

Réalisation du modèle géologique 3D de la pointe de Givet (08)

Étape 1 - Caractérisation des potentialités
d'exploitation des eaux souterraines

Rapport final

BRGM/RP-60384-FR

Décembre 2011



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Réalisation du modèle géologique 3D de la pointe de Givet (08)

Étape 1 - Caractérisation des potentialités
d'exploitation des eaux souterraines

Rapport final

BRGM/RP-60384-FR

Décembre 2011

F. Lacquement, G. Courrioux

Avec la collaboration de

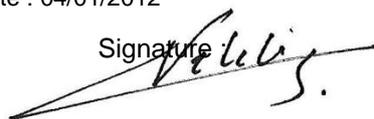
C. Ortega, Y. Thuon

Vérificateur :

Nom : Pierre NEHLIG

Date : 04/01/2012

Signature :

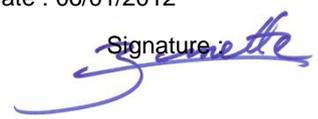


Approbateur :

Nom : Nicolas ZORNETTE

Date : 06/01/2012

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Mots clés : Modélisation géologique, Ardennes, Givet, Eaux souterraines.

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

F. Lacquement, G. Courrioux et la participation de C. Ortega, Y. Thuon (2011) - Réalisation du modèle géologique 3D de la Pointe de Givet (08). Étape 1 - caractérisation des potentialités d'exploitation des eaux souterraines. Rapport final. BRGM/RP-60384-FR, 52 p, 1 CD.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport présente les travaux effectués en partenariat avec la Communauté de Communes Ardennes Rives de Meuse. L'objectif est de réaliser une étude visant à disposer d'un niveau de connaissance suffisamment approfondi de la géologie et de l'hydrogéologie de la pointe de Givet, afin de caractériser ses potentialités d'exploitation des eaux souterraines. Les résultats de cette étude permettront d'aider les décideurs à l'orientation d'investissements et engager de futurs projets de valorisation de la ressource si elle existe.

Ce rapport concerne la première phase du projet qui a consisté à : (1) numériser et synthétiser les données disponibles ; (2) construire un modèle géologique 3D de l'ensemble de la zone et (3) proposer des zones cibles pour l'acquisition de données plus profondes.

Le modèle a pu être réalisé grâce à une base de données riche en données structurales et une cartographie très fine des différents niveaux et chevauchements qui les affectent. Une synthèse géologique de la région ainsi que les données sont présentées et permettent d'aboutir à un modèle assez bien contraint en subsurface (0-500 m). Au-delà, il est largement extrapolé et donc incertain.

Le modèle est constitué d'un assemblage de vingt-sept couches correspondant aux unités reconnues dans la carte géologique et de dix failles ou chevauchement reconnues comme majeures.

Les investigations complémentaires nécessaires pour la poursuite de l'étude concernent une meilleure connaissance de la géométrie des couches en profondeur ? ainsi que de leurs propriétés pétrophysiques.

Deux zones cibles ont été définies en fonction de critères combinant (1) la nature lithologique des formations susceptibles de présenter une porosité et une perméabilité optimale et (2) leur géométrie et la présence d'une fracturation favorisant la circulation des fluides. Elles correspondent aux zones de Givet et Vireux.

Sommaire

1. Présentation du projet	9
1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE	9
1.1.1. Phase 1 - Modélisation géologique	9
1.1.2. Phase 2 - Investigations indirectes	9
1.1.3. Phase 3 - Investigations directes	10
1.2. ZONE D'ÉTUDE.....	10
1.3. CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES.....	11
2. Géomodelleur 3D	13
2.1. CALCUL D'UN MODÈLE GÉOLOGIQUE 3D	14
2.2. TRAITEMENT DES DONNÉES.....	15
2.3. RÉALISATION DU MODÈLE 3D	15
3. Données.....	17
3.1. INVENTAIRE DES DONNÉES	17
3.1.1. Données cartographiques.....	17
3.1.2. Données complémentaires	20
3.2. MISE EN FORME DES DONNÉES	22
3.2.1. Données cartographiques.....	22
3.2.2. Données ponctuelles	26
3.2.3. Données de forages et données géophysiques	27
4. Réalisation du modèle géologique 3D.....	31
4.1. ÉTAPES DE LA MODÉLISATION	31
4.2. MODÈLE 3D – QUALITÉ DU MODÈLE	32
4.3. MODÈLE 3D – VERSION FINALE (CALCUL DE FIN ANNÉE 2011).....	34
5. Zones d'intérêts et investigations complémentaires.....	37
5.1. ZONES D'INTÉRÊTS.....	37
5.1.1. Nature lithologique.....	37
5.1.2. Structures tectoniques	41
5.1.3. Géométrie des corps sédimentaires.....	45
5.1.4. Profondeur d'investigation	45

5.1.5. Combinaison des critères et détermination des zones d'intérêts	45
5.2. FORMULATION DES BESOINS POUR INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES.....	48
6. Conclusions.....	49
7. Bibliographie	51

Liste des illustrations

Figure 1 - Emprise de la zone d'étude à partir de Google Maps, en blanc la frontière franco-belge.	10
Figure 2 - Carte et coupes géologiques des environs de Givet issues de F. Lacquement <i>et al.</i> (2005).	12
Figure 3 - Données d'entrée et résultats en sortie classiquement utilisés pour la modélisation géologique.	13
Figure 4 - Processus de saisie et de traitement des données pour la réalisation d'un modèle géologique 3D valide.....	14
Figure 5 - Carte de la Communauté de Communes Ardennes Rives de Meuse, en bleu, avec le fond topographique à 1/25 000 de l'IGN.....	18
Figure 6 - Limite cartographique méridionale de la série paléozoïque supérieure.	18
Figure 7 - Cartes géologiques belges à 1/25 000.	19
Figure 8 - Cartes géologiques françaises à 1/50 000.....	19
Figure 9 - Extrait de la carte géologique avec explication des différentes indications et caractéristiques géologiques notées sur le document.....	20
Figure 10 - Localisation du forage de Willerzie d'après Meilliez, 1989.	21
Figure 11 - Extrait de la carte de Givet (Mansy <i>et al.</i> , 2006).....	22
Figure 12 - Contours des formations géologiques, en bleu contours de la Communauté Ardennes Rives de Meuse.	24
Figure 13 - Contours des failles, en noir contours de la Communauté de Communes Ardennes Rives de Meuse.	25
Figure 14 - Localisation des données d'orientation de stratification mesurées sur le terrain et récupérées sur les cartes géologiques belges.....	26
Figure 15 - Cartes géophysiques des deux principaux réflecteurs sismiques identifiés lors de la campagne géophysique des années 80 (d'après Raoult, 1986).	27
Figure 16 - Forage de Willerzie (Meilliez, 1989).....	28
Figure 17 - Coupe verticale du forage de Focant (d'après Lacquement <i>et al.</i> , 2001, et de Bouvain <i>et Coen-Aubert</i> , 1997), coupe géologique N-S passant par le forage	

	de Focant et bloc diagramme des relations géométriques avec le forage de Focant (Lacquement, 2001).	29
Figure 18 -	Fenêtre de travail Geomodeller 3D – modélisation de quatre couches géologiques.	31
Figure 19 -	Fenêtre de travail Geomodeller – intégration des données et calcul du modèle avec 10 couches géologiques.	33
Figure 20 -	Fenêtre de travail geomodeller – modélisation de détail de quatre niveaux dans la partie septentrionale.	33
Figure 21 -	Exemple d’une coupe géologique nord-sud habillée des domaines d’incertitudes.....	34
Figure 22 -	Séries de vues du modèle géologique 3D de la pointe de Givet réalisé à partir de l’ensemble des données disponibles au 30/11/2011.	35
Figure 23 -	Série de vues du modèle géologique 3D simplifié à sept couches de la pointe de Givet réalisé à partir de l’ensemble des données disponibles au 30/11/2011.....	36
Figure 24 -	Colonne litho-stratigraphique du Dévonien et du Carbonifère dans la région de Givet, modifiée d’après Lacquement (2001).	40
Figure 25 -	Carrière d’Aubrives, d’après Lacquement (2001).....	41
Figure 26 -	Limite cartographique entre les deux principaux domaines structuraux.	41
Figure 27 -	La faille de Vireux.	42
Figure 28 -	Différentes propositions de relations géométriques pour la faille de Vireux.	43
Figure 29 -	Variation de la géométrie de la zone de faille de Vireux depuis la Meuse jusqu’à la Houille.....	43
Figure 30 -	Photographie aérienne de la pointe de Givet (Google Maps) avec mise en évidence des linéaires N-S hydrogéologiques (traits blancs).	44
Figure 31 -	Zone d’intérêt de Vireux (en grisé sur la carte) et coupe prévisionnelle N-S avec la Formation d’Anor située entre les courbes bleue et orange.	46
Figure 32 -	Zone d’intérêt de Givet (en grisé sur la carte) et coupe prévisionnelle N-S avec les calcaires du Givetien situés entre les courbes blanche et orangé.	47

1. Présentation du projet

1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE

Le projet réalisé en partenariat entre la Communauté de Communes Ardenne Rives de Meuse et le BRGM a pour ambition de disposer d'un niveau de connaissance suffisamment approfondi de la géologie et de l'hydrogéologie de la pointe de Givet, afin de caractériser ses potentialités d'exploitation des eaux souterraines. Les résultats de cette étude permettront d'aider les décideurs à l'orientation d'investissements et d'engager de futurs projets de valorisation de la ressource.

Afin d'aboutir à cet objectif final, trois phases successives sont nécessaires. Elles permettent d'ordonner le travail et de poser les jalons indispensables à la bonne conduite du projet. Ces phases détaillées ci-dessous correspondent :

- à la modélisation géologique 3D ;
- aux investigations indirectes ;
- aux investigations directes.

1.1.1. Phase 1 - Modélisation géologique

Cette étape initiale fait l'objet des travaux présentés dans ce rapport.

Elle correspond à la réalisation d'une modélisation géologique du secteur avec comme objectif de fournir la meilleure représentation géométrique 3D possible, en accord avec l'ensemble des connaissances et des données disponibles. Elle constitue le socle de la réflexion sur laquelle seront construites des hypothèses de travail. Ces hypothèses permettront de proposer des investigations complémentaires pour parfaire le modèle géologique et hydrogéologique du secteur.

