dans la façon de travailler pour donner suite à des rapports d'anomalie. Parmi les sujets abordés :
  - Pose de géophone au bord des trottoirs et sécurisation des capteurs ;
  - Signalement des géophones sur les passages piétons, cyclables ;
  - Gestion des déchets ;
  - Postures de travail, PPE ;
  - Signalétique autour des vibrateurs ;
  - Distances de sécurités du personnel autour des vibrateurs.
- Un système de remontée d'information du terrain en direction du management via des fiches d'anomalie et une application pour smartphone.

Le respect des normes de travail définie et la bonne collaboration entre les différents collaborateurs de cette mission a permis d'éviter tout incident majeur.

## Partie 2 : Technique

## 4. TOPOGRAPHIE

### 4.1. Système de coordonnées

L'ensemble des résultats cartographiques et géophysiques de cette étude sont fournis dans le système de coordonnées Lambert 93 (EPSG 2154).

### 4.2. Ressources

#### 4.2.1 Equipement

Le suivi topographique de l'acquisition sismique a été assuré à l'aide de deux systèmes DGPS distincts :

- Un DGPS Trimble R12i, assurant une précision des mesures à 10cm ;

Les spécifications techniques détaillées de chacun de ces équipements sont fournies en annexe I.

### 4.3. Paramètres et procédure d'acquisition

La plupart des géophones et tirs ont été positionnés au GPS différentiel. Les paramètres de mesures suivants ont été employés :

- Mode d'observation : RTK
- Observations : 5, moyennées
- Masque d'élévation : 5°
- Satellites : Minimum 8 (GPS & GLONASS)

L'ensemble des points traversant la zone de forêt ont été implantés préalablement à la pose des géophones et la réalisation des forages pour l'explosif. Le marquage au sol de ces points préparés sur un système SIG permet aux équipes de pose et de tirs de positionner les instruments. Dans les zones découvertes la position des géophones et des tirs a été mesurée après l'installation des capteurs.

### 4.4. Contrôle de qualité et traitement des données

Les données sont exportées des instruments en tant que fichiers texte. A la fin de chaque journée d'acquisition, l'ensemble des données est sauvegardé sur le serveur de Geo2X SA tout en étant copié pour traitement sur un ordinateur portable.

L'ensemble du traitement de données et du contrôle de qualité est effectuée dans des feuilles de calculs Microsoft Excel et dans un projet QGIS employant les données fournies par l'IGN.

Le contrôle de qualité et le traitement des données a été assuré chaque jour afin de fournir des données adéquates au traitement des données sismiques.

Afin de s'assurer de la cohérence des données, des points de contrôles ont été repris chaque jour. La procédure de contrôle de qualité inclus :

- Calcul des distances entre les points ;
- Contrôle de la cohérence des coordonnées X/Y dans un SIG (imagerie aérienne & cadastre) ;
- Contrôle visuel d'un profil altimétrique.

#### 4.5. Résultats

Les cartes en page suivante présentent les points relevés sur les 4 profils.

Le tableau ci-dessous résume les positions des lignes.

Table 3: Synthèse des positions des lignes (coordonnées Lambert 93)

Ligne	X <sub>Start</sub> [m]	Y <sub>Start</sub> [m]	X <sub>End</sub> [m]	Y <sub>End</sub> [m]
1	997930.6	6723102.1	995355.5	6724173.4
2	995407.1	6722781.0	996245.4	6725230.4
3	994976.4	6722287.0	998541.1	6721963.2
4	994933.6	6728015.6	998330.2	6723419.6



Figure 2: Mesures topographiques

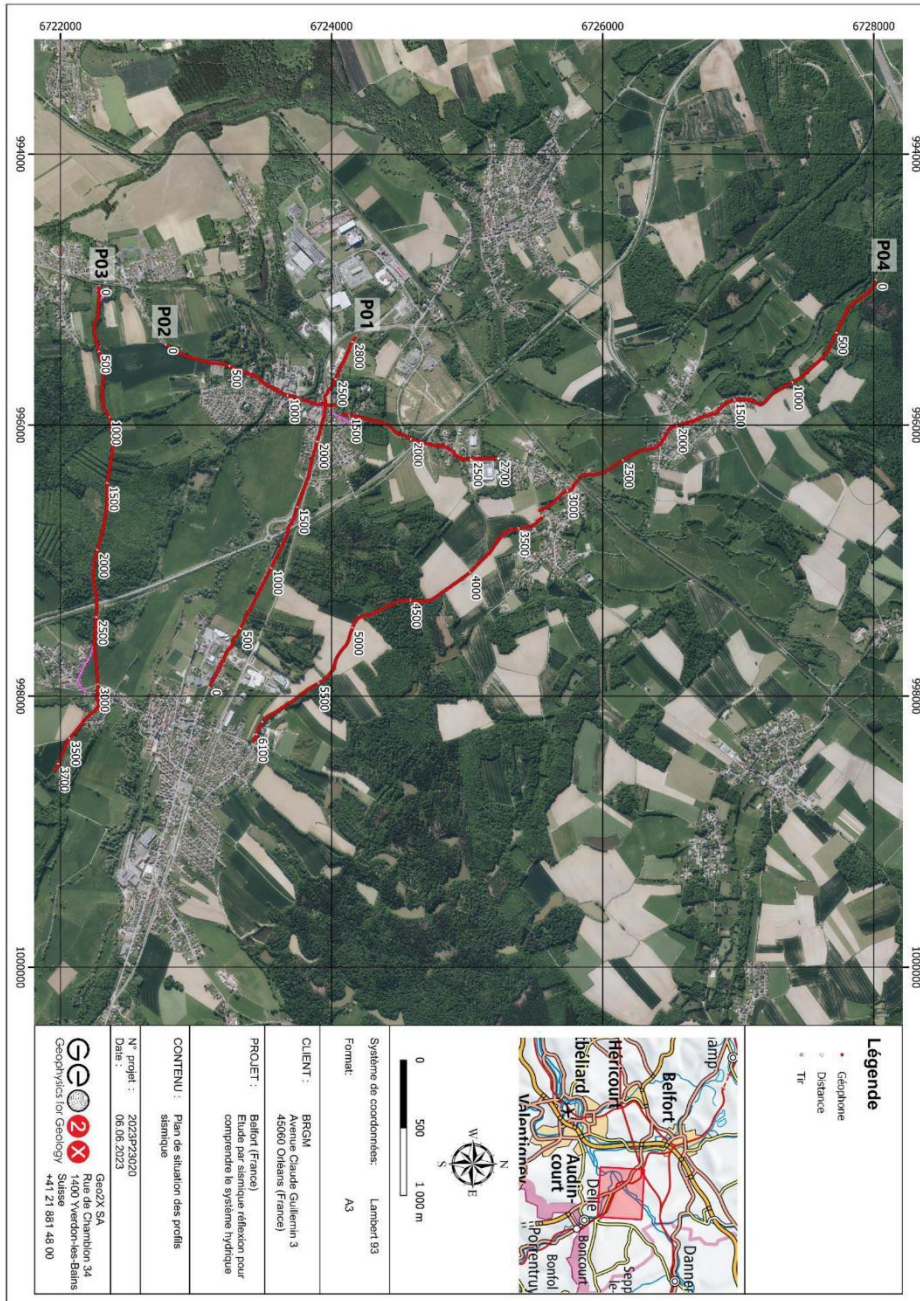


Figure 3: Position des géophones et des fils déportés



## 5. SISMIQUE RÉFLEXION

### 5.1. Objectifs de l'acquisition

L'acquisition des 4 profils de sismique réflexion vise à :

- Caractériser la géométrie des réflecteurs ;
- Préciser le positionnement d'accidents tectoniques en situant les plans de failles principaux ;
- Evaluer les décalages verticaux créés par ces failles.

Une source vibrante a été employée afin d'acquérir les données sismiques.

### 5.2. Ressources

#### 5.2.1 Equipement

##### 5.2.1.1 Vibrateur

La source vibrante employée, un Envirovibe IVI Mark II, déploie un *peak force* de 14940 livres ce qui le rend à même de travailler en environnement urbain ou péri-urbain tout en garantissant une profondeur d'investigation suffisante pour les objectifs requis.



Figure 4 : Camion vibrateur Envirovibe IVI Mark II

Les spécifications détaillées de ce vibrateur sont fournies en annexe II.

##### 5.2.1.2 Sismographe

Cette acquisition a été effectuée à l'aide d'un sismographe SmartSolo (DTCC) avec une fenêtre active de minimum 240 canaux. Les spécifications de ce sismographe sont précisées en annexe III.

### 5.3. Paramètres d'acquisition

Les paramètres d'acquisition utilisés lors de cette campagne de sismique sont récapitulés dans le tableau en page suivante.

Table 4: Paramètres d'acquisition.

<b>Intertrace</b>	10 mètres	<b>Géophones</b>	5Hz single vertical high sensitivity
<b>Intertir</b>	10 mètres	<b>Sources</b>	Envirovibe IVI Mark II
<b>Traces</b>	P1 : 271 P2 : 250 P3 : 358 P4 : 582	<b>Spécifications des sources</b>	V1: 12-140Hz, 30s, lin, 0.5s tap, <b>75%</b> drive
<b>Temps d'écoute</b>	3s	<b>Echantillonnage</b>	1ms
<b>Format des données</b>	SegY	<b>Active spread</b>	2400 split spread

### 5.4. Contrôle de qualité

#### 5.4.1 Choix des paramètres

Les tests pré-acquisition ont été effectués avant le premier tir, le lundi 22 mai 2023. Les résultats de ces tests ont permis de choisir le sweep le plus adapté à l'objectif de la campagne. A ce but, 48 canaux, avec un intertrace de 10 mètres ont été déployé le long du tracé de la ligne 4, et les données enregistrées avec un système real time Geode Geometrics.

#### 5.4.2 Logiciels

L'extraction des points de tirs se fait à partir des données brutes enregistrées en continu par les IGU SmartSolo et des T<sub>0</sub> GPS enregistrés lors du déclenchement de chaque sweep.

Le contrôle qualité et le traitement des données de vibrosismique ont été effectués à l'aide du logiciel ProMax (Halliburton).

#### 5.4.3 Qualité des données brutes

La cohérence du T<sub>0</sub> est bonne sur tous les tirs. La procédure logicielle d'extraction des points de tirs a permis de collecter 100% des données. Aucune trace n'a été perdue.

La qualité générale des données est globalement bonne.

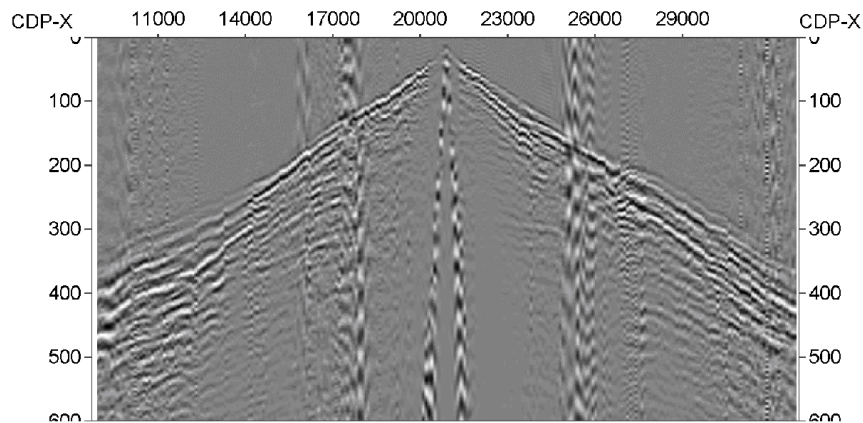


Figure 5: Exemple de tir

## 5.5. Traitement des données

La chaîne de traitement ci-dessous a été employée pour toutes les lignes de vibrosismique afin de produire des sections de qualité optimales. L'ensemble de la procédure a été effectuée dans le logiciel ProMax (Halliburton).

La chaîne de traitement ci-dessous a été appliquée sur toutes les lignes :

- Préparation des points de tirs :
  - Import des SEG-Y et mise en place de la géométrie
  - Déconvolution (spiking deconvolution, 8ms/80 ms)
  - Gain (Automatic Gain Control, 500ms)
  - Statiques réfractions (datum 400m.a.s.l., vitesse de remplacement 2'000 m/s)
  - Statiques résiduelles

- Collection CDP :
- CDP binning

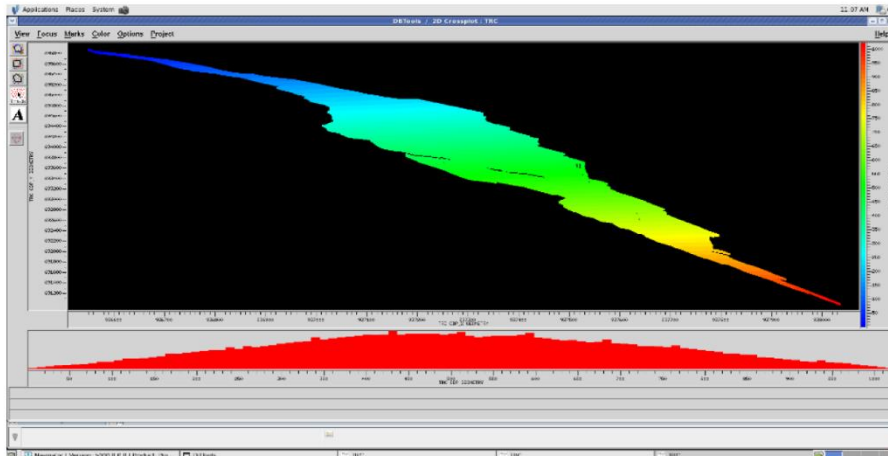


Figure 6: Position des midpoints et numérotation CDP Profil 1

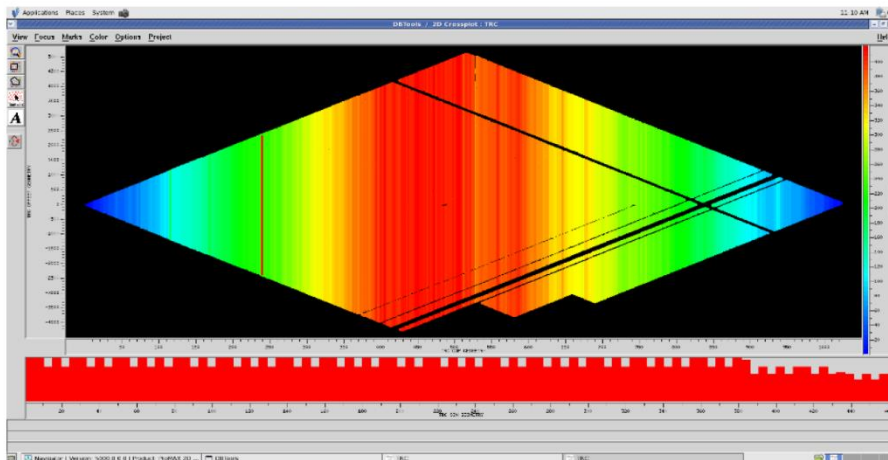


Figure 7: Verification de la géométrie Profil 1

- Pointé des vitesses et correction NMO (stretch mute 80%)
- Stack
- Atténuation des ondes de surface (800m/s)
- Filtre passe bande (18-24-110-140en surface, 12-20-90-120 en profondeur)

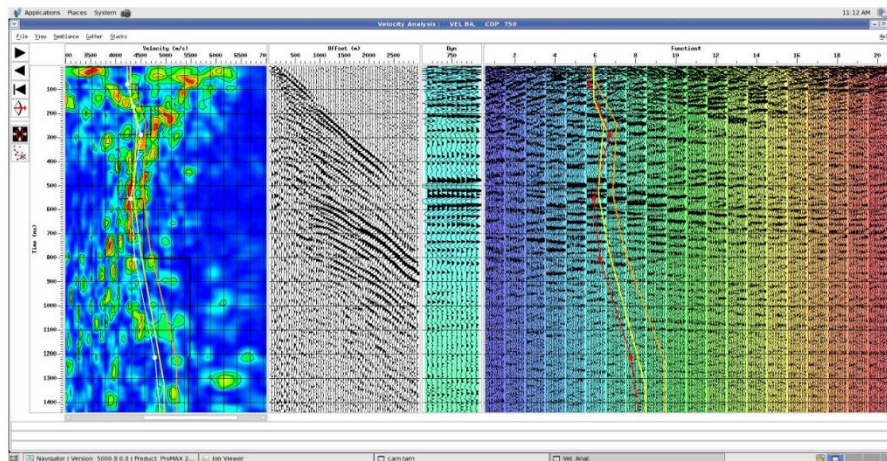


Figure 8: Construction du modèle de vitesses

- Optimisation post-stack
  - Atténuation des ondes de surface (800m/s)
  - Filtre passe bande (18-24-110-140en surface, 12-20-90-120 en profondeur)
  - Gain (AGC 800 ms)
  - Migration (phase-shift)
  - Filtre FK
  - Filtre passe bande (18-24-110-140en surface, 12-20-90-120 en profondeur)
  - Conversion temps-profondeur
  - Exports SEG-Y

## Partie 3: Résultats

## 6. RÉSULTATS

L'acquisition de 4 profils de sismique réflexion a été effectuée durant la campagne conduite au mois de mai 2021. Un total d'environ 6'000 mètres de sismique a été acquis.

Les données ont été traitées en sismique réflexion afin de caractériser la géométrie des éléments structuraux de la zone d'étude.

Les sections (stack-temps et profondeurs) présentées en annexe montrent différents éléments :

### Profil 1

- Un pendage global des couches vers le ESE.
- Un bassin a priori quaternaire qui se développe vers le ESE.
- Une zone déstructurée/faillée entre les CDP 240 et 280.

