

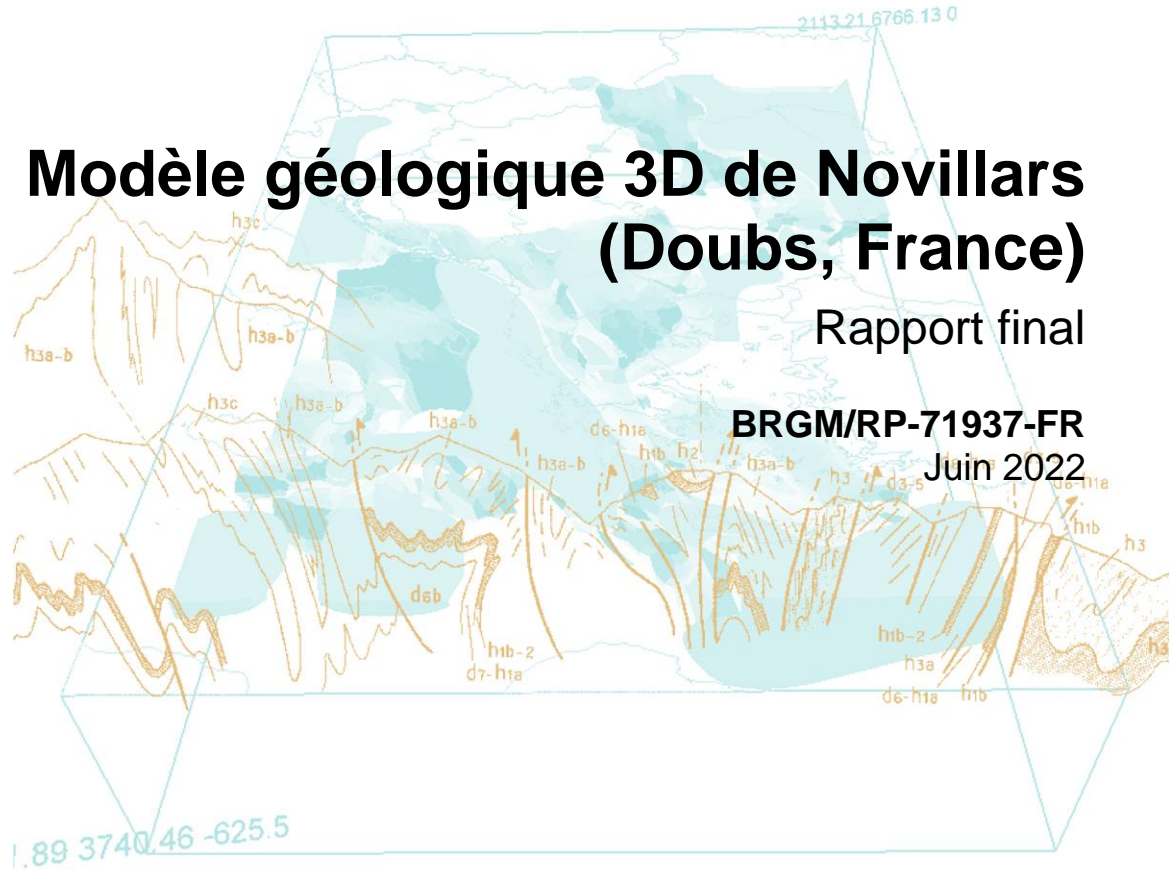


Modèle géologique 3D de Novillars (Doubs, France)

Rapport final

BRGM/RP-71937-FR

Juin 2022



Modèle géologique 3D de Novillars (Doubs, France)

Rapport final

BRGM/RP-71937-FR

Juin 2022

Étude réalisée dans le cadre du projet AP20DIJ008

S. Caritg

Avec la collaboration de

M. Devillèz, F. Choulet, L. Beccaletto, A. Bitri

Vérificateur :

Nom : Yannick CALLEC

Fonction : Responsable de l'unité
DGR/CGEO

Date : 09/06/2022

Signature :


Yannick CALLEC
Responsable de l'Unité DGR/CGEO
Cartographie Géologique des territoires

Approbateur :

Nom : Manuel PARIZOT

Fonction : Directeur régional BFC

Date : 13/06/2022

Signature :


Manuel PARIZOT
Directeur régional
Bourgogne - Franche Comté

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

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés :

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

S. Caritg, avec la collaboration de Devillèz M., Choulet F., Beccaletto L., et Bitri A (2022) – Modèle géologique 3D de Novillars (Doubs, France). Rapport final. BRGM/RP-71937-FR, 76 p., 40 fig., 3 ann..

Synthèse

Le modèle géologique 3D de Novillars a été réalisé par le BRGM dans le cadre d'un ensemble d'études lancées par Grand Besançon Métropole (GBM) visant à renforcer la production d'eau destinée à la consommation humaine par les eaux souterraines et protéger cette ressource.

Le logiciel de modélisation géologique 3D utilisé pour le projet est le « GeoModeller ». Créé et développé par le BRGM, ce logiciel permet d'intégrer de nombreuses données au fur et à mesure de leur acquisition et d'actualiser leur interpolation en 3 dimensions tout au long du projet.

Le modèle a été construit en 3 étapes successives, étalées entre juin 2020 et juin 2022. Chaque étape a donné lieu à une version du modèle améliorée, résultant de l'intégration des nouvelles données :

- La première version du modèle (« modèle préliminaire ») a été construite à partir des données existantes telles que les cartes géologiques, le modèle numérique de terrain, les forages et les mesures structurales. Elle a permis de mettre en cohérence l'ensemble de ces données dans un seul et unique espace 3D et de reproduire en 3 dimensions, la géométrie régionale des formations jurassiques et failles majeures présentes sur la zone d'étude ;
- La deuxième version du modèle (« modèle actualisé ») a été réalisée suite à l'acquisition de deux profils de sismique réflexion dans deux secteurs du périmètre de protection des eaux de Novillars pour lesquels la structuration géologique du substratum mésozoïque est recouverte, et donc cachée, par les alluvions anciennes du Doubs. L'interprétation en 3 dimensions de ces profils sismiques a permis de mettre en évidence l'existence de deux structures jusque-là insoupçonnées dans la plaine du paléo-méandre du Doubs, entre la butte de Montoillotte et le village d'Amagney. Il s'agit d'un synclinal centré au nord de la butte de Montoillotte et d'une faille N-S nommée « Faille du Méandre » qui le borde à l'est. L'intégration de ces deux profils sismiques dans le modèle 3D a également permis d'étendre l'extension latérale de certaines failles repérées sur ces profils. On notera par exemple le prolongement des failles du Doubs et des Longeaux vers l'ouest, dans le secteur des forages de Novillars.
- La troisième et dernière version du modèle (« modèle consolidé ») intègre les observations et mesures de terrain réalisées par le BRGM et ciblées sur la fracturation du secteur de Novillars. La présence d'une fracturation orientée N-S probablement plus fréquente que celle observée à l'affleurement a ainsi été étayée.

Au final, le modèle géologique 3D réalisé sur le périmètre de protection des eaux de Novillars montre que la circulation des eaux karstiques profondes est largement influencée par le découpage structural de ce secteur. La fracturation N-S mise en évidence par l'acquisition des profils sismiques et les nouvelles données de terrain constitue un guide majeur dans la circulation de ces eaux. Limitée au sud par la faille inverse des Longeaux, cette fracturation N-S partitionne, voire déconnecte, les aquifères karstiques en profondeur.

Sommaire

1. Cadre de l'étude	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. OBJECTIF	9
1.3. PARTICIPATION AUX RÉUNIONS.....	10
2. Méthodologie.....	11
2.1. LE LOGICIEL DE MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D « GEOMODELLER ».	11
2.2. LES 3 ÉTAPES DE CONSTRUCTION DU MODÈLE GÉOLOGIQUE DE NOVILLARS	11
11	
3. Données d'entrée du modèle géologique 3D	13
3.1.1. Cartes géologiques	13
3.1.2. Forages profonds.....	13
3.1.3. MNT.....	15
3.1.4. Mesures et observations de terrain	16
3.1.5. Acquisitions sismiques.....	19
4. Construction du modèle préliminaire à partir des données existantes (version 1)	23
4.1. DÉFINITION DE L'EMPRISE DU MODÈLE	23
4.2. DÉFINITION DE LA PILE LITHOSTRATIGRAPHIQUE ET CHOIX DES FORMATIONS À MODÉLISER.....	24
4.3. FAILLES MAJEURES RETENUES POUR LA MODÉLISATION.....	26
4.4. RÉSULTATS INTERMÉDIAIRES DU MODÈLE PRÉLIMINAIRE ET RECOMMANDATIONS POUR LA SUITE DE L'ÉTUDE	29
4.4.1. Structuration géologique globale.....	29
4.4.2. Extension des failles	31
4.4.3. Structuration géologique sous alluvions, au droit des forages.....	33
5. Actualisation du modèle intégrant les acquisitions sismiques (version 2).....	35
5.1. POINTS D'INTÉRÊT RELEVÉS SUR LES IMAGES SISMIQUES	35
5.2. CALAGE DE LA BASE DES CALCAIRES DU BATHONIEN (J2).....	36
5.3. LES FAILLES BORDIÈRES DE L'ANTICLINAL DU BOIS DE SASSY	37
5.4. MISE EN ÉVIDENCE DU SYNCLINAL DE MONTOILLOTTE	38

5.5. PROLONGEMENT DES FAILLES DES LONGEAUX ET DU DOUBS.....	38
5.6. LA NOUVELLE FAILLE « DU MÉANDRE ».....	40
5.7. RÉSULTATS INTERMÉDIAIRES DU MODÈLE ACTUALISÉ ET RECOMMANDATIONS POUR LA SUITE DE L'ETUDE.....	42
6. Consolidation du modèle par les observations de terrain dans le secteur de Novillars (version 3).....	45
6.1. AJOUT DE NOUVELLES FRACTURES NORD-SUD DANS LE SECTEUR DE NOVILLARS	45
6.2. PRÉCISION DU TRACÉ DE LA FAILLE DES LONGEAUX VERS LE SUD-OUEST 50	
6.3. RÉSULTATS INTERMÉDIAIRES DU MODÈLE CONSOLIDÉ ET RECOMMANDATIONS TECHNIQUES.....	52
7. Synthèse des résultats.....	53
8. Conclusions et perspectives.....	59
8.1. CONCLUSIONS	59
8.2. PERSPECTIVES	59
9. Bibliographie.....	61

Liste des figures

Figure 1 : Carte géologique interprétative des formations et failles supposées sous les alluvions du Doubs, dans le secteur de Novillars (données communiquées par M. Devillèz, ASCOMADE, 2020). Fonds géologiques de la carte géologique de la France à 1/50 000 n°502 et n° 503	10
Figure 2 : Localisation des forages profonds du secteur d'étude de Novillars, profondeur (entre parenthèses) et formations atteintes (voir légende des couleurs) sur le fond géologique des cartes BRGM à 1/50 000 n°502 et 503	15
Figure 3 : Modèle numérique de terrain (MNT) du secteur de Novillars	16
Figure 4 : Carte synthétique des mesures de stratification déjà disponibles ou nouvellement acquises, intégrées dans le modèle géologique 3D de Novillars.	18
Figure 5 : Carte synthétique des mesures de fracturation nouvellement acquises par le BRGM (2021) et intégrées dans le modèle géologique 3D de Novillars.	19
Figure 6 : Tracés des deux profils de sismique réflexion réalisés par le BRGM en 2021 dans le secteur du Périmètre de Protection des Eaux (PPE) de Novillars.....	20
Figure 7 : Image sismique du Grand profil (PS1) obtenue après conversion des temps en profondeur, et géoréférencement (x, y, z) avant intégration dans le modèle géologique 3D de Novillars.	21

Figure 8 : Image sismique du Petit profil (PS2) obtenue après conversion des temps en profondeur, et géoréférencement (x, y, z) avant intégration dans le modèle géologique 3D de Novillars.	21
Figure 9 : Coordonnées de la « boîte » Geomodeller du modèle géologique 3D de Novillars. Système de RGF93/ Lambert 93. Unités en mètres.....	23
Figure 10 : Emprise du modèle géologique 3D de Novillars sur fond de carte géologique au 1/50 000 BRGM.	24
Figure 11 : Pile lithostratigraphique du modèle géologique 3D de Novillars et colonne stratigraphique de la région bisontine associée.	26
Figure 12 : Coupe géologique du secteur de Novillars interprétée à partir de la carte géologique de Vercel (d'après Université Besançon Franche-Comté, 2017)	27
Figure 13 : Carte synthétique des formations géologiques et failles retenues pour la modélisation géologique 3D de Novillars (GeoModeller).....	28
Figure 14 : Modèle géologique 3D préliminaire (Version 1) de Novillars : Vue 3D depuis le sud-est.	30
Figure 15 : Exemple de coupes transversales nord-sud réalisées dans le volume du modèle 3D géologique de Novillars (modèle préliminaire, version 1).....	30
Figure 16 : Carte litho-structurale résultante du modèle géologique 3D préliminaire (version 1) de Novillars.	32
Figure 17 : Coupe passant par les forages de Chailluz et Thise, issue du modèle géologique 3D préliminaire de Novillars (Coupe C9).....	34
Figure 18 : Coupe passant par les forages SPD'Eau à Pré-Lavel, issue du modèle géologique 3D préliminaire de Novillars (Coupe C7_sondages).	34
Figure 19 : Points d'intérêt relevés sur l'image du grand profil sismique PS1	35
Figure 20 : Points d'intérêt relevés sur l'image du grand profil sismique PS2	36
Figure 21 : Calage de la base des calcaires du Bathonien (J2) suite à l'intégration du grand profil sismique PS1 dans le modèle géologique 3D de Novillars.	37
Figure 22 : Calage de la base des calcaires du Bathonien (J2) suite à l'intégration du petit profil sismique PS2 dans le modèle géologique 3D de Novillars.	37
Figure 23 : Ajustement des failles bordières de l'Anticlinal du Bois de Sassy dans le modèle géologique 3D de Novillars. a) Avant actualisation (modèle préliminaire), b) Après actualisation (modèle actualisé).	38
Figure 24 : Synclinal de Montoillotte mis en évidence par l'acquisition du Grand profil sismique (PS1). Avant (a) et après (b) actualisation du modèle 3D de Novillars (version 2).	38
Figure 25 : Prolongement vers l'ouest de la faille des Longeaux et de la Faille du Doubs. Modèle géologique 3D de Novillars, actualisé par les acquisitions sismiques.....	39
Figure 26 : Failles des Longeaux (trait vert) et du Doubs (trait violet) prolongées dans les profils sismiques PS1 (a) et PS2 (b) : Résultats du modèle géologique 3D actualisé de Novillars (version 2).	40
Figure 27 : Faille du Méandre (en noir) et faille des Longeaux (en vert) interprétées dans le du Grand profil sismique (PS1) résultat du modèle géologique 3D actualisé de Novillars (version 2).	41
Figure 28 : Faille du Méandre modélisée d'après l'interprétation du Grand profil sismique (PS1) (modèle 3D de Novillars actualisé, version 2). a) Vue en carte. b) vue 3D depuis le sud. c) vue 3D depuis l'ouest.....	42

Figure 29 : Résultats du modèle géologique 3D de Novillars actualisé par l'intégration des profils sismiques PS1 et PS2 : Coupes des profils sismiques PS1 et PS2 avant (a) et après interprétation 3D (b) (modèle consolidé, version 2).....	44
Figure 30 : a. Diaclase N-S observée au point d'affleurement N007. b. Plan de la diaclase en surface structurale. Affleurement situé en dessous du « Château d'eau » de Novillars.	46
Figure 31 : a. Diaclase N-S observée au point d'affleurement N012. b. Plan de la diaclase en surface structurale. Affleurement situé au niveau du parking de l'église de Novillars.	46
Figure 32 : Diaclase N-S observée au point d'affleurement N017, dans la forêt du Bois du Bois Vernotte, au nord de Novillars.	47
Figure 33 : Diaclase N-S nommée « F16_Licorne », observée au point d'affleurement N016 dans la forêt du Bois Vernotte, à l'ouest du centre équestre de la Licorne (sortie Nord de Novillars en direction d'Amagney).	48
Figure 34 : Nouvelles fracturations N-S ajoutées et modélisées dans le modèle 3D de Novillars suite à l'acquisition de nouvelles données de terrain (modèle consolidé, version 3).	49
Figure 35 : Faille normale N-S nommée « F17_pap_GBM » déduite de l'aprofondissement des formations vers l'ouest observé entre les captages AEP de Grand Besançon Métropole (GBM) et les forages de la papèterie de Novillars.	50
Figure 36 : a. Indice probable de la présence de la Faille des Longeaux relevés sur le terrain par BRGM dans le secteur de Vaire le Petit :b. vue rapprochée du bourelet. Les flèches blanches indiquent la base du ressaut.	51
Figure 37 : Modèle structural 3D préliminaire (Version 1) de Novillars : Vue 3D depuis le sud-est.	56
Figure 38 : Modèle structural 3D consolidé (Version 3, finale) de Novillars : Vue 3D depuis le sud-est.	56
Figure 39 : Vues 3D des formations aquifères, centrées sur le secteur sous alluvions de Novillars – Montoillotte : Version finale du modèle géologique 3D de Novillars (version 3).	57
Figure 40 : Carte litho-structurale extraite du modèle géologique 3D final de Novillars (modèle consolidé, version 3).	58

Liste des annexes

Annexe 1 Nomenclature des âges et notations utilisés pour définir la pile géologique du modèle géologique 3D de Novillars	63
Annexe 2 Tableau des sondages interprétés pour la modélisation géologique 3D (GeoModeller).....	67
Annexe 3 Carte de localisation des Coupes du modèle géologique 3D de Novillars	71

1. Cadre de l'étude

1.1. CONTEXTE

La modélisation géologique 3D du secteur de Novillars a été réalisée par le BRGM dans le cadre des études menées pour la Gestion Patrimoniale des Ressources en Eau Potable du Grand Besançon Métropole. Suite à la sécheresse de 2003, plusieurs travaux ont été lancés par la Communauté Urbaine du Grand Besançon Métropole (GBM) et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. L'espacement des épisodes de précipitations actuel montre en effet qu'il devient nécessaire et urgent, non seulement d'augmenter les capacités d'alimentation en eau potable de la Métropole de Besançon, mais aussi de protéger cette ressource naturelle.

Pour pallier au risque de pénurie en eau du Grand Besançon Métropole, deux captages pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) aujourd'hui exploités, ont été réalisés sur la commune de Novillars. Si la nappe du karst profond captée semble très productive, son fonctionnement en termes de provenance et de circulation des eaux reste cependant complexe et difficile à appréhender. De plus, la proximité avec l'industrie chimique du groupe ARDEA à Roche-lez-Beaupré et des forages de la papèterie de Novillars constituent un enjeu majeur quant au risque avéré de pollution des eaux.

C'est en vue d'améliorer les connaissances sur cette ressource en eau souterraine de la vallée du Doubs mais aussi de la protéger, qu'un comité scientifique a été créé. Un poste de chargé de mission, rattaché à l'Association des Collectivités pour la Maîtrise des Déchets et de l'Environnement de Besançon (ASCOMADE), a été ouvert pour en assurer la coordination.

1.2. OBJECTIF

L'objectif ciblé par la modélisation géologique 3D de Novillars est d'améliorer la compréhension de la structuration géologique du sous-sol qui conditionne la circulation des eaux profondes et donc les enjeux de protection de la ressource en eau dans ce secteur. Il s'agit notamment pour le BRGM de lever les incertitudes quant à la nature des formations et la présence ou non de failles majeures sous les alluvions du Doubs, dans le Périmètre de Protection des Eaux de Novillars (Figure 1).

Deux secteurs stratégiques pour lesquels deux profils sismiques ont été acquis durant le projet sont particulièrement visés :

- Le secteur de Roche-lez-Beaupré, dans lequel est suspecté la présence de calcaires du Jurassique moyen (âge Bathonien) encadrés par deux failles orientées est-ouest.
- Le secteur nord de la butte de Montoillotte, qui constitue une vaste plaine entièrement recouverte par les alluvions anciennes du Doubs, et dont la géomorphologie est souvent considérée comme le témoin d'un ancien méandre du Doubs.

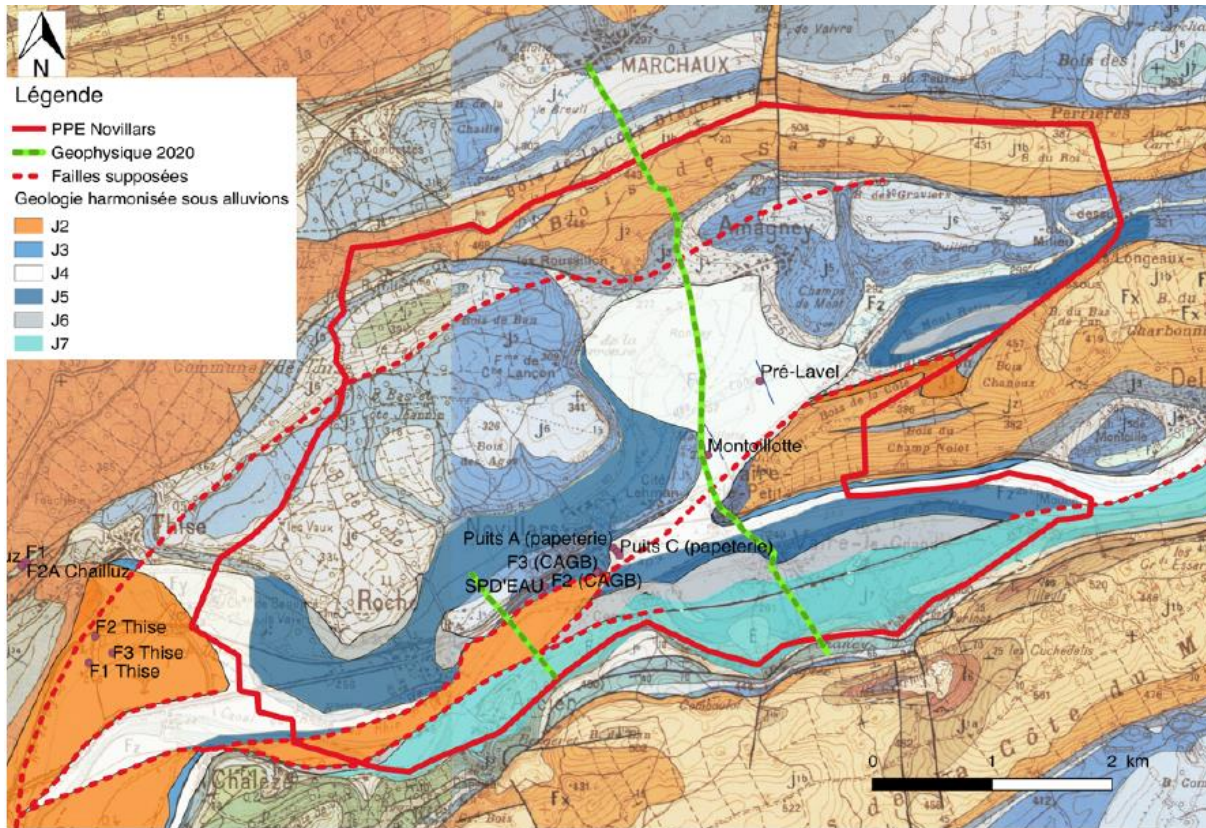


Figure 1 : Carte géologique interprétative des formations et failles supposées sous les alluvions du Doubs, dans le secteur de Novillars (données communiquées par M. Devillèz, ASCOMADE, 2020).
Fonds géologiques de la carte géologique de la France à 1/50 000 n°502 et n° 503

1.3. PARTICIPATION AUX RÉUNIONS

Durant le projet Novillars, le BRGM a participé aux réunions d'échanges et de présentation des modèles géologiques 3D lors des comités suivants :

- Le 23/06/2020 en comité technique (BRGM, ASCOMADE et UNIV BFC) : réunion de lancement du modèle géologique 3D de Novillars. Définition de l'emprise et de la pile lithostratigraphique du modèle, identification des données disponibles pour la modélisation ;
- Le 22/10/2020 en comité scientifique n°5 : présentation par le BRGM des résultats du « modèle préliminaire » (version 1) ;
- Le 25/11/2021 en comité scientifique n°6 : présentation par le BRGM des résultats du « modèle actualisé » (version 2) au comité scientifique ;
- Le 14/06/2022 : présentation par le BRGM des résultats du « modèle consolidé » (version 3 finale) au comité de pilotage et remise des livrables (rapport + modèle Geomodeller).