La définition de cibles pour la reconnaissance d'horizons potentiellement aquifères nécessite en effet de s'appuyer sur une bonne connaissance de la géométrie des couches géologiques et des structures tectoniques qui les ont affectées.

1.1.2. Phase 2 - Investigations indirectes

Les investigations indirectes constitueront la deuxième phase du projet, basée sur des mesures géophysiques (sismique ?) et/ou géochimiques, voire le couplage de la modélisation géologique avec une modélisation géochimique (si les données le permettent). Cette phase permettra également la validation du modèle géologique 3D obtenue en phase 1.

(Belgique). La limite méridionale se situe au niveau de Revin. Des données en dehors de cette région ont été saisies, afin de contraindre le modèle géologique qui est proposé. La zone retenue correspond à un quadrilatère de 27 sur 31 km, soit plus de 800 km².

Le modèle géologique 3D a été produit sur le territoire de la Communauté de Communes Ardennes Rives de Meuse. Toutefois, afin de contraindre au mieux ce modèle, il a été nécessaire de prendre en compte les données présentes sur un domaine un peu plus large et notamment s'intéresser à celles existantes en Belgique.

1.3. CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES

La géologie du secteur de la Communauté de Communes Ardenne Rives de Meuse est très complexe. Il existe toutefois de multiples données sur la géologie (thèse F. Lacquement, 2001 ; cartes et notices géologiques récentes au 1/50 000 de Givet et de Fumay).

La région est constituée par un massif ancien formé de roches sédimentaires datées du Paléozoïque (-540 à -375 Ma) sur lequel reposent de manière pelliculaire des dépôts de formations superficielles essentiellement fluviatiles apportés par la Meuse. Les roches anciennes sont divisées en deux ensembles séparés par une lacune de sédimentation qui a duré environ 100 millions d'années. La série inférieure, qui constitue le substrat, appartient au Massif de Rocroi ; elle est formée par les roches les plus anciennes, essentiellement des phyllades et quartzophyllades du Cambrien (Devillien et Revinien). La couverture, datée du Dévonien, est quant à elle constituée de roches sédimentaires silicoclastiques pour les 2/3 de la série et carbonatées pour le tiers restant.

Les roches du paléozoïque ont été affectées par des déformations essentiellement plicatives et faillées lors de la mise en place de la chaîne varisque. Le raccourcissement, globalement du sud vers le nord, s'accompagne de la formation de structures plissées et faillées orientées est-ouest qui affectent le substratum et sa couverture. Lors des travaux de cartographie et de recherches scientifiques réalisés parallèlement à la fabrication de la carte géologique, il a clairement pu être mis en évidence que le secteur de la pointe de Givet se situe sur une bordure sud d'une zone complexe de dimension plurikilométrique appelée « zone décrochante de Givet ». En effet, la compilation des données géophysiques, géologiques et paléomagnétiques a démontré de manière évidente que cette zone est marquée par une torsion des structures plissées de 1^{er} ordre (kilométrique). Ainsi par exemple, la série du Frasnien dont l'épaisseur à l'affleurement atteint 400 mètres maximum est présente sur près de 3 000 mètres dans le sondage de Focant (Belgique). Ce sur-épaississement est à associer à la torsion des structures et à la mise en place d'un décrochement majeur dextre compressif de largeur plurikilométrique (voir Figure 2 ci-après extraite de Lacquement *et al.*, 2005).

Plus récemment, il semble y avoir eu une structuration par fractures de directions nord-sud se traduisant par la formation de joints subverticaux. Ces joints semblent guider le réseau hydrogéologique en surface. En effet, il est aisé de constater que l'ensemble

des drains principaux et secondaires est de direction nord-sud et que les eaux s'écoulent toujours majoritairement du sud vers le nord. Généralement, sous recouvrement de formations alluvionnaires et ne décalant apparemment pas les contacts du socle, ces structures sont assez mal connues.

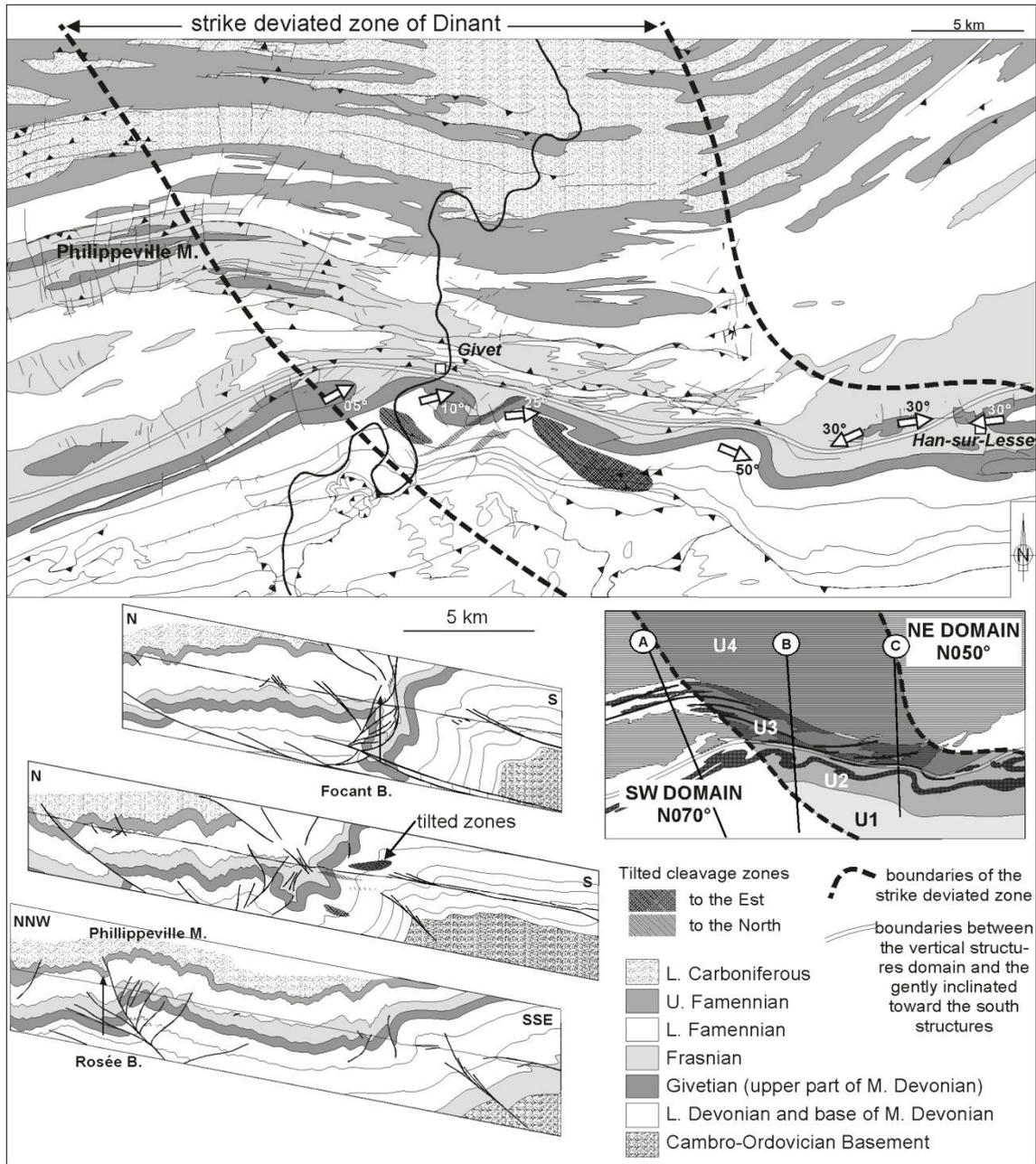


Figure 2 - Carte et coupes géologiques des environs de Givet issues de F. Lacquement et al. (2005).

2. Géomodelleur 3D

La modélisation géologique est réalisée à l'aide du logiciel **Geomodeller 3D** (copyright BRGM Intrepid Geophysics). Ce logiciel permet de reconstruire en 3D les surfaces et volumes géologiques en prenant en compte les observations terrains ou/et les données cartographiques. La méthode d'interpolation permet de prendre en compte simultanément : (1) des points de passage d'interface géologiques connus en certains endroits, (2) des données d'orientation (directions et pendages des couches) connues indépendamment des interfaces géologiques et (3) des données sur les failles (les failles sont modélisées sous forme de surfaces et imposent une discontinuité à l'interpolation). Les fondements théoriques de la méthode d'interpolation (basée sur le cokrigeage d'un champ de potentiel et de ses dérivées) sont décrits dans Lajaunie *et al.* (1997). L'utilisation de cette méthode pour la modélisation géologique est illustrée dans Calcagno *et al.* (2008).

Cet outil, par sa méthode d'interpolation 3D originale, permet au géologue de calculer un modèle rapidement, même avec des données de géologie éparses et variées (carte, sondage, coupe, observations terrains, etc.) La partie reconstruction 3D (création et visualisation des surfaces) est prise en charge par les algorithmes du **Geomodeller 3D** garantissant le respect de l'ensemble des données. Le modèle peut être visualisé en 3 dimensions ou dans des coupes quelconques à la demande (Figure 3).

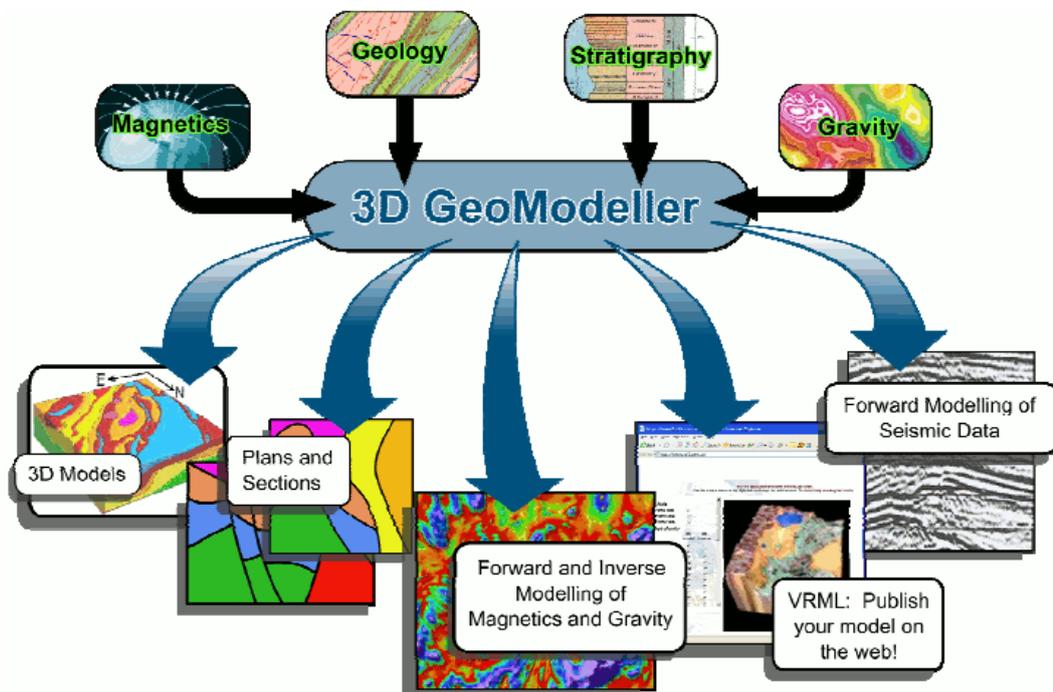


Figure 3 - Données d'entrée et résultats en sortie classiquement utilisés pour la modélisation géologique.