### Profil 2

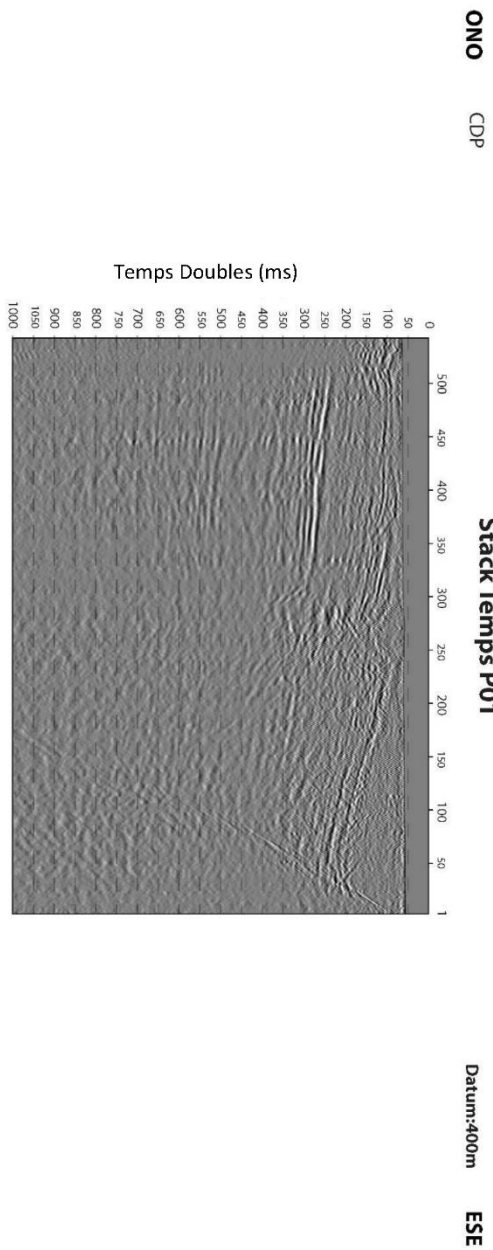
- Un pendage global des couches vers le N.
- Des reflecteurs continus, sans présence évidente de faille.

### Profil 3

- Une géologie globalement déstructurée.
- Un bassin a priori quaternaire qui se développe entre les CDP 250 et 600
- Une zone déstructurée/faillée entre les CDP 300 et 575.

### Profil 4

- Un pendage global des couches vers le SE.
- Un bassin a priori quaternaire qui se développe entre les CDP 550 et 1025
- Une succession de failles (CDP 100, 300, 650...)



<b>Format:</b> A3	<b>Legende:</b>
<b>Projet:</b> BRGM Belfort Reconnaissance géophysiques en sismique réflexion	<b>Echelle horizontale:</b> 1:15000
<b>Contenu:</b> Profils sismique réflexion 01	<b>Echelle verticale temps:</b> 1:7500
<b>Date:</b> 12.06.2023	<b>N° Projet:</b> 23020
	<b>Echelle verticale profondeur:</b> 1:7500

Figure 9: Section sismique P01 – Stack temps



BELFORT / SISMIQUE

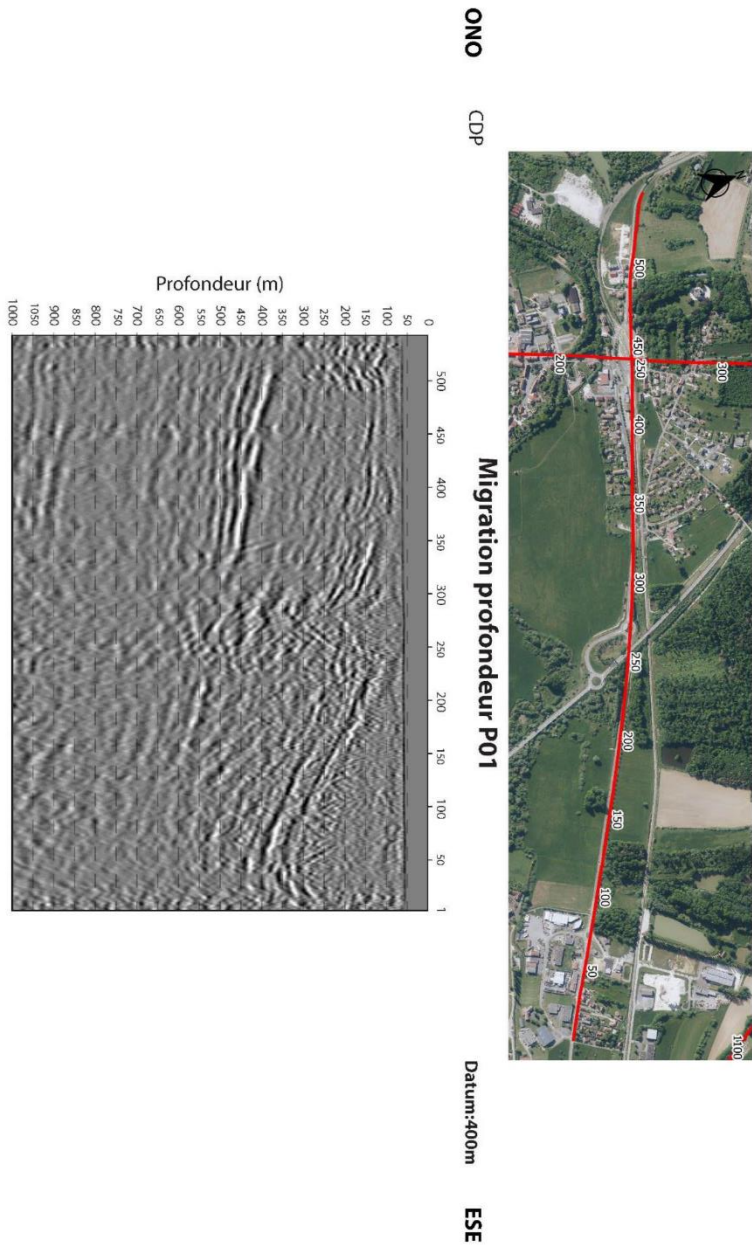
25

Geophysics for Geology

BRGM

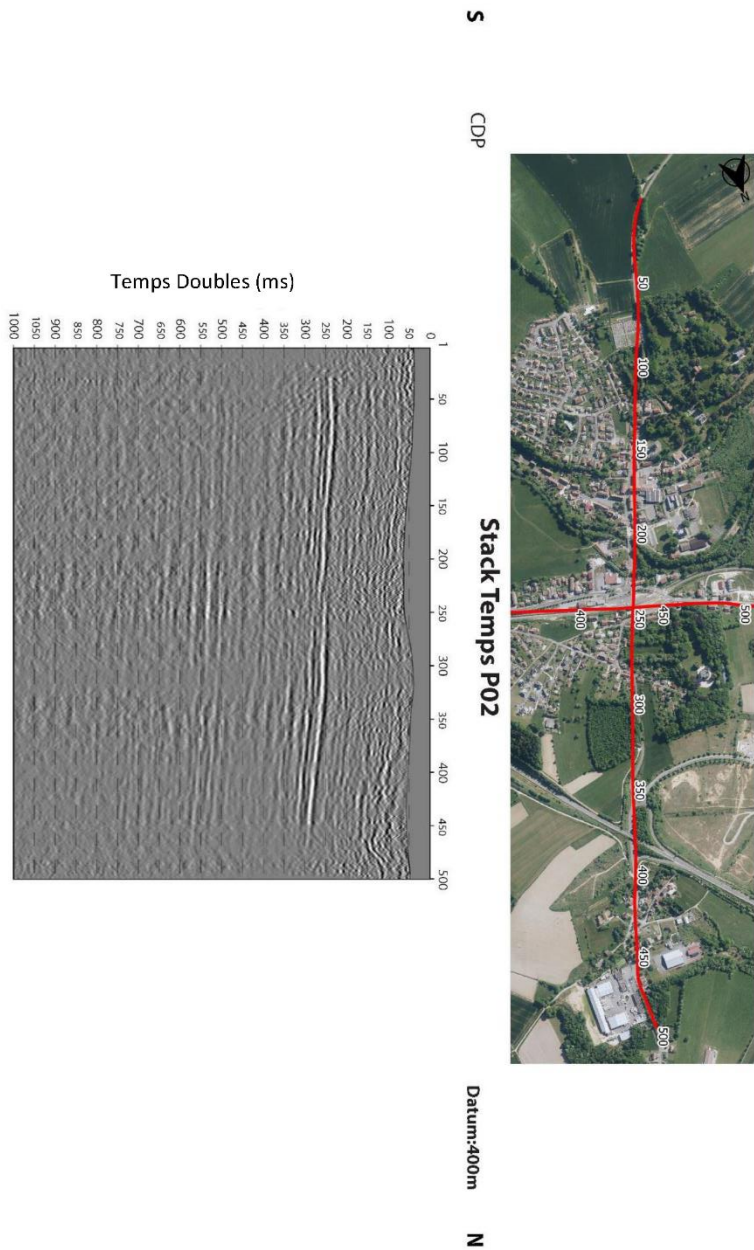
GeoX  
Rue de Chamblon  
1400 Yverdon-les-Bains  
SWITZERLAND

BRGM  
3, Avenue Claude Guillemin  
57100 Châtenoy  
FRANCE



<b>Format:</b> A3	<b>Légende:</b>	 Geo2X Rue de Chamblon 1400 Yverdon-les-Bains SWITZERLAND
<b>Projet:</b> BRGM-Belfort Reconnaitssances géophysiques en sismique réflexion		
<b>Contenu:</b> Profils sismique réflexion 01	<b>Echelle horizontale:</b> 1:15000	 BRGM Rue Claude Guillemin 45100 Orléans FRANCE
<b>Date:</b> 12.06.2023	<b>N° Projet:</b> 23020	
	<b>Echelle verticale temps:</b> 1:7500	<b>Echelle verticale profondeur:</b> 1:7500

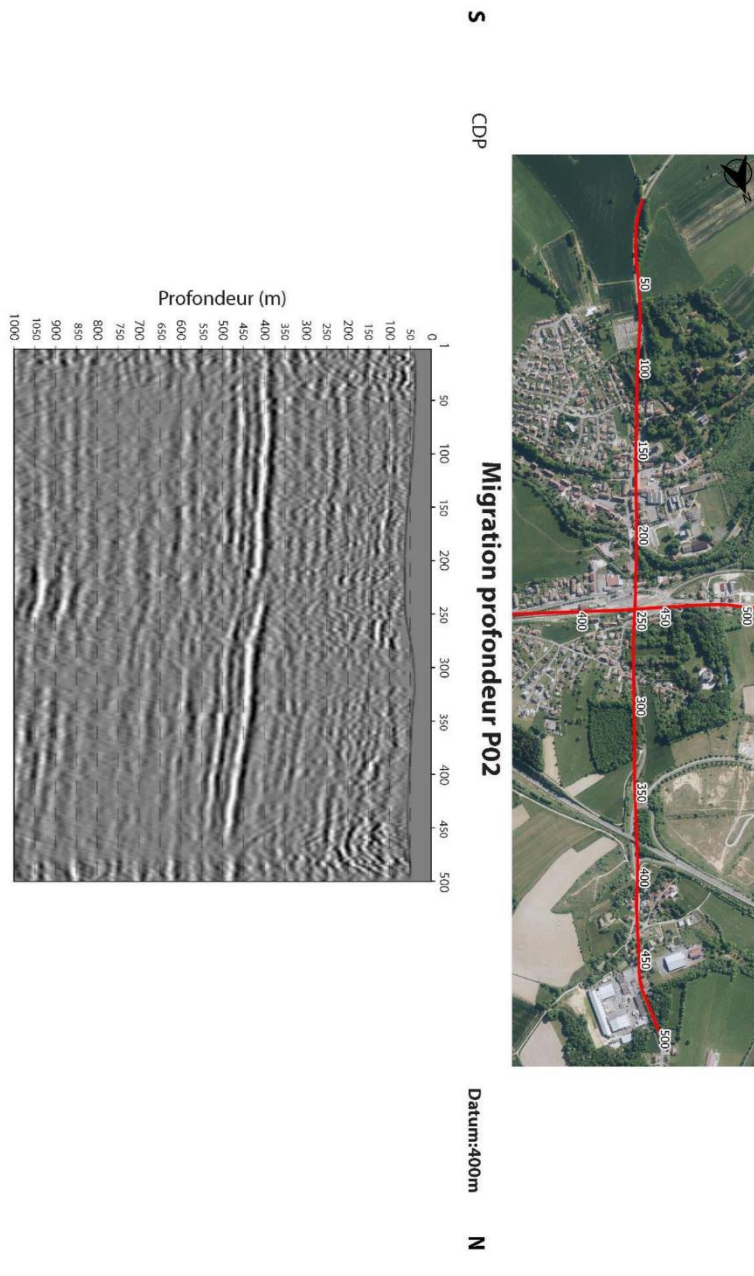
Figure 10: Section sismique P01 \_ Migration Profondeur



<b>Format:</b> A3	<b>Légende:</b>	Geox Rue de Chamblon 1400 Yverdon-les-Bains SWITZERLAND
<b>Projet:</b> BRGM Belfort Recherches géophysiques en sismique réflexion		
<b>Contenu:</b> Profils sismique réflexion 02	<b>Echelle horizontale:</b> 1:15000	BRGM 3, Avenue Claude Guillemin 78140 Champs FRANCE
<b>Date:</b> 12.06.2023	<b>N° Projet:</b> 23020	
	<b>Echelle verticale temps:</b> 1:7500	
	<b>Echelle verticale profondeur:</b> 1:7500	

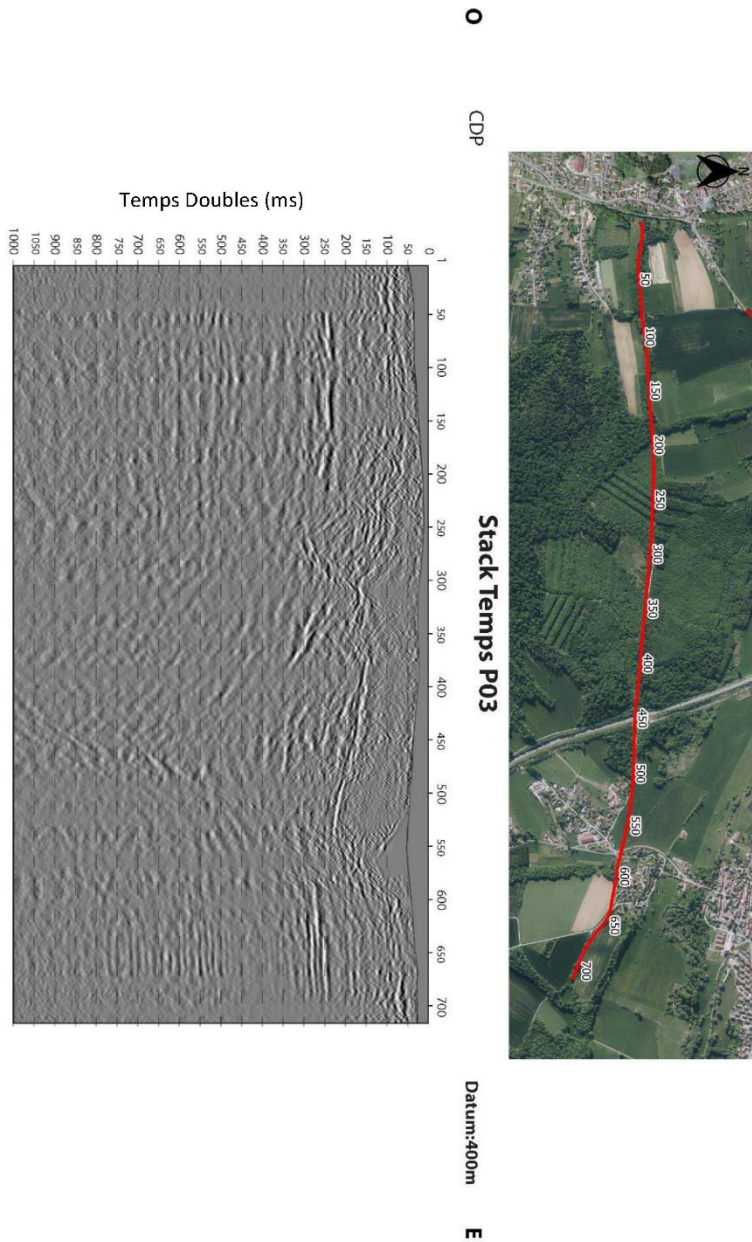
Figure 11: Section sismique P02 – Stack temps





<b>Format:</b> A3	<b>Legende:</b>	 Geo2X Rue de Chamblon 1400 Yverdon-les-Bains SWITZERLAND
<b>Projet:</b> BRGM Belfort Reconnaissances géophysiques en sismique réflexion		
<b>Contenu:</b> Profils sismique réflexion 02	<b>Echelle horizontale:</b> 1:15000	 BRGM 3, Avenue Claude Gullermin 1400 Yverdon-les-Bains FRANCE
<b>Date:</b> 12.08.2023	<b>N° Projet:</b> 23020	
	<b>Echelle verticale temps:</b> 1:7500	
	<b>Echelle verticale profondeur:</b> 1:7500	