D'autres réunions d'échanges plus informelles ont été tenues par S. Caritg (BRGM) tout au long du projet, notamment pour assurer la qualité des données transférées par M. Devillèz (ASCOMADE) et F. Choulet (Université de Besançon Franche-Comté) et discuter des résultats intermédiaires des modèles 3D réalisés.

2. Méthodologie

2.1. LE LOGICIEL DE MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D « GEOMODELLER »

Le modèle géologique 3D de Novillars 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 non seulement d'intégrer et de mettre en cohérence des données hétérogènes en nature comme en distribution spatiale (cartes, coupes, forages, géophysiques, hydrogéologiques, ...) dans un espace de travail unique, mais surtout de les interpoler à partir de méthodes géostatistiques en tout point de l'espace 3D. Il permet ainsi de d'obtenir des surfaces et des volumes à géométrie complexe.

2.2. LES 3 ÉTAPES DE CONSTRUCTION DU MODÈLE GÉOLOGIQUE DE NOVILLARS

3 versions du modèle géologique 3D de Novillars ont été réalisées pour déterminer et préciser la géométrie 3D des formations et failles présentes dans le sous-sol de la région.

Une première version du modèle géologique 3D, dite « modèle préliminaire », a été réalisée à partir des données existantes, entre juin et octobre 2020. Sa construction s'est appuyée sur les cartes géologiques BRGM (coupures n°502, 503), les données de terrain déjà relevées par l'ASCOMADE et l'université de Franche Comté, ainsi que les données issues des forages profonds. Une fois recueillies et analysées, ces données ont préalablement été mises en forme et géoréférencées sous SIG (ArcGIS) avant d'être intégrées dans le logiciel de modélisation GeoModeller. Le travail de modélisation et l'interprétation de ces données en trois dimensions qui a suivi a permis d'obtenir un premier squelette régional cohérent du bâti géologique du secteur de Novillars. Les coupes prédictives des deux futurs profils sismiques ont également été extraites. L'ensemble des résultats de ce modèle préliminaire a été présenté et discuté lors du comité scientifique n°5 du 22 octobre 2020.

Une deuxième version du modèle géologique 3D dite « modèle actualisé » a été réalisée entre juillet et novembre 2021. Elle intègre les deux profils sismiques NO-SE acquis au printemps par le BRGM entre Marchaux et Vaire-le-Grand (« Grand profil » PS1) et au sud-est de la papeterie (« Petit profil » PS2). Ces profils ont préalablement été géoréférencés sous SIG et convertis en temps-profondeur afin d'obtenir des images directement intégrables dans le logiciel GeoModeller. Ils ont ainsi pu être interprétés directement dans le logiciel de modélisation géologique. Fort des résultats de la première version du modèle, une attention particulière a été portée dans les secteurs ciblés par les nouvelles acquisitions sismiques afin d'imager la structuration de la géologie profonde de ces zones recouvertes par les alluvions du Doubs. L'ensemble des résultats de ce modèle « actualisé » au regard des nouvelles acquisitions sismiques a été présenté et discuté lors du comité scientifique n°6 du 25 novembre 2021.

Une troisième version du modèle géologique 3D dite « modèle consolidé » a finalement été réalisée entre novembre 2021 et mai 2022. Elle prend en compte les données de terrain acquises par le BRGM au lendemain du comité scientifique n°6, les 26 et 27 novembre 2021. Cette courte reconnaissance de terrain visait à préciser la suspicion de failles N-S au nord de la papeterie ainsi que la prolongation probable de la faille des Longeaux vers l'ouest. Les mesures et observations recueillies ont permis de compléter et renforcer les interprétations finales sur la

structuration 3D des aquifères karstiques profonds. L'ensemble des résultats de ce modèle final « consolidé » seront présentés le 14 juin 2022.

3. Données d'entrée du modèle géologique 3D

De nombreuses données déjà disponibles ou nouvellement acquises dans le cadre de ce projet ont été intégrées dans le modèle géologique 3D de Novillars. Elles sont constituées de cartes géologiques, de forages profonds, de mesures et observations de terrain ainsi que de profils sismiques. Certaines de ces données étaient déjà à disposition avant le travail de modélisation, d'autres, comme les données géologiques de terrain et les profils sismiques, ont été acquises et intégrées au fil du projet.

Ces données ont été préalablement harmonisées et géoréférencées en système de coordonnées RGF93/Lambert93 sous format SIG (Système d'Information Géographique), à l'aide du logiciel « ArcGIS ». Elles ont ensuite été formatées puis intégrées dans le logiciel de modélisation géologique 3D du BRGM « GeoModeller ».

3.1.1. Cartes géologiques

Trois cartes éditées et géoréférencées par le BRGM ont été utilisées en tant que fond cartographique pour la modélisation 3D de Novillars :

- La carte géologique à l'échelle au 1 : 50 000 de Besançon (Bonté *et al.*, 1934) : feuille n°502 ;
- La carte géologique à l'échelle 1 : 50 000 de Vercel (Cautru *et al.*, 1958) ; feuille n° n°503 ;
- La carte géologique harmonisée à l'échelle 1 : 50 000 du département du Doubs (Lagie *et al.*, 2008) : Rapport BRGM/RP-55929.

Bien qu'anciennes, les cartes géologiques de Besançon et de Vercel constituent le support cartographique le plus couramment utilisé pour la géologie du massif du Jura. Très complètes, elles rassemblent la géologie, le fond topographique et la toponymie. Bien que la nomenclature des notations de ces cartes ait été révisée depuis, elle a été conservée ici pour définir la pile lithostratigraphique du modèle géologique 3D en vue de faciliter les échanges au sein du comité technique. Pour plus de détail, une charte de correspondance entre ces notations anciennes et récentes, et les âges associés, est fournie dans l'annexe 1.

La carte géologique harmonisée du département du Doubs permet d'avoir une vue d'ensemble, sans raccord entre les deux cartes de Vercel et de Besançon. Elle présente également l'intérêt de pouvoir extraire les mesures de pendage des formations sous format numérique, et donc de les importer facilement dans le logiciel GeoModeller.

3.1.2. Forages profonds

Les données des 14 forages profonds réalisés dans le secteur d'étude ont été recueillies, interprétées et transmises par l'ASCOMADE en août 2020. Elles ont ensuite été mises en forme et intégrées sous forme de tableau .csv par le BRGM. Ce dernier est disponible dans l'annexe 2.

Ces forages ont été réalisés par l'entreprise « Précis-forages ». Bien que souvent déviés, aucune information sur les données de déviation n'a été fournie. Ils ont donc été intégrés dans le modèle géologique 3D en tant que forages verticaux. Il existe donc une incertitude quant aux profondeurs précises du toit et des murs des formations fournies par ces forages. Elle ne devrait cependant pas avoir d'impact majeur sur la contrainte du modèle géologique 3D en profondeur, à l'échelle régionale.

Quatre zones du secteur d'étude ont été investiguées par ces forages (Figure 2) :

- Au sud-ouest, 3 forages ont été réalisés dans la zone de Chailluz et 3 autres dans celle de Thise à environ 1000 m de distance. Ces forages sont parmi les plus profonds (entre 100 et 177 m) et ont tous atteint les calcaires de la Grande Oolithe et les calcaires bioclastiques d'âge Bajocien (formation J1) entre 50 et 70 m de profondeur ;
- Au centre, la zone de Novillars a fait l'objet de 5 forages. Un seul, le SPD Eau, s'est arrêté dans les Calcaires de la Dalle Nacrée d'âge Callovien (formation inférieure de l'unité J3) à 116 m de profondeur. Il a atteint cette formation notée J3, à 92 m de profondeur. Les 4 autres forages ont tous atteint les Calcaires de la Citadelle d'âge Bathonien (formation inférieure de l'unité J2). Il s'agit des 2 captages AEP de Grand Besançon Métropole (GBM Novillars) profonds de 136 et 142 m, ainsi que des 3 forages exploités par la papeterie les moins profonds (68 et 88 m) du secteur d'étude. Malgré une distance de moins de 250 m entre les forages de GBM Novillars et de la papeterie, ceux de GBM ont tous les deux atteint la formation du J2 à 107 m de profondeur tandis que ceux de la papeterie l'ont atteint entre 53 et 71 m de profondeur.
- Au nord-est de Novillars, à 1000 m environ des forages de la papeterie, le forage de Montoillotte a atteint les Calcaires de la Dalle Nacrée d'âge Callovien (formation inférieure de l'unité J3) dès 38 m de profondeur et reste dans cette formation jusqu'en fond de trou à 110 m ;
- À 1000 m environ au nord-est du forage de Montoillotte, le forage de Pré-Lavel est le plus profond de la zone d'étude avec 181 m forés. Il atteint les calcaires de la Grande Oolithe d'âge Bajocien supérieur (formation notée J1b) à 120 m de profondeur.

Le détail des toits et murs de chaque formation recoupée par les 14 forages est fourni dans l'annexe 2.

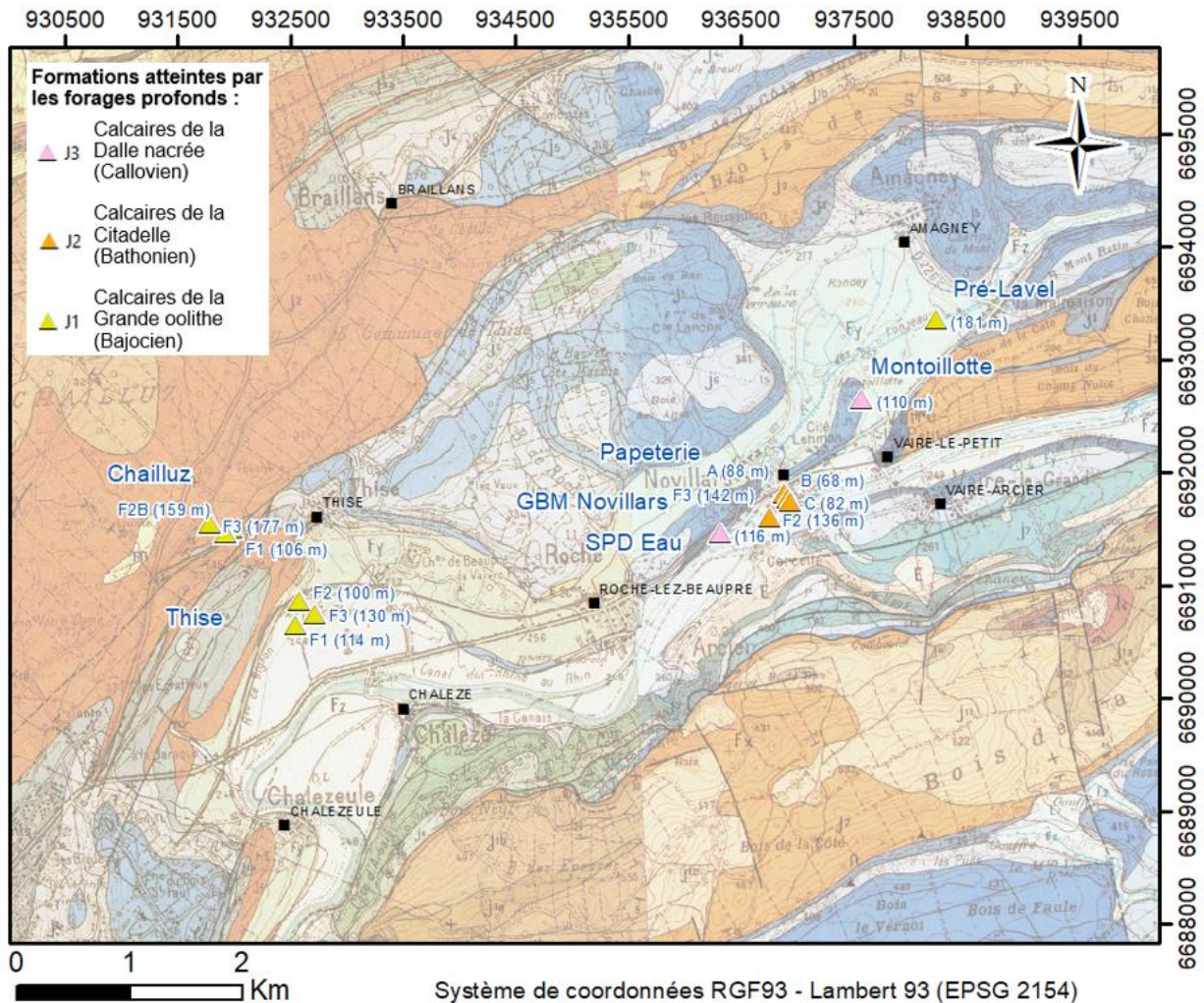


Figure 2 : Localisation des forages profonds du secteur d'étude de Novillars, profondeur (entre parenthèses) et formations atteintes (voir légende des couleurs) sur le fond géologique des cartes BRGM à 1/50 000 n°502 et 503

3.1.3. MNT

Traversé d'est en ouest par la vallée du Doubs, le secteur de Novillars fait partie des Avant-Monts et Avants-plateaux du Jura. Caractérisés par une succession de monts et vallées typiques du massif du Jura, les reliefs varient entre 250 m d'altitude dans la vallée du Doubs et atteignent plus de 550 m d'altitude au niveau de l'anticlinal de Montfaucon et de la forêt de Chailluz (Figure 3).

L'expression et l'influence de ces reliefs sur la modélisation géologique 3D du sous-sol nécessitent d'utiliser une représentation numérique sous forme de grille des valeurs d'altitude du sol en tout point du modèle. Il s'agit du modèle numérique de terrain (MNT). C'est sur cette surface topographique que les données cartographiques sont projetées pour être modélisées dans le logiciel GeoModeller. La résolution du MNT utilisé pour la réalisation du modèle géologique 3D de Novillars est de 5 m .

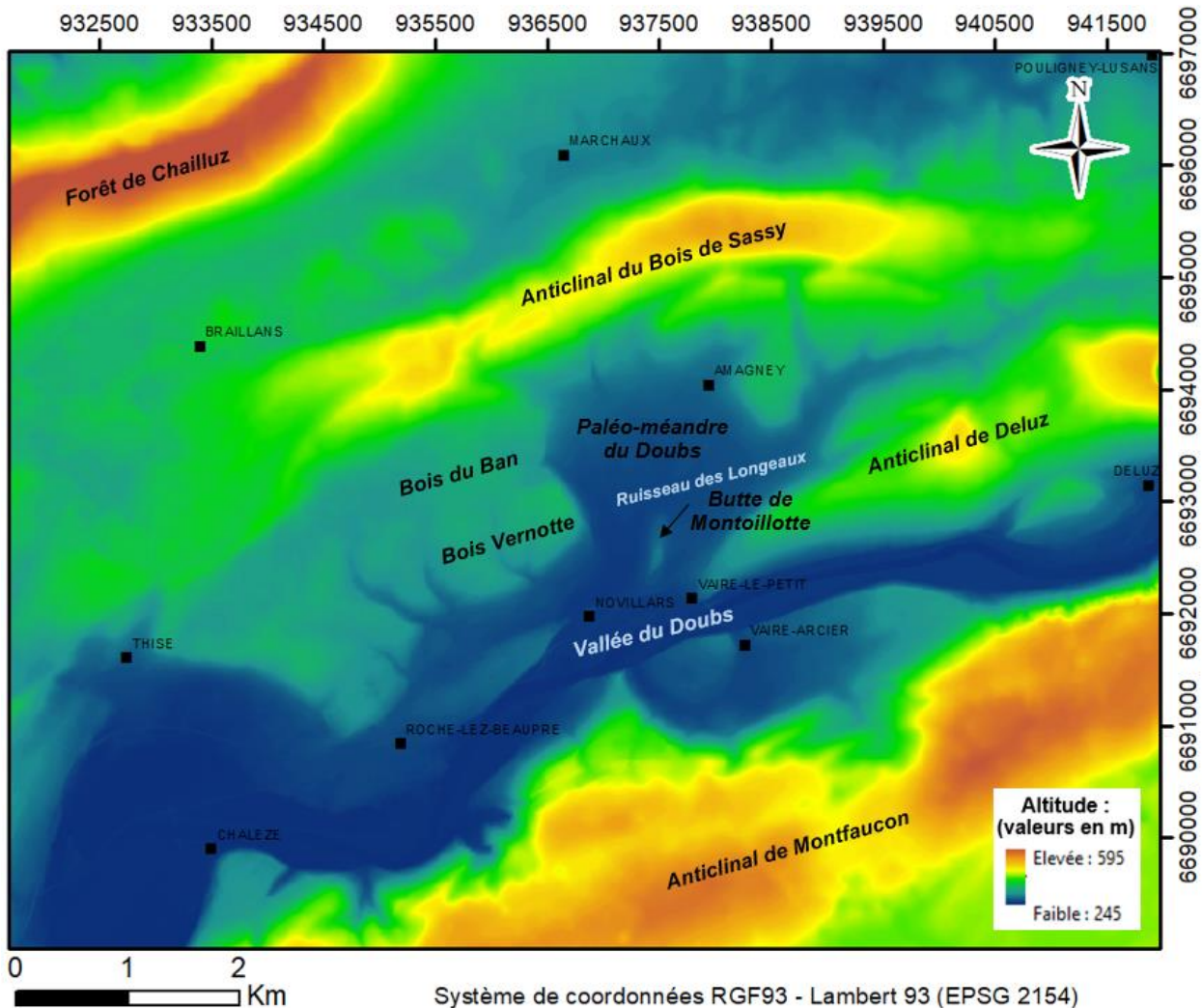


Figure 3 : Modèle numérique de terrain (MNT) du secteur de Novillars

3.1.4. Mesures et observations de terrain

6 jeux de données structurales ont été récoltés, géoréférencés et mis en forme pour être intégrés dans le modèle géologique 3D de Novillars. Ces données d'orientations et pentages mesurés sur le terrain sont essentielles pour contraindre la géométrie des formations et failles en surface. Elles sont en effet directement projetées sur le modèle numérique de terrain du GeoModeller et donc rattachées à lui dans le processus de modélisation en 3 dimensions.

Bien que ces données aient été relevées sur le terrain par différents auteurs et durant des périodes espacées depuis la première carte de Besançon en 1934, elles couvrent l'ensemble de la zone d'étude et ont permis de concentrer les investigations supplémentaires aux seuls points stratégiques du projet.

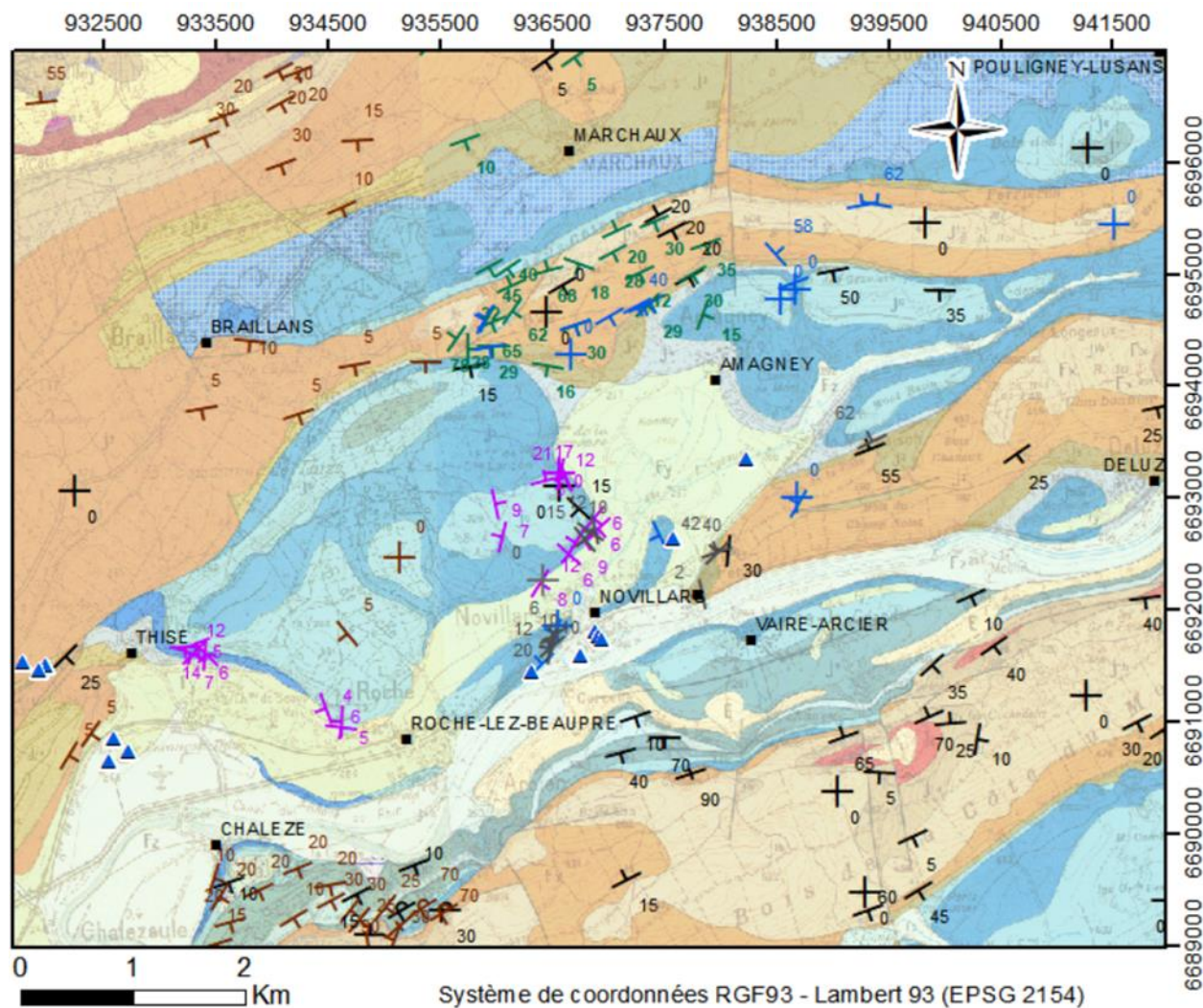
Les 6 jeux de données structurales utilisés pour la modélisation géologique 3D de Novillars, sont détaillés ci-dessous. Les 3 premiers concernent des données déjà existantes tandis que les 3 derniers ont été acquis durant le projet (Figure 4 et Figure 5) :

- Les données issues de la carte géologique harmonisée du département du Doubs (Editions BRGM, 2008) : 50 mesures d'orientation/pendage ont été extraites de cette carte vectorisée et géoréférencée qui n'est autre que le résultat de l'harmonisation à l'échelle

1 : 50 000 des 20 cartes géologiques du département du Doubs. De ce fait, bien que le travail d'harmonisation ait été réalisé en 2008, les données d'orientation/pendage de la stratification datent des relevés de terrain effectués par les auteurs des cartes géologiques de Besançon (1934) et de Vercel (1958). Ces données sont réparties de manière relativement uniforme sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure 4) ;

- Les données fournies par l'université sur le secteur de Marchaux (2001) : Ces mesures d'orientation/pendage ont été relevées sur une minute de terrain par 3 étudiants de l'Université de Franche-Comté en 2001, dans le cadre de leur stage de cartographie de terrain pour leur DESS en Géologie Appliquée. Cette minute de terrain a été transmise au BRGM par l'université de Franche-Comté fin août 2020, sous format image (.pdf). Elle a donc été préalablement géoréférencée sous SIG par le BRGM, afin de digitaliser les 22 mesures de stratification disponibles sur la zone d'étude et de les extraire pour intégration dans le modèle. Ces données sont principalement localisées au sud de Marchaux, sur l'anticlinal du Bois de Sassy (Figure 4) ;
- Les données de la carte géologique de P. Chauve et P. Rolin (2015) : Ces données sont issues de leur ouvrage « Jura bisontin : Reliefs, paysages et roches ». Elles ont été fournies au BRGM par l'université de Franche Comté fin août 2020, sous format SIG. Les 36 mesures d'orientation/pendage de stratification fournies sont uniquement réparties sur le tiers ouest de la zone d'étude. Elles se concentrent essentiellement au nord de Braillans et au sud de Chalèze (Figure 4) ;
- Les données acquises par l'ASCOMADE (2017) : 22 mesures d'orientation/pendage de stratification ont été acquises sur le terrain en 2017 par l'ASCOMADE, dans le cadre du projet. Localisées à l'intérieur du Périmètre de Protection de Eaux (PPE) de Novillars, elles se concentrent essentiellement sur Novillars, la butte de Montoillotte, la terminaison ouest de l'anticlinal Deluz, ainsi que sur l'anticlinal du Bois de Sassy au nord d'Amagney. Ces données ont été transmises au BRGM par l'ASCOMADE fin août 2020, sous format QGIS ;
- Les données acquises en commun par l'université de Franche-Comté et l'ASCOMADE (2020) : Une vingtaine de mesures de stratification ont été relevées sur le terrain lors d'une mission de terrain commune organisée en juin 2020 entre l'université de Franche Comté et l'ASCOMADE. Ces mesures sont venues compléter celles déjà acquises par l'ASCOMADE en 2017 dans le cadre du projet, afin de préciser la structuration géologique des zones peu investiguées de Thise, Roche-lez-Beaupré et Novillars (Bois du Ban) (Figure 4) ;
- Les données acquises par le BRGM (2021) : Une mission de terrain de deux jours a été réalisée par le BRGM fin d'année 2021, au lendemain du comité technique n°6 du 25 novembre 2021. Cette dernière mission avait pour objectif de consolider les résultats du modèle géologique 3D actualisé par les acquisitions sismiques (version 2), notamment en terme de suspicion de failles N-S dans le secteur de Novillars. Une trentaine de données structurales ont donc été relevées dans ce secteur dont 13 mesures de stratification (Figure 4) et surtout 17 de mesures de fractures (Figure 5). Les 3/4 des fractures observées et mesurées sont clairement des diaclases (fracture sans déplacement) tandis qu'un 1/4 seulement ont été interprétées en tant que failles (fractures avec déplacement).