2.1. CALCUL D'UN MODÈLE GÉOLOGIQUE 3D

Dans le cadre de la réalisation d'un modèle géologique 3D, une succession de tâches nécessaires est réalisée (Figure 4). Une fois les données saisies, les processus de validation et de structuration permettent de mettre en forme les données, afin qu'elles puissent être utilisées efficacement lors du calcul du modèle. Lors de ce calcul, l'ensemble des interfaces et objets géologiques sont modélisés. Le modèle géologique est ensuite testé, afin de voir la cohérence entre les données et la cohérence avec les concepts et réalités géologiques et tectoniques.

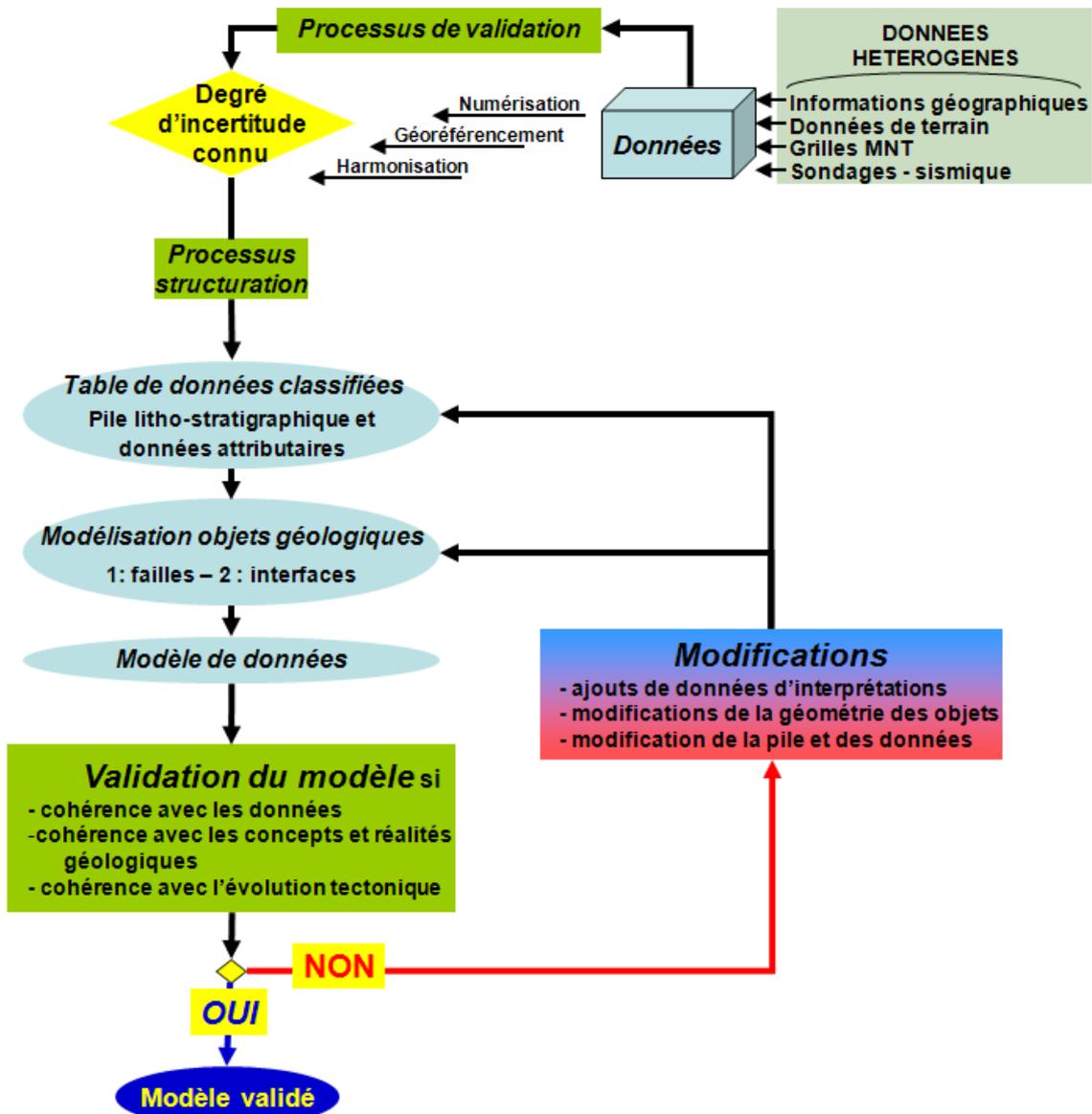


Figure 4 - Processus de saisie et de traitement des données pour la réalisation d'un modèle géologique 3D valide.

En effet, une géométrie peut s'avérer être réaliste alors que géologiquement elle est aberrante. Si des incohérences apparaissent, il est nécessaire de les corriger et de refaire les calculs et ce jusqu'à ce que le modèle soit géométriquement et géologiquement cohérent. Il n'y a pas de résultat unique, plusieurs modèles peuvent être cohérents et donc valides par rapport au jeu de données fournies pour calculer le modèle. Seule l'acquisition de données complémentaires peut permettre de faire la part des choses et d'accroître la véracité d'un modèle.

2.2. TRAITEMENT DES DONNÉES

Pour pouvoir utiliser les données, il est nécessaire de réaliser une succession de tâches de tri, de sélection, de mise en forme des données ainsi que de les structurer et de préparer la boîte dans laquelle elles seront traitées.

Ainsi, les données ont été hiérarchisées par la prise en compte des géométries des structures et de la gestion de leurs intersections géométriques. Pour cela, les phases suivantes ont été réalisées :

- création de la pile à modéliser ;
- identification des principales unités ;
- choix des niveaux repères et discontinuités ;
- intégration des données d'affleurements numérisées, des données de forage profond, des données contenues dans la BSS, des contours de la carte géologique ;
- intégration du Modèle Numérique de Terrain ;
- résolution des incohérences 3D ;
- homogénéisation des données en fonction de l'échelle de modélisation choisie.

Une fois l'ensemble de ces tâches réalisé, le calcul du modèle 3D a débuté.

2.3. RÉALISATION DU MODÈLE 3D

Le contexte tectonique régional implique une méthodologie de traitement adéquate entre le géologue modélisateur et le géologue ayant réalisé les levés cartographiques. Ainsi, pour obtenir un modèle géologiquement valide la méthodologie suivante est appliquée :

- hiérarchisation des discontinuités (failles) et détermination de leurs relations géométriques ;
- détermination de l'extension des failles ;
- modélisation du réseau de failles ;
- modélisation des unités géologiques en prenant en compte les discontinuités ;
- recherche des paramètres d'interpolation les mieux adaptés ;
- test de plusieurs hypothèses sur ces paramètres ;

- analyse de l'impact du réseau de faille sur la géométrie des unités ;
- critique du modèle au vu de cette analyse ;
- et réinterprétation du réseau de failles jusqu'à obtention d'un modèle cinématiquement acceptable (compatible en 3 dimensions avec les contraintes de déplacement le long des failles et chevauchement et les plissements associés).

Le résultat des calculs permet la réalisation d'un modèle géologique 3D en volume et/ou en surface suivant le mode de représentation souhaité. Ces modèles peuvent être visualisés dans toutes les directions de l'espace et selon le degré de zoom choisi. Afin de mieux visualiser les objets géologiques, des coupes peuvent être réalisées.

À partir des coupes, des interfaces calculées et des relations géométriques entre les différents objets, résultats de l'intégration de l'ensemble des données disponibles, le (ou les) modèle(s) géologique(s) est (sont) examiné(s) et retravaillé(s) pour prendre en compte l'aspect cinématique des déformations déduit de l'étude géologique.

Une fois l'ensemble de ces travaux réalisé, le modèle 3D est dit « validé ». Il prend en compte l'ensemble des données et est cinématiquement cohérent.

3. Données

3.1. INVENTAIRE DES DONNÉES

Le modèle géologique 3D a été réalisé à partir des données existantes. Ces données sont de nature cartographique, issues des cartes géologiques. Elles ont été complétées par des données de forage, permettant de contraindre le modèle en profondeur, ainsi que par des données ponctuelles acquises par le BRGM lors de la réalisation de cartes géologiques françaises.

Les données utilisées pour la réalisation du modèle ne sont pas uniquement localisées en France. En effet, pour contraindre la géométrie en profondeur des structures plissées et faillées, il a été indispensable d'utiliser des données situées aux alentours de la zone à modéliser. Pour ce faire, nous avons choisi d'étendre la zone de travail à la Belgique et plus particulièrement aux régions se situant de part et d'autre de la pointe de Givet (Figure 5).

Les données utilisées dans le cadre de la modélisation 3D ne concernent que la série paléozoïque supérieure. Les informations sur les séries post-paléozoïques, à savoir les formations sédimentaires alluviales associées au creusement de la Meuse ainsi que celles du Cambrien du massif de Rocroi (paléozoïque inférieur) ne sont pas prises en compte. Cette restriction implique que seules les données, non pelliculaires, situées au nord d'une ligne passant par le village de Fépin et de Hargnies sont utilisées et modélisées (Figure 6). Les sous-sols des communes de Fépin, Fumay, Haybes et Hargnies seront donc renseignés de manière partielle.