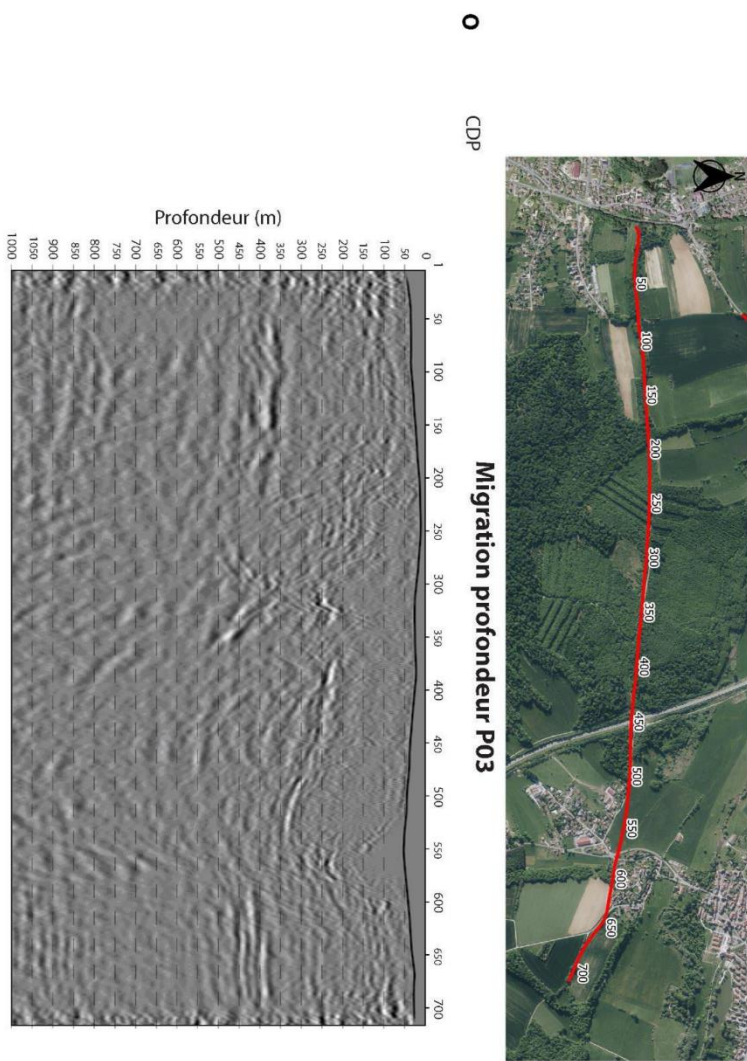
Figure 12: Section sismique P02 \_ Migration Profondeur



<b>Format:</b> A3	<b>Légende:</b>		Geo2X Rue de Chamblon 1400 Yverdon-les-Bains SWITZERLAND
<b>Projet:</b> BRGM-Belfort Reconnaissances géophysiques en sismique réflexion	<b>Echelle horizontale:</b> 1:15000		
<b>Contenu:</b> Profils sismique réflexion 03	<b>Echelle verticale temps:</b> 1:7500	<b>Echelle verticale profondeur:</b> 1:7500	
<b>Date:</b> 12.06.2023	<b>N° Projet:</b> 23020		

Figure 13. Section sismique P03 – Stack temps





O CDP

Datum:400m E

<b>Format:</b> A3	<b>Legende:</b>	 Geo2X Rue de Chamblin 1400 Yverdon-les-Bains SWITZERLAND
<b>Projet:</b> BRGM Belfort Reconnaitssances géophysiques en sismique réflexion		
<b>Contenu:</b> Profils sismique réflexion 03	<b>Echelle horizontale:</b> 1:15000	 BRGM 3, Avenue Claude Guillemin 45100 Orléans FRANCE
<b>Date:</b> 12.09.2023	<b>N° Profil:</b> 23020	
	<b>Echelle verticale temps:</b> 1:7500	
	<b>Echelle verticale profondeur:</b> 1:7500	

Figure 14: Section sismique P03 - Migration Profondeur

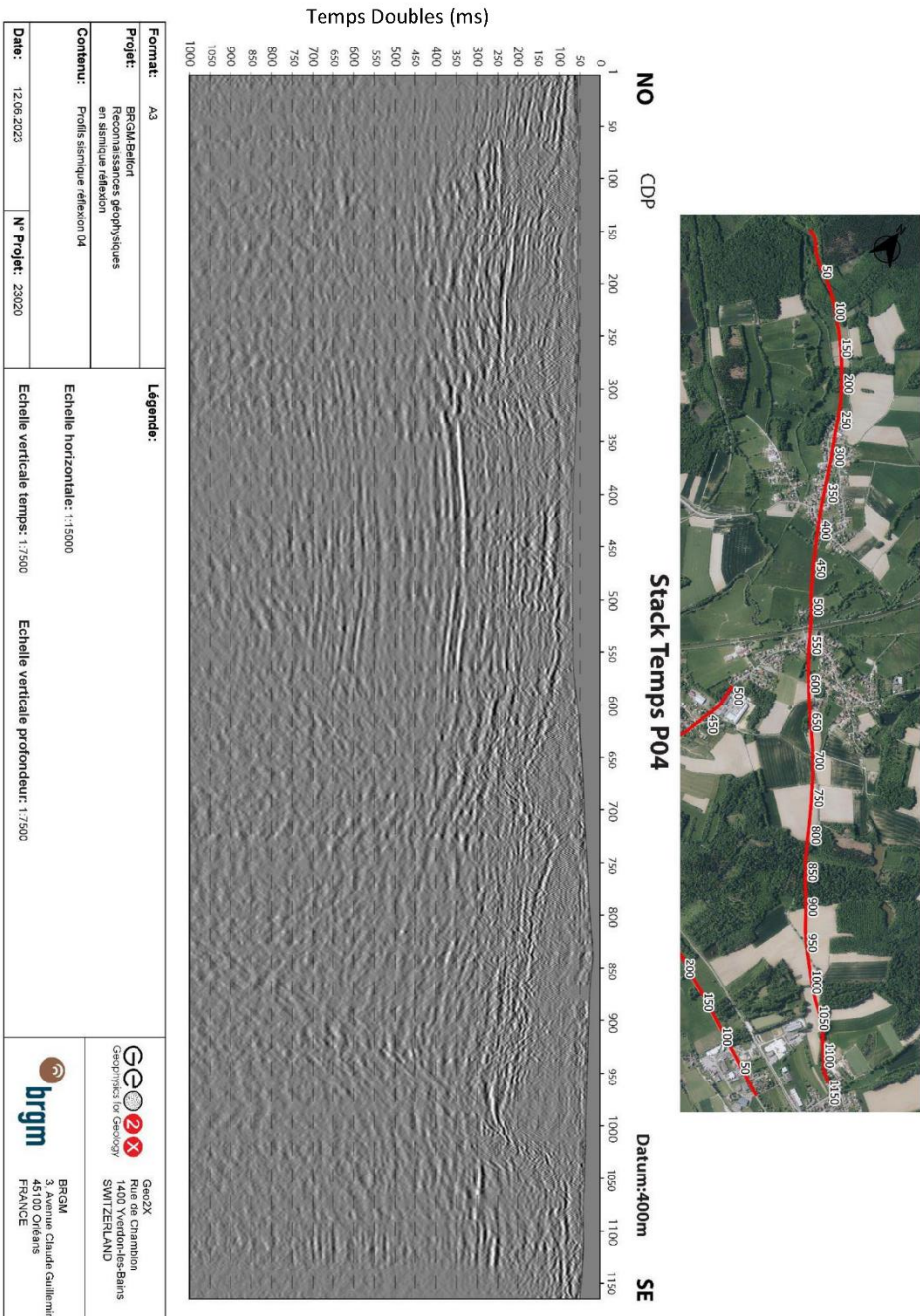
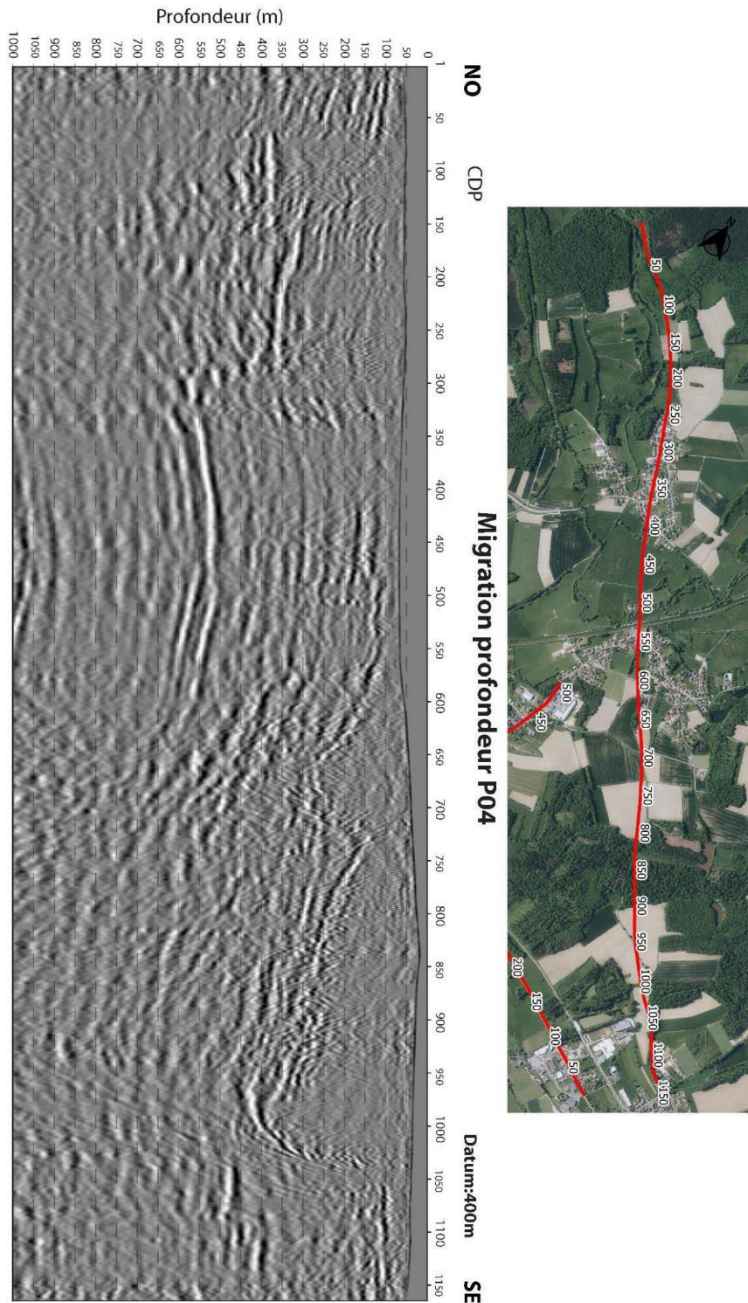


Figure 15. Section sismique P04 – Stack temps



<b>Format:</b> A3	<b>Légende:</b>	 Geo2X Rue de Chamblion 1400 Yverdon-les-Bains SWITZERLAND
<b>Projet:</b> BRGM Belfort Reconnaitssances géophysiques en sismique réflexion		
<b>Contenu:</b> Profils sismique réflexion 04	<b>Echelle horizontale:</b> 1:15000	 BRGM 2 Avenue Claude Guillemin 45100 Orléans FRANCE
<b>Date:</b> 12.06.2023	<b>N° Projet:</b> 23020	
	<b>Echelle verticale temps:</b> 1:7500	<b>Echelle verticale profondeur:</b> 1:7500

Figure 16: Section sismique P04 \_ Migration Profondeur

# Annexes

## I. Spécifications de l'équipement topographique

FICHE TECHNIQUE

# Trimble R12i

## SYSTÈME GNSS

### PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

- ▶ La technologie Trimble® Inertial Platform™ (TIP). Compensation d'inclinaison IMU sans calibrage est protégée magnétiquement pour les mesures topo et l'implantation
- ▶ Moteur de positionnement Trimble ProPoint™ GNSS. Conçu pour une précision et une productivité accrues dans des conditions GNSS complexes
- ▶ Solution à 6/2 canaux dotée de la technologie de suivi des satellites Trimble 360
- ▶ Le service de corrections CenterPoint™ RTX fournit une précision de niveau RTK rapide, dans le monde entier via satellite/IP
- ▶ Technologie Trimble xFill™ pour les coupures de réseau cellulaires
- ▶ Optimisé pour le logiciel de terrain Trimble Access™
- ▶ Prise en charge de la plate-forme iOS et Android™
- ▶ Connectivité cellulaire, Bluetooth®, Wi-Fi
- ▶ Conception et construction robustes, classe IP67
- ▶ Forme ergonomique
- ▶ Batterie avec une journée d'autonomie et indication de la charge par led sur la batterie
- ▶ Mémoire interne de 6 GO
- ▶ Prend en charge des capacités de réalité augmentée par Trimble SiteVision™

Pour en savoir plus:  
[geospatial.trimble.com/R12i](https://geospatial.trimble.com/R12i)



Compensation de l'inclinaison



CHANGER LA MANIÈRE DONT LE MONDE FONCTIONNE



BELFORT / SISMIQUE



FICHE TECHNIQUE

SPECIFICATIONS DES PERFORMANCES		
<b>MESURES GNSS</b>		
	Constellation agnostique, suivi flexible du signal, positionnement amélioré dans les environnements rudes <sup>1</sup> et l'intégration de mesures inertielles avec la technologie Trimble ProPoint GNSS Productivité et traçabilité accrues de mesure et d'implantation avec la compensation d'inclinaison IMU de la technologie Trimble TIP <sup>2</sup> Processeur propriétaire Trimble Survey GNSS avancé à 672 canaux Réduction des temps d'immobilisation dus à la perte du signal radio, grâce à la technologie Trimble xFill Signaux suivis simultanément	
	GPS : L1C, L1C/A, L2C, L2E, L5 GLONASS : L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3 SBAS (WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS) : L1C/A, L5 Galileo : E1, E5A, E5B, E5, AltBOC, E6 <sup>3</sup> BeiDou : B1, B1C, B2, B2A, B2B, B3 QZSS : L1C/A, L1S, L1C, L2C, L5, L6 NavIC (IRNSS) : L5 Band L: Corrections Trimble RTX <sup>4</sup> Un filtrage de l'iridium au dessus de 1616 MHz permet d'utiliser l'antenne à 20 m de l'émetteur iridium Un filtrage japonais en dessous de 1510 MHz permet d'utiliser l'antenne à 100 m de la tour de téléphonie japonaise LTE Techniques de traitement de signal numérique (DSP) pour détecter et récupérer des signaux GNSS usurpés Algorithme de surveillance de l'intégrité autonome du récepteur (RAIM) pour détecter et rejeter les mesures satellites problématiques afin d'améliorer la qualité de la position Protection améliorée contre les données éphémères erronées Taux de positionnement	
		1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz et 20 Hz
<b>POSITIONNEMENT<sup>5</sup></b>		
<b>ARPENTAGE GNSS STATIQUE</b>		
Statique de haute précision		
	Horizontal	3 mm + 0,1 ppm RMS
	Vertical	3,5 mm + 0,4 ppm RMS
Statique et Statique rapide		
	Horizontal	3 mm + 0,5 ppm RMS
	Vertical	5 mm + 0,5 ppm RMS
<b>LEVE CINÉMATIQUE EN TEMPS RÉEL (RTK)</b>		
Ligne de base unique < 30 km		
	Horizontal	8 mm + 1 ppm RMS
	Vertical	15 mm + 1 ppm RMS
Réseau RTK <sup>4</sup>		
	Horizontal	8 mm + 0,5 ppm RMS
	Vertical	15 mm + 0,5 ppm RMS
	Temps de démarrage RTK pour les précisions spécifiées <sup>6</sup>	
	2 à 8 secondes	
<b>LA TECHNOLOGIE TRIMBLE INERTIAL PLATFORM (TIP)</b>		
Arpentage compensé TIP <sup>6</sup>		
	Horizontal	RTK + 5 mm + 0,4 mm/° inclinaison (jusqu'à 30°) RMS
	Surveillance de biais	
	Température, âge et choc	
<b>SERVICE DE CORRECTIONS TRIMBLE RTX</b>		
CenterPoint RTX <sup>7</sup>		
	Horizontal	2 cm RMS
	Vertical	5 cm RMS
	Temps de convergence RTX pour les précisions spécifiées dans les régions Trimble RTX Fast	
	< 1 min	
	Temps de convergence RT pour les précisions spécifiées dans les régions non Trimble RTX Fast	
	< 15 min	
	Temps de convergence RTX QuickStart pour les précisions spécifiées	
	< 1 min	
TRIMBLE xFILL <sup>4</sup>		
	Horizontal	RTK <sup>4</sup> + 10 mm/minute RMS
	Vertical	RTK <sup>4</sup> + 20 mm/minute RMS
TRIMBLE xFILL PREMIUM <sup>6</sup>		
	Horizontal	3 cm RMS
	Vertical	7 cm RMS
<b>POSITIONNEMENT CODE GNSS DIFFÉRENTIEL</b>		
	Horizontal	0,25 m + 1 ppm RMS
	Vertical	0,50 m + 1 ppm RMS
	SBAS <sup>2</sup>	habituellement <5 m 3DRMS