Au total, 180 mesures structurales déjà existantes ou nouvellement acquises, ont été intégrées dans le modèle géologique 3D de Novillars (Figure 4 et Figure 5). Force est de constater que la quasi-totalité de ces données sont des mesures de stratification. Seules 17 d'entre elles, ont été spécifiquement relevées par le BRGM sur la fracturation (Figure 5).



▲ Forages profonds	Origine du jeu de données déjà existantes :
Stratifications avec valeurs de pendage :	— Carte publiée dans l'ouvrage « Jura bisontin : Reliefs, paysages et roches » (P. Chauve et P. Rolin, 2015)
⊥ Pendage avec série normale	— Minute de terrain sur la zone de Marchaux (Université de Franche-Comté, 2001)
⊕ Pendage horizontal avec série normale	⊥ Carte géologique harmonisée à l'échelle 1:50000 du Département du Doubs (BRGM, 2008). D'après les cartes géologiques au 1 : 50 000 de Besançon (BRGM, 1934) et de Vercel (BRGM, 1958)
⊥ Pendage vertical avec série normale	
⊥ Pendage avec série inverse	
Origine du jeu de données nouvellement acquises :	
⊥ Acquises par le BRGM (S. Carigt, 2021)	
⊥ Acquises par l'univ. de Franche-Comté et l'ASCOMDE (F. Choulet et M. Devillez, 2020)	
⊥ Acquises par l'ASCOMDE (M. Devillez, 2017)	

Figure 4 : Carte synthétique des mesures de stratification déjà disponibles ou nouvellement acquises, intégrées dans le modèle géologique 3D de Novillars.

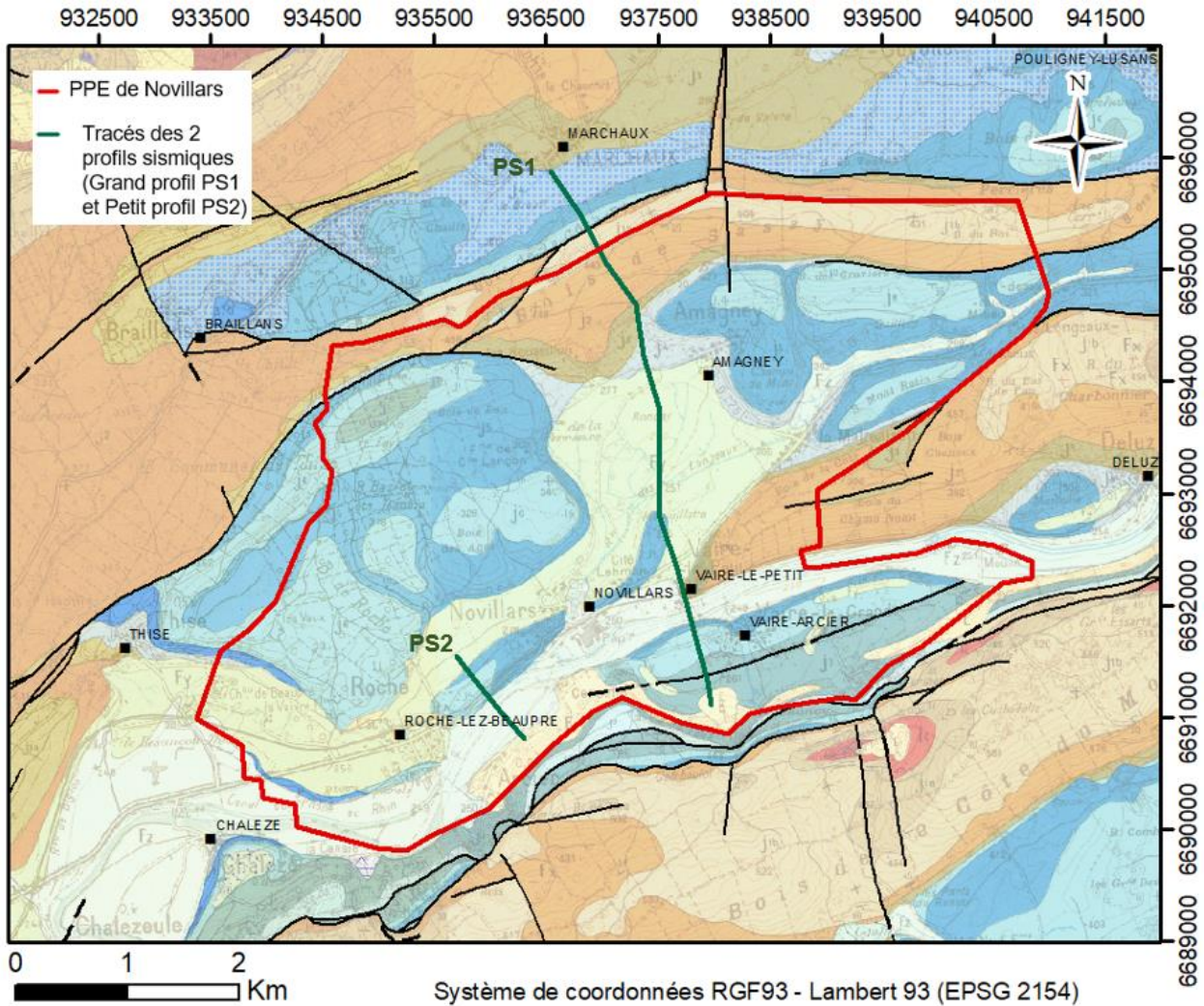


Figure 6 : Tracés des deux profils de sismique réflexion réalisés par le BRGM en 2021 dans le secteur du Périmètre de Protection des Eaux (PPE) de Novillars.

Le « Grand Profil Sismique » (PS1) traverse une grande partie du secteur d'étude, depuis la ville de Marchaux au nord, jusqu'à Vaire-le-Grand au sud (Figure 6). Long d'un peu plus de 5 km et imagé jusqu'à 1600 m de profondeur, il permet de recouper l'ensemble des formations jurassiques et failles majeures du secteur de Novillars. L'objectif de ce profil est de préciser la nature et la géométrie des structures géologiques présentes en profondeur, sous les alluvions anciennes du Doubs qui recouvrent la plaine paléo-méandre du Doubs, entre Amagney et Novillars (Figure 3). L'image sismique obtenue après conversion des temps en profondeur par les géophysiciens est présentée sur la Figure 7.

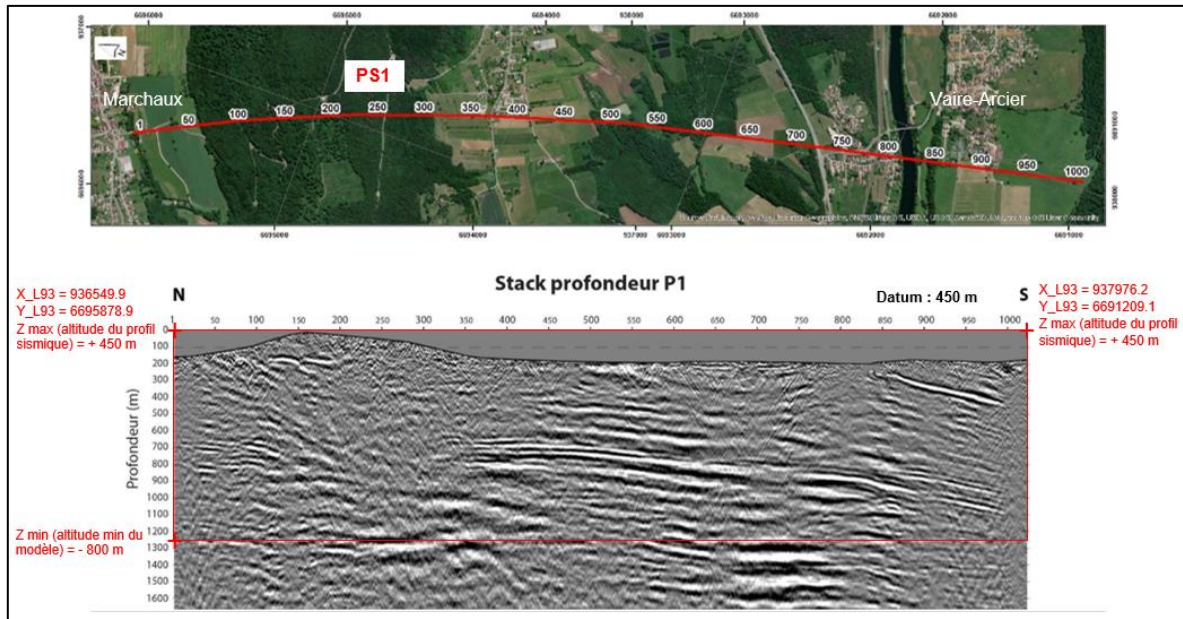


Figure 7 : Image sismique du Grand profil (PS1) obtenue après conversion des temps en profondeur, et géoréférencement (x, y, z) avant intégration dans le modèle géologique 3D de Novillars.

Le « Petit Profil Sismique » (PS2) recoupe la vallée du Doubs à Roche-lez-Beaupré (Cf. Figure 6). L'objectif de son acquisition est de valider ou non la présence de failles subverticales qui pourraient décaler les formations en profondeur, notamment au niveau des forages de Novillars. Long de 950 m environ, il a été imagé jusqu'à 1400 m de profondeur (Figure 8).

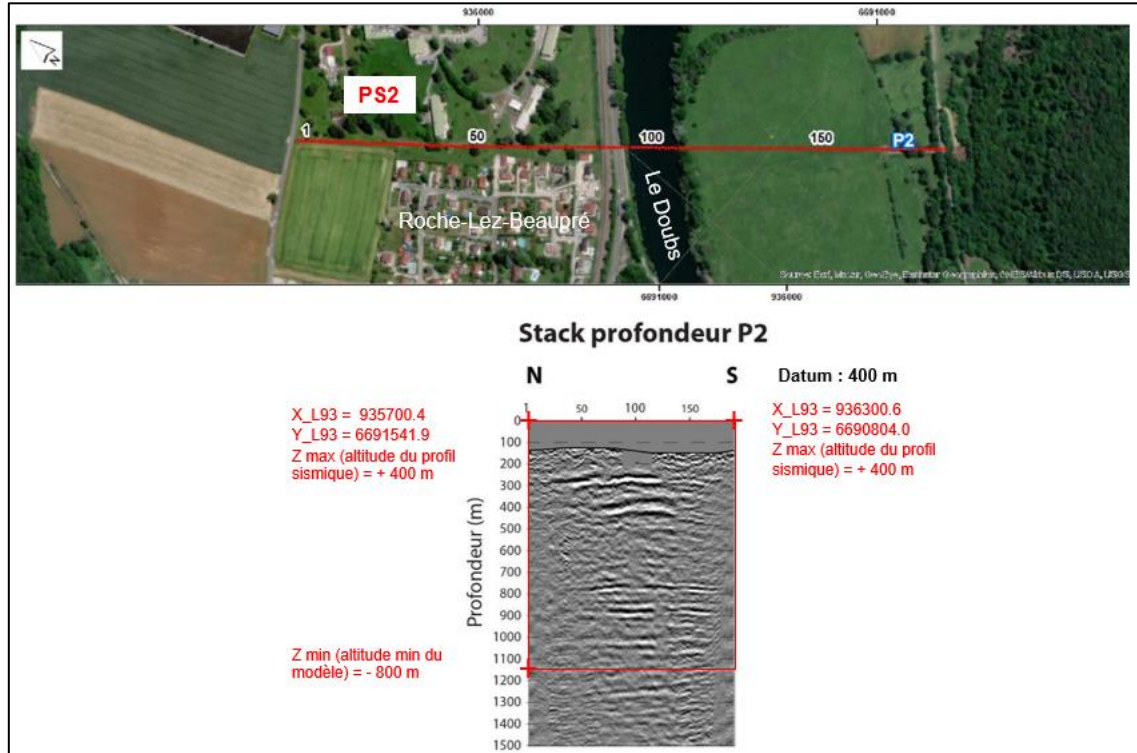


Figure 8 : Image sismique du Petit profil (PS2) obtenue après conversion des temps en profondeur, et géoréférencement (x, y, z) avant intégration dans le modèle géologique 3D de Novillars.

4. Construction du modèle préliminaire à partir des données existantes (version 1)

4.1. DÉFINITION DE L'EMPRISE DU MODÈLE

L'emprise et l'échelle régionale du modèle géologique 3D de Novillars ont été définies d'un commun accord entre le BRGM, l'ASCOMADE et l'Université de Franche Comté, lors de la réunion de lancement du modèle. L'extension retenue forme une « boîte » Geomodeller d'environ 10 km de long, sur 8 km de large, et 2 kilomètres de haut dont les coordonnées sont précisées dans la Figure 9. Elle vise à intégrer l'ensemble des formations jurassiques affleurantes et failles majeures associées, susceptibles d'être présentes ou d'avoir une influence sur la structuration géologique du sous-sol dans le secteur du captage de Novillars. Dans ce secteur, les calcaires karstiques exploités pour la consommation d'eau potable sont en effet recouverts, et donc « cachés », par les alluvions anciennes et récentes du Doubs.

Les limites de ce modèle régional et les formations et structures géologiques modélisées prennent ainsi en compte (Figure 10) :

- L'ensemble des formations du Jurassique depuis le Bajocien (J1) à la base, jusqu'au Kimméridgien (J8) au sommet, présentes sur la carte géologique au 1 :50 000 de Besançon et Versel ;
- Une douzaine de failles et chevauchements majeurs, dont le chevauchement de Montfaucon associé aux reliefs du faisceau bisontin ;
- Les structures plissées depuis l'anticlinal de Montfaucon au sud-est, jusqu'à l'anticlinal du Bois de Sassy limité par l'autoroute A36 au nord de la ville de Marchaux ;
- Les champs captant de Chailluz et de Thise au sud-ouest, ainsi que celles des forages SPD Eau, Novillars, Montoillotte et Pré-Lavel plus au centre.

Project Extent					
XMin	931700.0	XMax	942000.0	XExtent	10300.0 m
YMin	6689000.0	YMax	6697000.0	YExtent	8000.0 m
ZMin	-800.0	ZMax	1200.0	ZExtent	2000.0 m

Figure 9 : Coordonnées de la « boîte » Geomodeller du modèle géologique 3D de Novillars. Système de RGF93/Lambert 93. Unités en mètres.

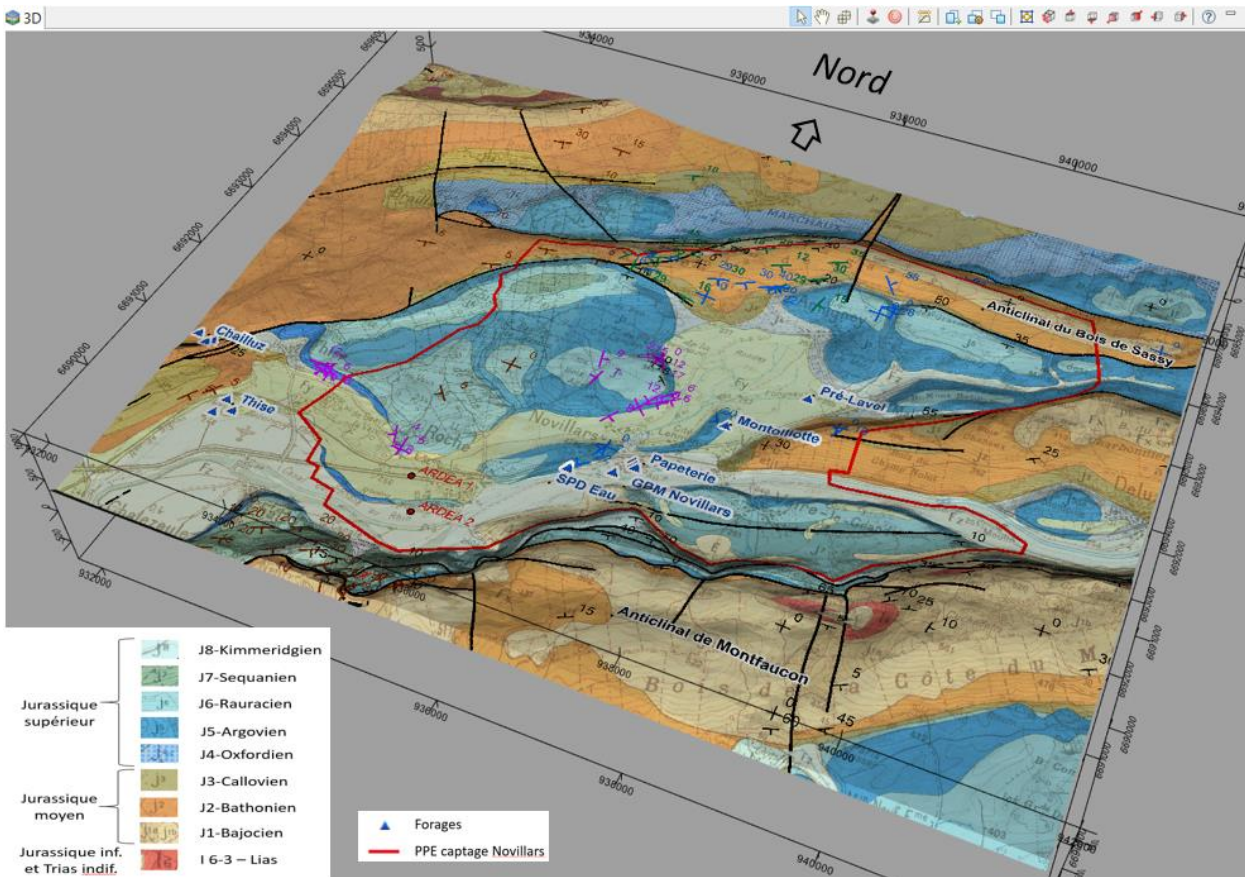


Figure 10 : Emprise du modèle géologique 3D de Novillars sur fond de carte géologique au 1/50 000 BRGM.

4.2. DÉFINITION DE LA PILE LITHOSTRATIGRAPHIQUE ET CHOIX DES FORMATIONS À MODÉLISER

Tout comme l'emprise du modèle, la pile lithostratigraphique des formations à modéliser a été définie d'un commun accord entre le BRGM, l'ASCOMADE et l'Université de Franche Comté, lors de la réunion de lancement du modèle.

Elle regroupe l'ensemble des formations présentes dans le secteur et impliquées dans la circulation des eaux profondes. Elle prend en compte la nature lithologique de ces formations en tant qu'aquifère (calcaires) ou aquitards (marnes), leur contraste en terme de compétence (marquage en sismique, karstification) et la manière dont elles s'empilent (stratigraphie, contact concordant ou érosif).

Basée sur la colonne stratigraphique de Chauve et Rolin (2015), la pile lithostratigraphique du modèle 3D de Novillars comprend ainsi l'ensemble des formations jurassiques suivantes avec, du sommet (la plus récente) vers la base (la plus ancienne) (Figure 11) :

- Les marno-calcaires du Kimméridgien – Séquanien (J7-J8) (*Kimméridgien - Oxfordien sup.*)
- Les calcaires à pisolithes du Rauracien (J6) (*Oxfordien sup.*)
- Les « Marnes jaunes et calcaires » de l'Argovien (J5) (*Oxfordien moy.*)

- Les « Marnes bleues » de l'Oxfordien (J4) (*Oxfordien inf.*)
- La « Dalle nacrée » du Callovien (J3)
- Les « Calcaires de la Citadelle » du Bathonien (J2)
- La « Grande Oolithe » du Bajocien (J1b)

Les formations du J7 et J8 ont été regroupées car très proches en terme de lithologie et n'apparaissant que dans la partie sud du modèle, au niveau du pli sur chevauchement de Montfaucon.

En revanche, les formations du J5, J4, J3, J2 et J1 ont toutes été individualisées :

- Les formations J6, J5, J4 ont été considérées comme possiblement bien marquées et donc différenciables, par la sismique ;
- La « Dalle nacrée » du Callovien (J3), peu épaisse, aurait pu être regroupée avec les « Calcaires de la Citadelle » du Bathonien (J2) d'autant plus que les deux sont des formations assez similaires. Le choix a cependant été fait de les différencier car, contrairement aux calcaires de la Dalle nacrée, les Calcaires de la Citadelle sont très karstifiés (responsables des dolines) et donc probablement bien identifiables par les réflecteurs sismiques.

Enfin et bien que présentes dans le secteur, certaines formations n'ont pas été prises en compte :

- Les alluvions anciennes (Fy) et récentes (Fz) du Doubs ont été considérées comme étant hors cible karstique ;
- Les formations du Lias et du Trias n'ont pas été recoupées par les forages du secteur. Leur profondeur et leur épaisseur reste donc inconnues. Elles ont de fait été considérées ici comme représentant la base indifférenciée du modèle (soubassement).

On notera ici que la nomenclature des âges et les notations utilisées pour définir la pile du modèle géologique 3D de Novillars ont été calées sur celles des cartes géologiques BRGM à l'échelle 1 : 50 000 (Annexe 1). En effet, bien qu'anciennes et aujourd'hui légèrement différentes et actualisées (notamment sur la carte harmonisée du Doubs), elles restent les plus communément utilisées dans les échanges entre experts mais aussi dans la bibliographie.