3.1.1. Données cartographiques

Les données cartographiques utilisées correspondent :

- aux cartes géologiques belges publiées à 1/25 000 (Figure 7) :
 - carte d'Olloy-Treignes,
 - carte d'Agimont-Beauraing,
 - carte de Sautour-Surice ;
- aux cartes géologiques françaises à 1/50 000 (Figure 8) :
 - Givet (2006),
 - et Fumay 3^e édition en cours de réactualisation.

Les données cartographiques de la carte géologique de Fumay utilisées sont celles de la future édition de la carte géologique. Elles résultent de levés de terrain effectués dans la continuité de ceux réalisés pour la carte de Givet. Ces nouveaux tracés ne sont pas encore publiés. Toutefois, ils ont été utilisés afin de produire des documents prenant en compte les données les plus récentes.

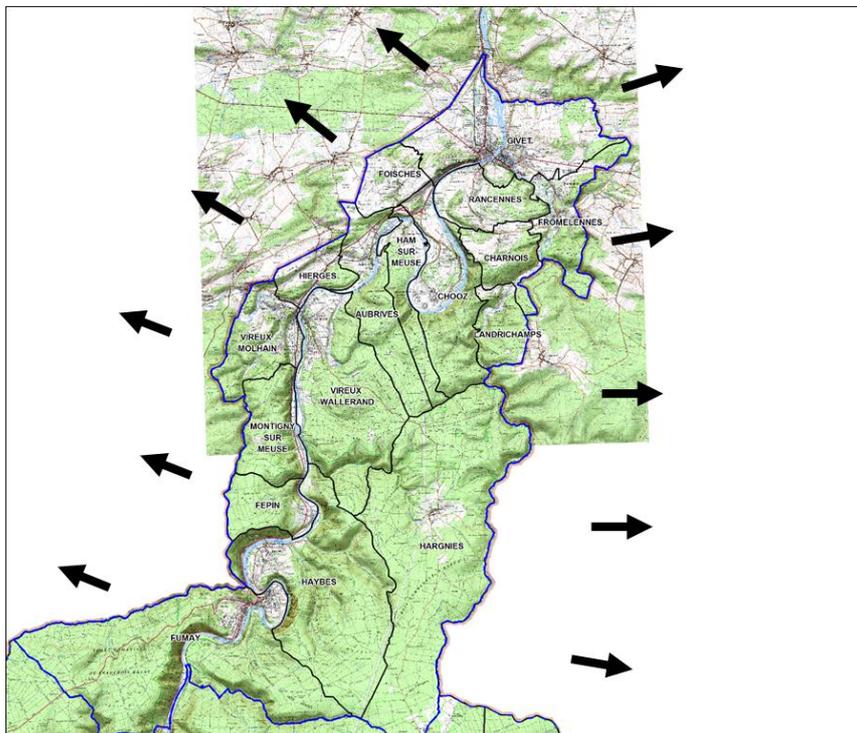


Figure 5 - Carte de la Communauté de Communes Ardennes Rives de Meuse, en bleu, avec le fond topographique à 1/25 000 de l'IGN.

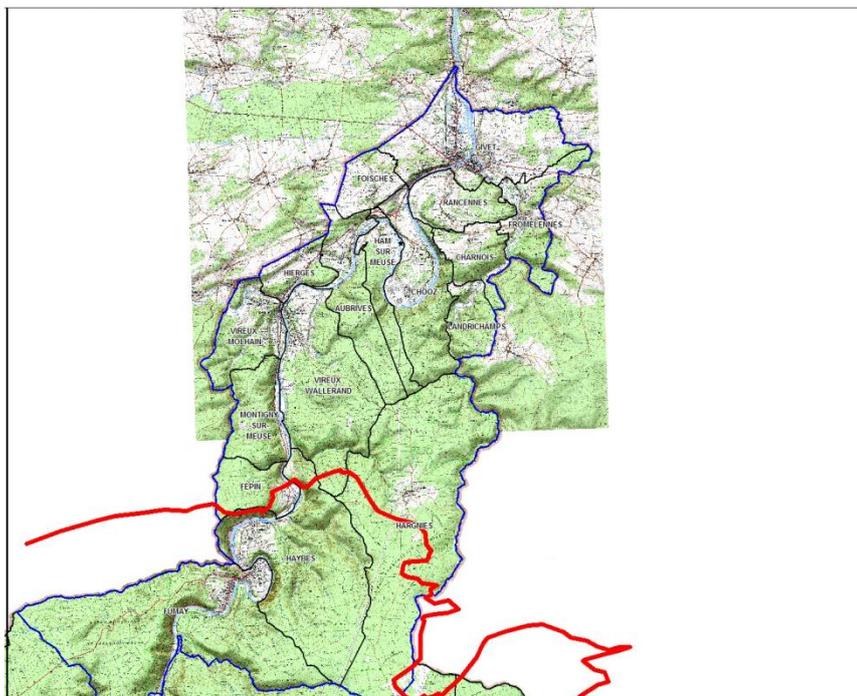


Figure 6 - Limite cartographique méridionale de la série paléozoïque supérieure.

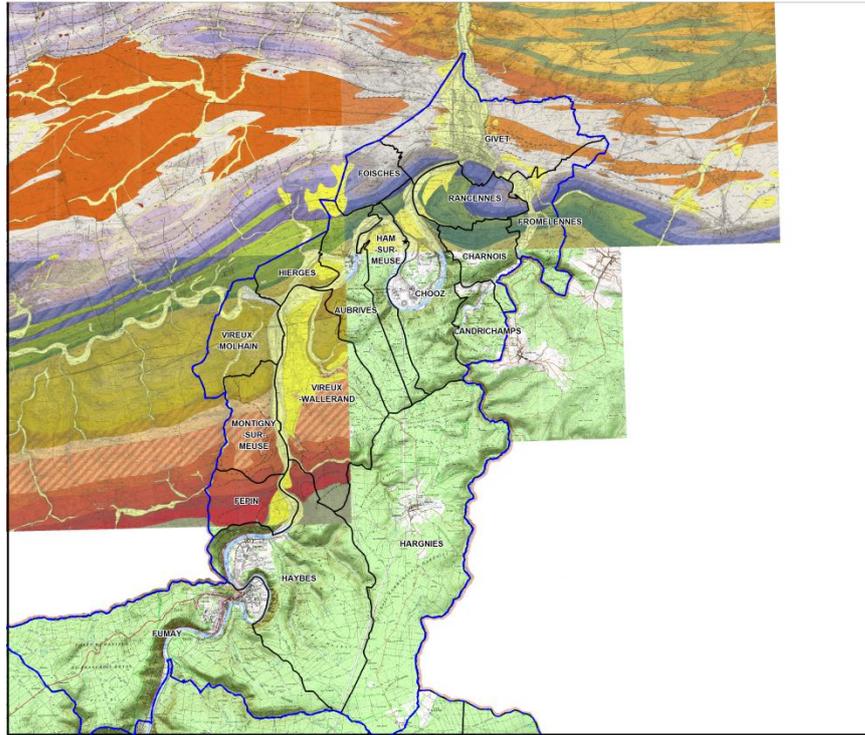


Figure 7 - Cartes géologiques belges à 1/25 000.

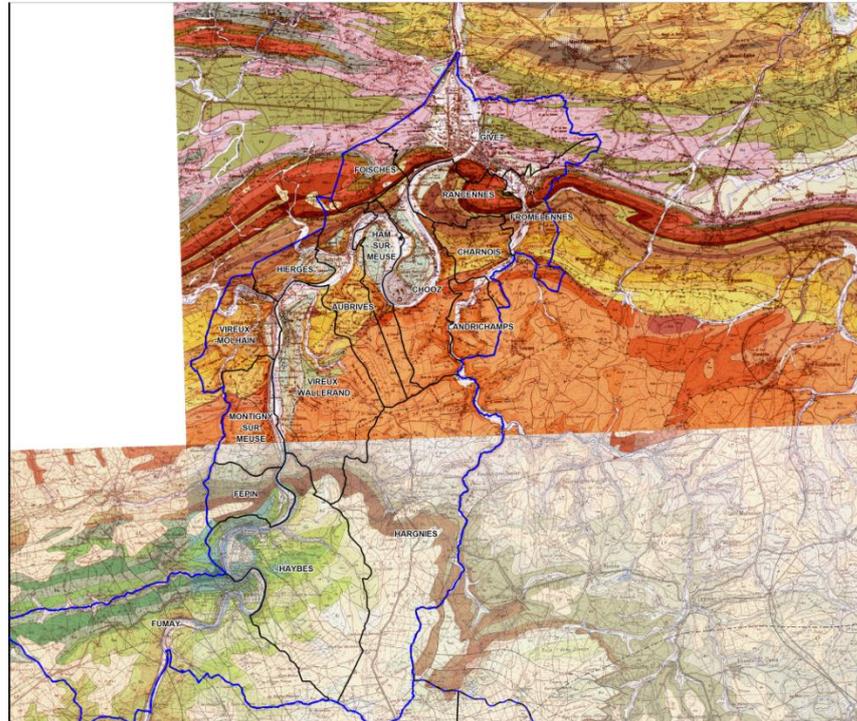


Figure 8 - Cartes géologiques françaises à 1/50 000.

Sur ces cartes, ont été récupérés l'ensemble des contours géologiques des formations du paléozoïque supérieur ainsi que les informations ponctuelles renseignant sur la géométrie des objets géologiques (Figure 9). De la sorte, sont réalisés des fichiers numériques (MapInfo) correspondant aux :

- contours géologiques sédimentaires ;
- contours géologiques des failles ;
- informations ponctuelles (données d'orientation et valeur d'inclinaison de l'objet géologique).

Les fichiers réalisés ont ensuite été injectés dans l'outil de modélisation pour être traités et permettre la construction du modèle 3D.