CHANGER LA MANIÈRE DONT LE MONDE FONCTIONNE





## SYSTÈME GNSS **R12i** de Trimble

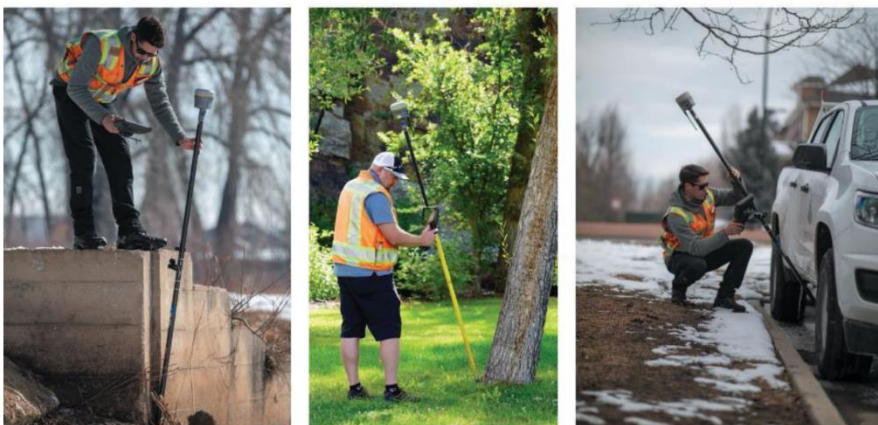
MATÉRIEL	
<b>PHYSIQUE</b>	
Dimensions (l x h)	11,9 cm x 13,6 cm
Poids	1,12 kg avec batterie interne, radio interne avec antenne UHF 3,95 kg éléments au-dessus plus canne, Trimble TSC7 contrôleur et support
Température <sup>25</sup>	Utilisation -40 °C à +65 °C Stockage -40 °C à +75 °C
Humidité	100% avec condensation
Étanchéité	IP67 étanche à la poussière, et protégé en cas d'immersion temporaire à 1 m de profondeur.
<b>Chocs et vibrations (testé et conforme aux normes d'environnement suivantes)</b>	
Chocs	Étanchéité : Conçu pour résister à une chute de la canne de 2 mètres sur du béton. En marche : à 40 G, 10 msec, en dents de scie MIL-STD-883C, FIG. 514.5C-1
Vibrations	
<b>ALIMENTATION ÉLECTRIQUE</b>	
Alimentation externe de 11 à 24 V DC et protection contre les surtensions sur les ports 1 et 2 (Lemo 7 broches) Batterie intelligente lithium-ion amovible rechargeable 7,4 V, 3,7 A/h avec voyants d'état à LED Consommation électrique de 4,2 W en mode mobile RTK avec radio interne <sup>26</sup>	
<b>Autonomie avec la batterie interne<sup>27</sup> :</b>	
Option réception uniquement 450 MHz	6,5 heures
Option réception/transmission 450 MHz (0,5 W)	6,0 heures
Option réception/transmission 450 MHz (2,0 W)	5,5 heures
Option réception cellulaire	6,5 heures
<b>COMMUNICATION ET STOCKAGE DES DONNÉES</b>	
Série	Série à 3 fils (Lemo 7 broches)
USB v2.0	Permet le téléchargement de données et les communications à haut débit.
Modem radio	Récepteur/transmetteur à large spectre 450 MHz complètement intégré, scellé, avec une gamme de fréquences allant de 403 MHz à 473 MHz, compatibles avec les protocoles radio Trimble, Pacific Crest et SATEL Puissance d'émission 2 W Portée généralement 3 à 5 km / optimal 10 km <sup>28</sup>
Cellulaire <sup>28</sup>	Modem 3,5 G intégré, HSDPA 7,2 Mb/s (téléchargement), GPRS multi-créneaux classe 12, EDGE multi-créneaux classe 12, Pentaband UMTS/HSDPA (WCDMA/FDD) 800/850/900/1900/2100 MHz, EGSM Quadri-bande 850/900/1800/1900 MHz, GSM CSD, 3GPP LTE
Bluetooth	Version 4.1 <sup>29</sup>
Wi-Fi	802.11 b/g, mode point d'accès et client, cryptage WPA/WPA2/WEP64/WEP128
Ports E/S	De série, USB, TCP/IP, IBSS/NTRIP, Bluetooth
Stockage des données	Mémoire interne de 6 Go
Format de stockage des données	Entrée et sortie CMR-, CMRx, RTCM 2.1, RTCM 2.3, RTCM 3.0, RTCM 3.1, RTCM 3.2 24 sorties NMEA, sorties OSOF, RT17 et RT27.1 sortie PPS
<b>WEBUI</b>	
Grande simplicité pour le configurer, l'utiliser, connaître son état et transférer des données Accessible via WiFi, port série, USB et Bluetooth	
<b>LOGICIELS DE TERRAIN &amp; CONTRÔLEURS ACCEPTÉS</b>	
Trimble TSC7, Trimble T10, Trimble T7, appareils Android et iOS avec applications compatibles Trimble Access 2020.10 ou ultérieur	
<b>RÉALITÉ AUGMENTÉE</b>	
Prend en charge des capacités de réalité augmentée à l'extérieur par Trimble SiteVision s'exécutant sur le contrôleur Trimble TSC7	
<b>CERTIFICATIONS</b>	
FCC Part 15 (appareil de Classe B), 24, 32; marquage CE; RCM; PTCRB; BT SIG	



FICHE TECHNIQUE



SYSTÈME GNSS **R12i** de Trimble



1. Les environnements GNSS complets sont des lieux où le récepteur dispose d'une disponibilité optimale sur le terrain pour respecter les exigences de précision minimales, mais où le signal peut être en partie bloqué, et/ou couvrir des zones, des séquences et/ou des sites. Les résultats peuvent varier en fonction de la localisation géographique et de l'altitude, l'architecture, les interférences, les réseaux de satellites, la santé et la disponibilité de la constellation GNSS, le niveau du matériel et l'occupation du signal.
2. La capacité réelle des récepteurs est basée sur les informations disponibles au grand public. Pour cette raison, Trimble ne peut pas garantir que ses récepteurs seront entièrement compatibles avec tous les environnements de satellites ou signaux GNSS.
3. La précision et la latence sont affectées par des variations de rayonnement multiples et d'ombrages, de la géométrie des satellites et des conditions atmosphériques. Les logiciels Trimble mesurent et recommandent d'utiliser des signaux de satellites avec une vue dégagée du ciel, un environnement sans interférences électromagnétiques et sans trajets multiples. Ils optimisent les constellations GNSS extérieures, et de trouver des signaux de référence communément acceptés afin de réaliser des relevés du plus haut niveau applicable ainsi que des mesures d'occupation appropriées à la longueur de la ligne de base. Des lignes de base de 1000 mètres ou supérieures à 30 km exigent une technique de précision et des occupations allant jusqu'à 24 heures pendant des semaines pour répondre à la certification française de haute précision.
4. Les valeurs PPP ou RTK sont référencées par rapport à la station de base matérielle la plus proche disponible. La latence d'installation est soumise en contrepartie pour une qualité supérieure.
5. La RTK (plate-forme matérielle Trimble) fait référence à l'acquisition d'erreurs de positionnement globale à la pointe de la mesure à travers toute la plage de compensation d'erreurs. Elle fait référence à la précision horizontale externe de la position GNSS si vous possédez ce qui dépasse des facteurs qui affectent la qualité de la solution GNSS. La conception de l'ensemble standard de 5 mètres permet également d'être utilisé entre les sites verticaux du récepteur et l'unité de mesure immobile (M) à l'extérieur du câblage en fibre optique, ne supportant que les réseaux de câbles sur une gamme standard de 100 mètres ou plus, et des câbles câblés et sans câbles physiques. Le composant de l'ensemble standard de l'émission est en fonction de la qualité de l'installation et de la précision de la solution, ce qui est susceptible de varier en fonction des conditions GNSS optimales.
6. Les performances RMS basées sur des données spécifiques sur le terrain, la précision et le temps d'installation réelles peuvent varier en fonction du type et du matériel du récepteur et de l'environnement, de l'implantation géographique de l'utilisateur et de l'activité géographique, de l'âge de la constellation GNSS et de la disponibilité et du niveau des signaux multiples, y compris les obstacles tels que les grands arbres et les bâtiments.
7. Les précisions dépendent de la disponibilité des satellites GNSS. Un positionnement RTK sans un abonnement à RTK Premium ou à temps limité (à moins de temps d'arrêt des données ou continu), RTK Premium continu. Au cas de 5 minutes à condition que la solution est convergée avec des précisions typiques ne dépassant pas 2 cm horizontal, 7 cm vertical, et il n'est pas disponible dans toutes les régions, contactez votre distributeur local pour de plus amples informations.
8. RTK se réfère à la dernière précision indiquée avant la perte de la source de correction et le démarrage de RTK.
9. Dépend des performances du système SBAS.
10. Le récepteur peut fonctionner normalement jusqu'à +40 °C, les batteries internes sont évaluées de -30 °C à +60 °C, température ambiante +50 °C.
11. Seuls les satellites GPS, GLONASS, GALILEO.
12. Vous ne fonctionnez ni la température et du site de transfert des données sans fil. Lors de l'installation d'un récepteur et d'un radio interne en mode d'émission, il est recommandé d'utiliser une batterie externe de 6 Ah ou supérieure.
13. Vérifiez la configuration du terrain et les conditions d'installation.
14. En raison des interférences locales, le module cellulaire intégré ne peut être activé en Chine, à Taïwan ou au Brésil. Un module cellulaire intégré à un contrôleur Trimble ou un module cellulaire externe peut être utilisé pour établir des connexions GNSS via une connexion IP (Internet/Proximus).
15. Les homologations Bluetooth sont prises à chaque page.



Spécifications susceptibles d'être modifiées sans préavis.

<p>AMÉRIQUE DU NORD Trimble Inc. 10302 Westminster Dr. Westminster, CO 80021 ETATS-UNIS</p>	<p>EUROPE Trimble Germany GmbH Am Pfaffen Park 11 66479 Raunheim ALLEMAGNE</p>	<p>ASIE-PACIFIQUE Trimble Navigation Singapore PTE Limited 3 HarbourFront Place #13-02 HarbourFront Tower Two Singapore 099254 SINGAPOUR</p>
---	--	--

Contactez votre distributeur Trimble agréé pour plus d'informations.

© 2020 Trimble Inc. Tous droits réservés. Trimble, le logo de Trimble et Trimble, CarverPoint, et RTK sont des marques déposées de Trimble Inc. enregistrées aux États-Unis et dans d'autres pays. Accura, ProXess, Geopack, TSC, Trimble RTK et GPS sont des marques commerciales de Trimble Inc. et iPhone sont des marques commerciales d'Apple Inc., enregistrées aux États-Unis et dans d'autres pays. Google, Google Play et ses autres marques sont des marques de Google LLC. Wi-Fi est une marque déposée de Wi-Fi Alliance. La marque et le logo Bluetooth appartiennent à Bluetooth SIG, Inc. et le logo Bluetooth sont des marques de Trimble Inc. ou sont des marques de Trimble Inc. ou sont des marques de Trimble Inc. ou sont des marques de Trimble Inc. Toutes les autres marques appartiennent à leurs propriétaires respectifs. PN 022863-000-0000 (02/20)

CHANGER LA MANIÈRE DONT LE MONDE FONCTIONNE [www.trimble.com](http://www.trimble.com)

## II. Spécifications de la source vibrante

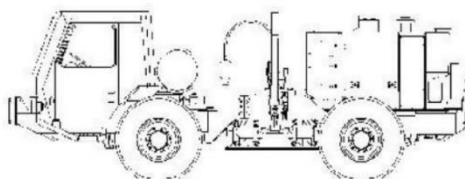


### INDUSTRIAL VEHICLES INTERNATIONAL, INC.

6737 EAST 12TH STREET, TULSA, OKLAHOMA 74112 U.S.A. PHONE (918)836-6516 FAX (918)838-9529

## EnviroVibe II

With 'minivib' 15



### PRODUCT SPECIFICATION

**CLASS:** The **EnviroVibe II** is an articulated off-road vehicle for carrying seismic energy sources. It is hydrostatically driven in a 4x4 configuration.

**TIRES:** (Four):

Standard: 500/70R24, LI157B, TLR4  
Optional: 48x31-20, 14 ply, HF3  
Optional: 600/55B-26.5, 20 ply, HF-1

**DIMENSIONS:**

**LENGTH:** 274.7 inches (6977 mm)  
**WIDTH:** (Does not include tire bulge at loaded section)  
84.7 inches (2151 mm) minimum with 500/70R24 tires  
95.7 inches (2431 mm) maximum with 500/70R24 tires  
107 inches (2718 mm) maximum with 48x31-20 tires  
**HEIGHT:** 99.2 inches (2520 mm) 102 inches with rotating light  
**WHEELBASE:** 120 inches (3048 mm)

### COMPONENTS AND ANCILLARY EQUIPMENT

**ENGINE:** Rear mounted engine is equipped with a lubrication system for operation at steep angles of inclination. The engine protection system automatically idles the Diesel under excessively high temperatures or low lubricating oil pressure.

John Deere 4045HF485 (Tier 3, Stage 3): 173 horsepower (129 kW) @ 2,400 RPM continuous rating.

**TRACTION PUMP:** Variable displacement, axial piston type, electric displacement control: 4,060 psi (280 bar) continuous; 6,525 psi (450 bar) intermittent, pressure-override control.

**DRIVE TRAIN:** The **EnviroVibe II** is a full-time 4-wheel drive vehicle. Variable displacement hydraulic motors are coupled to single reduction gearboxes which drive the axles via telescoping driveshafts.

**HYDRAULIC MOTORS:**

Rear: Axial piston, variable displacement type. 4060 psi (280 bar) continuous; 7400 psi (510 bar) intermittent. Electric motor displacement control via joystick.

INDUSTRIAL VEHICLES INTERNATIONAL



BELFORT / SISMIQUE

V

**EnviroVibe II**

Front: Axial piston, variable displacement type. 4060 psi (280 bar) continuous; 7400 psi (510 bar) intermittent. Automatic hydraulic motor displacement control via drive system pressure, electrical override.

GEARBOX: Single speed, 2.16:1.

DRIVE AXLES, FRONT & REAR: Outboard planetary type; 19.84:1. Internal wet disc brakes and differential lock.

**STANDARD DRIVE TRAIN DYNAMIC PERFORMANCE:**

**TRACTIVE EFFORT, VELOCITY, & GRADABILITY**

At 3500 psi (207 bar), 2400 engine RPM, no ground slippage, standard tires (500/70R24), 414 rev/mi (259 rev/km), GVW 28,230 lbs (12.805 kgf).

SPEED	TRACTIVE EFFORT		VELOCITY		GRADE
	lb	N	mph	km/h	degrees
LO 4WD	20,912	93,019	3.1	5.0	29.6
MID 4WD	8,365	37,208	7.8	12.6	16.1
HI 4WD	4,182	18,604	15.7	25.2	8.5

**COOLING:** The water-cooled Diesel engine's heat is dissipated via a suction-fan cooled radiator. The hydraulic system oil is cooled with a series mounted radiator capable of dissipating over 56 hp (42 kW) in heat. Optional bypass valving is available for cold weather operation. Chaff screens minimize radiator core fouling.

**FUEL:** Fuel tank capacity = 100 US gal (375.5 liters).

**HYDRAULIC LINES AND VALVING:** Hydraulic fluid lines are adequately sized to keep peak flow velocities below 35 ft/sec (10.7 m/s). Large connections use SAE flange fittings for ease of maintenance. Relief valves in critical locations limit peak pressure under dynamic braking conditions to 4,500 psi (310 bar).

**BRAKES:** The vehicle is equipped with three braking systems:

1. Hydrodynamic braking (normal).
2. Hydraulic wet disc brakes on the axle shafts (service).
3. Spring applied, hydraulically released wet disc brakes on the axle input shaft (parking).

**MANEUVERABILITY:** Wagon wheel, hydraulic-power steering; ±40°. Suspension of front section oscillates ±15° with respect to rear wheels. Approach angle; 25°. Departure angle; 31°.

**INDUSTRIAL VEHICLES INTERNATIONAL**



**TURN RADIUS:**

<u>TIRE</u>	<u>CL OF TIRE</u>	<u>CURB CLEARANCE</u>
500/70R24:	211.6 inches (5375 mm)	221.4 inches (5623 mm)

**OPERATOR'S CAB:** The operation of the vehicle and vibrator is simply controlled and monitored from within the operator's cab which features: off-road suspension driver's seat and a padded passenger seat; structural reinforcement for tip-over protection; forward hinged driver's and passenger's doors.

The vehicle velocity (both forward and reverse) is controlled by a pedal with a spring-centered safety feature. The maximum speed is selected with a joystick. A pedal valve is used for the disc brakes controlling each axle.

The hydraulic parking brakes are spring applied and released by a rotary hydraulic valve. The hydraulic axle differential locks are solenoid valve controlled.

Manually operated switches and valves on the instrument panels control the following functions and components: engine start; diesel engine speed; vibrator pump hydraulic pressure; traction control; headlights, dimmer, parking, turn-signals, warning, floodlights, and dome light; windshield wiper; heater & air conditioning; electric horn; and engine shutdown.

Operational parameters are measured and displayed as follows: traction system pressure; vibrator system pressure; lift system pressure; return (low) pressure; engine speed; engine hourmeter; engine oil pressure; engine coolant temperature; hydraulic oil temperature; fuel level; battery voltage. Other parameters can be shown on the digital display gauges as required.

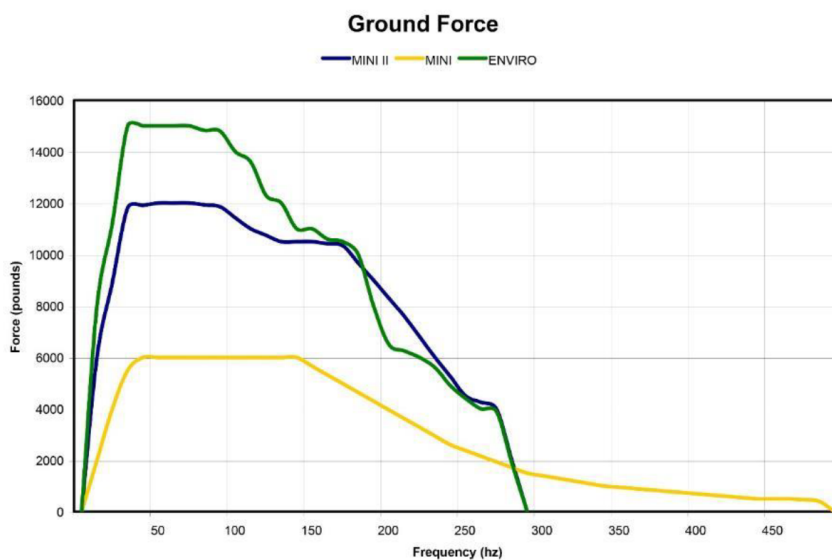
A warning light panel is installed on the overhead console with high intensity bulbs that can easily be seen in bright daylight. The following warning and indicating annunciators are included on this panel: turn signals; vibrator travel locks not engaged; high beam position of headlights. A backup alarm is sounded when the vehicle is put in reverse.

Rear view mirrors are positioned outside both door windows. An LCD display rear-view camera system monitors the vibrator well and the rear of the vehicle.

**NOISE:** At a distance of 23 feet (7 meters) from the side of the vehicle, with the vehicle stationary, the engine at 1800 RPM, the vibrator pump pressurized, and noise reduction panels in place, the noise level is 78 dbA. Under the same conditions, with the engine at 800 rpm, and the vibrator pump not pressurized, the noise level is 65 dbA.