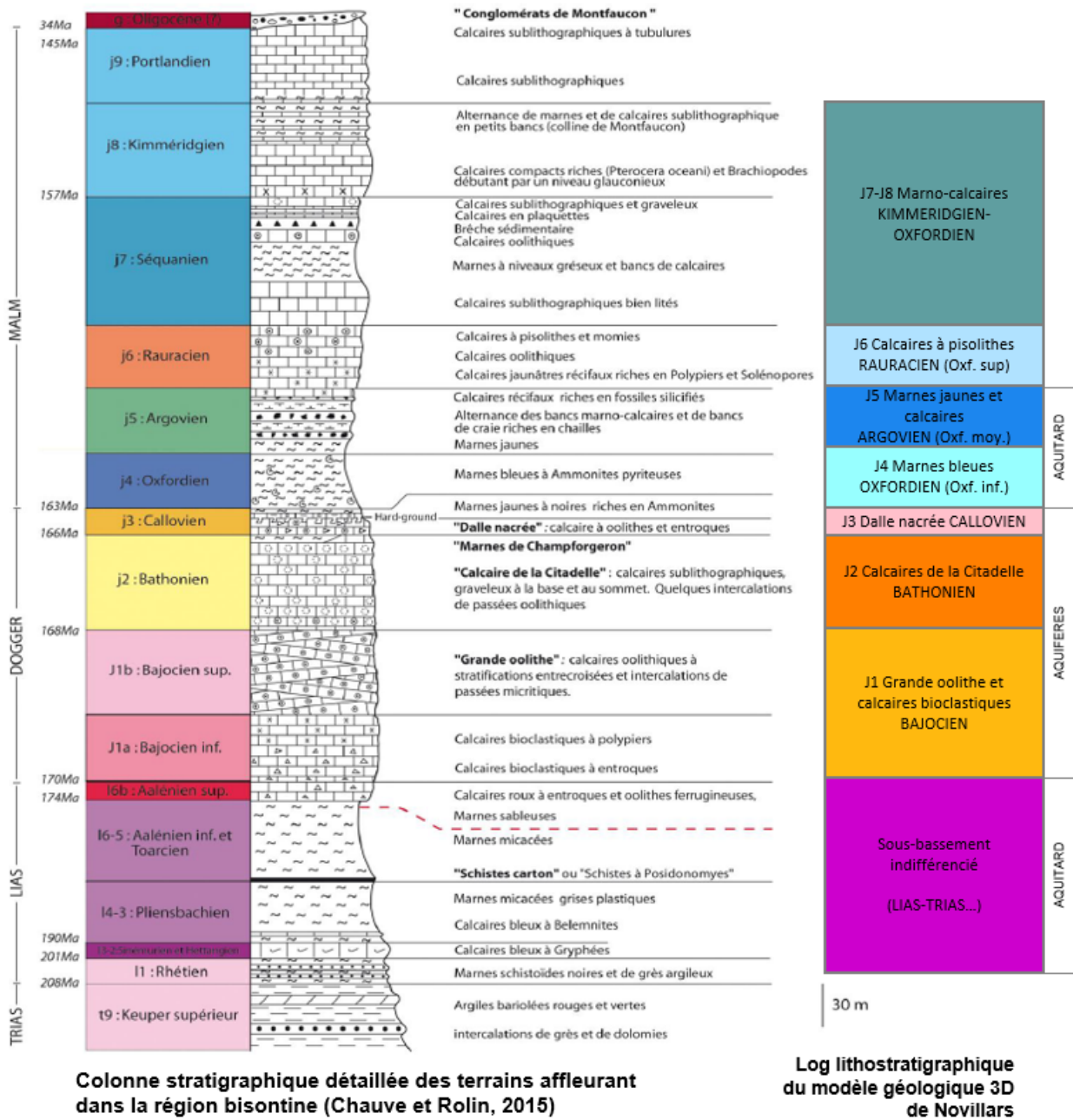
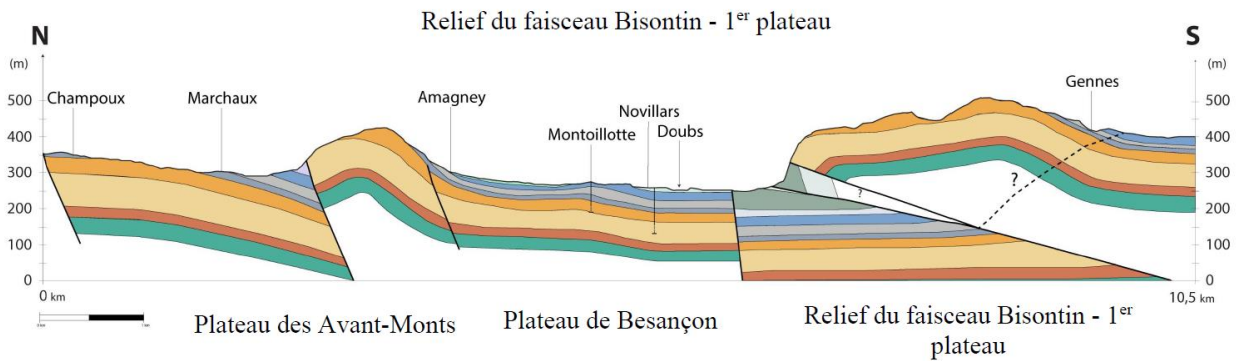


Figure 11 : Pile lithostratigraphique du modèle géologique 3D de Novillars et colonne stratigraphique de la région bisontine associée.

4.3. FAILLES MAJEURES RETENUES POUR LA MODÉLISATION

Le secteur modélisé de Novillars se trouve dans la zone plissée et faillée du faisceau Bisontin, coincée entre les zones plus tabulaires des plateaux du Jura externe au sud, et les Avant-Monts au nord. Il est caractérisé par une succession de plis anticlinaux dont les axes sont globalement orientés NE-SO. Ces derniers se développent à la faveur de failles subverticales inverses ou chevauchantes vers le nord-ouest (Figure 12 et Figure 13). Un jeu de failles transverses (orientées N-S) plus récent, apparait sur les cartes géologiques, au nord du secteur d'étude (au nord d'Amagney). Verticales et généralement décrochantes, elles recoupent l'ensemble des structures dans les secteurs de Braillards et de Marchaux (Figure 13).



Légende :

Fz Alluvions modernes	j7 Séquanien	j4 Oxfordien	j1 Bajocien
Fy Alluvions anciennes	j6 Rauracien	j3 Callovien-Bathonien sup.	l6 Aalénien sup.
j8 Kimméridgien	j5 Argovien	j2 Bathonien	l5-4 Aalénien inf.-Toarcien

Figure 12 : Coupe géologique du secteur de Novillars interprétée à partir de la carte géologique de Vercel (d'après Université Besançon Franche-Comté, 2017)

Dix failles majeures ont été considérées dans le modèle « préliminaire » (version 1) à partir des données cartographiques existantes des cartes géologiques au 1/50 000 de Vercel et Besançon :

- 7 failles inverses chevauchantes orientées est-ouest, nommées ici failles de Montfaucon (F1 et F2), du Doubs (F3), des Longeaux (F8), du Bois de Sassy (F6 et F7) et de Thise (F9) ;
- 3 failles orientées nord-sud, nommées ici failles de Braillans (F10), des Combottes (F11) et de Vaivre (F12)

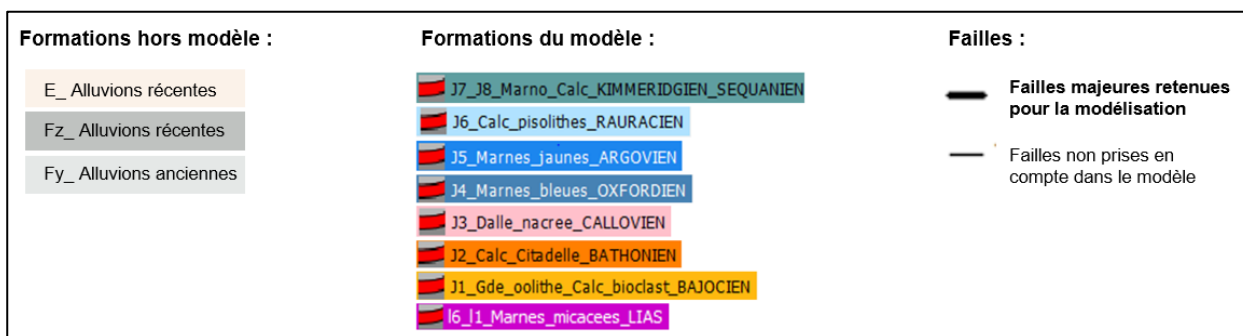
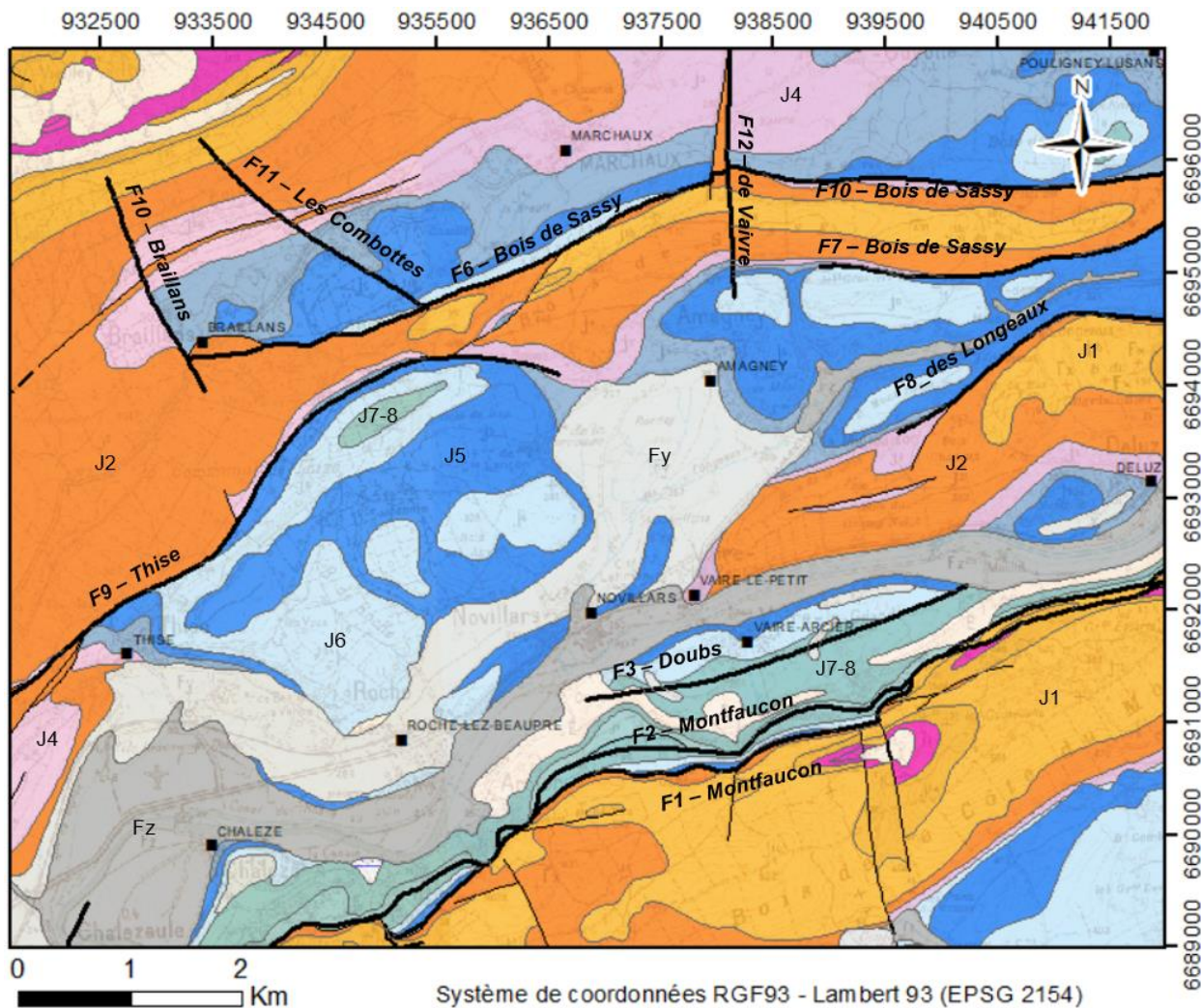


Figure 13 : Carte synthétique des formations géologiques et failles retenues pour la modélisation géologique 3D de Novillars (GeoModeller).

4.4. RÉSULTATS INTERMÉDIAIRES DU MODÈLE PRÉLIMINAIRE ET RECOMMANDATIONS POUR LA SUITE DE L'ETUDE

4.4.1. Structuration géologique globale

Le modèle géologique 3D préliminaire réalisé à partir des données existantes, a permis de reproduire les grandes structures géologiques suivantes, avec du sud vers le nord (Figure 14) :

- Orienté ENE-OSO, l'anticlinal de Montfaucon est souligné par les reliefs du faisceau Bisontin. Il vient chevaucher les terrains subtabulaires de la vallée du Doubs vers le nord-ouest à la faveur de deux failles chevauchantes (F1_Montcaucon et F2_Montfaucon) qui forment une écaille faiblement pentée vers le SE;
- La zone subtabulaire de la vallée du Doubs associée au plateau de Besançon. Elle est affectée à l'est de la zone d'étude par une faille normale subverticale, à la hauteur de Vaire-Arcier, en rive gauche du cours principal du Doubs (F3) où elle suit l'orientation Est-ouest de la vallée et approfondit les formations du compartiment sud ;
- L'anticlinal sur faille de Deluz, orienté ENE-OSO. Il plonge vers le sud-ouest sous les alluvions récentes du Doubs, en direction de Novillars. Il est limité au nord par la faille des Longeaux (F8), inverse et chevauchante vers le nord ;
- La zone tabulaire d'Amagney décrite comme un synclinal à fond plat (feuille de Vercel, Cautru *et al.*, 1958). Elle est recouverte par les alluvions anciennes du Doubs entre Amagney et Novillars ;
- L'anticlinal sur faille du Bois de Sassy, étroit et longiligne, orientée E-O à ENE-OSO. Il traverse l'ensemble de la zone d'étude d'est en ouest. Il est limité au nord par les failles inverses du Bois de Sassy (F6 et F10) et au sud par celles de Thise (F9) et du Bois de Sassy (F7). Il est recoupé, au nord d'Amagney, par la faille décrochante transverse de Vaivre (F12), orientée N-S ;
- Le monoclinale de Marchaux à Champoux, faiblement penté vers le sud-est. Il est recoupé par 2 failles normales transversales et décrochantes : les failles F10_Braillans (senestre) et F11_Combottes (dextre).

Un exemple d'extraction de coupes transversales issues du modèle géologique 3D préliminaire est donné dans la Figure 15.

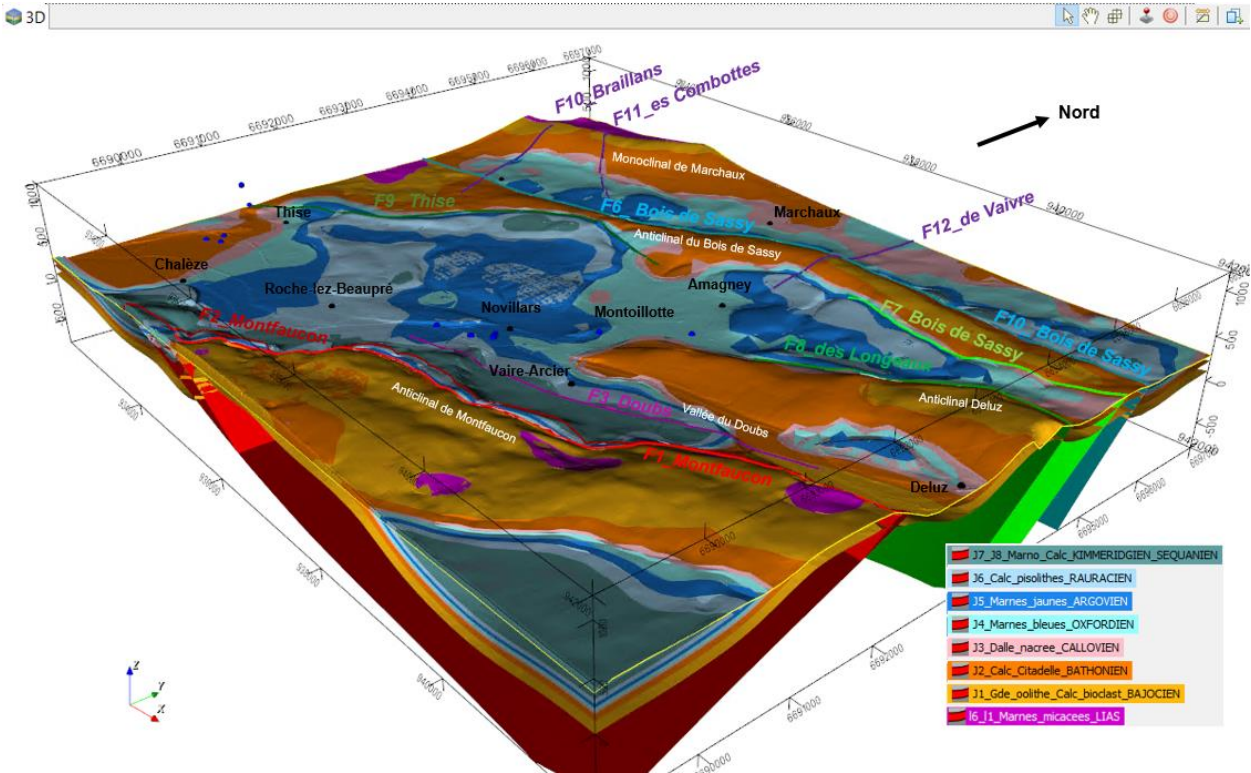


Figure 14 : Modèle géologique 3D préliminaire (Version 1) de Novillars : Vue 3D depuis le sud-est.

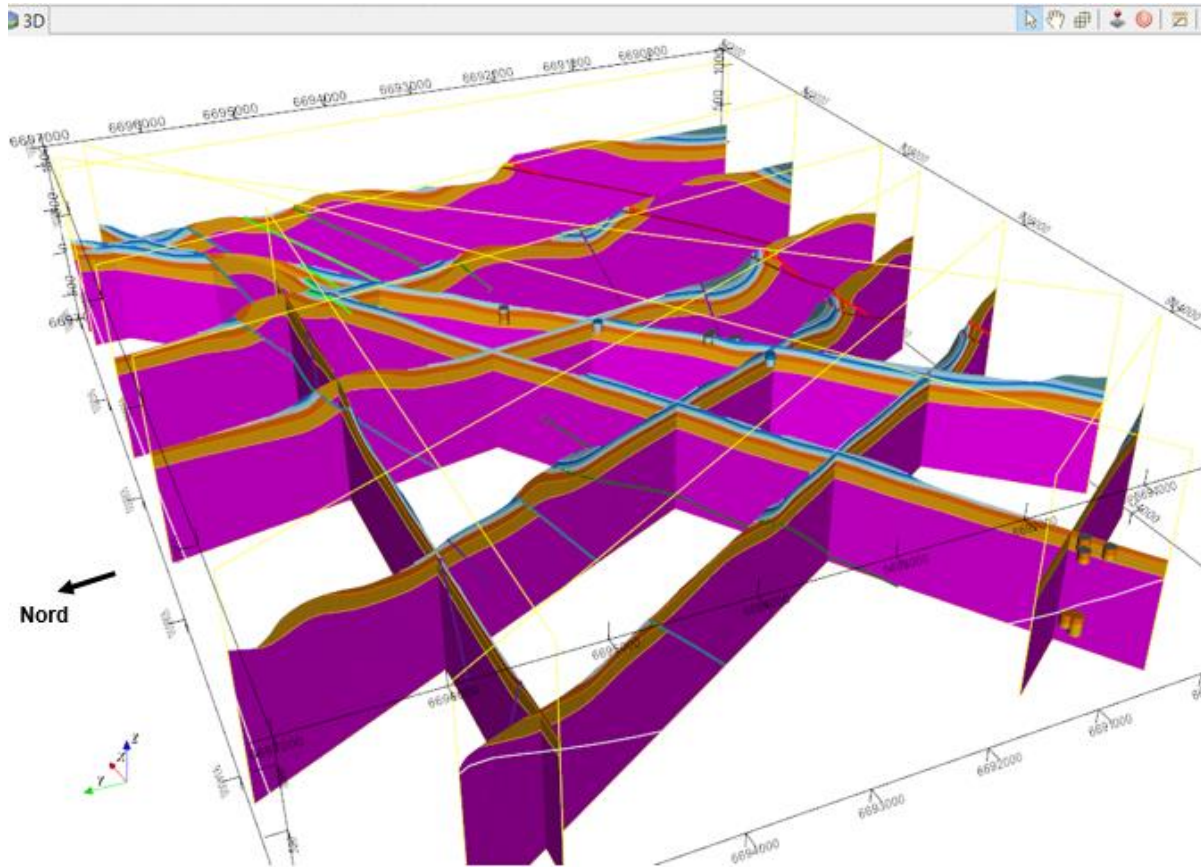


Figure 15 : Exemple de coupes transversales nord-sud réalisées dans le volume du modèle 3D géologique de Novillars (modèle préliminaire, version 1).

4.4.2. Extension des failles

Le travail de modélisation 3D des failles majeures retenues pour le modèle géologique préliminaire s'est appliqué à retracer le schéma structural tel que défini en surface par les cartes géologiques de Vercel et Besançon. Pour ce faire, l'orientation et le pendage de chaque faille, mais aussi leur extension latérale et en profondeur, ou encore les relations entre elles (se recourent/buttent l'une sur l'autre) et les formations qu'elles affectent, ont dûes être définies/interprétées en amont.

Le schéma structural en 3D ainsi obtenu pour le modèle préliminaire de Novillars respecte l'interprétation géologique en 2D des cartes géologiques au 1 : 50 000 (Figure 16). Leur extension latérale en 3D reste cependant à considérer. 4 failles ont attiré notre attention à ce sujet :

- Les failles de Thise (F9) et du Bois de Sassy (F7) s'atténuent toutes deux avant d'atteindre la faille N-S de Vaivre (F12) située entre les deux. Or ces deux failles marquent la bordure sud de l'anticlinal de Sassy. Elles pourraient donc être prolongées l'une vers l'autre pour se rejoindre contre la faille de Vaivre, au même titre que les failles F6 et F10 qui recourent le flan nord de l'anticlinal du Bois de Sassy. La réalisation du Grand profil sismique (PS1) qui recoupe l'anticlinal du Bois de Sassy devrait permettre de lever le doute sur ce point.
- La faille des Longeaux/Deluz (F8) et du Doubs (F3) disparaissent toutes deux sous les alluvions du Doubs. Si leur prolongement vers l'ouest semble plus que probable, leur extension reste inconnue. La faille du Doubs pourrait également être étendue vers l'est. La réalisation des deux profils sismiques (PS1 et PS2) susceptibles de recouper le prolongement de ces 2 failles devrait permettre de lever le doute sur ce point également.