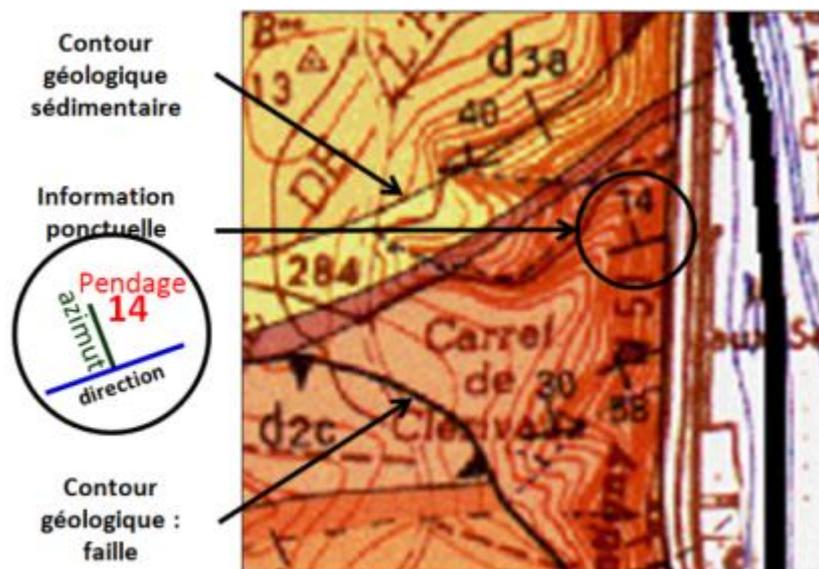


Figure 9 - Extrait de la carte géologique avec explication des différentes indications et caractéristiques géologiques notées sur le document.

3.1.2. Données complémentaires

Données ponctuelles

En parallèle aux données linéaires et ponctuelles récupérées sur les cartes géologiques belges et françaises, une série de mesures non publiées, acquises lors des campagnes cartographiques menées de 1995 à 2005 qui ont conduit à la fabrication de la carte géologique de Givet à 1/50 000 (déjà parue) ainsi que, et dans une moindre mesure, à celles prélevées dans le cadre de la réalisation de la carte géologique de Fumay à 1/50 000 (en cours de réalisation), sont utilisées. Elles sont incluses dans le fichier correspondant aux informations ponctuelles.

Données forages

En France, il n'y a pas de forages pour permettre de préciser la géométrie des couches en profondeur. Par contre, il existe en Belgique une série de forages qui, même s'ils peuvent apparaître lointains, permettent d'apporter des contraintes importantes sur la structure à l'échelle du kilomètre. Ces forages sont situés à l'est de la zone d'étude dans deux secteurs :

- le premier secteur est situé à l'est d'Hargnies, sur la commune de Willerzie et se caractérise par un forage profond d'un peu plus de 180 mètres (Figure 10) ;
- le second secteur est situé à l'est de Givet, dans la région de Focant. Une série de forages peu profonds permet de renseigner la géologie de subsurface au niveau de la plaine de la Famenne (zone peu affleurante). Ces forages sont complétés par un forage très profond de plus de 3 000 mètres de profondeur (Figure 11).

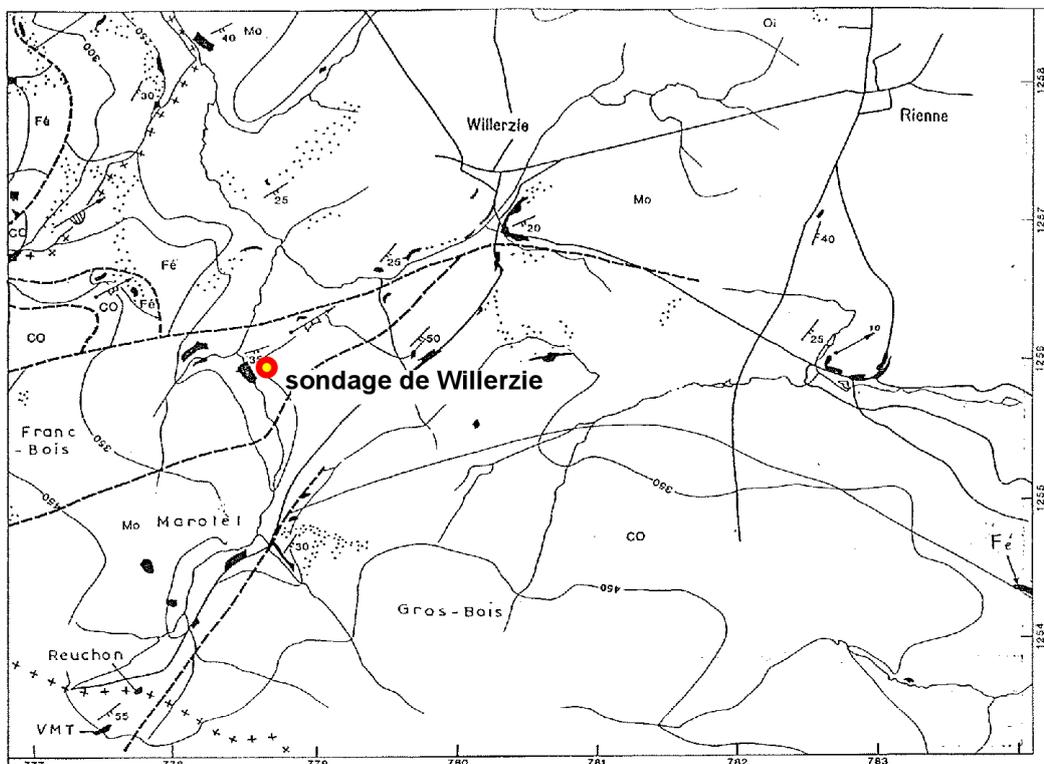


Fig. 147 - Carte d'affleurements de la région de Willerzie. CO = substratum ; Fé = Formation de Fépin ; Mo = Formation de Mondrepuis ; Oi = Formation d'Oignies. Présentation et discussion dans le texte. Au Sud de Willerzie, la Formation de Fépin n'est plus représentée que par quelques lentilles isolées de conglomérats lités, comme ici à Louette-St-Pierre (Fé).

Figure 10 - Localisation du forage de Willerzie d'après Meilliez, 1989.

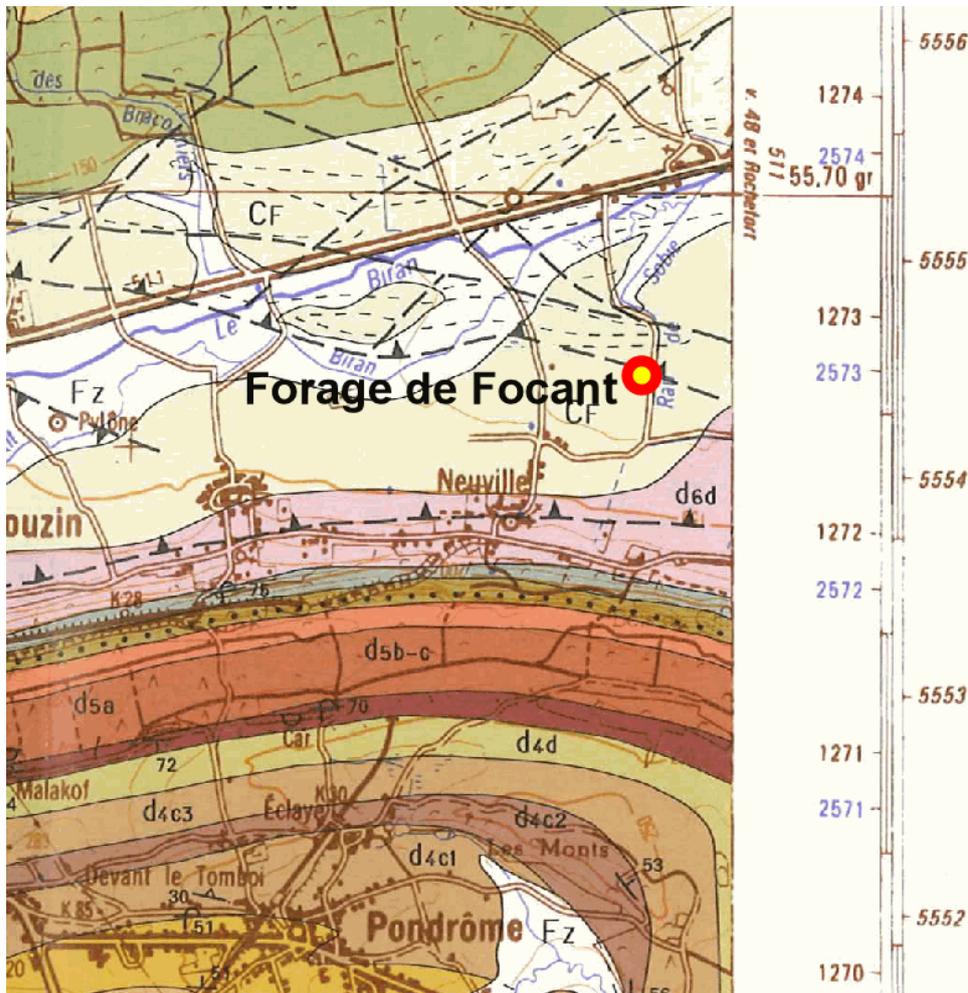


Figure 11 - Extrait de la carte de Givet (Mansy et al., 2006).

Données géophysiques

En Belgique, une campagne d'acquisition géophysique a été opérée dans les années 1980 avec l'acquisition de lignes sismiques. À partir de ces lignes sismiques, deux réflecteurs principaux ont été identifiés (Raoul, 1986), ils permettent de contraindre la géométrie en profondeur.

3.2. MISE EN FORME DES DONNÉES

3.2.1. Données cartographiques

Les données cartographiques sont mises en forme dans des fichiers numériques sous MapInfo. Le premier fichier regroupe l'ensemble des contours géologiques (Figure 12). Chaque formation géologique est représentée par sa base. Les bases de couches sont notées de 1 à 29, le niveau 1 correspondant à la base de la couche située en bas de la

pile sédimentaire. Le niveau 29 correspond à la base de la dernière formation de la pile modélisée. De la base au sommet, on trouve :

- Niveau 1 – Formation de Fépin (conglomérats de Fépin et Arkose d'Haybes) ;
- Niveau 2 – Formation de Mondrepuis ;
- Niveau 3 – Formation de Oignies ;
- Niveau 4 – Formation de Saint-Hubert ;
- Niveau 5 – Formation d'Anor / Mirwart ;
- Niveau 6 – Formation de Villé ;
- Niveau 7 – Formation de La Roche ;
- Niveau 8 – Formation de Pernelle ;
- Niveau 9 – Formation de Pesches ;
- Niveau 10 – Formation de Vireux ;
- Niveau 11 – Formation de Chooz ;
- Niveau 12 – Formation de Hierges ;
- Niveau 13 – formations de Saint-Joseph et de l'Eau-Noire ;
- Niveau 14 – Membre du Vieux Moulin
- Niveau 15 – Formation de Couvin ;
- Niveau 16 – Membre des Chavées
- Niveau 17 – Formation d'Hanonet ;
- Niveau 18 – Formation des trois-Fontaines ;
- Niveau 19 – formations des Terres d'Hairs et du Mont d'hairs ;
- Niveau 20 – Formation de Fromelennes ;
- Niveau 21 – Formation de Nismes ;
- Niveau 22 – Formation du Moulin Lienaux
- Niveau 23 – Formation de Grand Breux
- Niveau 24 – formations de Neuville, Valisettes et Matagne ;
- Niveau 25 – Formation de Famenne ;
- Niveau 26 - Formation d'Aye ;
- Niveau 27 – Formation d'Esneux ;
- Niveau 28 – Formation de Souverain Près ;
- Niveau 29 – Formation de Ciney.