**INDUSTRIAL VEHICLES INTERNATIONAL**

CATEGORY	ENGLISH	METRIC
Max. Peak Force	14,940 lbf.	66.456 N.
Mass Piston Area	4.98 sq. in.	32,1 sq. cm.
Reaction Mass Weight	1750 pounds	794 kgf.
Reaction Mass Stroke	2.75 inches	6,99 cm
Servo valve	60 gpm	227 l/m
Servo valve Pilot Filter	3 micron	3 micron
Baseplate Area	1,810 sq. in.	11.677 sq. cm.
Baseplate Assembly Weight	855 pounds (with pad)	388 kg. (with pad)
Lift System Stroke	38 inches	96,5 cm.
Lift Cylinder Diameter	2.5 inches	6,3 cm.
Lift Synchronization	Mechanical Crossbeam	Mechanical Crossbeam
Vibrator Pump Flow	53 gpm	201 l/m
Holddown Weight	16,500 pounds	7484 kgf
Frequencies	10-300Hz	10-300Hz



### III. Spécification du sismographe

#### SmartSolo® World's First Smart Seismic Sensor

The seismic industry continues to demand that exploration is carried out at ever-greater scale and receiver density, while somehow attempting to balance the requirement to keep project costs under control. To provide the industry with a solution to this challenge, DTCC has developed the SmartSolo intelligent seismic sensor.

SmartSolo is based on DT-SOLO, the high-sensitivity geophone and focuses on the principal of seismic exploration which is known as **3W** (**W**ave = high fidelity signal; **W**hen = accurate timing; and **W**here = the location), incorporated with electronics and software technologies in mobile internet era. This smart sensor provides adequate info for highest-quality seismic data acquisition while keeping its functions and structure as simple as possible. Electronics and software technologies are super reliable, mature and cost-effective in mobile internet era. These technologies are used for SmartSolo at maximum possible scale. The result: the geophone is something smart, reliable, user-friendly, cost-effective and could run in any harsh environment.

Patent Publication Number 201630504296.0  
Patent Pending Number 201610905491.3



- Lowest per Channel Cost in the Seismic Industry
- Small Footprint 95mm X 103mm
- Mobile App Scanning & Technical Support
- No Exposed Connector in the Field
- 50 Days Operating Life @ 25°C 1ms 12h ON/12h OFF
- Stake-less Operation for Max Flexibility
- Light Weight 1.1 kg (including battery and spika)
- Built-in 8 GB Non-volatile Flash Memory could be Expanded to 32 GB
- DT-SOLO High-sensitivity Sensor Technology (10Hz & 5Hz optional)
- Optional External Battery and Sensor
- Automatic Sensor Testing and GPS Logging
- Auto Scan Mode for Fast Deployment

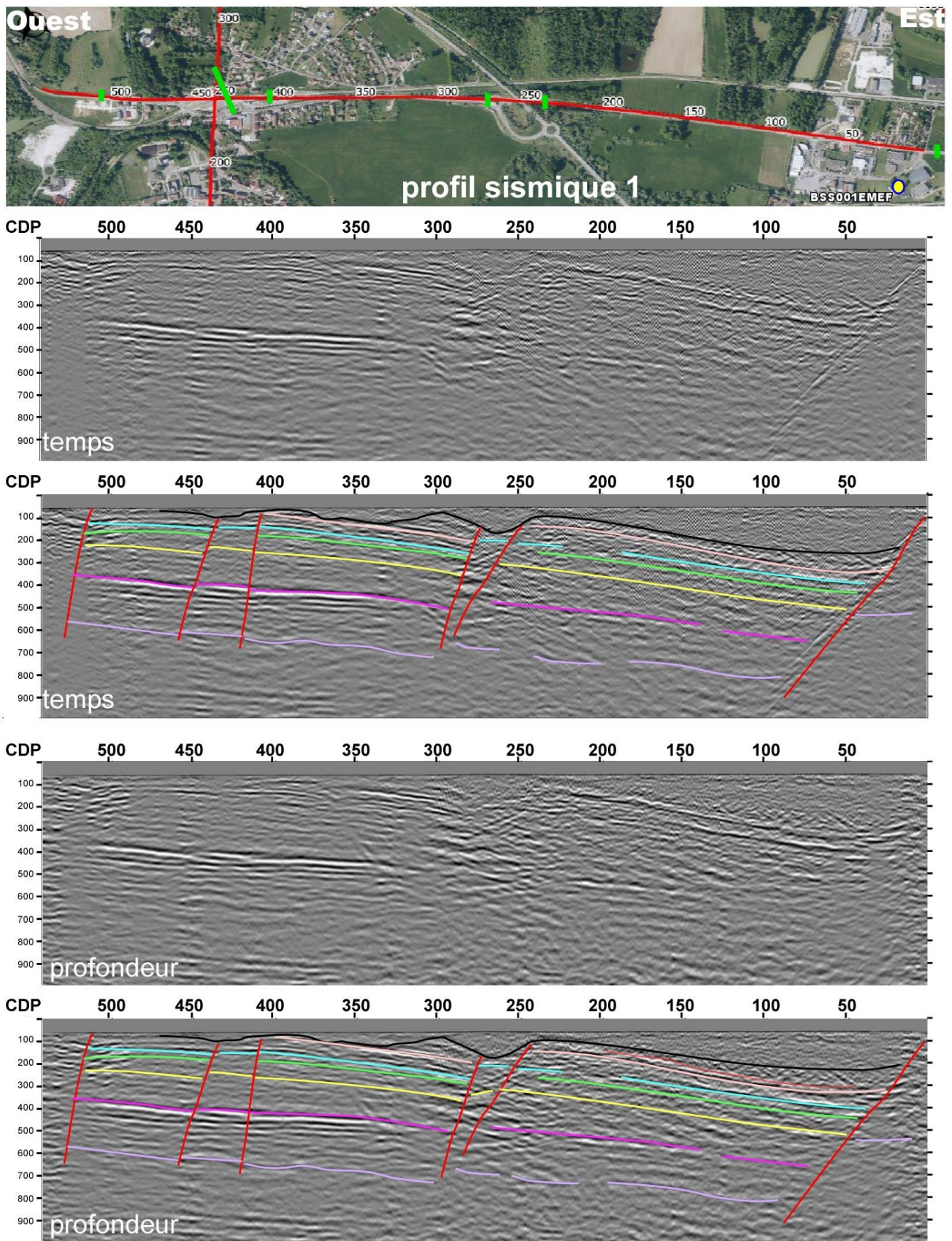
518022



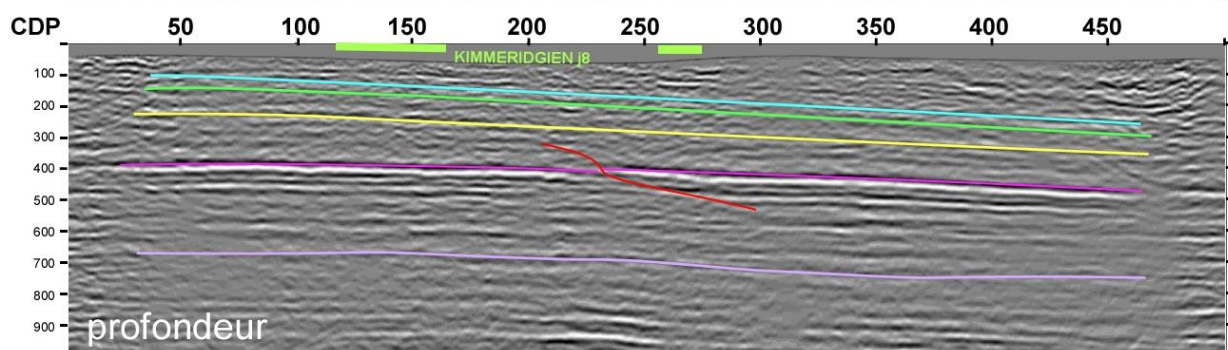
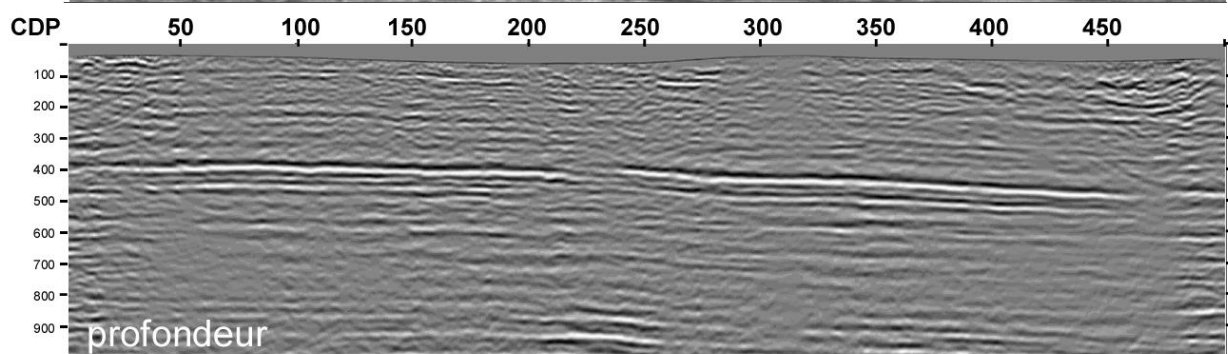
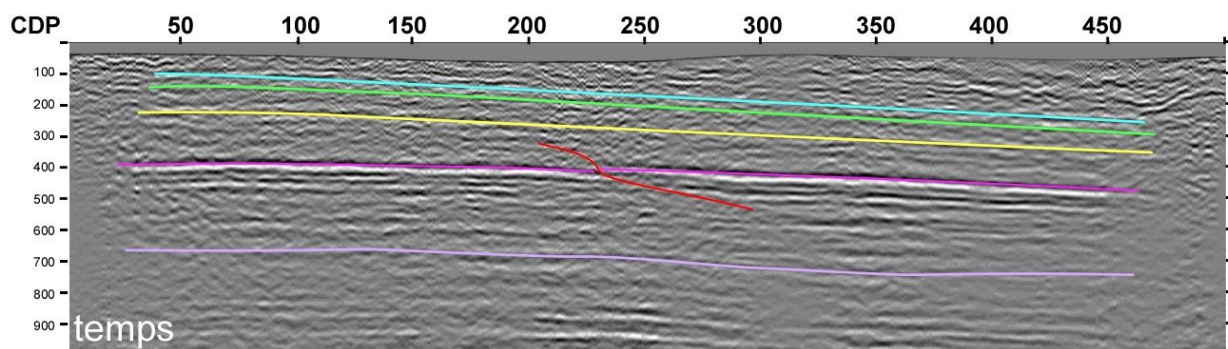
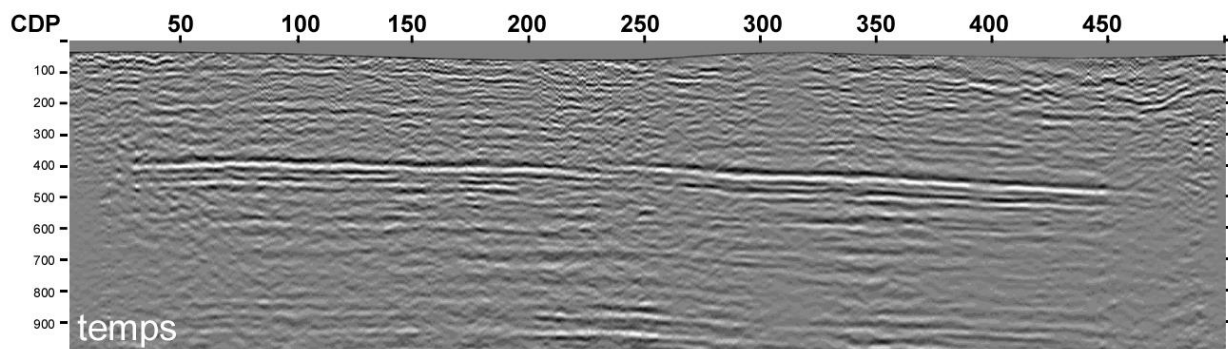
## **Annexe 4 Paramètres de calage et d'intégration des profils sismiques dans le GeoModeller**

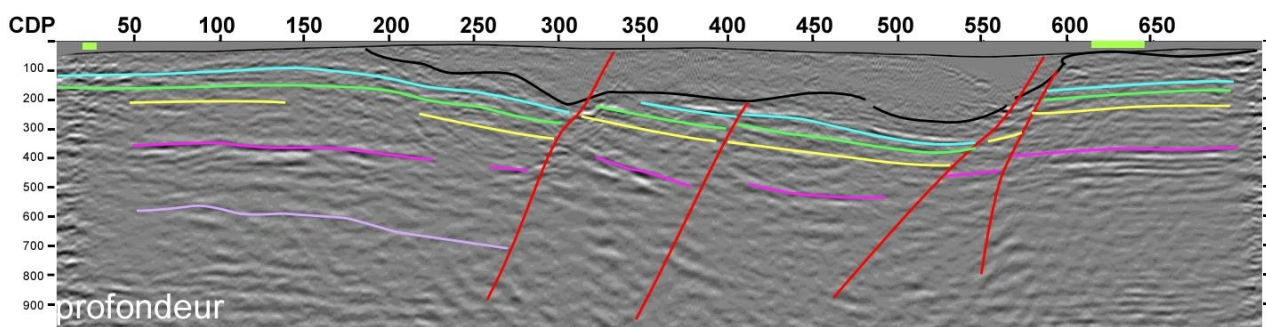
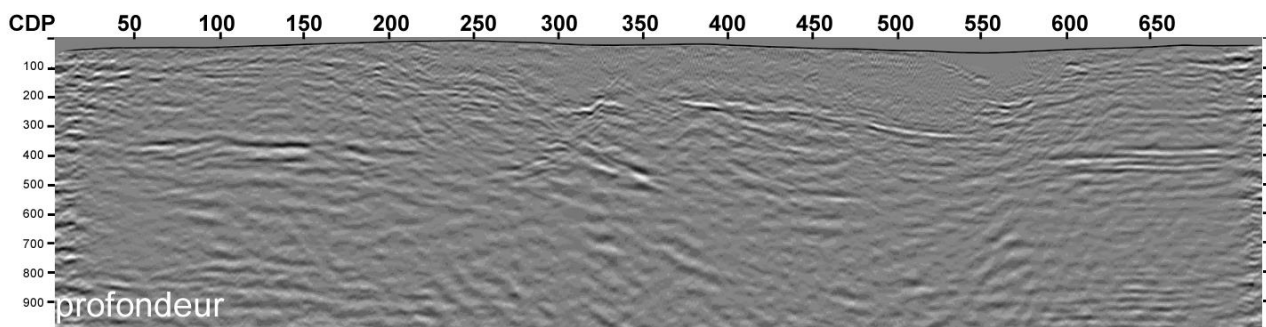
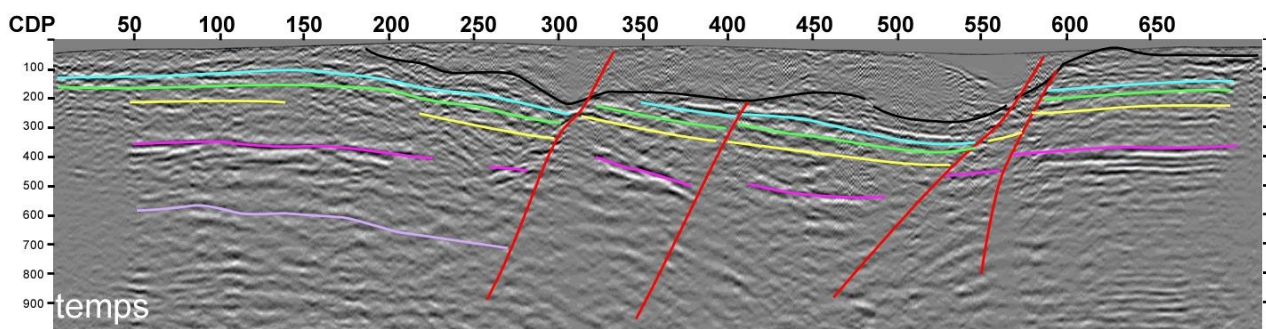
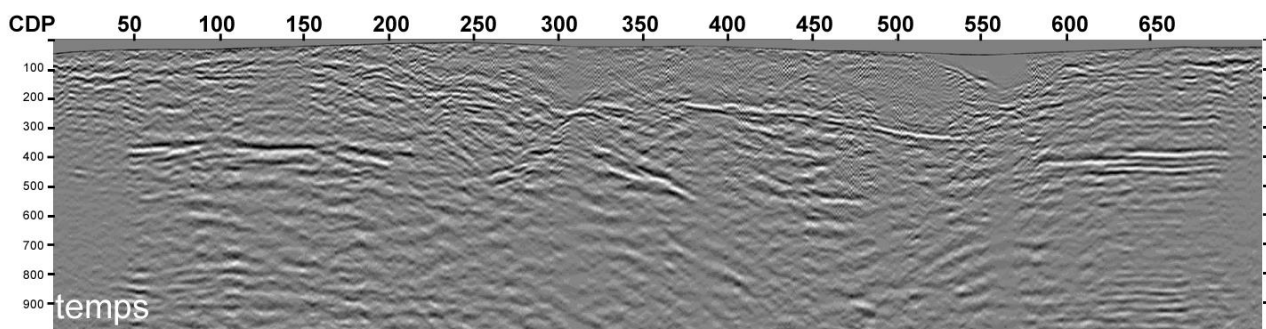
- a) Interprétation géométriques profil sismique PS01 ;
- b) Interprétation géométriques du profil sismique PS02 ;
- c) Interprétation géométriques du profil sismique PS03 ;
- d) Interprétation géométriques du profil sismique PS04.