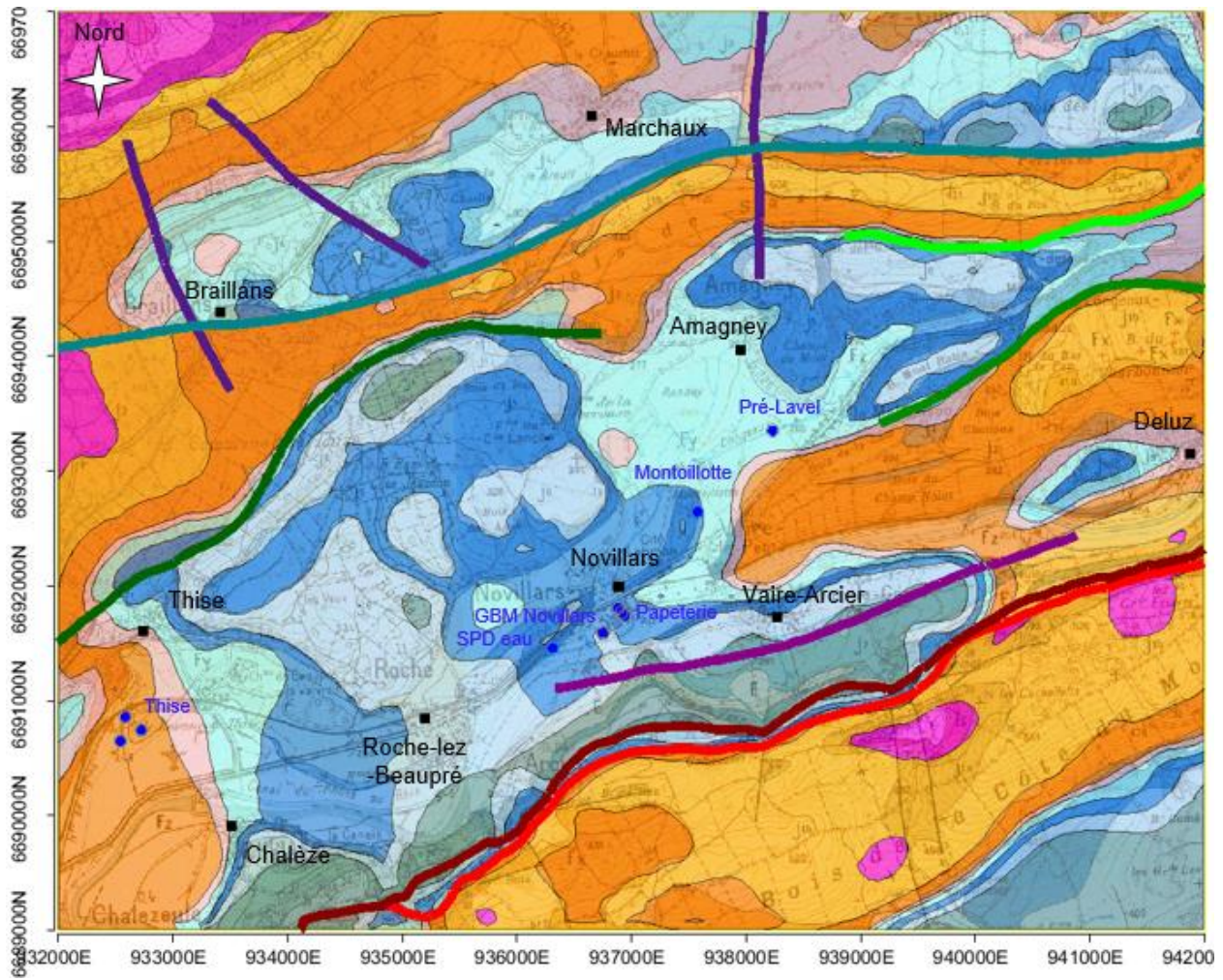


Figure 16 : Carte litho-structurale résultante du modèle géologique 3D préliminaire (version 1) de Novillars.

4.4.3. Structuration géologique sous alluvions, au droit des forages

Deux coupes géologiques passant par les forages de Chailluz à Thise (Figure 17) et de SPD 'Eau à Pré-Lavel (Figure 18) ont été réalisées à travers le modèle géologique 3D préliminaire. Elles permettent de visualiser les résultats de la modélisation et de vérifier leur cohérence avec les données d'entrée des forages (Annexe 2), notamment en terme de profondeur et d'épaisseur des formations modélisées.

La modélisation des Calcaires de la Citadelle du Bathonien (J2) montre que les 3 forages de Chailluz et les 3 forages de Thise situés au sud-ouest de la zone d'étude, sont cohérents entre eux et en accord avec modèle géologique 3D préliminaire (Figure 17). Ils ont permis de bien caler la base des calcaires bathoniens (J2) à une soixantaine de mètres de profondeur à l'ouest du modèle. L'épaisseur moyenne de cette formation du J2 est d'environ 65 à 80 m sur l'ensemble du modèle, conformément à celle calibrée par le forage de Pré-Lavel (Annexe 2).

Les Calcaires de la Dalle nacrée du Callovien (J3) sont connus pour leur faible épaisseur qui varie autour de 10 m d'épaisseur sur l'ensemble du modèle. Cette valeur est notamment bien contrainte par les forages de Novillars, de la Papeterie et de Pré-Lavel ayant recoupé le toit et le mur de cette formation et en concordance avec celle observée sur le forage SPD 'Eau (Figure 18). Dans ce contexte, l'épaisseur de J3 décrite dans le forage de Montoillotte, avec plus de 80 m, dénote (Annexe 2). Trois hypothèses sont alors suggérées :

- La présence d'un synclinal au droit du forage de Montoillotte qui expliquerait l'approfondissement de la base des calcaires calloviens de la Dalle nacrée (J3) ;
- La présence de failles subverticales de part et d'autre du forage de Montoillotte suggérant un remplissage de type « graben » ou demi-graben ;
- Une incertitude quant à l'interprétation du log stratigraphique du forage de Montoillotte. Il est nécessaire dans ce cas, de consolider cette interprétation à partir des descriptions lithologiques d'origine ;
- Une déviation du forage qui « s'horizontaliserait » en profondeur et impliquerait une surestimation de l'épaisseur du J3.

La réalisation du Grand profil sismique (PS1) permettra de lever le doute sur ce point.

La modélisation des Marnes bleues de l'Oxfordien (J4) montre un approfondissement de la base de cette formation, centré sur les captages AEP de Novillars (Figure 18). Une géométrie synclinale entre le forage SPD 'Eau et ceux de la Papeterie suffit à l'expliquer à ce stade du projet mais l'hypothèse de la présence d'une faille entre ces forages n'est pas à exclure. L'épaisseur de cette formation varie entre 23 et presque 48 m d'après les sondages interprétés (Annexe 2). Elle est en moyenne de 35 m sur l'ensemble du modèle.

Les marnes jaunes et calcaires de l'Argovien (J5) ont une épaisseur moyenne de 35 à 45 m sur l'ensemble du modèle géologique préliminaire, mais ils peuvent atteindre jusqu'à 60 m d'épaisseur d'après les données des captages EAP de GBM Novillars (Annexe 2).

L'ensemble de ces résultats et hypothèses de travail a été présenté par le BRGM au comité scientifique de novembre 2020.

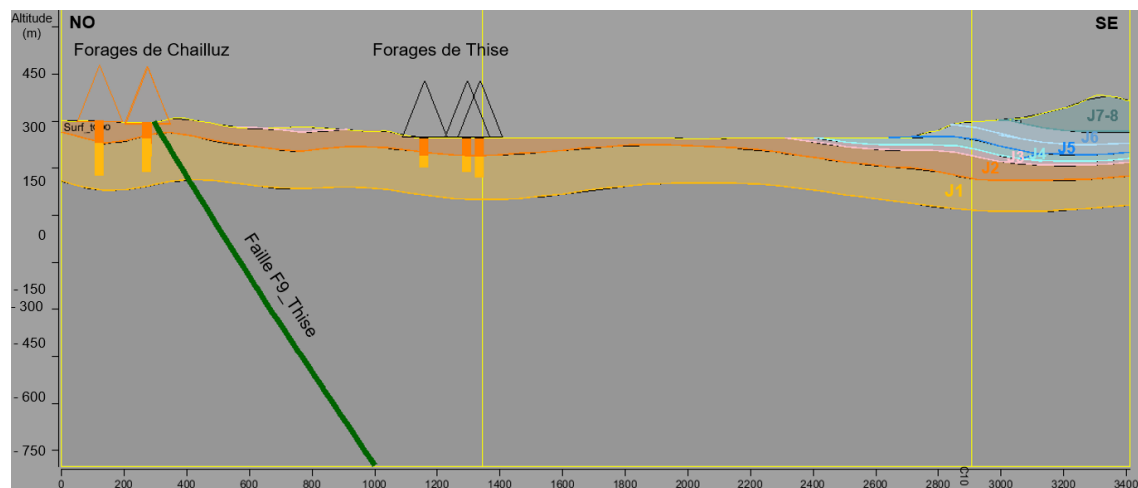


Figure 17 : Coupe passant par les forages de Chailluz et Thise, issue du modèle géologique 3D préliminaire de Novillars (Coupe C9).

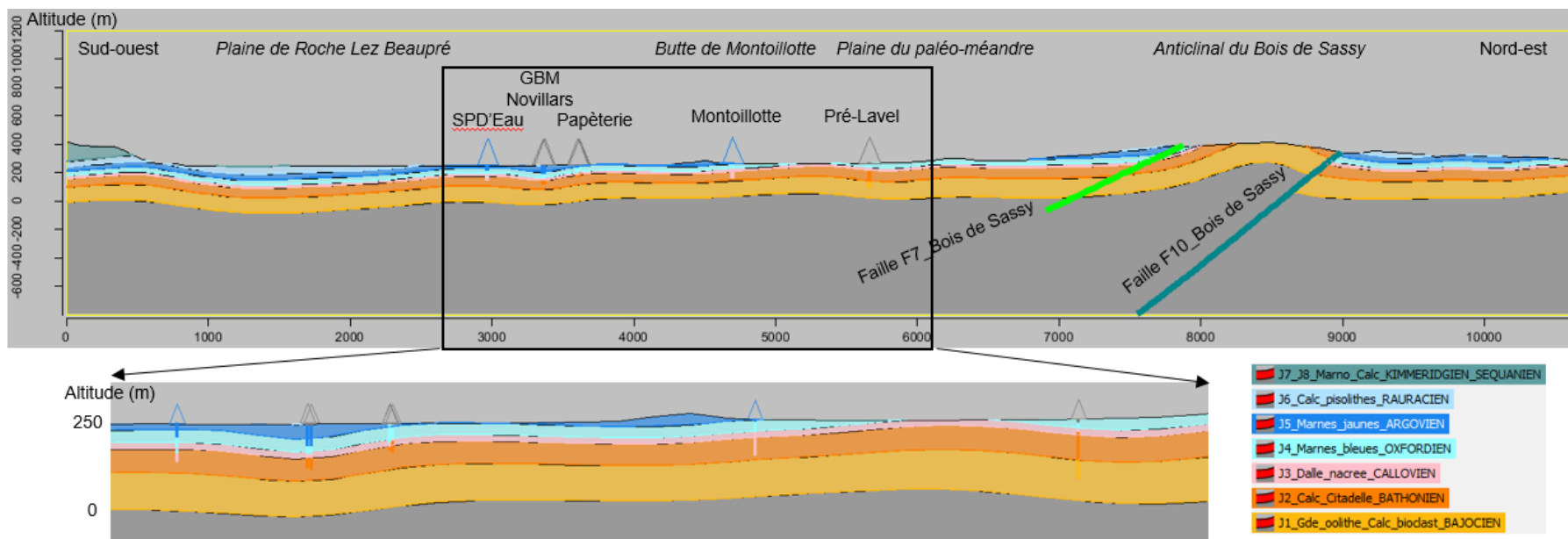


Figure 18 : Coupe passant par les forages SPD'Eau à Pré-Lavel, issue du modèle géologique 3D préliminaire de Novillars (Coupe C7_ sondages).

5. Actualisation du modèle intégrant les acquisitions sismiques (version 2)

5.1. POINTS D'INTÉRÊT RELEVÉS SUR LES IMAGES SISMQUES

Deux profils sismiques (PS1 et PS2) ont été acquis par le BRGM au printemps 2021 afin d'imager la structure géologique du sous-sol dans les secteurs recouverts et donc cachés par les alluvions du Doubs. Une fois retraitées (conversion des temps en profondeur) les images de ces profils ont été intégrées dans le modèle géologique 3D préliminaire (Version 1) et analysées telle quelles avant d'être interprétées en 3 dimensions.

Plusieurs points d'intérêt apparaissent sur le grand profil sismique (PS1), avec du nord vers le sud (Figure 19) :

- Une grange zone triangulaire (Zone 1) pour laquelle le signal sismique est brouillé jusqu'à la base du modèle, située à l'aplomb de l'anticlinal du Bois de Sassy ;
- Un réflecteur oblique, faiblement penté vers le sud ;
- Une forme synclinale dans le secteur de Montoillotte ;
- La zone 2, plus petite que la précédente et moins profonde, pour laquelle le signal sismique est brouillé jusqu'au réflecteur oblique ;
- Un réflecteur repère, bien marqué, que l'on retrouve aussi sur le profil sismique PS2.

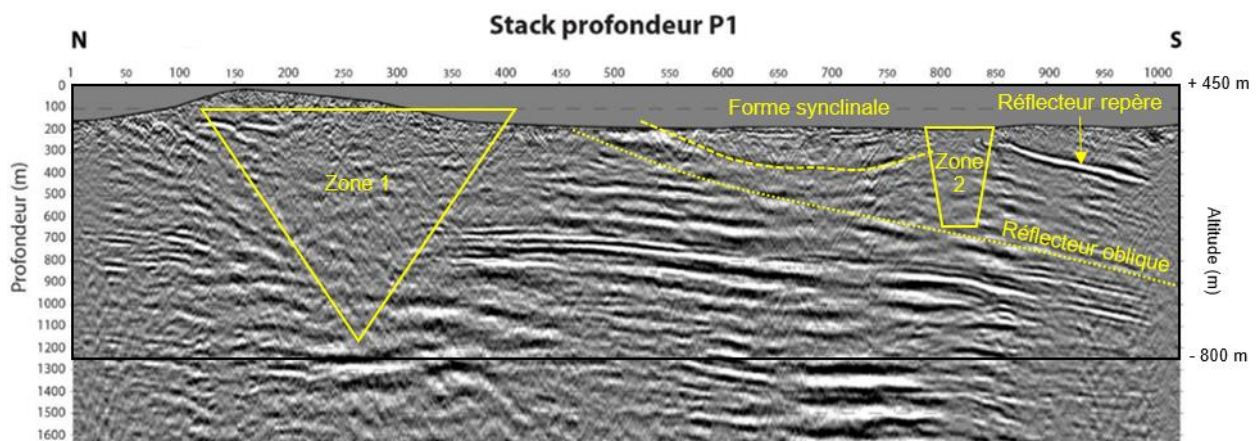


Figure 19 : Points d'intérêt relevés sur l'image du grand profil sismique PS1

Trois points d'intérêt apparaissent sur le petit profil sismique (PS2), avec du nord vers le sud (Figure 20) :

- Deux réflecteurs repères à environ 100 m de profondeur d'écart ;
- Une zone 3 pour laquelle le signal sismique est brouillé.

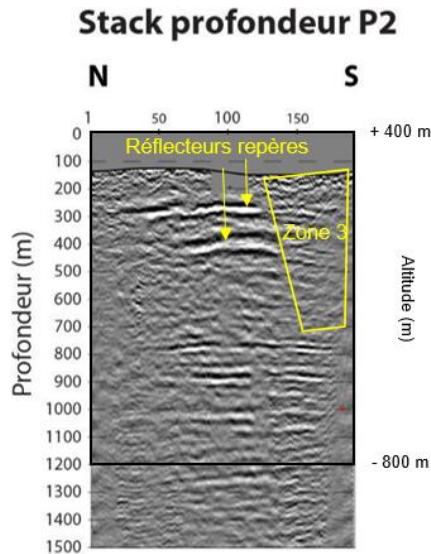


Figure 20 : Points d'intérêt relevés sur l'image du grand profil sismique PS2

L'ensemble de ces points d'intérêt est détaillé et interprété dans les chapitres ci-dessous.

5.2. CALAGE DE LA BASE DES CALCAIRES DU BATHONIEN (J2)

La base des Calcaires de la Citadelle d'âge Bathonien (J2) s'avère être un bon marqueur pour la sismique réflexion. Elle est repérable aussi bien sur le Grand profil sismique PS1 (Figure 21a) que sur le Petit PS2 (Figure 22a) par la présence d'un réflecteur blanc très marqué, encadré de noir. Ce type de contraste marque le passage, du haut vers le bas, d'une zone de vitesse sismique faible à une zone de vitesse forte. Ce résultat vient étayer le caractère karstifié des calcaires du J2 qui ralentit les ondes sismiques par rapport aux calcaires lithographiques plus compétent de la formation du J1 sous-jacente.

Le réflecteur blanc repère (Figure 19 et Figure 20) marquerait donc le contraste de vitesse sismique entre les formations à vitesses lentes (marnes du J5 et J4, calcaires peu épais du J3 et calcaires karstifiés du J2) avec celle à vitesse plus rapide des calcaires lithographiques, sous-jacents, plus compétents et plus épais du J1 (Calcaires de la Grande oolithe et calcaires bioclastiques du Bajocien).

La base de la formation des Calcaires de la Citadelle (J2) a donc été très légèrement réajustée dans le modèle géologique 3D actualisé de Novillars (Figure 21b et Figure 22b). Il est important de noter que ce réajustement impacte l'ensemble des formations et failles déjà modélisées, sur l'ensemble du volume 3D.

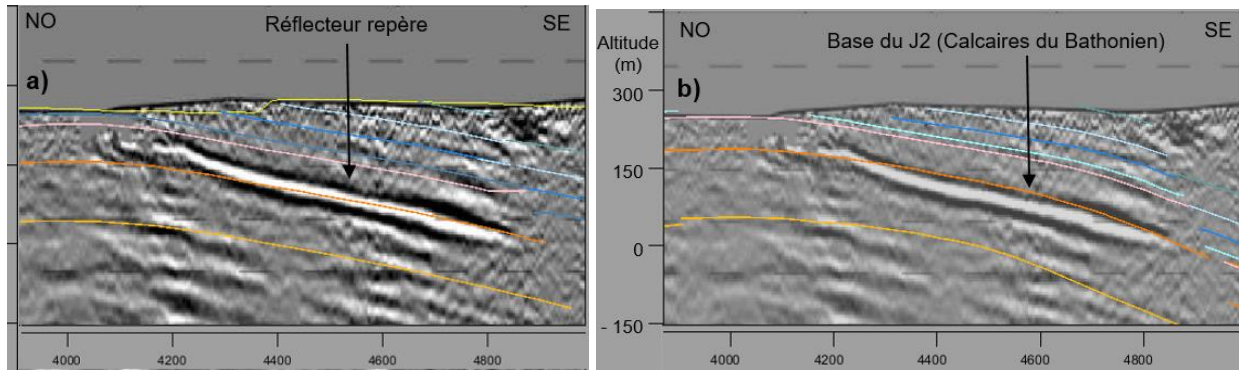


Figure 21 : Calage de la base des calcaires du Bathonien (J2) suite à l'intégration du grand profil sismique PS1 dans le modèle géologique 3D de Novillars.

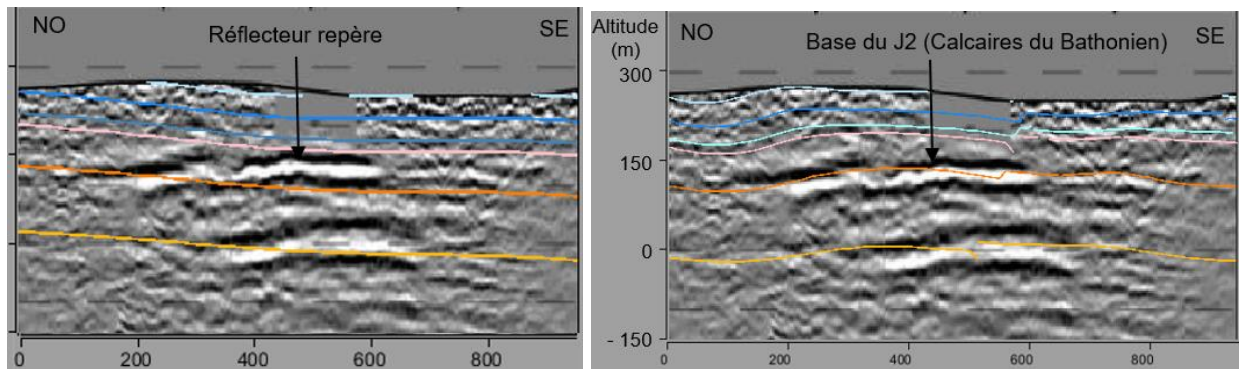


Figure 22 : Calage de la base des calcaires du Bathonien (J2) suite à l'intégration du petit profil sismique PS2 dans le modèle géologique 3D de Novillars.

5.3. LES FAILLES BORDIÈRES DE L'ANTICLINAL DU BOIS DE SASSY

La zone triangulaire (zone 1) dans laquelle les signaux sismiques sont brouillés au nord du grand profil sismique PS1 suggère la présence d'une zone faillée (Figure 19).

La limite nord de ce triangle est concordante avec le passage de la faille bordière qui limite au nord l'anticlinal du Bois de Sassy (Faille F6_Bois de Sassy). L'image sismique montre que le pendage de cette faille doit être redressé dans le modèle actualisé (version 2) par rapport à celui du modèle préliminaire (version 1), passant de 50° à 65° environ (Figure 23).

En revanche, la limite sud nécessite d'ajouter une deuxième faille. Hors la faille F9_de Thise, déjà présente dans le modèle préliminaire, constitue une bonne candidate. Cette faille a donc été prolongée vers l'est dans le modèle géologique actualisé, jusqu'au profil PS1 (Figure 23). La faille de Thise (F9), tout comme la faille F7 du Bois de Sassy ont finalement toutes deux été prolongées jusqu'à la faille N-S de Vaire (F12), tel que déjà suggéré dans les recommandations du modèle préliminaire.

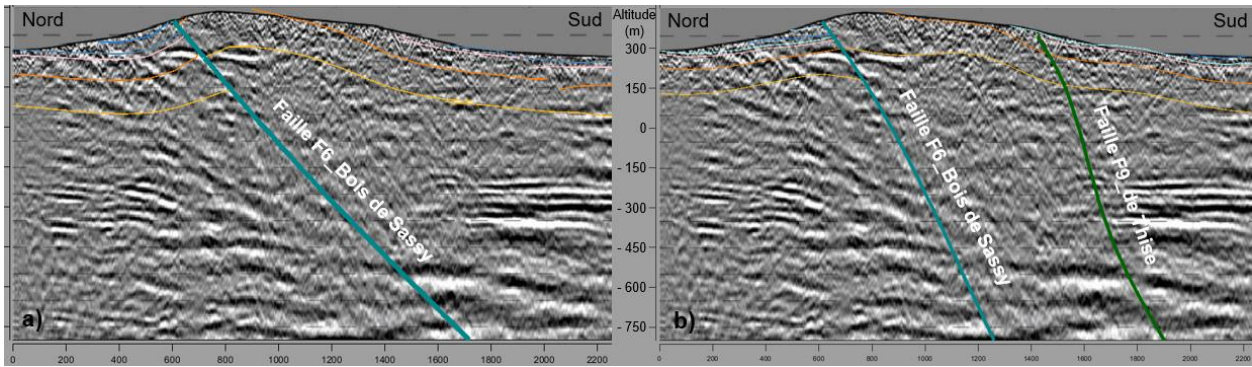


Figure 23 : Ajustement des failles bordières de l'Anticlinal du Bois de Sassy dans le modèle géologique 3D de Novillars. a) Avant actualisation (modèle préliminaire), b) Après actualisation (modèle actualisé).

5.4. MISE EN ÉVIDENCE DU SYNCLINAL DE MONTOILLOTTE

La présence d'une structure synclinale au droit du forage de Montoillotte a clairement été mise en évidence par le Grand profil sismique (PS1) (Figure 24). Elle permet de répondre à l'un des points soulevés lors des premiers résultats du modèle préliminaire, à savoir expliquer l'épaisseur anormale des calcaires du Callovien (J3) au droit de ce forage (80 m au lieu des 10 à 15 m généralement admis sur l'ensemble du modèle). La base des Calcaires du J3 a donc été réajustée pour passer en dessous des 110 m de profondeur du forage de Montoillotte et valider ainsi son log descriptif.