Le fichier MapInfo est ensuite exporté sous Geomodeller, afin de pouvoir constituer la pile sédimentaire. Les couches géologiques sont référencées par leur base.

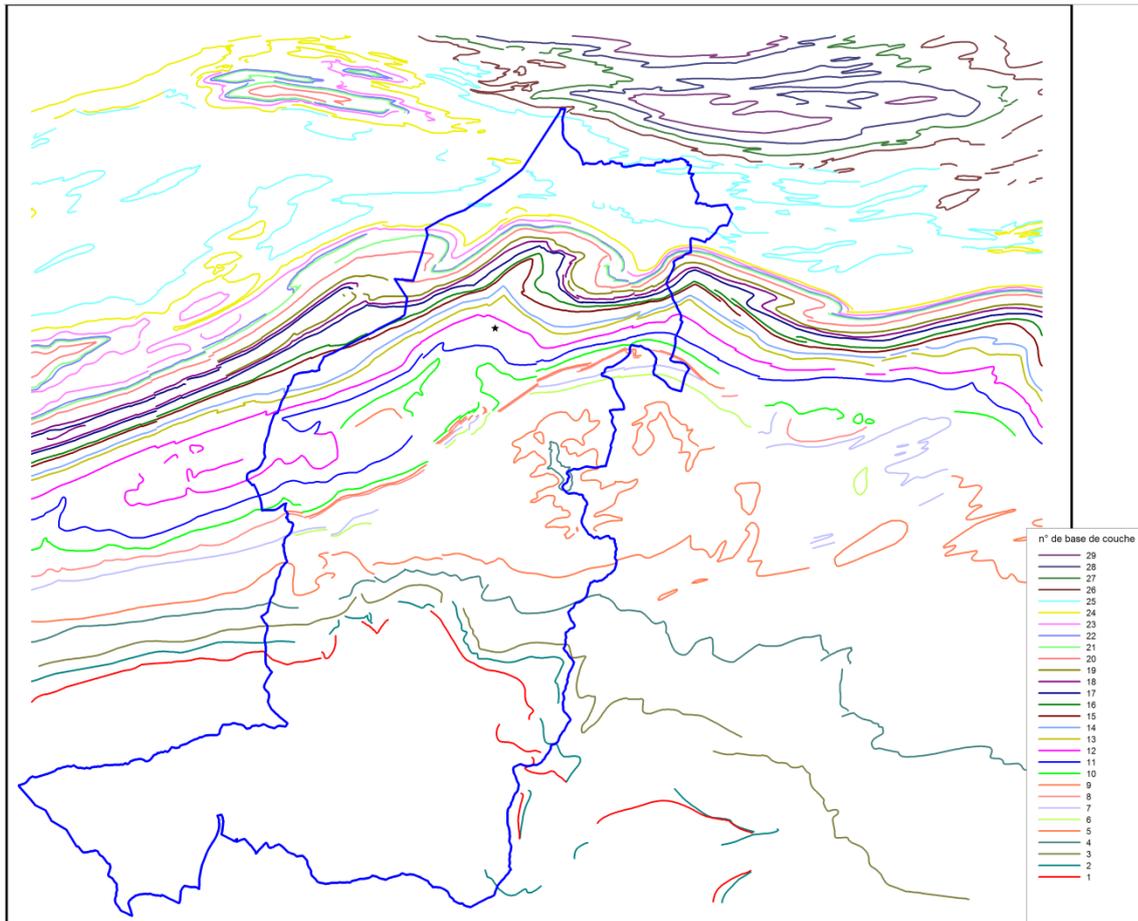


Figure 12 - Contours des formations géologiques, en bleu contours de la Communauté Ardennes Rives de Meuse.

Le second fichier regroupe l'ensemble des failles (Figure 13). Les failles sont regroupées en fonction des relations géométriques et chronologiques qu'elles entretiennent avec les structures sédimentaires. Six groupes sont différenciés :

- **Failles Fw** – failles du groupe de Willerzie. Ces failles correspondent à des failles synsédimentaires passant dans la région de Willerzie et ayant fonctionnées pendant la sédimentation dévonienne. Elles sont à l'origine des variations de puissance et de faciès important de part et d'autre du couloir de faille ;
- **Failles Fv** – Failles du groupe de Vireux. Ces failles sont peu nombreuses et forment un couloir étroit passant par Vireux. Elles correspondent à des failles synsédimentaires passant dans la région de Vireux-Wallerand et Vireux-Molhain et ayant fonctionnées pendant la sédimentation dévonienne. Elles sont à l'origine des variations de puissance et de faciès importantes de part et d'autre du couloir de failles. Dans la partie occidentale, ces failles ont joué tardivement en failles normales extensives. De la barytine a pu être observée dans les plans de faille ;

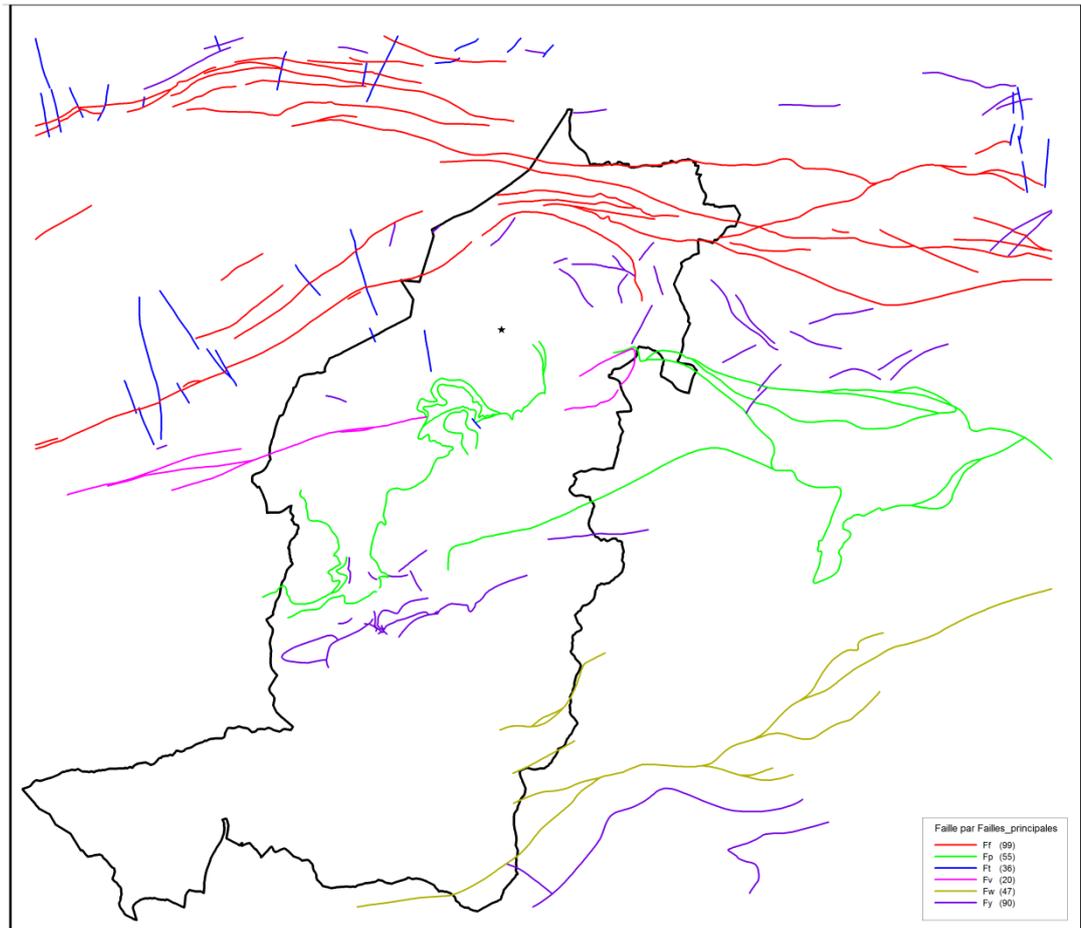


Figure 13 - Contours des failles, en noir contours de la Communauté de Communes Ardennes Rives de Meuse.

- **Failles Ff** – Failles du groupe de la Famenne. Les failles de ce groupe sont principalement à pente sud et marquent la limite entre un domaine sud où les structures plissées sont déjetées vers le nord (surfaces axiales pentées vers le sud) et un domaine nord où les structures sont droites (surfaces axiales verticales) ;
- **Failles Fp** – Failles plates. Ces failles sont essentiellement associées aux structures plissées déjetées vers le nord. Ces failles chevauchantes sont subhorizontales à vergence nord, et parfois même avec une pente légèrement inclinée vers le Nord. Elles affleurent principalement à l'est de la Meuse et affectent la partie supérieure de la série dévonienne inférieure. Cartographiquement, le niveau stratigraphique le plus récent affecté par ces failles correspond à la Formation de Chooz (niveau 11) ;
- **Failles Fy** – Autres failles. Ce groupe rassemble l'ensemble des autres failles associées aux phénomènes de plissement mais n'ayant pas de valeur régionale. Ces failles sont plates à vergence nord pour l'ensemble situé au sud de la plaine de la Famenne et pentées tantôt vers le nord, tantôt vers le sud en fonction de leur position dans les structures plissées au nord de la plaine de la Famenne ;

- **Failles Ft** – Failles tardives. Les failles regroupées dans cet ensemble correspondent à des failles subverticales, généralement de direction nord-sud. Elles recoupent l'ensemble des structures plissées et faillées et sont les principaux guides du ressaut hydrologique, au moins en surface.