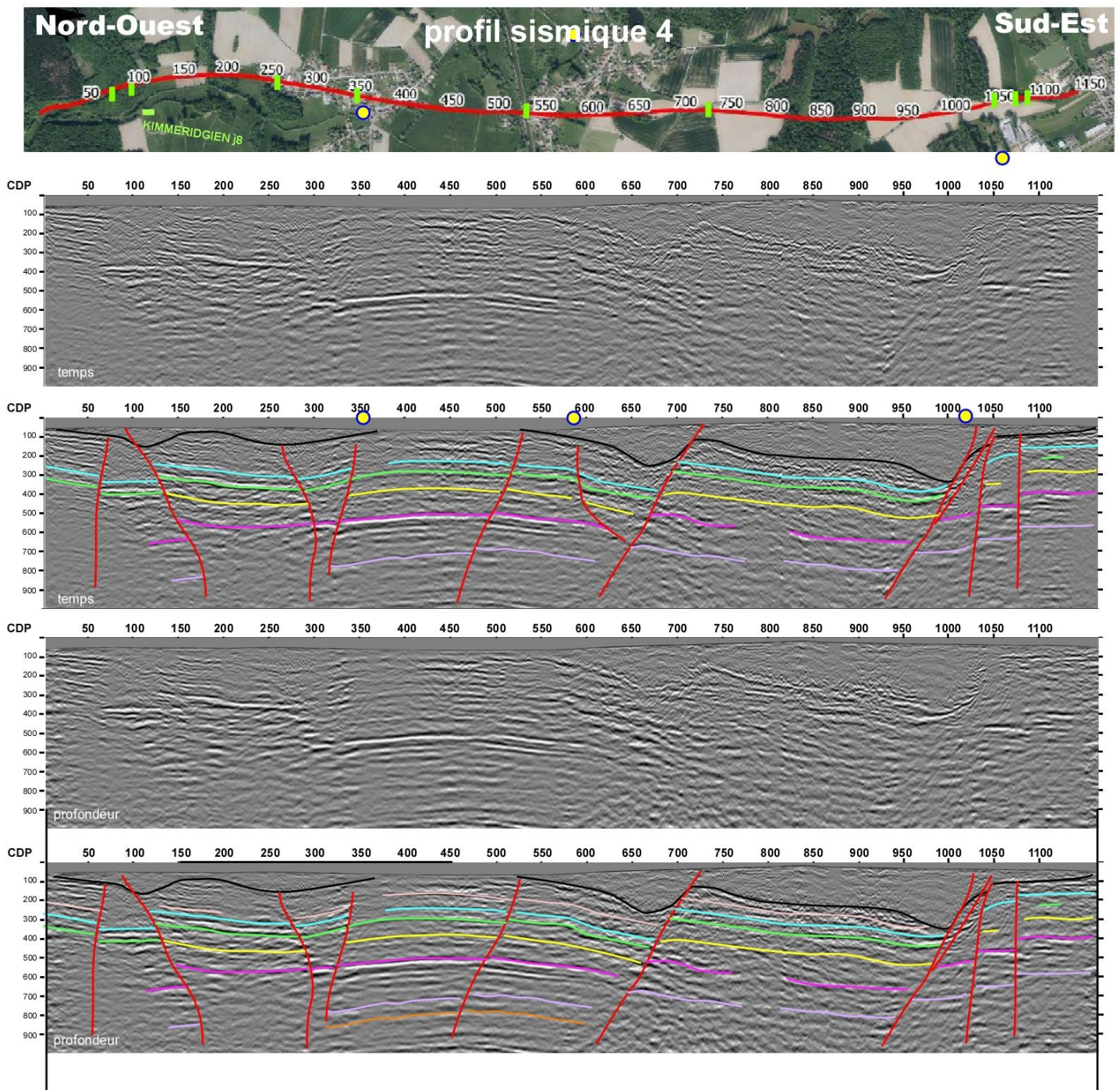
Acquisition sismique et construction d'un modèle géologique 3D pour préciser l'implantation de forages de reconnaissance hydrogéologique dans les calcaires du jurassique du Grand Belfort



Acquisition sismique et construction d'un modèle géologique 3D pour préciser l'implantation de forages de reconnaissance hydrogéologique dans les calcaires du jurassique du Grand Belfort



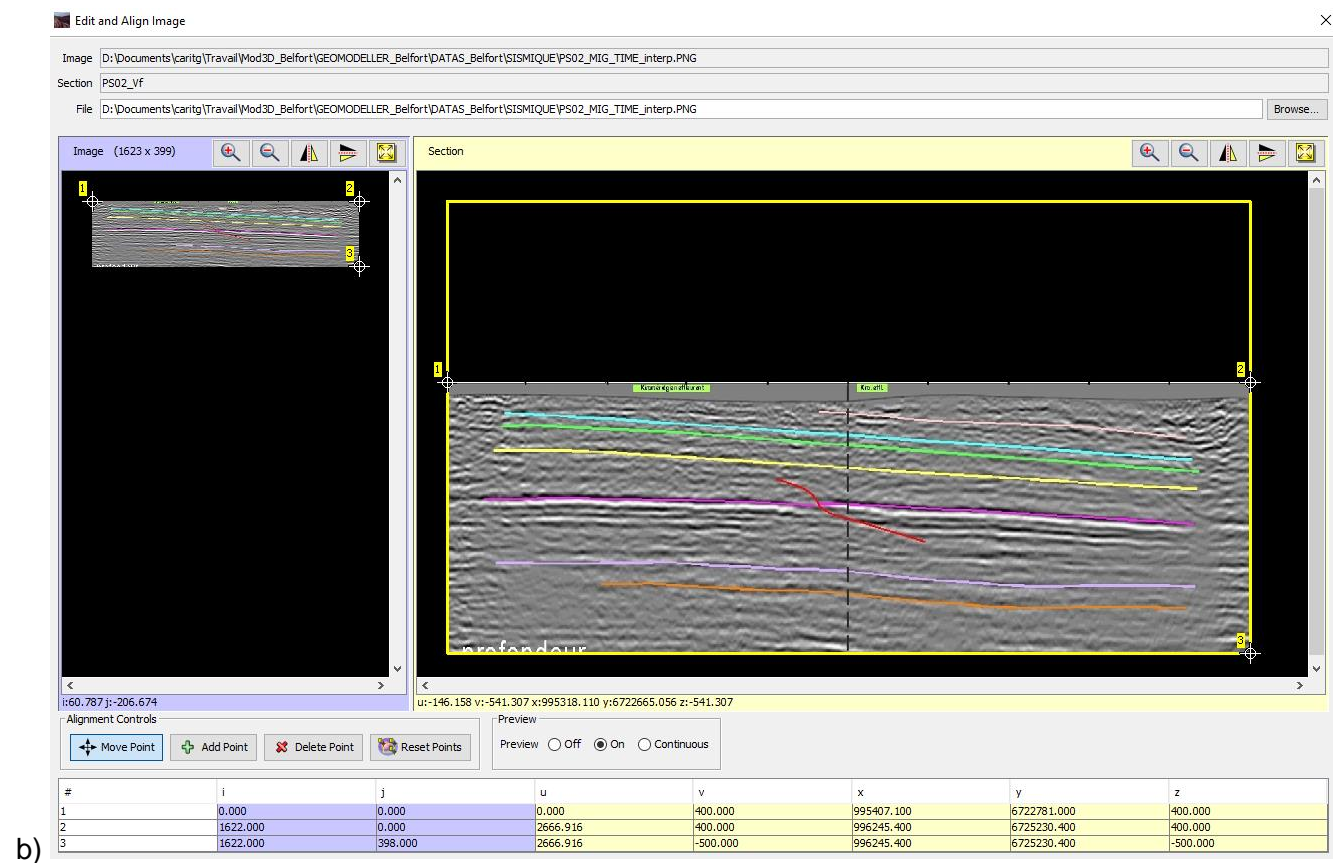
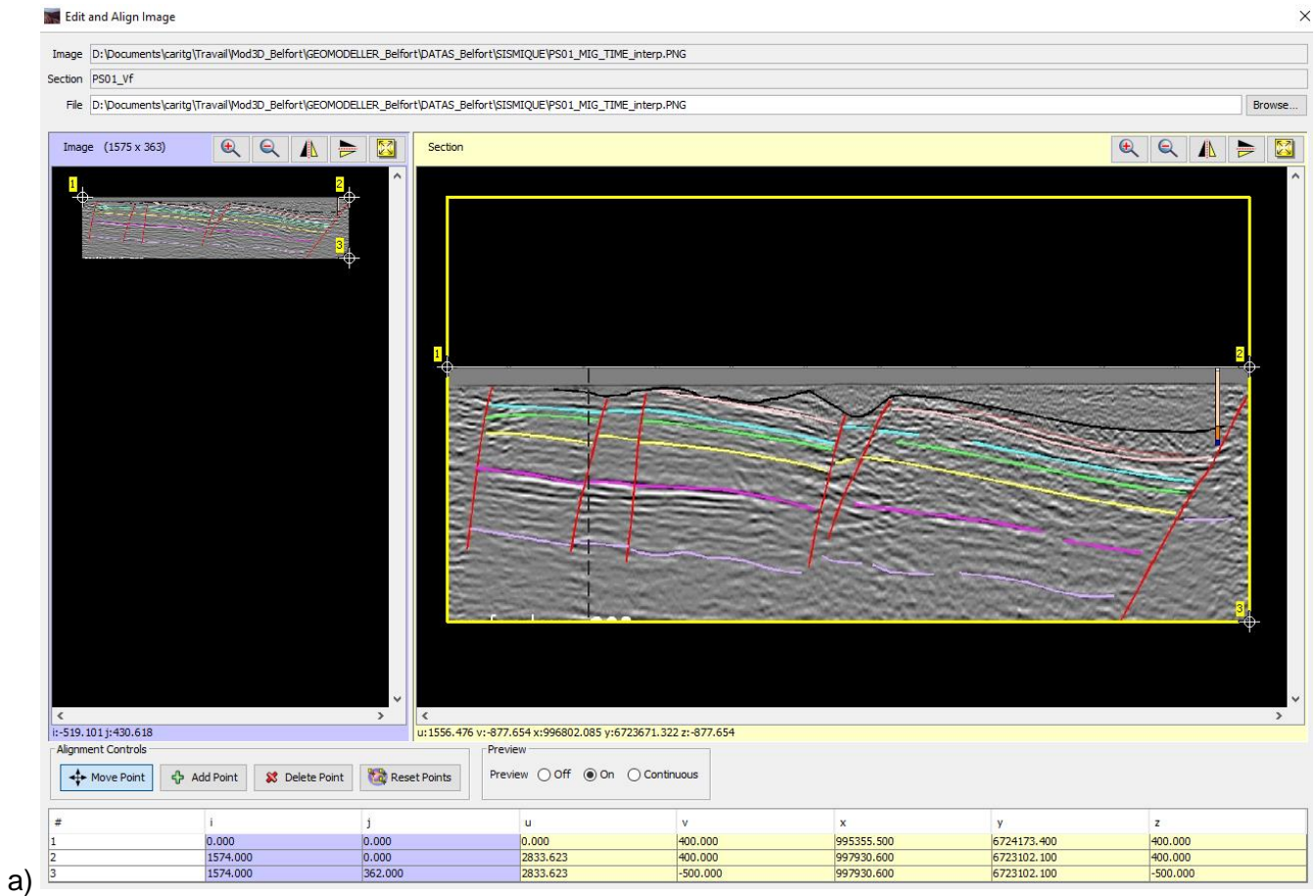




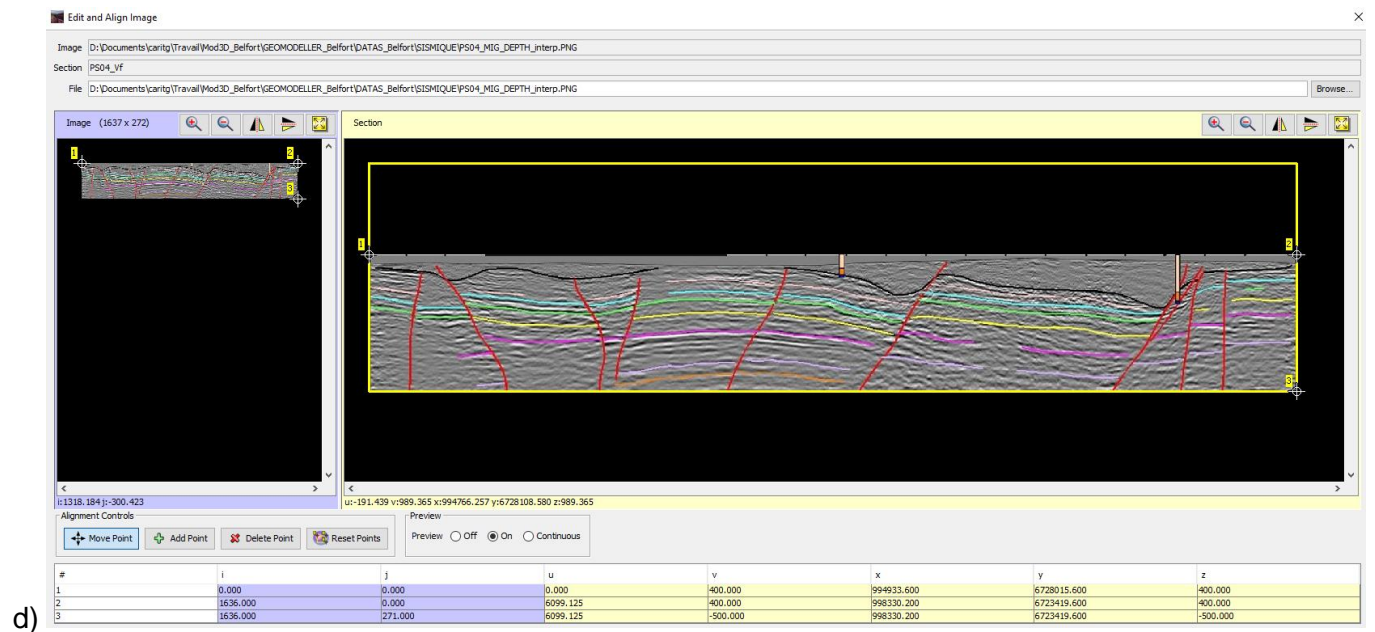
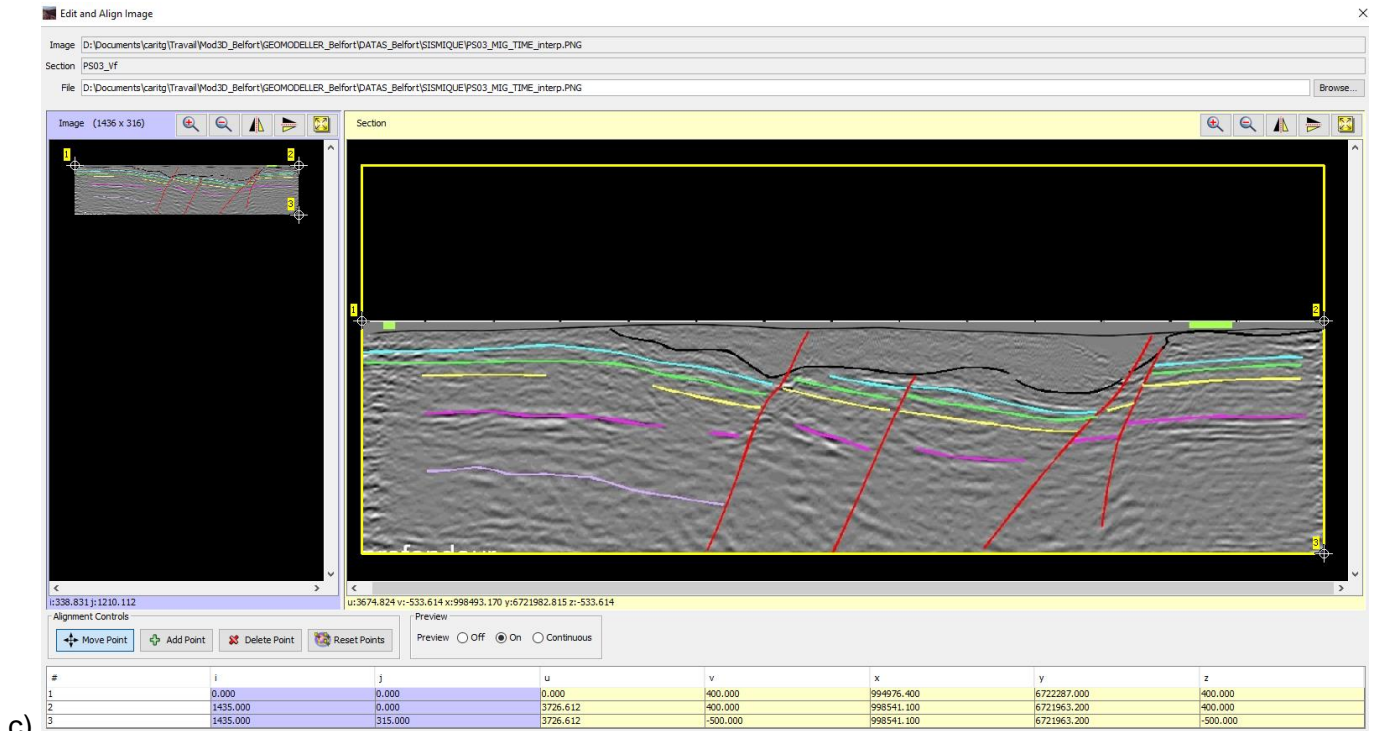
## **Annexe 5 Paramètres de calage et d'intégration des profils sismiques dans le GeoModeller**

- a) Paramètres d'intégration du profil sismique PS01 dans le GeoModeller.
- b) Paramètres d'intégration du profil sismique PS02 dans le GeoModeller.
- c) Paramètres d'intégration du profil sismique PS03 dans le GeoModeller.
- d) Paramètres d'intégration du profil sismique PS04 dans le GeoModeller.