L'axe du synclinal de Montoillotte a une orientation apparente est-ouest, identique à celle de l'anticlinal Deluz qui le borde au sud-est, et du Bois de Sassy plus au nord. La découverte de cette géométrie synclinale dans ce secteur du paléo-méandre du Doubs est totalement inédite puisqu'il était classiquement admis que les secteurs développés entre les anticlinaux, étaient subtabulaires à tabulaires (Figure 12).

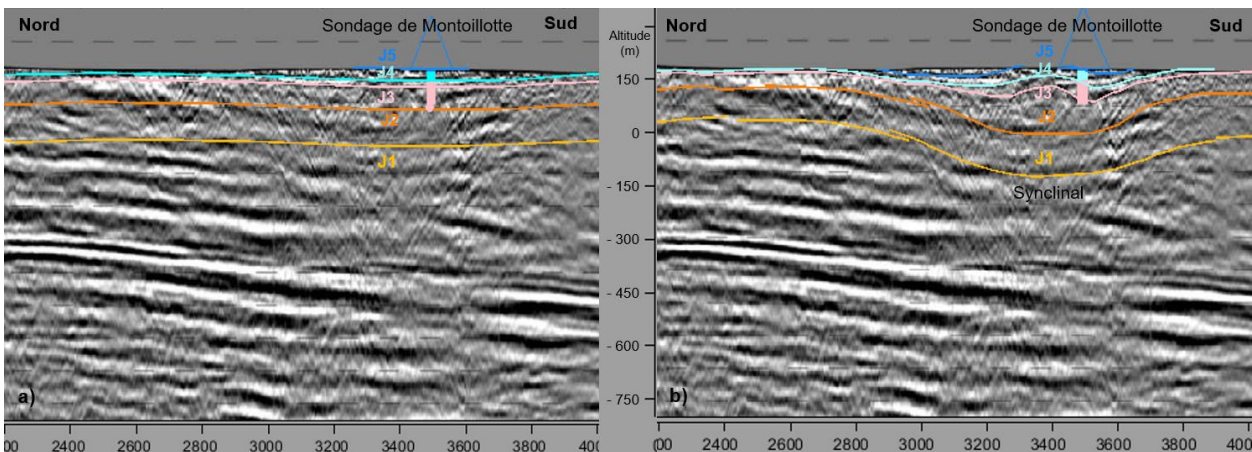


Figure 24 : Synclinal de Montoillotte mis en évidence par l'acquisition du Grand profil sismique (PS1). Avant (a) et après (b) actualisation du modèle 3D de Novillars (version 2).

5.5. PROLONGEMENT DES FAILLES DES LONGEAUX ET DU DOUBS

De nombreuses failles orientées est-ouest ont été modélisées dans le modèle 3D préliminaire de Novillars. Deux d'entre elles, la faille des Longeaux (F8) et la faille du Doubs (F3) ont notamment été visées dans les recommandations du modèle géologique préliminaire pour faire l'objet d'une

attention particulière, notamment en terme d'extension latérale. Suite aux acquisitions sismiques, la nécessité de prolonger ces deux failles s'est confirmée.

La faille des Longeaux a été prolongée vers l'ouest, jusqu'au petit profil sismique PS2 (Figure 25 et Figure 26b). Déjà suggérée dans les recommandations du modèle géologique 3D préliminaire, cette extension permet d'interpréter de manière simple et cohérente la continuité des zones 2 et 3 pour lesquels le signal sismique est perturbé sur les profils sismiques PS1 et PS2 (Figure 19 et Figure 20). L'orientation et le pendage de la faille des Longeaux qui en découle est en accord avec l'inclinaison de l'axe de l'anticlinal Deluz vers le sud-ouest (Figure 26a).

La faille du Doubs a été prolongée vers l'ouest jusqu'au profil PS2 bien qu'elle n'ait pas été spécifiquement repérée sur ce dernier, car trop en bordure. Elle a également été prolongée vers l'est (Figure 25 et Figure 26).

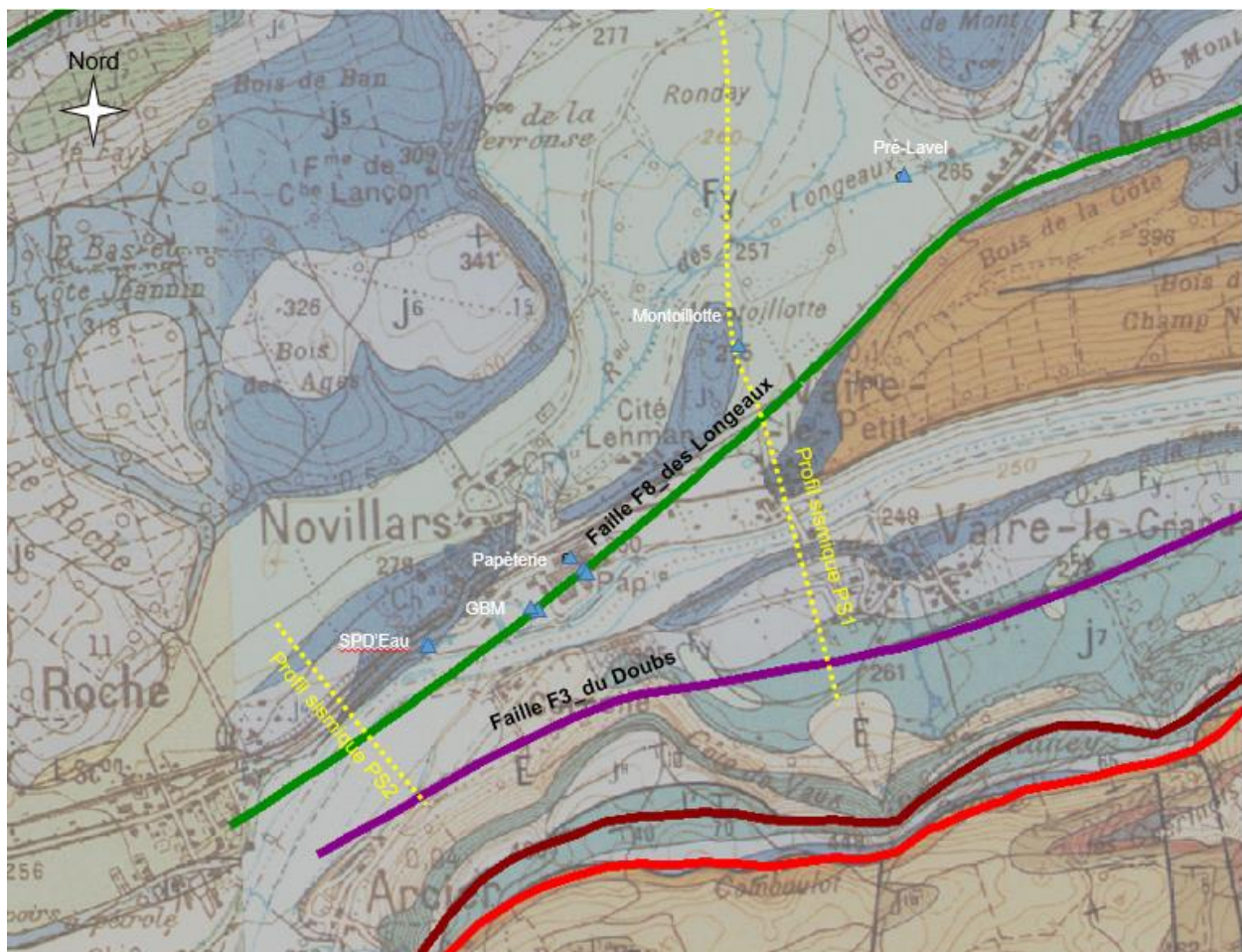


Figure 25 : Prolongement vers l'ouest de la faille des Longeaux et de la Faille du Doubs. Modèle géologique 3D de Novillars, actualisé par les acquisitions sismiques.

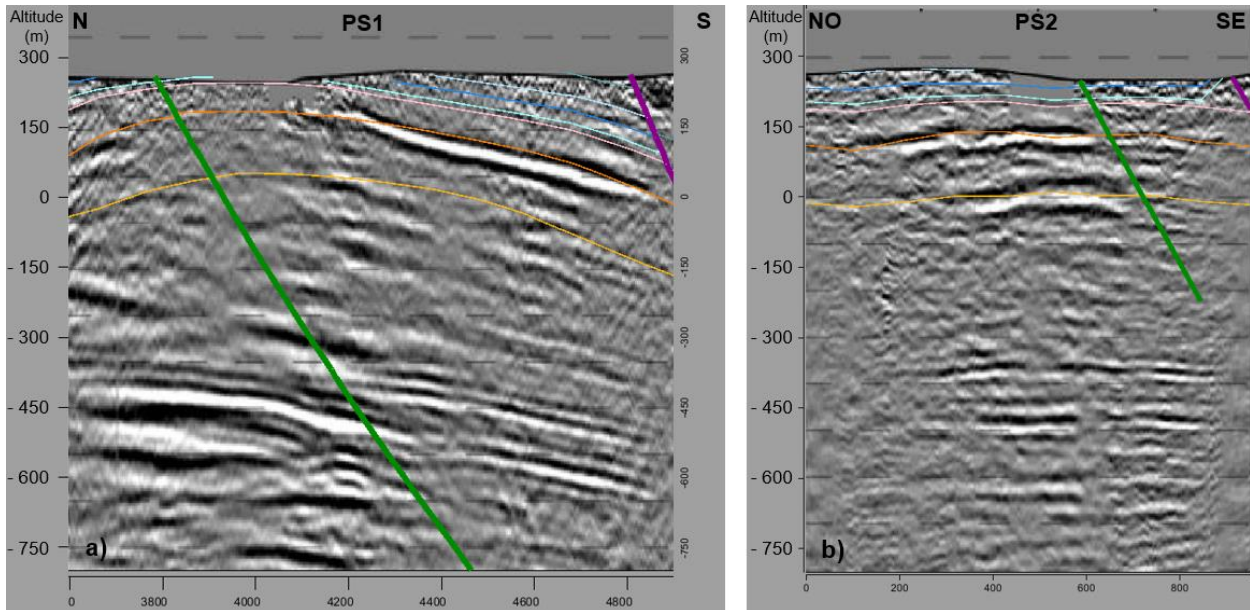


Figure 26 : Failles des Longeaux (trait vert) et du Doubs (trait violet) prolongées dans les profils sismiques PS1 (a) et PS2 (b) : Résultats du modèle géologique 3D actualisé de Novillars (version 2).

5.6. LA NOUVELLE FAILLE « DU MÉANDRE »

Suite aux nouvelles acquisitions sismiques par le BRGM pour le compte de GBM, un réflecteur oblique, d'environ 15° de pendage vers le sud, apparaît sous la structure synclinale de Montoillotte sur le grand profil sismique PS1. Sa géométrie oblique par rapport aux principaux réflecteurs suggère la présence d'une faille est-ouest faiblement pentée (Figure 19). Hors, aucune faille déjà existante ou supposée ne peut expliquer l'existence d'une telle faille dans ce secteur et encore moins la faiblesse de son pendage.

Grace à la modélisation et au travail d'interprétation en 3 dimensions, il a été montré que la structure la plus probable permettant d'expliquer l'orientation et le pendage apparents de ce réflecteur (Figure 27) était celle d'une faille subverticale, subparallèle au tracé du profil sismique PS1 (Figure 28a). Cette nouvelle faille a été ajoutée dans le modèle actualisé (Figure 28b et Figure 28c).

Sur le profil sismique PS1, l'interprétation en 3D suggère que la faille du Méandre vient butter sur la faille des Longeaux (Figure 27). Cette interprétation est cohérente avec la géométrie des réflecteurs du profil PS1 mais aussi avec la carte géologique de Vercel qui ne donne aucun indice de présence de cette faille N-S recoupant le nez de l'anticlinal Deluz vers le sud (Figure 28).

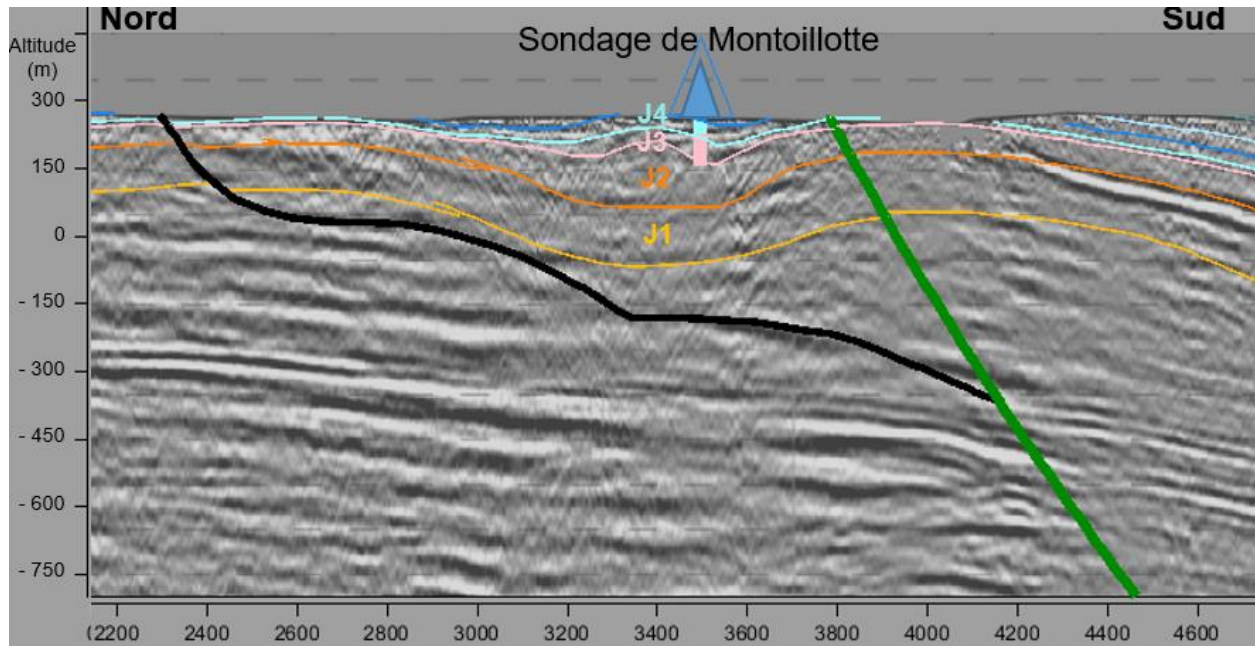


Figure 27 : Faille du Méandre (en noir) et faille des Longeaux (en vert) interprétées dans le du Grand profil sismique (PS1) résultat du modèle géologique 3D actualisé de Novillars (version 2).

Il s'agit d'une faille normale, orientée NNO-SSE avec un pendage d'environ 85° vers l'ouest. Elle sépare clairement le secteur du forage de Pré-Lavel et celui de Montoillotte avec un approfondissement des formations aquifères (notamment J2) de plus de 40 m du côté de Montoillotte. Elle s'étend depuis la base des reliefs de l'anticlinal du Bois de Sassy, puis se poursuit à l'est de la butte de Montoillotte et vient butter sur la faille des Longeaux (Figure 27 et Figure 28a).

Cette faille, jusque-là inconnue car masquée par les alluvions anciennes du Doubs entre Amagney et Novillars, a été nommée « F_BRGM_du_Méandre » en écho à la morphologie du secteur de sa découverte, associé à l'un des nombreux paléo-méandres du Doubs (Chauve et Rolin, 2015).

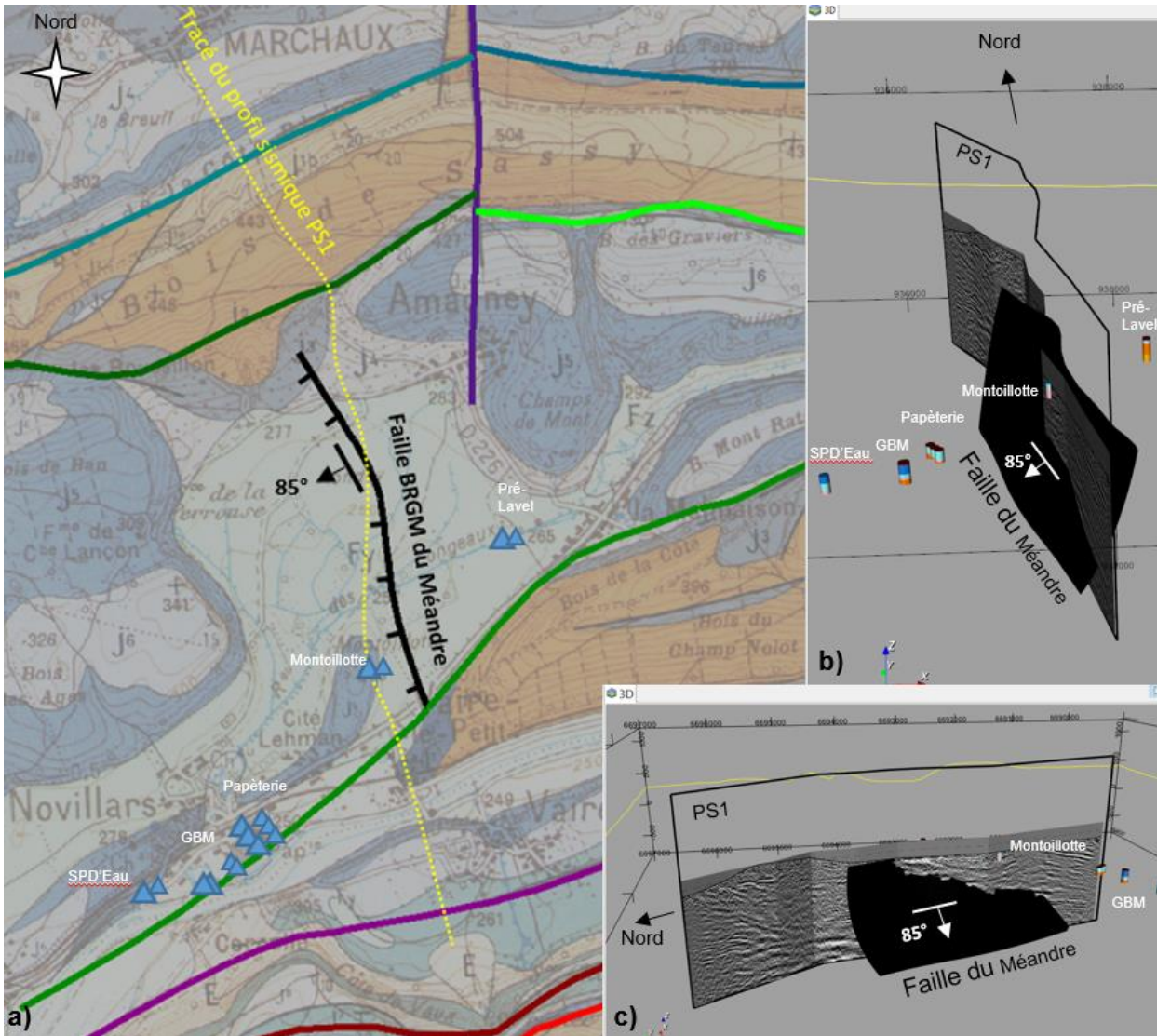


Figure 28 : Faille du Méandre modélisée d'après l'interprétation du Grand profil sismique (PS1) (modèle 3D de Novillars actualisé, version 2). a) Vue en carte. b) vue 3D depuis le sud. c) vue 3D depuis l'ouest.

5.7. RÉSULTATS INTERMÉDIAIRES DU MODÈLE ACTUALISÉ ET RECOMMANDATIONS POUR LA SUITE DE L'ETUDE

L'acquisition de deux profils sismiques réalisés dans les secteurs de Roche-lez-Beaupré et du paléoméandre de Montoillotte a permis d'imager plusieurs structures géologiques profondes dont l'existence même était jusque-là masquée par les alluvions du Doubs (Figure 29).

Deux de ces structures sont particulièrement remarquables puisqu'inconnues jusqu'à aujourd'hui. Il s'agit du synclinal de Montoillotte et de la Faille du Méandre. Toutes deux ont un impact majeur sur la circulation des eaux profondes puisque la « cuvette » formée par le synclinal de Montoillotte favorise le drainage et le piégeage des eaux, tandis que la faille du Méandre aprofondie de 50 m les formations aquifères du Bajocien et du Bathonien (calcaires du J1 et J2), à l'ouest de la faille.

Le prolongement de la Faille des Longeaux vers l'ouest constitue le troisième élément majeur du modèle géologique actualisé de Novillars puisqu'il impacte la structuration géologique et donc la circulation des eaux profondes dans l'entourage direct des captages AEP de Novillars. Cette faille

actualisée traverse en effet les forages de la papeterie (Puits C en particulier) ainsi que les 2 captages AEP de Novillars (GBM F2 et F3) (Figure 25). Il sera donc nécessaire d'affiner, dans la mesure du possible, la modélisation 3D de cette faille, grâce notamment à l'apport de nouvelles observations et mesures de terrain.

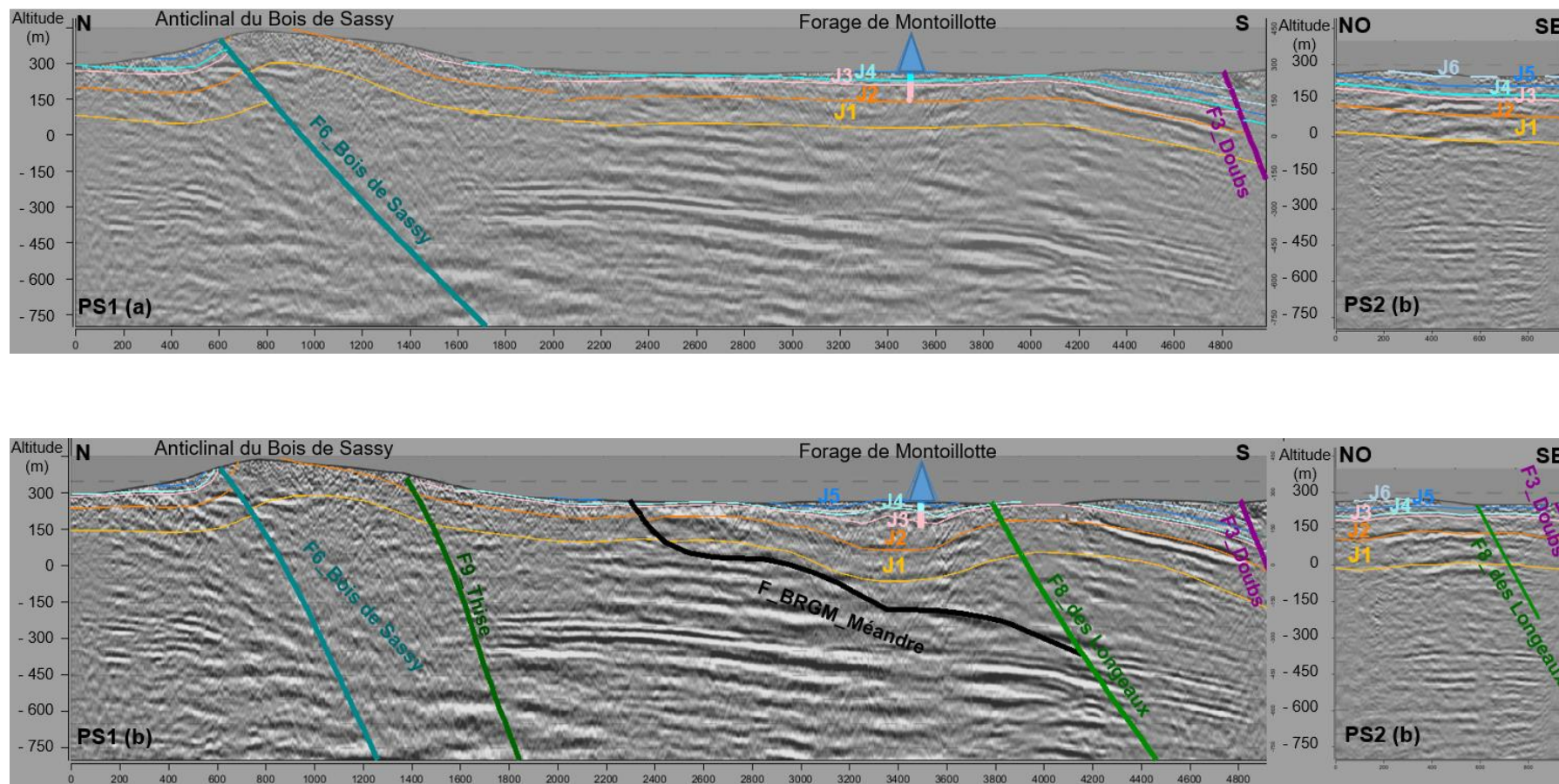


Figure 29 : Résultats du modèle géologique 3D de Novillars actualisé par l'intégration des profils sismiques PS1 et PS2 : Coupes des profils sismiques PS1 et PS2 avant (a) et après interprétation 3D (b) (modèle consolidé, version 2).