Le fichier MapInfo est ensuite exporté sous Geomodeller. Les failles sont référencées selon leur typologie, les relations géométriques entre les failles qui se touchent sont établies (faille **F'** se terminant sur la faille **F''**).

3.2.2. Données ponctuelles

Les données ponctuelles récupérées sur les cartes géologiques et celles non publiées sont rassemblées dans un fichier points. L'ensemble des points de mesures permettront de déterminer la géométrie des couches. À chaque point de mesure est attribué un code qui correspond à la formation géologique dans lequel a été mesuré le plan de stratification. 1 402 mesures ont été récoltées et rassemblées dans la base de données affleurements sur MapInfo (Figure 14).

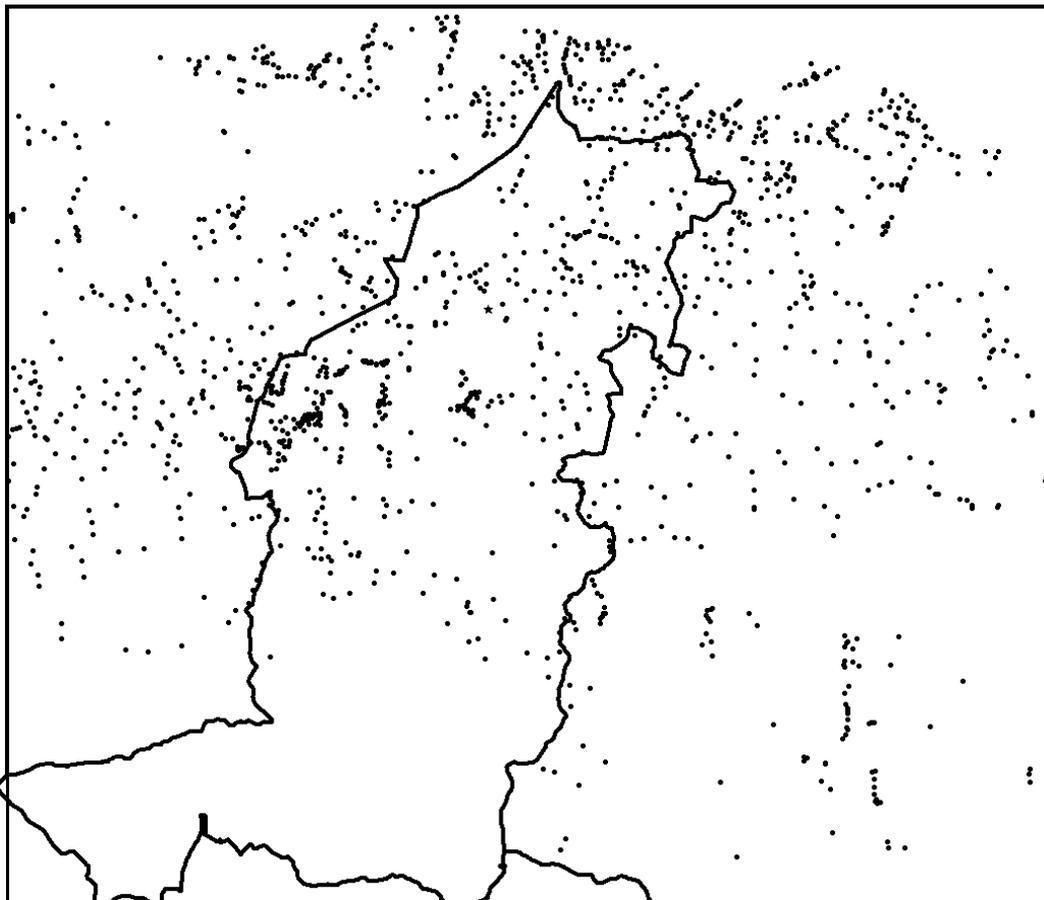


Figure 14 - Localisation des données d'orientation de stratification mesurées sur le terrain et récupérées sur les cartes géologiques belges.

Le fichier MapInfo est ensuite exporté sous Geomodeller. Les données d'orientation sont référencées selon les formations géologiques dans lesquelles elles se situent.

3.2.3. Données de forages et données géophysiques

Les données de forage de Willerzie et de la zone de Focant ainsi que les isobathes des réflecteurs sismiques présents au nord de la zone de Focant ont été utilisées pour contraindre le modèle.

Données géophysiques

À partir des coupes sismiques réalisées dans les années 1980 dans le secteur au nord de la Famenne, des cartes d'isobathes de deux réflecteurs sismiques profonds ont été réalisés. Ces réflecteurs correspondraient selon Raoult (1986) à la réponse sismique de la faille du midi et à un réflecteur plus profond qui correspondrait au contact entre la couverture et son substrat (Figure 15).

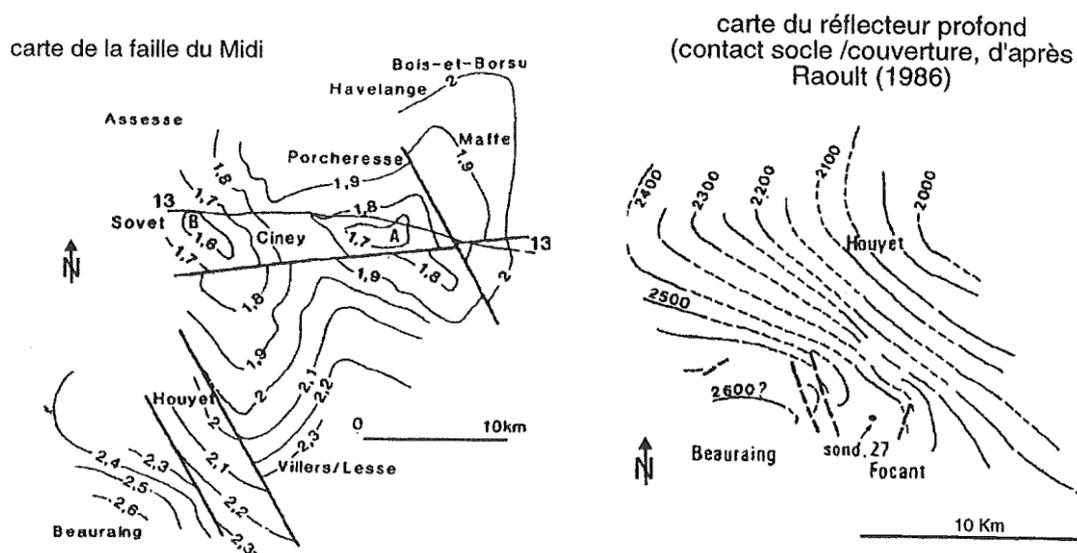


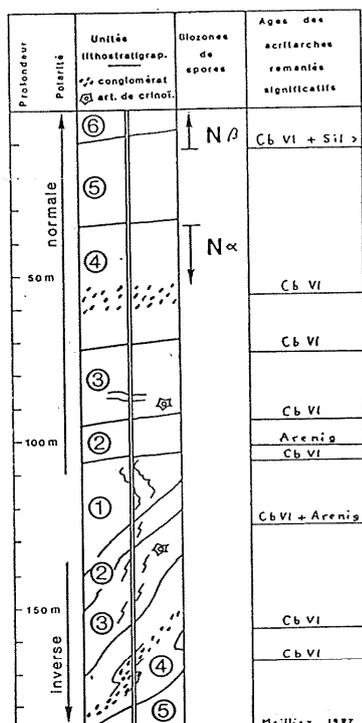
Figure 15 - Cartes géophysiques des deux principaux réflecteurs sismiques identifiés lors de la campagne géophysique des années 80 (d'après Raoult, 1986).

Ces objets géologiques ont servi de guide pour l'interprétation en profondeur dans le secteur de Focant.

Données de forages

Les forages sont trop complexes pour pouvoir réaliser l'étude à l'échelle souhaitée. Il a par conséquent été nécessaire de les simplifier afin de les rendre utilisables dans le cadre de la modélisation.

Le forage de Willerzie comporte deux unités, la partie supérieure est formée par une série en position normale, elle surmonte une série inversée à partir de 110 m de profondeur environ (Figure 16). Une faille plate subhorizontale met en contact les deux unités.



- 1 - Conglomérat à matrice argilo-silteuse, dont les caractères texturaux sont donnés par le figuré ; les grains allongés noirs représentent les grains résédimentés de siltites bleu noir (lithofaciès A, B, D).
- 2 - Grès finement lité, fin à grossier, peu argileux (lithofaciès E, G, H).
- 3 - Grès argileux fin, jaune vert (lithofaciès I).
- 4 - Siltite bleu noir finement litée avec structure en flaser (lithofaciès G et J non disloqués).
- 5 - Les mêmes, mais disloqués par liquéfaction et fluidification.
- 6 - Argilite claire (lithofaciès K).

Figure 16 - Forage de Willerzie (Meilliez, 1989).

Le forage de Willerzie n'a pas été intégré dans le modèle 3D, des faits suivants :

- 1/ faible profondeur ;
- 2/ une seule formation géologique rencontrée (Formation de Mondrepuis) et
- 3/ la géométrie des roches n'est concernée que dans la partie belge de Willerzie.

Toutefois, la géométrie et les objets géologiques qui la caractérisent ont été pris en compte dans le calcul de la géométrie des couches dans le secteur.

Le forage de Focant est bien plus profond : il atteint un peu plus de 3 200 mètres. Il recoupe sur sa quasi-totalité des terrains d'âge Frasnien uniquement, généralement fortement tectonisés. Quatre unités structurales peuvent y être identifiées. L'unité de base est formée par des calcaires du Givetien, en position normale, faiblement pentés, sur laquelle s'empilent trois unités tectoniques globalement en position verticale (Figure 17). Parmi ces trois unités, l'unité intermédiaire est la plus déformée (entre 1 400 et 2 100 m de profondeur). En coupe, le forage de Focant est implanté au sein d'une gouttière structurale complexe formée par un cœur contenant des roches frasnienne pincées entre deux structures anticlinales de vergence opposées. Celle au

sud, à vergence nord, correspond aux unités inférieures U3 et U4, celle au nord, à vergence sud, aux unités U1 et U2 (voir coupe et bloc diagramme de la Figure 17).