Acquisition sismique et construction d'un modèle géologique 3D pour préciser l'implantation de forages de reconnaissance hydrogéologique dans les calcaires du jurassique du Grand Belfort



# Acquisition sismique et construction d'un modèle géologique 3D pour préciser l'implantation de forages de reconnaissance hydrogéologique dans les calcaires du jurassique du Grand Belfort

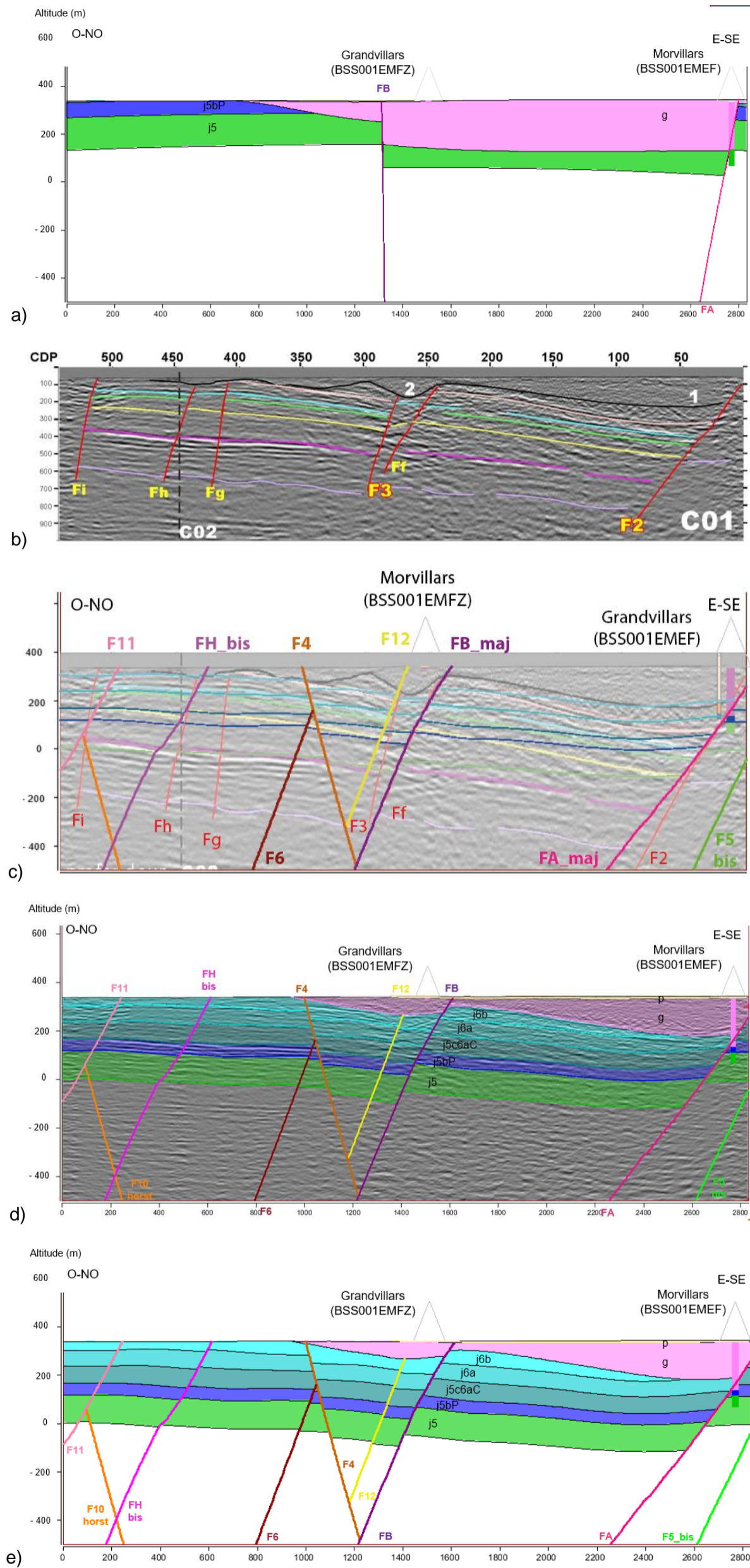


## **Annexe 6 Étapes d'ajustement du modèle géologique 3D et résultat des interprétations sur le profil sismique PS01, PS02 et PS04**

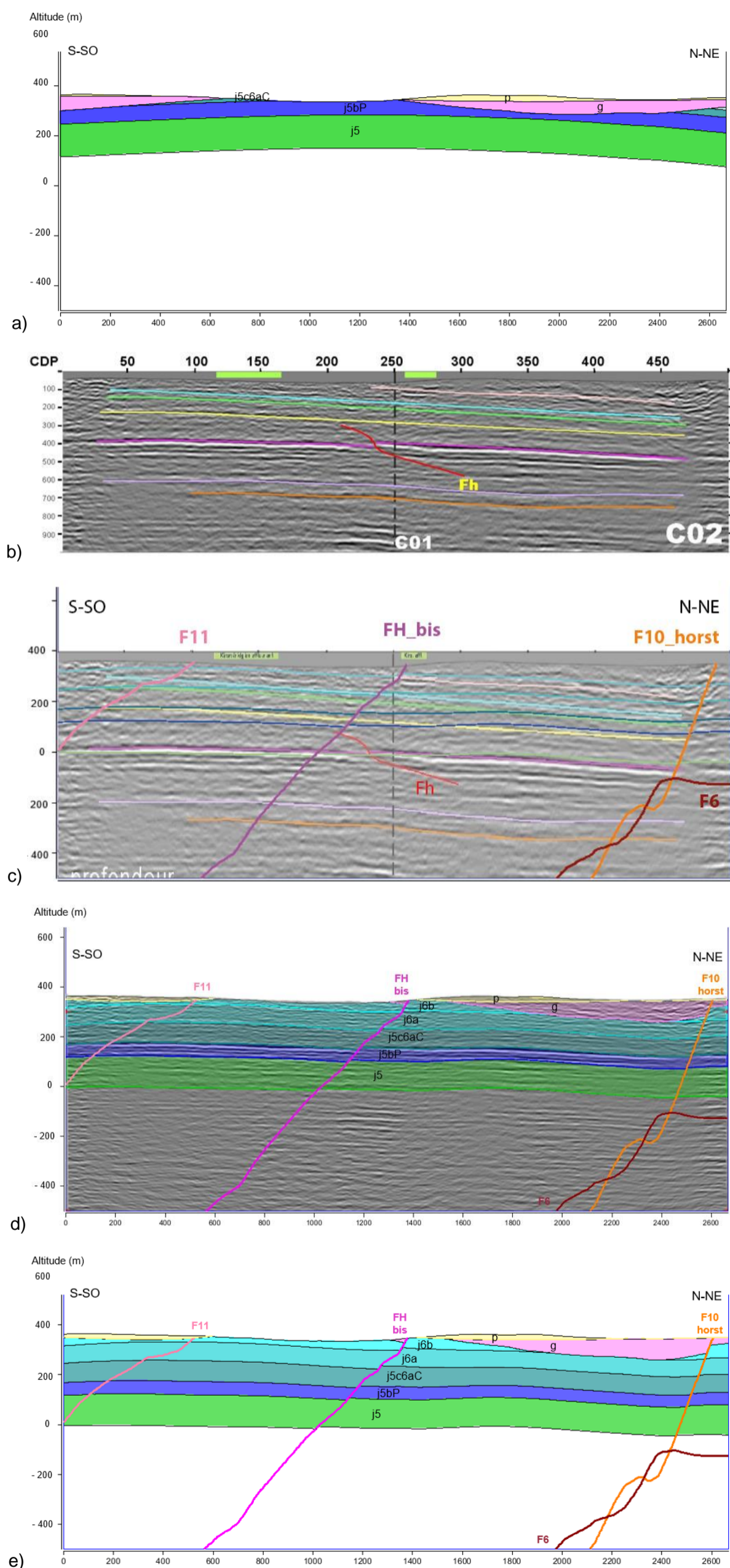
Pour chaque planche de figure :

- a) Modèle préliminaire avant acquisitions sismiques.
- b) Interprétation préalable du profil sismique avant intégration dans le modèle.
- c) Ajustement des limites de formation et des failles interprétés dans le modèle.
- d) et e) Résultats des interprétations 3D dans le modèle final.

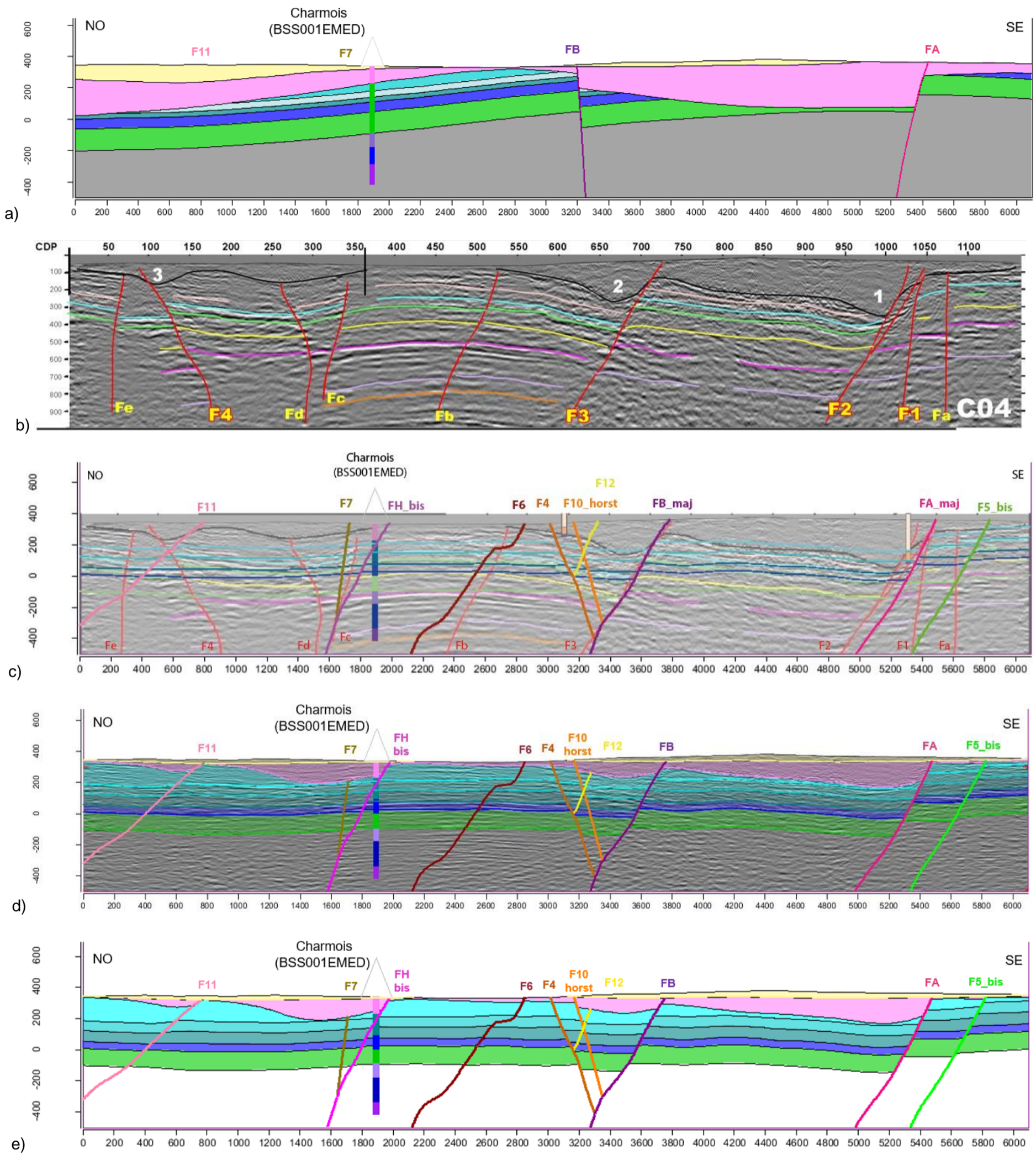
# PS01



# PS02

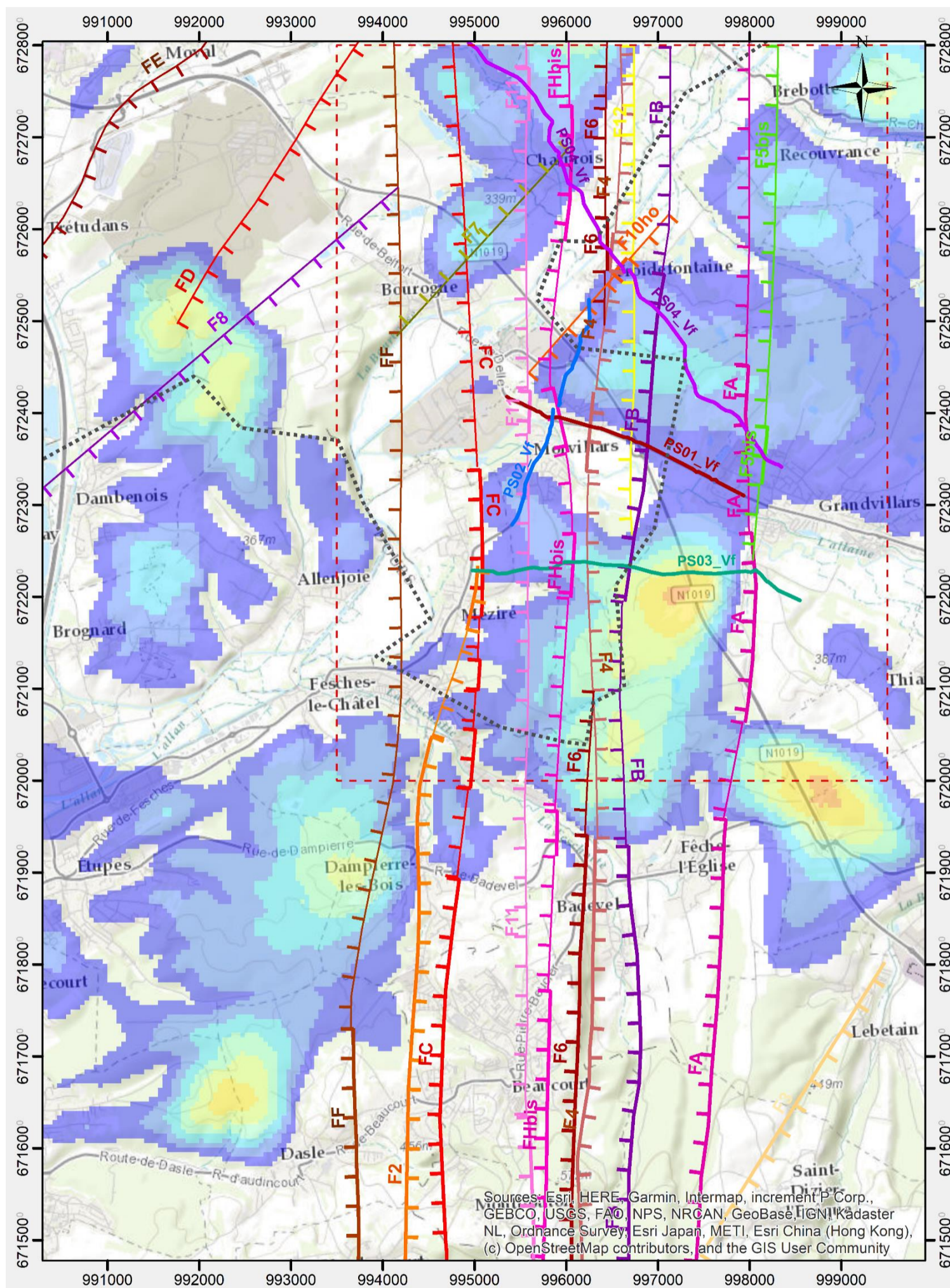


# PS04

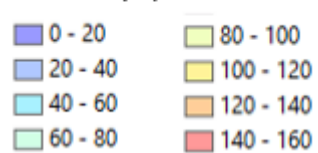


## Annexe 7 Cartes d'épaisseur de chacune des 7 formations, d'après les résultats du modèle géologique 3D final du Grand Belfort

### Épaisseur du pliocène (p)



Épaisseur de la couverture Pliocène (m)