6. Consolidation du modèle par les observations de terrain dans le secteur de Novillars (version 3)

6.1. AJOUT DE NOUVELLES FRACTURES NORD-SUD DANS LE SECTEUR DE NOVILLARS

De nombreuses fractures ont été observées et mesurées aux alentours de Novillars lors de la mission de terrain réalisée par le BRGM en novembre 2021 (Figure 5).

Ces fractures sont essentiellement représentées par des plans subverticaux d'une dizaine de mètres de haut, globalement orientés N-S et donc perpendiculaires à la stratification, et qui se poursuivent à l'affleurement parfois sur plusieurs dizaines de mètres. Ce type de géométrie est typique des diaclases, d'autant qu'aucun indice de mouvement relatif entre les deux compartiments de part et d'autre de ces fractures n'a été relevé. Souvent assimilables à des fronts de taille, nombre d'entre elles semblent avoir été utilisées par l'Homme pour l'implantation d'infrastructures comme celles du château d'eau et du parking de l'église de Novillars (Figure 30 et Figure 31) ou l'exploitation du calcaire comme celle observée dans la forêt du Bois Vernotte (Figure 32). D'autres sont déduites d'un pseudo-alignement de dolines, comme celle observée à l'ouest du centre équestre de la Licorne, à la sortie Nord de Novillars (Figure 33).

Témoins d'une déformation récente et limitées en terme d'extension, ces diaclases N-S n'ont que peu d'impact sur la structuration géologique profonde du secteur de Novillars. Leur localisation et leur orientation attestent néanmoins d'une fracturation intense dans ce secteur, qui favorise l'infiltration et la circulation des eaux avec une forte anisotropie orientée N-S.

Deux de ces diaclases ont donc été retenues et modélisées dans la troisième et dernière version du modèle (Figure 34) :

- La diaclase nommée « F15_Chateau_d_Eau », observée en dessous du Château d'eau de Novillars. Bien que sa surface structurale ait été estimée à 8 m de haut et une quinzaine de mètres de long à l'affleurement, son extension a été portée à 300 m pour la modélisation. Son orientation mesurée sur le terrain et retenue pour la modélisation est N165 avec un pendage de 78° vers l'est ;
- La diaclase nommée « F16_Licorne », observée dans le Bois Vernotte, à l'ouest du centre équestre de la Licorne (sortie Nord de Novillars en direction d'Amagney). Déduite d'un pseudo-alignement de dolines observé sur une vingtaine de mètres de long à l'affleurement, son extension a été portée à 400 m pour la modélisation. Son orientation mesurée sur le terrain et retenue pour la modélisation est N174 avec un pendage de 88° vers l'est.



Figure 30 : a. Diaclase N-S observée au point d'affleurement N007. b. Plan de la diaclase en surface structurale. Affleurement situé en dessous du « Château d'eau » de Novillars.



Figure 31 : a. Diaclase N-S observée au point d'affleurement N012. b. Plan de la diaclase en surface structurale. Affleurement situé au niveau du parking de l'église de Noivillars.



Figure 32 : Diaclase N-S observée au point d'affleurement N017, dans la forêt du Bois du Bois Vernotte, au nord de Novillars.



Figure 33 : Diaclase N-S nommée « F16_Licorne », observée au point d'affleurement N016 dans la forêt du Bois Vernotte, à l'ouest du centre équestre de la Licorne (sortie Nord de Novillars en direction d'Amagney).

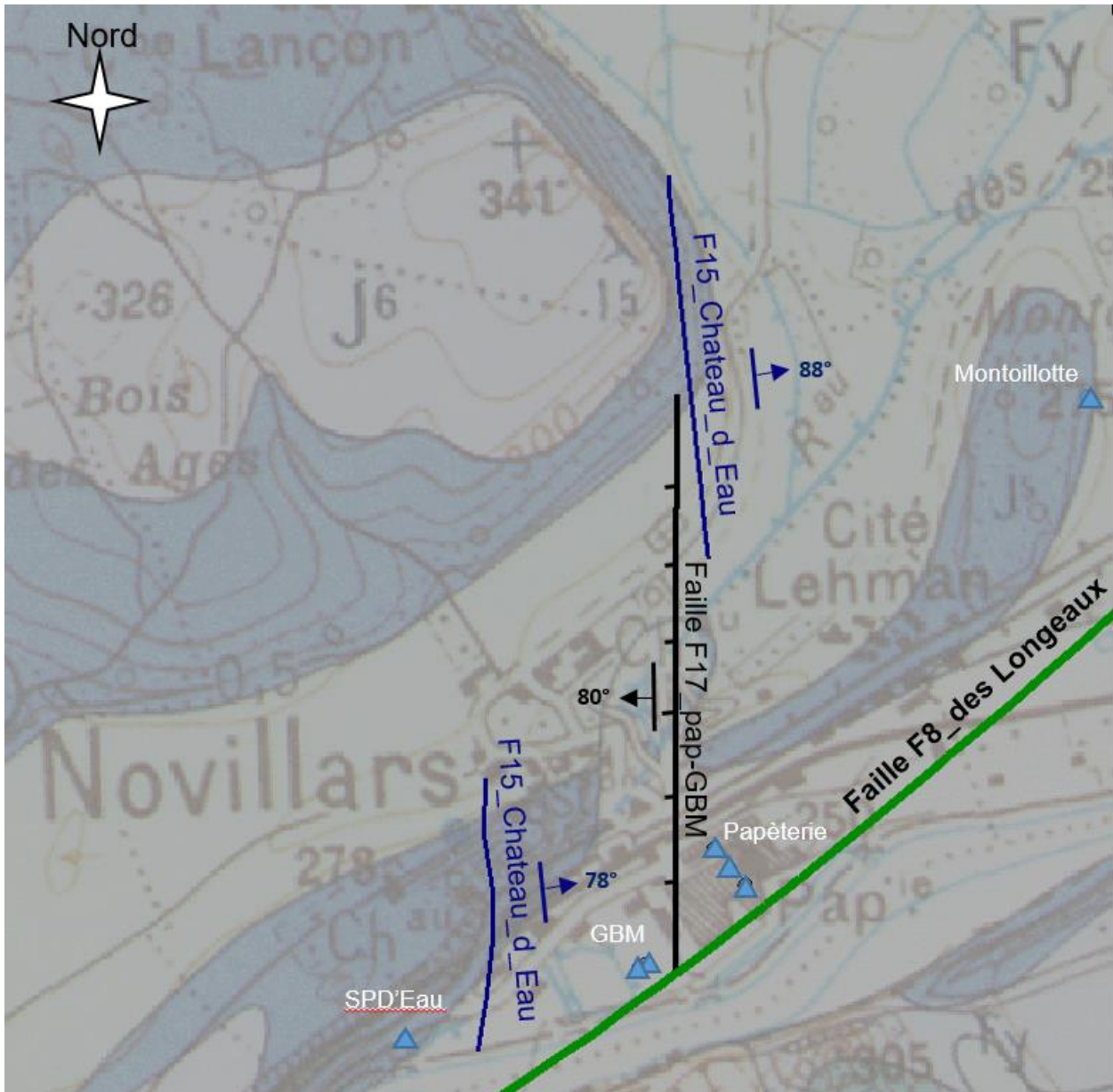


Figure 34 : Nouvelles fracturations N-S ajoutées et modélisées dans le modèle 3D de Novillars suite à l'acquisition de nouvelles données de terrain (modèle consolidé, version 3).

Une troisième fracture a été ajoutée au modèle géologique actualisé. Il s'agit d'une faille N-S nommée « F17_pap_GBM » qui permet d'expliquer l'approfondissement vers l'ouest de la base des formations observé dans les captages AEP de Grand Besançon Métropole, par rapport aux forages de la Papèterie de Novillars situés à moins de 250 m au nord-est.

Cette faille est déduite de la coupe C7 des sondages et n'a pas été observée sur le terrain. Elle a cependant été définie en tant que faille normale avec une direction N180 et un pendage de 80° vers l'ouest, en accord avec les observations de terrain précédentes. Son rejet est estimé à 35 m sur la coupe des sondages (coupe C7).

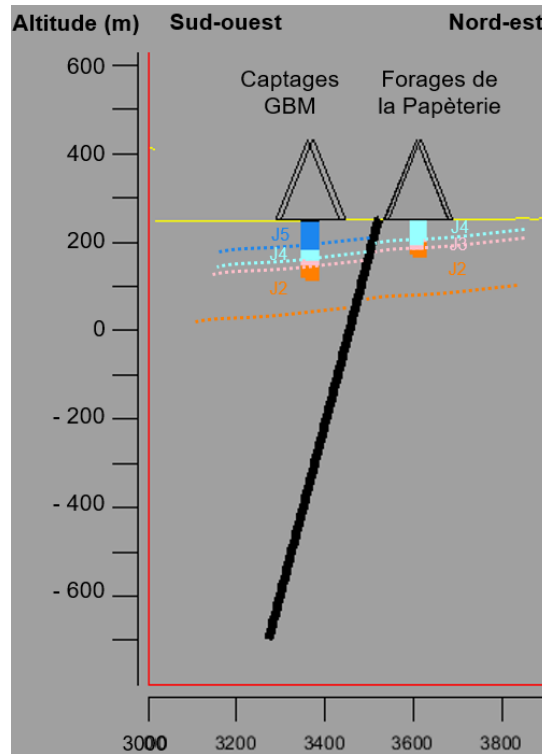


Figure 35 : Faille normale N-S nommée « F17_pap_GBM » déduite de l'aprofondissement des formations vers l'ouest observé entre les captages AEP de Grand Besançon Métropole (GBM) et les forages de la papèterie de Novillars.

6.2. PRÉCISION DU TRACÉ DE LA FAILLE DES LONGEAUX VERS LE SUD-OUEST

Des indices susceptibles de marquer la faille des Longeaux ont été relevés sur le terrain par le BRGM dans le secteur de Vaire le Petit, à l'extrémité ouest de l'anticlinal Deluz. Ils se traduisent par un bourrelet formant un ressaut d'environ 80 cm de hauteur qui se poursuit sur plus de 200 m, le long la route départementale D683 (Figure 36).

Les points d'observations de ce ressaut ont été reportés dans le modèle 3D en tant que point de passage de la faille des Longeaux. De plus, deux estimations d'orientation/pendage interprétées sur le terrain y ont été associé, à savoir N230/80°SE et N235 /80°SE. Elles sont indiquées sur la Figure 5.

Le résultat final de la modélisation de la faille chevauchante des Longeaux, affiné par l'ajout des observations de terrain, montre que son tracé passe plus au sud que celui estimé dans le modèle précédent (version 2). Les forages profonds de Novillars qui ne se trouvent qu'à une trentaine de mètres au sud, ne seraient donc pas affectés (Figure 34).



Figure 36 : a. Indice probable de la présence de la Faille des Longeaux relevés sur le terrain par BRGM dans le secteur de Vaire le Petit :b. vue rapprochée du bourelet. Les flèches blanches indiquent la base du ressaut.

6.3. RÉSULTATS INTERMÉDIAIRES DU MODÈLE CONSOLIDÉ ET RECOMMANDATIONS TECHNIQUES

Les dernières acquisitions de terrain réalisées par le BRGM pour consolider le modèle géologique 3D de Novillars ont permis de :

- Confirmer l'existence d'une fracturation N-S dans le secteur de Novillars. Même si cette fracturation se traduit généralement à l'affleurement par une série de diaclases récentes et non par des failles. Les décalages observés entre les forages de Grand Besançon Métropole et ceux de la papèterie de Novillars laissent supposer que ces failles N-S existent en profondeur, tout comme celle du Méandre mise en évidence par le profil sismique PS1 ;
- Affiner le tracé la faille des Longeaux vers l'ouest et de montrer ainsi que son passage au sud des forages de Novillars n'impacte pas ces derniers. En revanche, cette faille chevauchante vers le nord, très redressée, semble limiter et limiter la circulation des eaux profondes du secteur de Novillars, au nord de la faille.

Les résultats du modèle consolidé montrent que le secteur de Novillars est marqué par une fracturation nord-sud qui semble être limitée au sud par la faille est-ouest des Longeaux. La combinaison de ces deux orientations de failles semble être responsable de la segmentation de la circulation des eaux profondes dans ce secteur.

La réalisation d'un troisième profil sismique au nord de la faille des Longeaux, qui relierait les profils sismiques déjà réalisés (PS1 et PS2) avec une orientation sud-ouest - nord-est pour recouper les failles N-S, permettrait de déterminer la fréquence et la géométrie de ces failles sous alluvions. La structuration compartimentée de la géologie profonde de ce secteur serait alors précisée et la compréhension de la circulation des eaux profondes améliorées sur l'ensemble du secteur de Novillars.

7. Synthèse des résultats

Le modèle géologique 3D de Novillars s'est appliqué à mettre en cohérence l'ensemble des données existantes et acquises en 3 dimensions (cartes géologiques, MNT, forages, mesures structurales et profils sismiques). Il a permis d'obtenir une géométrie cohérente et une interprétation géologique valide de l'ensemble des formations jurassiques et failles majeures présentes sur la zone d'étude, aussi bien à l'échelle régionale qu'à l'échelle locale.

7 formations jurassiques présentant un intérêt pour la circulation des eaux du karst profond ont été modélisées. Leur géométrie a été calée en profondeur grâce aux 14 sondages présents sur la zone puis confortée par l'interprétation des 2 profils sismiques acquis en cours de projet. Leur épaisseur moyenne a été estimée à l'échelle du modèle et localement ajustée pour tenir compte des valeurs ponctuelles issues des données de forages :

- Les marno-calcaires du Kimméridgien-Séquanien (J7-J8) ont une épaisseur moyenne minimale (le toit de cette formation n'ayant pas été modélisée) estimée à 50 m. L'épaisseur régionale de cette formation est estimée à 90 m d'après Chauve et Rolin (2015) (Figure 11) ;
- Les calcaires à pisolithes du Rauracien (J6) ont une épaisseur moyenne de 45 m ;
- Les « Marnes jaunes et calcaires » de l'Argovien (J5) ont une épaisseur moyenne de 35 à 45 m et peut atteindre jusqu'à 60 m d'épaisseur localement dans les captages EAP de GBM-Novillars ;
- Les « Marnes bleues » de l'Oxfordien (J4), ont une épaisseur moyenne de 35 m qui atteint localement 48 m (sondage SPD 'Eau) ;
- Les calcaires de la « Dalle nacrée » du Callovien (J3), ont une épaisseur moyenne de 10 à 15 m qui atteint jusqu'à 80 m localement (sondage de Montoillotte) ;
- Les « Calcaires de la Citadelle » du Bathonien (J2) ont une épaisseur moyenne de 55 à 65 m qui atteint jusqu'à 80 m localement (sondage de Pré-Lavel) ;
- Les calcaires de la « Grande Oolithe » du Bajocien (J1) ont une épaisseur moyenne de 100 m, calée d'après les valeurs de la colonne stratigraphique de Chauve et Rolin (2015) (Figure 11).

Dix failles majeures ont été considérées et modélisées à partir des données existantes, notamment celles des cartes géologiques au 1/50 000 de Vercel et Besançon et de la coupe géologique conceptuelle régionale de Chauve et Rolin (2015) (Figure 37). Certaines de ces failles ont été réajustées en terme de tracé et de pendage grâce aux acquisitions sismiques et aux nouvelles données géologiques relevées sur le terrain par le BRGM. La géométrie finale des failles obtenue par la modélisation 3D est décrite ci-après (Figure 38) :

- Les 2 failles chevauchantes de Montfaucon (F1 et F2) forment une structure en écaille orientée est-ouest sur laquelle se développe l'anticlinal de Montfaucon, de part en part du modèle. Elles sont chevauchantes vers le nord avec un pendage faible d'environ 30° vers le sud° ;

- La faille normale du Doubs (F3) approfondit les formations vers le sud avec un rejet estimé entre 50 et 80 m dans le secteur de Vaire Arcier. Elle est globalement orientée N090 avec un pendage de 70° vers le sud. Son tracé a été prolongé vers l'ouest jusqu'au profil sismique PS2 ;
- La faille inverse des Longeaux (F8) borde le flanc nord de l'anticlinal Deluz avec une direction globalement NE-SO et un pendage très redressé de l'ordre de 80° vers le sud. Son jeu inverse favorise le développement de cet anticlinal vers le nord. Son tracé a été prolongé vers l'ouest jusqu'au petit profil sismique PS2 grâce à l'acquisition des 2 profils sismiques dans lesquels elle a été repérée. Son tracé final a ensuite été ajusté et décalé vers le sud grâce aux observations géologiques de terrain. Il passe ainsi 50 m au sud des sondages de Novillars ;
- Les failles inverses du Bois de Sassy (F7) et de Thise (F9) bordent le flanc sud de l'anticlinal du Bois de Sassy avec une direction E-O (F7) à NE-SO (F9). Elles ont toutes deux été prolongées l'une vers l'autre pour se rejoindre au niveau de la faille perpendiculaire de Vaivre (F12), suite à l'interprétation 3D du grand profil sismique PS1.
- Les failles inverses du Bois de Sassy (F10 et F6) bordent le flanc nord de l'anticlinal du même nom. La faille F6 a été prolongée vers l'ouest dès la première version du modèle afin de mettre en cohérence le jeu relatif de cette faille NE-SO, antérieure aux failles décrochantes N-S (F10 et F11) qui la recoupernt.
- Les 3 failles décrochantes orientées N-S recoupernt l'anticlinal du Bois de Sassy au nord de la zone d'étude. Le jeu en extension de ces failles à composante normale est plus récent que celui des failles inverses orientées NE-SO. La faille de Braillans (F10) est décrochante senestre orientée N150/70°E, la faille des Combottes (F11) est décrochante dextre orientée N130/70°SO, et la faille de Vaivre (F12) est normale à senestre avec une orientation N180 et un pendage de 80° vers l'ouest (F12).

De plus, deux structures totalement inédites ont été mises en évidence dans la plaine alluviale du paléo-méandre du Doubs (entre Montoillotte et Amagney), suite à l'acquisition et l'intégration dans le Geomodeller du grand profil sismique PS1 :

- Un synclinal d'environ 1500 m d'extension N-S, centré au nord du forage de Montoillotte. Sa présence a validé la forte épaisseur de J3 (80 m) localement observée dans ce dernier par rapport à la moyenne modélisée sur l'ensemble du modèle (15 m). L'existence d'une telle structure plissée, encadrée par deux anticlinaux sur faille, est totalement inédite dans la région. Les terrains jurassiques de la plaine du paléo-méandre du Doubs, comme la plupart des formations présentent entre les plis anticlinaux, étaient en effet considérés jusque-là comme subhorizontaux.
- Une faille majeure orientée nord-sud, subparallèle au grand profil sismique PS1, à pendage subvertical vers l'ouest. Cette faille normale borde le synclinal décrit précédemment à l'est (Figure 38). Tout comme celle du synclinal, sa présence et son extension sur plus de 2000 m de long étaient insoupçonnées dans ce secteur recouvert par les alluvions des Doubs. Elle suggère que la fracturation N-S déjà observée au nord de la zone d'étude est probablement aussi présente dans d'autres secteurs recouverts par les alluvions.

Enfin, la présence d'une fracturation N-S, probablement plus fréquente qu'il n'y paraît, a été confirmée par les observations géologiques de terrain relevées par le BRGM dans le secteur de

Novillars. Les mesures relevées ont permis d'ajouter et de modéliser deux diaclases majeures ainsi qu'une nouvelle faille, toutes orientées N-S, dans le secteur de Novillars (Figure 38) :

- Les diaclases observées et mesurées à l'ouest des forages de Novillars (F15_Chateau d'eau) et au nord des forages de la papèterie (F16_Licorne) attestent d'une fracturation N-S récente, certes de faible extension et sans décalage relatif apparent des formations de part et d'autre des fractures. Si leur impact sur la circulation des eaux profondes reste relatif, elles n'en restent pas moins les témoins d'une orientation privilégiée pour l'infiltration des eaux de surface.
- Confortée par la mise en évidence de la faille majeure N-S du méandre (F13) et par les dernières observations de terrain, une nouvelle faille (F_pap_GBM) a été ajoutée et modélisée dans le modèle final, entre les captages de GBM Novillars et les forages de la papèterie. Cette faille permet d'absorber le décalage relatif qui approfondit les formations vers le sud-ouest.

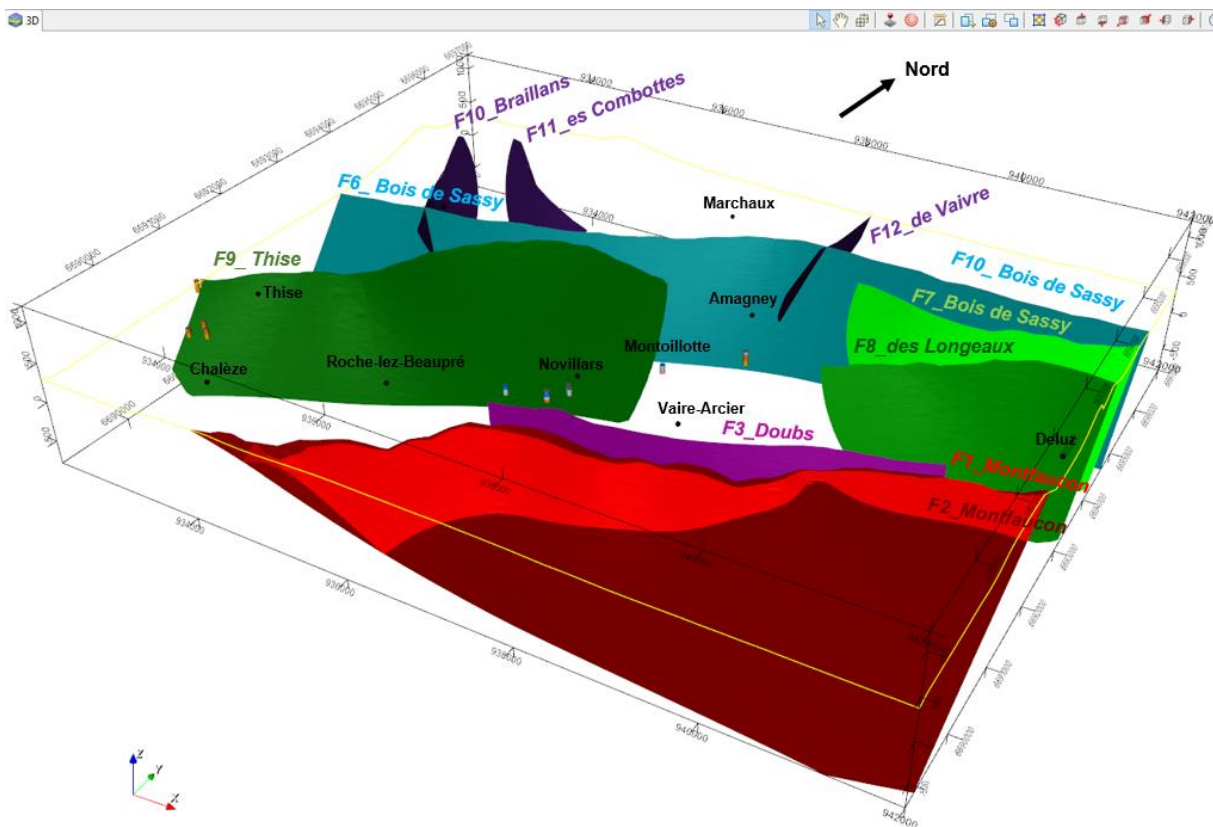


Figure 37 : Modèle structural 3D préliminaire (Version 1) de Novillars : Vue 3D depuis le sud-est.

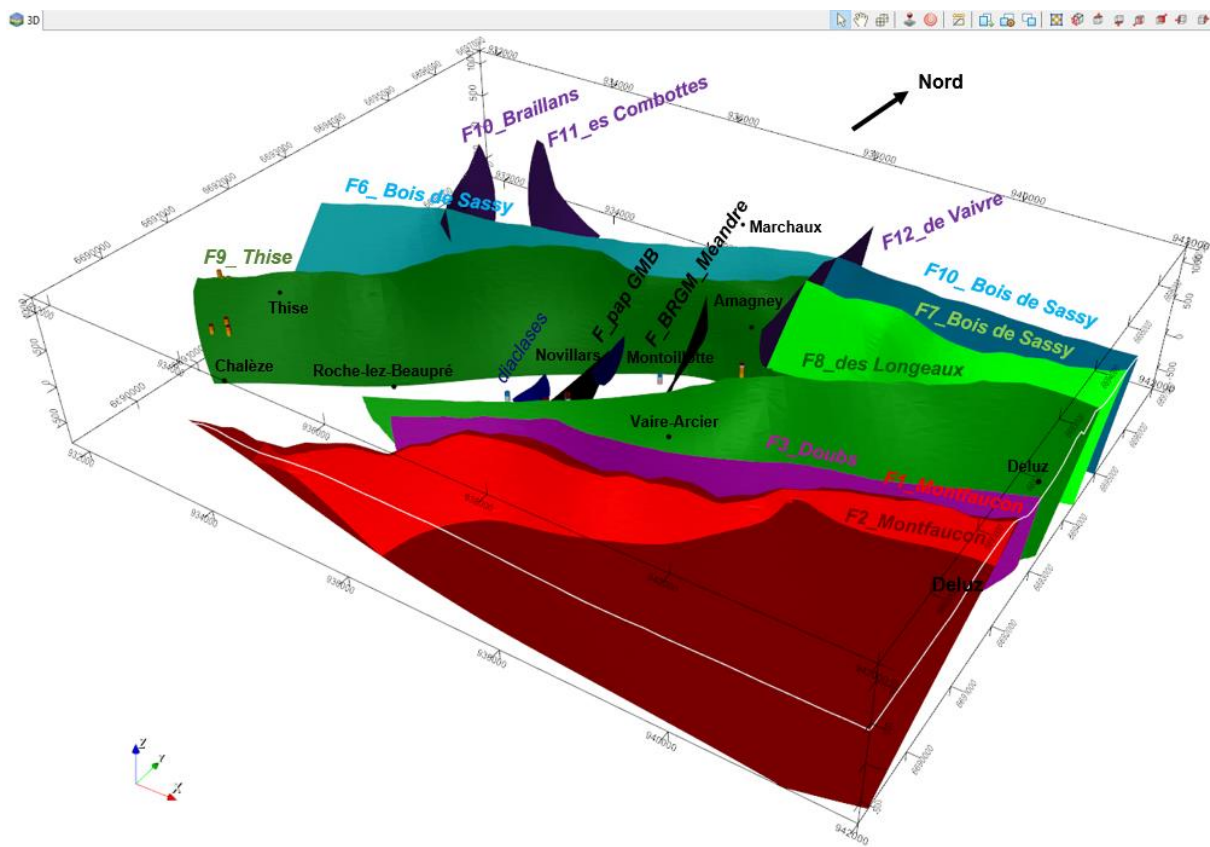


Figure 38 : Modèle structural 3D consolidé (Version 3, finale) de Novillars : Vue 3D depuis le sud-est.

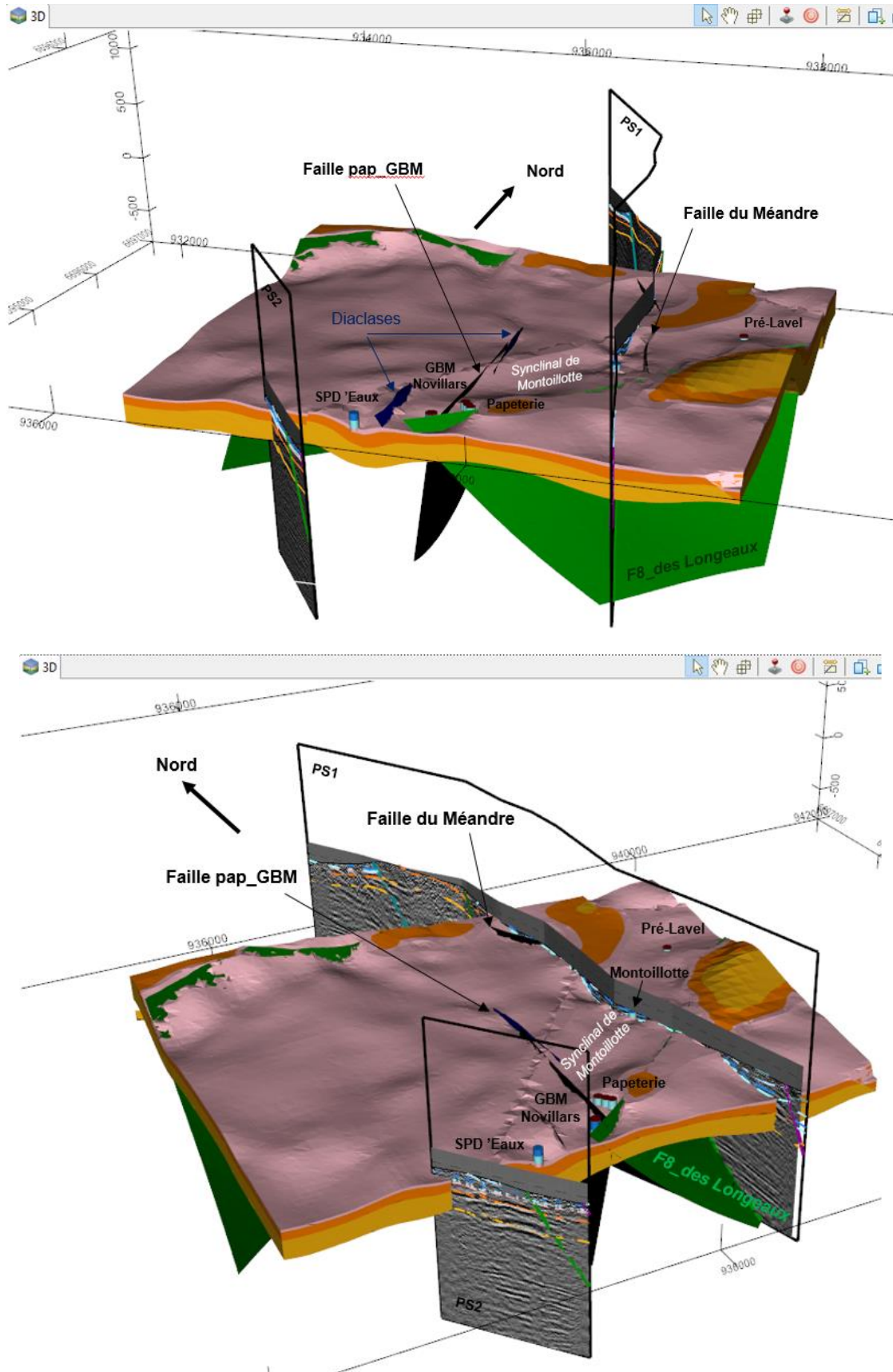


Figure 39 : Vues 3D des formations aquifères, centrées sur le secteur sous alluvions de Novillars – Montoillotte : Version finale du modèle géologique 3D de Novillars (version 3).

8. Conclusions et perspectives

8.1. CONCLUSIONS

Le modèle géologique 3D final réalisé sur l'ensemble du périmètre de protection des eaux de Novillars, montre tout l'intérêt de la modélisation géologique 3D itérative et incrémentale réalisée dans le cadre de ce projet à l'aide du logiciel GeoModeller. L'intégration progressive des données géologiques associée à l'acquisition de nouveaux profils sismiques, se sont avérées particulièrement efficaces pour contraindre la géométrie des formations et failles en profondeur dans les secteurs recouverts par les alluvions anciennes du Doubs :

Un synclinal bordé par une faille normale orientée nord-sud a notamment été mis en évidence sous la plaine alluviale du paléo-méandre du Doubs, entre la butte de Montoillotte et le village d'Amagney. Cette structuration favorise l'approfondissement des aquifères karstiques et leur éventuelle déconnection à l'ouest de la faille et concentre les eaux profondes vers le centre du synclinal.

Une fracturation N-S extensive a aussi été identifiée sur le terrain, à l'ouest des captages de GBM Novillars et au nord des forages de la papèterie. Elle a permis d'ajouter dans le modèle une faille de même orientation entre ces forages ; faille qui explique l'approfondissement des aquifères karstiques et leur éventuelle déconnection à l'ouest de celle-ci.

L'ensemble de cette fracturation N-S semble se concentrer au nord de la faille inverse des Longeaux, orientée NE-SO, sur laquelle se développe l'anticlinal Deluz vers le nord. Il est donc probable que cette faille constitue une ligne de séparation des eaux, entre les secteurs de Novillars et d'Amagney au nord de la faille, et les secteurs situés au sud de la vallée du Doubs.

Le modèle 3D de Novillars, dans sa version finale, a permis de décrire et illustrer la structuration géologique en 3 dimensions des calcaires karstiques profonds, notamment bathoniens, exploités pour la consommation en eau potable. Des coupes géologiques aussi bien horizontales que verticales ou obliques pourront être réalisées et extraites en tout point de ce modèle, notamment dans les secteurs d'intérêts pour guider la compréhension du système hydrogéologique du secteur du captage de Novillars.

8.2. PERSPECTIVES

Trois éléments complémentaires pourraient être envisagés pour compléter le modèle géologique 3D de Novillars et améliorer la compréhension de la circulation des eaux profondes dans les secteurs sous alluvions du secteur de Novillars :

- La réalisation et l'intégration dans le modèle géologique actuel d'un troisième profil sismique au nord de la faille des Longeaux. Son tracé relierait les profils sismiques déjà réalisés (PS1 et PS2) avec une orientation sud-ouest - nord-est pour recouper les failles N-S. Il permettrait ainsi de déterminer la fréquence et la géométrie de ces failles et de mieux contraindre *in fine* la structuration compartimentée de la géologie profonde de ce secteur ;
- L'intégration dans le modèle géologique actuel, s'ils existent, des conduits karstiques éventuellement relevés dans la région par les spéléologues ;

- L'export du modèle géologique 3D de Novillars vers des logiciels de modélisation hydrogéologique (Visual karsys ?, ...) ou de simulations hydrogéologiques (Marthe ?, Feflow ? ...) afin d'y intégrer l'ensemble des données de traçage géochimique des eaux, acquises ou en vue de l'être dans le cadre de ce projet.

De nouvelles données sont actuellement en cours d'acquisition par l'Université de Franche Comté sur les parties sud (anticlinal et chevauchement de Montfaucon) et sud-est (anticlinal de Deluz) pour déterminer l'épaisseur du Bajocien dans ces secteurs. Ces observations et mesures de terrain ont pour objectif d'alimenter un modèle géologique 3D régional, réalisé sous GeoModeller, par un doctorant de l'Université de Franche Comté. Un travail collaboratif entre les acteurs des deux projets, voire la concaténation des deux modèles (Novillars et Montfaucon) pourraient être envisagés en vue d'améliorer la compréhension du système de circulation des eaux du karst dans la partie sud de la région.

L'ensemble de ces travaux pourraient également faire l'objet d'une publication commune.

9. Bibliographie

Bonté A., Caquineau X., Celet P., Contini D., Cussey R., Dreyfuss M., Javey A., Kuntz G., Martin J., Théobald N., Renard B., Rollet M. (1934) - Carte géologique au 1 : 50 000 de Besançon. *Edition BRGM*, feuille n°502.

Cautru J. P., Calret J., Dreyfuss M., Nicot D., Patillet J., Protche G., Seguin J. C. (1958) - Carte géologique au 1 : 50 000 de Vercel. *Edition BRGM*, feuille n°503.

Chauve P. et Rolin P. (2015) - : ouvrage « Jura bisontin : Reliefs, paysages et roches ». *Muséum de Besançon. Citadelle - Patrimoine mondial*. 211 pages.


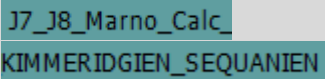

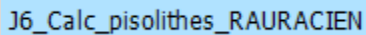

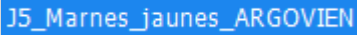


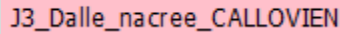

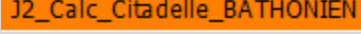

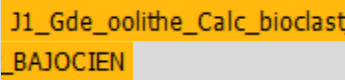



Devillez M. (2019) : Gestion patrimoniale de la ressource en eau potable de Novillars : État des lieux et actions fin 2016-2019.

Lagie B. et Nagel J-L. (2008) - Carte géologique harmonisée du département du Doubs. *Rapport BRGM/RP-55929*, 143p., 6 fig., 2 tab., 2 pl. hors-texte.

Devillez M. (2019) : Gestion patrimoniale de la ressource en eau potable de Novillars : État des lieux et actions fin 2016-2019.

Annexe 1

Nomenclature des âges et notations utilisés pour définir la pile géologique du modèle géologique 3D de Novillars

	ÉTAGES GÉOLOGIQUES		
PÉRIODES / ÉPOQUES GÉOLOGIQUES	Nomenclature ancienne issue des cartes géologiques de Vercel et Besançon (C50K-papier)	Nomenclature utilisée pour définir la pile géologique du modèle 3D de Novillars, calée sur celle des cartes géologiques d'origine (MOD3D Novillars)	Correspondance avec la nomenclature actuelle révisée par la carte géologique harmonisée du Doubs (CHARM-50K)
Jurassique supérieur	 J8-Kimméridgien		J6 - Kimméridgien
	 J7-Séquanien		J5c-6aR - Oxfordien sup. – Kimméridgien inférieur
	 J6-Rauracien		J5c1R - Oxfordien supérieur
	 J5-Argovien		J5bA - Oxfordien moyen
	 J4-Oxfordien		J5a - Oxfordien inférieur
Jurassique moyen	 J3-Callovien		J4a - Callovien inférieur
	 J2-Bathonien		J3 - Bathonien
	 J1-Bajocien		J2 - Bajocien
Jurassique inférieur	 I 6 Lias		J1b - Aalénien supérieur
Jurassique inférieur et Trias indifférenciés	 I 6-3 – Lias		It - Lias et Trias indifférenciés

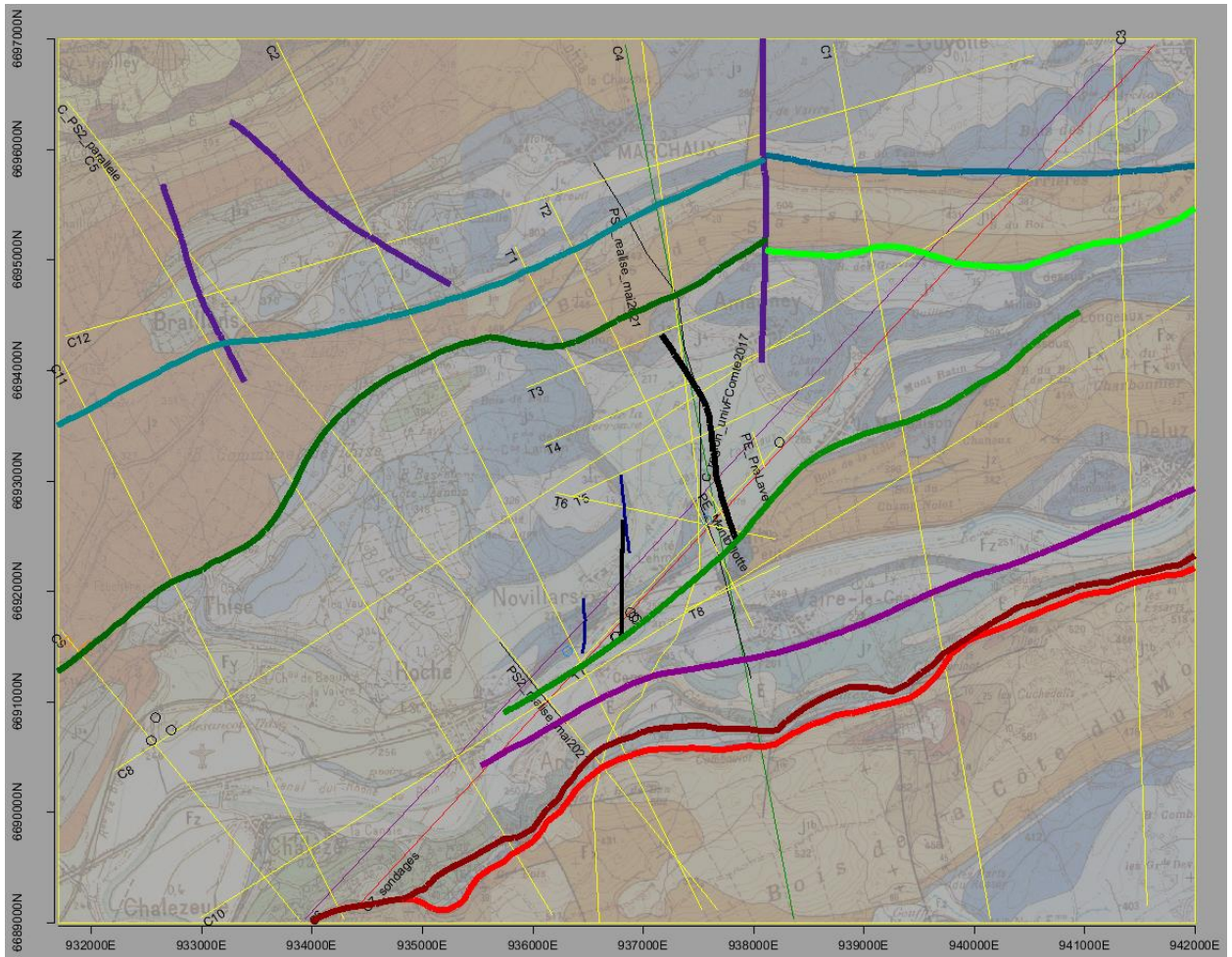
Annexe 2

Tableau des sondages interprétés pour la modélisation géologique 3D (GeoModeller)

Sondage	X_L93	Y_L93	Altitude	Profondeur	Formation	Toit	Mur	Epaisseur
Puits_A_papeterie	936883,31	6691807,97	250,94	88,35	All	0	5,1	5,1
Puits_A_papeterie	936883,31	6691807,97	250,94	88,35	J4	5,1	47	41,9
Puits_A_papeterie	936883,31	6691807,97	250,94	88,35	J3	47	53	6
Puits_A_papeterie	936883,31	6691807,97	250,94	88,35	J2	53	88,35	33,35
Puits_B_papeterie	936914,01	6691768,38	251,95	67,6	All	0	3,5	3,5
Puits_B_papeterie	936914,01	6691768,38	251,95	67,6	J4	3,5	55,1	51,6
Puits_B_papeterie	936914,01	6691768,38	251,95	67,6	J3	55,1	56,9	1,8
Puits_B_papeterie	936914,01	6691768,38	251,95	67,6	J2	56,9	67,6	10,7
Puits_C_papeterie	936941,72	6691741,41	251	82,41	All	0	3,5	3,5
Puits_C_papeterie	936941,72	6691741,41	251	82,41	J4	3,5	60,9	57,4
Puits_C_papeterie	936941,72	6691741,41	251	82,41	J3	60,9	71,2	10,3
Puits_C_papeterie	936941,72	6691741,41	251	82,41	J2	71,2	82,41	11,21
F2_GBM_Novillars	936745,8	6691589	251,73	136	All	0	9,5	9,5
F2_GBM_Novillars	936745,8	6691589	251,73	136	J5	9,5	70	60,5
F2_GBM_Novillars	936745,8	6691589	251,73	136	J4	70	93	23
F2_GBM_Novillars	936745,8	6691589	251,73	136	J3	93	107	14
F2_GBM_Novillars	936745,8	6691589	251,73	136	J2	107	136	29
F3_GBM_Novillars	936756,9	6691594	251,74	142	All	0	10	10
F3_GBM_Novillars	936756,9	6691594	251,74	142	J5	10	70	60
F3_GBM_Novillars	936756,9	6691594	251,74	142	J4	70	95	25
F3_GBM_Novillars	936756,9	6691594	251,74	142	J3	95	107	12
F3_GBM_Novillars	936756,9	6691594	251,74	142	J2	107	142	35
F1_Chailuz_Z2CZ8	931978,61	6691505,5	291,37	106,2	J2	0	65	65
F1_Chailuz_Z2CZ8	931978,61	6691505,5	291,37	106,2	J1	65	106,2	41,2
F2B_Chailuz_Z2CZ5	931922,38	6691461,75	294,34	158,6	J2	0	50	50
F2B_Chailuz_Z2CZ5	931922,38	6691461,75	294,34	158,6	J1	50	158,6	108,6
F3_Chailuz_Z5CZ6	931781,94	6691542,46	300,1	177	J2	0	70	70
F3_Chailuz_Z5CZ6	931781,94	6691542,46	300,1	177	J1	70	177	107
F1_Thise_TH4	932542,44	6690648,86	249,68	113,5	All	0	5	5
F1_Thise_TH4	932542,44	6690648,86	249,68	113,5	J2	5	60	55
F1_Thise_TH4	932542,44	6690648,86	249,68	113,5	J1	60	113,5	53,5
F2_Thise_Z5TH3	932581,99	6690857,55	249,56	100	All	0	5	5
F2_Thise_Z5TH3	932581,99	6690857,55	249,56	100	J2	5	60	55
F2_Thise_Z5TH3	932581,99	6690857,55	249,56	100	J1	60	100	40
F3_Thise_Z5TH6	932723,03	6690744,42	249,43	130	All	0	5	5
F3_Thise_Z5TH6	932723,03	6690744,42	249,43	130	J2	5	60	55
F3_Thise_Z5TH6	932723,03	6690744,42	249,43	130	J1	60	130	70
SPD_EAU	936313,45	6691457,97	251,11	116	J5	0	43,8	43,8
SPD_EAU	936313,45	6691457,97	251,11	116	J4	43,8	91,7	47,9
SPD_EAU	936313,45	6691457,97	251,11	116	J3	91,7	116	24,3
Montoillotte	937574,19	6692642,66	262,17	110	J5	0	8	8
Montoillotte	937574,19	6692642,66	262,17	110	J4	8	38	30
Montoillotte	937574,19	6692642,66	262,17	110	J3	38	110	72
Pre_Level_BRGM	938232,2	6693350	264,14	181	All	0	13	13
Pre_Level_BRGM	938232,2	6693350	264,14	181	J4	13	30	17
Pre_Level_BRGM	938232,2	6693350	264,14	181	J3	30	40	10
Pre_Level_BRGM	938232,2	6693350	264,14	181	J2	40	120	80
Pre_Level_BRGM	938232,2	6693350	264,14	181	J1	120	181	61

Annexe 3

Carte de localisation des Coupes du modèle géologique 3D de Novillars





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 –
www.brgm.fr

Direction régionale Bourgogne Franche Comté
27 rue Louis de broglie
21000 – Dijon – France
Tél. : 03 80 72 90 40