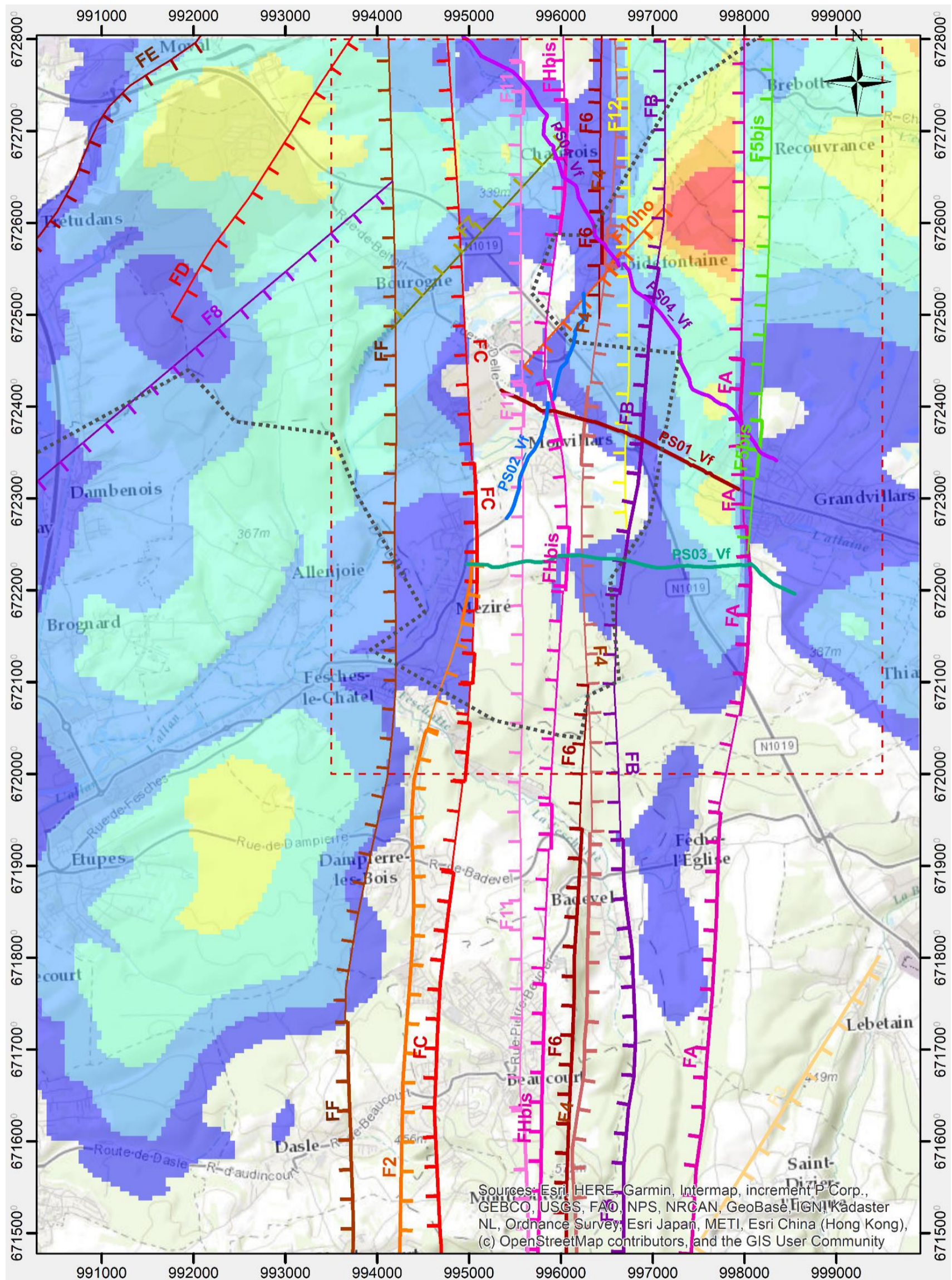
Cible\_hydrogeologique

Limite\_du\_Grand\_Belfort

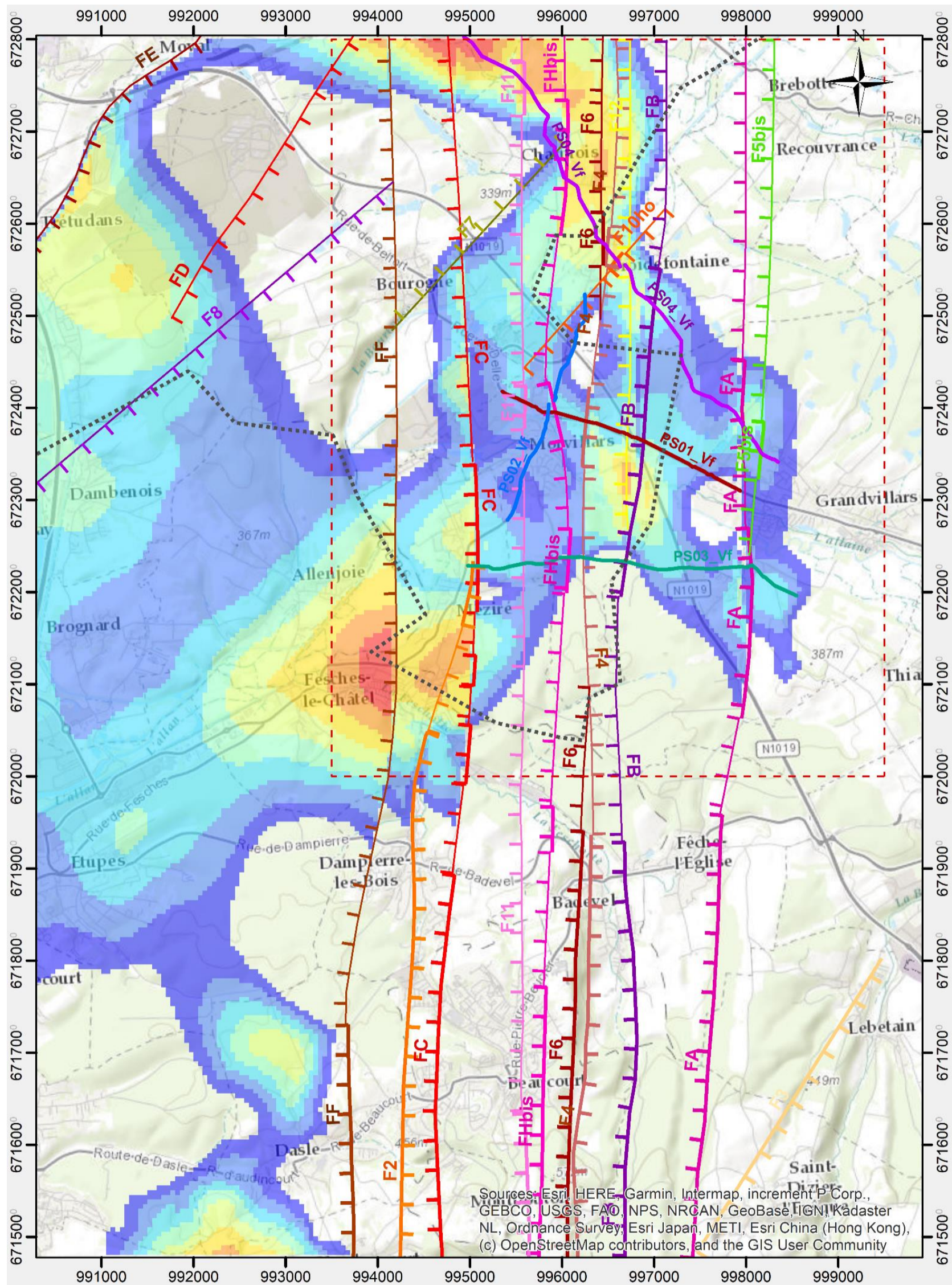
Limite\_du\_Grand\_Belfort

Limite\_du\_Grand\_Belfort

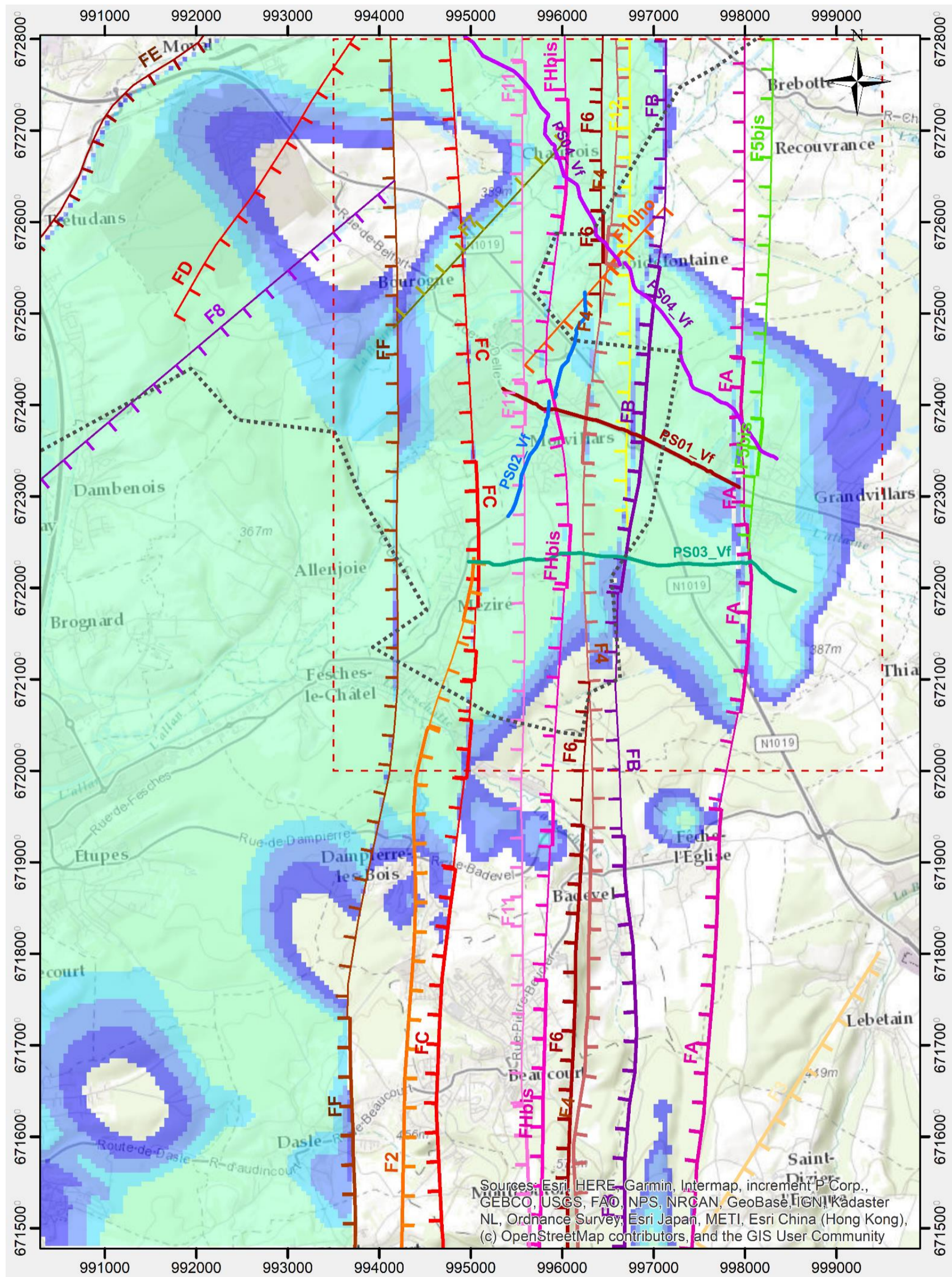
## Épaisseur de l'oligocène (g)



## Épaisseur du kimméridgien sup. (j6b) – jurassique sup.



## Épaisseur du kimméridgien inf. (j6a) – jurassique sup.



Épaisseur du j6a –  
Kimméridgien inf. (m)

- 0 - 20
- 20 - 40
- 40 - 60
- 60 - 80

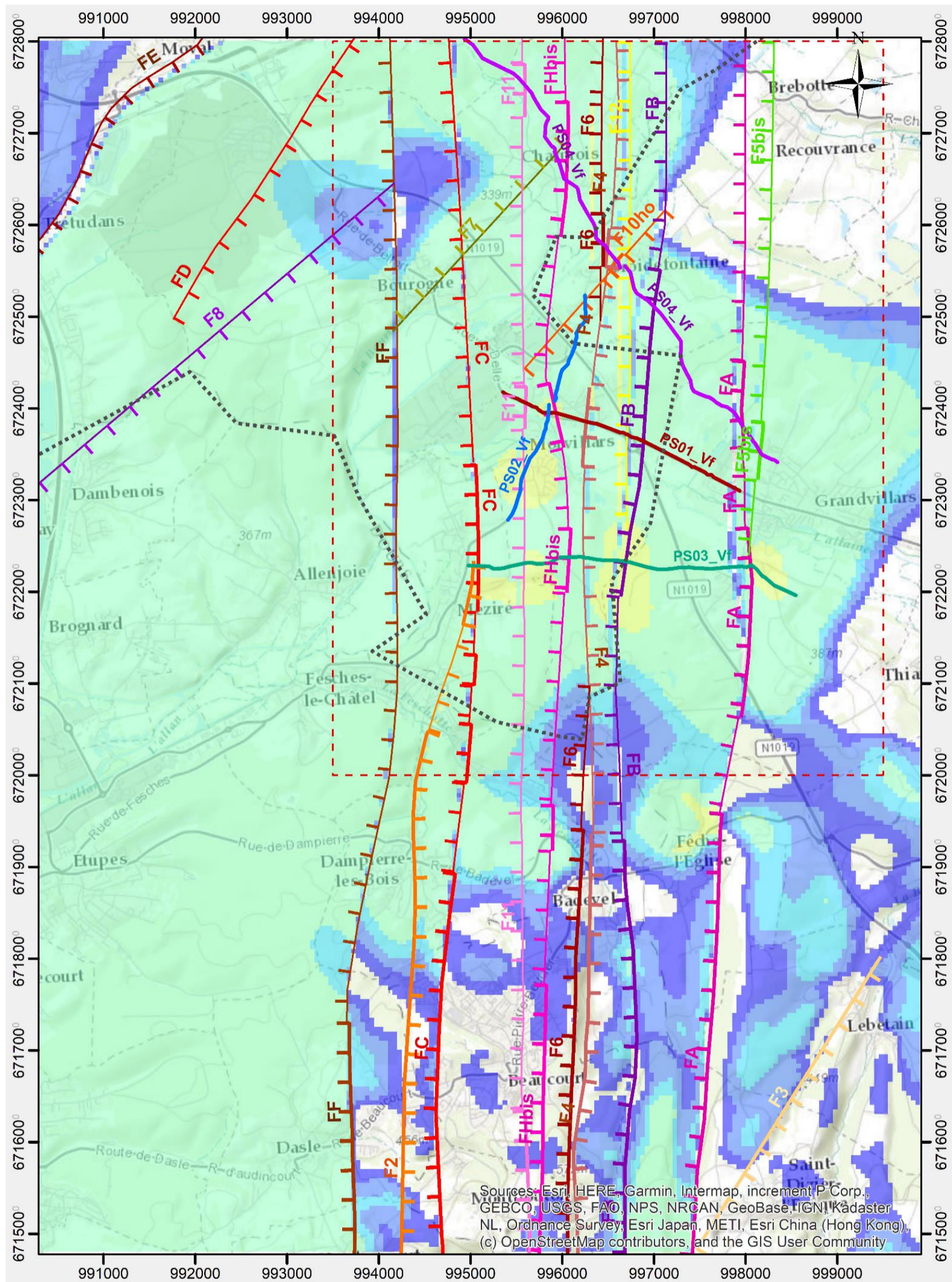
Cible\_hydrogeologique



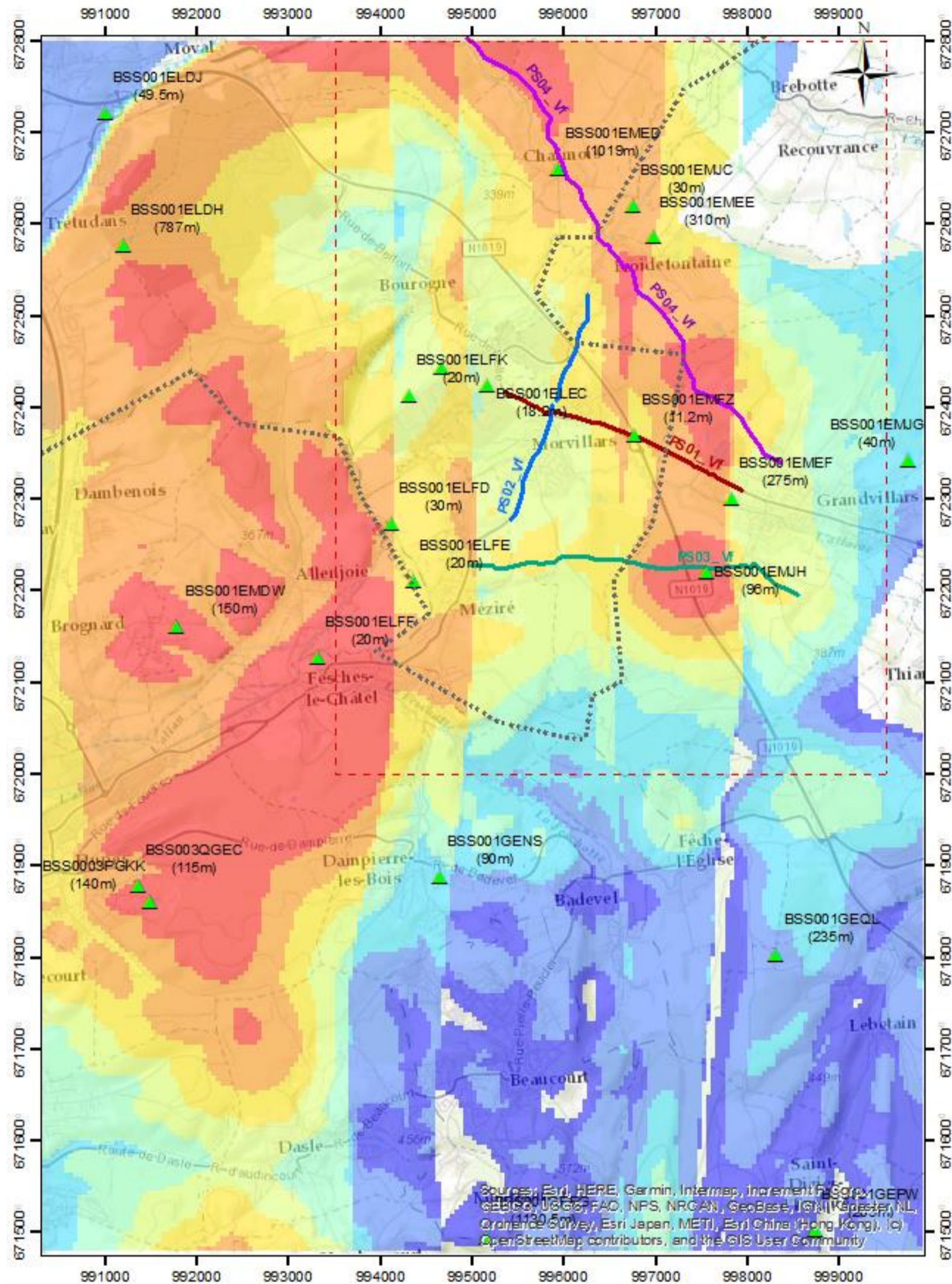
Limite\_du\_Grand\_Belfort



## Épaisseur du kimméridgien inf. - oxfordien sup. (j5c6aC) – jurassique sup.



## Profondeur de l'oxfordien sup. (j5bP) – jurassique sup.



- prof\_mur\_j5bP
- <VALEUR>
- 0 - 50
- 50 - 100
- 100 - 150
- 150 - 200
- 200 - 250
- 250 - 300
- 300 - 350
- 350 - 400

## **Annexe 8 Cahier des Charges pour la création d'un forage d'exploration et d'un piézomètre dans le territoire du Grand Belfort (90)**



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale Bourgogne Franche-Comté**

27, rue Louis de Broglie

21000 – Dijon – France

Tél. : 03 80 72 90 40

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**