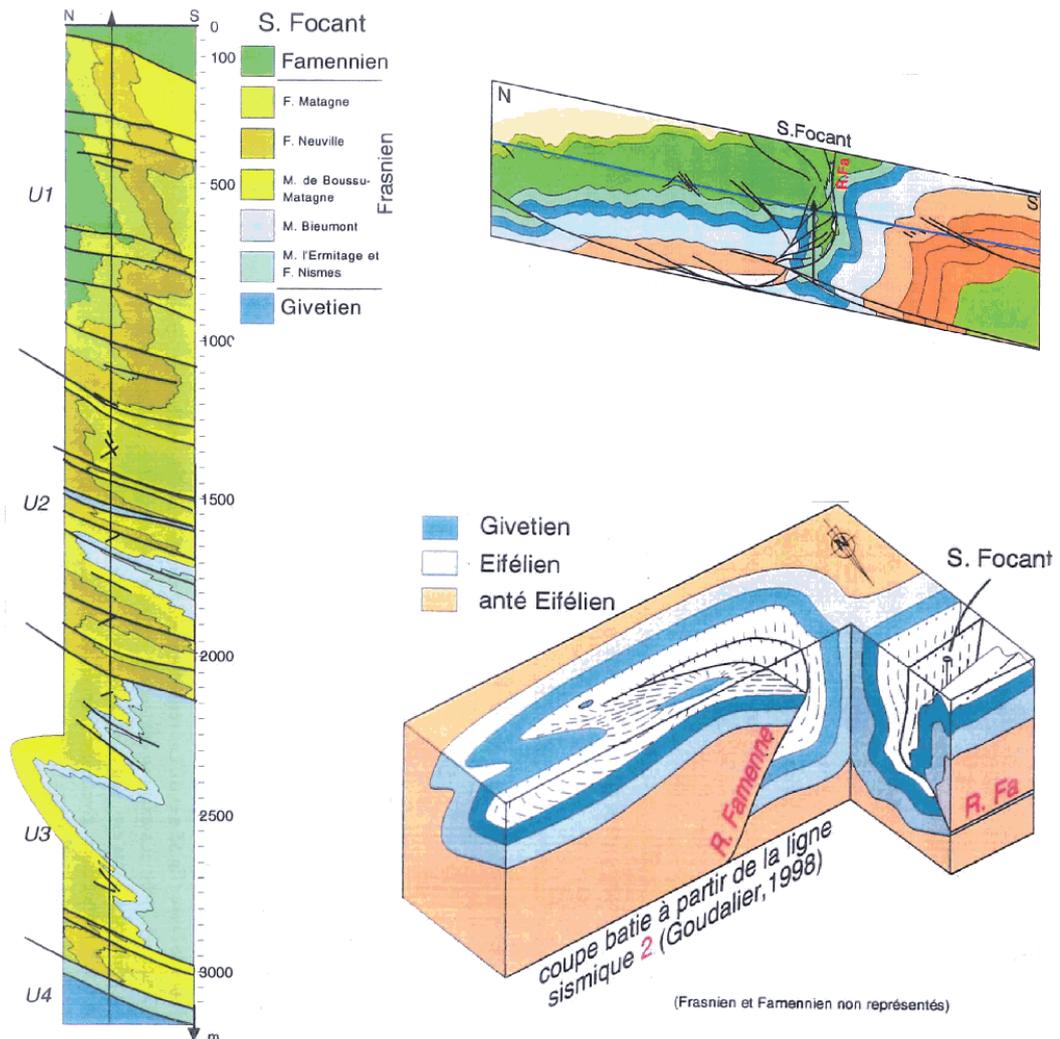


Figure 17 - Coupe verticale du forage de Focant (d'après Lacquement et al., 2001, et de Bouvain et Coen-Aubert, 1997), coupe géologique N-S passant par le forage de Focant et bloc diagramme des relations géométriques avec le forage de Focant (Lacquement, 2001).

Les interprétations faites de ce forage divergent selon les auteurs. Cependant, tous s'accordent pour valider l'empilement de trois unités structurales. Dans le cadre de notre travail et vu l'éloignement de la position du sondage par rapport à la zone d'intérêt, l'objectif a été de faire en sorte que le Givétien soit rencontré vers 3 200 mètres de profondeur, afin de contrôler la géométrie de la retombée anticlinale des plis de dimension kilométrique qui sont situés au sud. Ce forage permet ainsi de mettre en évidence la profonde gouttière qui borde le nord des anticlinaux qui affectent le Givétien et qui ont tendance à fortement plonger vers le nord-est et l'est.

L'ensemble des contacts stratigraphiques référencés dans le Frasnien n'a pas été modélisé du fait de la structure complexe et fortement tectonisée de ces séries le long du forage. Seule la base de la série du Frasnien (contact avec le Givétien) et son toit sont modélisés dans le couloir de la Famenne. À cette échelle, la prise en compte du forage ne peut être plus précise.

4. Réalisation du modèle géologique 3D

4.1. ÉTAPES DE LA MODÉLISATION

Afin de parvenir à la réalisation d'un modèle intégrant l'ensemble des structures sans s'attacher à mettre en prépondérance un secteur par rapport à un autre, il est nécessaire de réaliser plusieurs étapes et d'affiner le modèle peu à peu.

Dans un premier temps, un premier modèle géologique est calculé à partir de l'ensemble des données de contours (failles et contours sédimentaires) sans intégrer les données d'orientation. Une fois ce modèle réalisé, la cohérence entre les niveaux est regardée. L'objectif est de veiller à ce que les contours respectent l'ordre de la pile sédimentaire définie. À ce stade, on regarde la cohérence en global de la géologie du secteur étudié.

Le second stade correspond à l'intégration des données d'orientation. Pour éviter de travailler sur l'ensemble des couches en même temps, on ne sélectionne que quelques niveaux au sein de la pile sédimentaire et des failles réparties sur l'ensemble de la zone étudiée. Cette sélection permet de fixer la géométrie globale du modèle géologique (Figure 18). Pour réaliser correctement le modèle géologique, il est alors préférable d'intégrer peu à peu les données d'orientations, afin de distinguer les mesures qui ont un effet local et celles d'intérêt plus régional. Celles ayant un effet local ne sont pas utilisées car elles viennent perturber les calculs du modèle 3D.

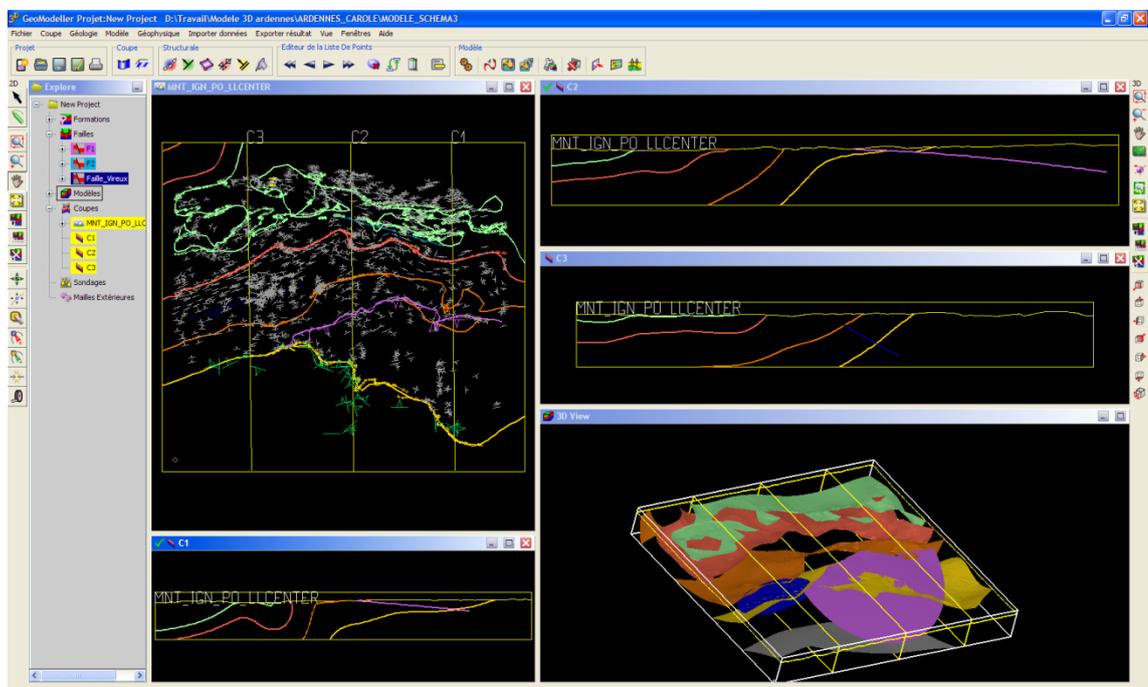


Figure 18 - Fenêtre de travail Geomodeller 3D – modélisation de quatre couches géologiques.

Peu à peu, différentes couches sont intégrées, afin de préciser leur géométrie et permettre de construire le modèle (Figure 19). Ce travail s'effectue progressivement en sectorisant les zones de travail et en améliorant le degré de précision du modèle. Dans le cas de notre étude, le travail a été réalisé par bandes orientées est-ouest. Sur la Figure 20, le travail de modélisation a concerné la bande nord (concerne les niveaux du Frasnien et du Famennien). On notera clairement que plus les données permettant de renseigner les objets géologiques sont intégrées, plus les détails géométriques de ceux-ci sont précis et plus le modèle 3D qui en découle détaillé. Il suffit de comparer les modèles des figures 20 et 22 pour se rendre compte que les quatre niveaux modélisés présentent des détails géométriques beaucoup plus précis sur la Figure 20, alors que sur la Figure 18 la couche géologique est légèrement voilée (niveau verdâtre).

En poursuivant ce travail, le modèle géométrique 3D se construit peu à peu. L'ensemble des mesures d'orientation, les contours de toutes les formations géologiques ainsi que les failles sont intégrés et permettent de renseigner au mieux l'ensemble. Plus le nombre de données intégré s'accroît, plus les géométries en profondeur sont de mieux en mieux contraintes. La réalisation du modèle 3D prend fin lorsque l'ensemble des couches sont modélisées par la prise en compte de l'ensemble des données existantes et qu'en profondeur la géométrie des couches géologiques est jugée cohérente et compatible avec les connaissances de surface d'un point de vue géométrique et dynamique (mode de formation et d'évolution des plis et des failles).

4.2. MODÈLE 3D – QUALITÉ DU MODÈLE

Dans la zone d'étude, la quantité de données permet de dire qu'au niveau de la surface la précision du modèle géométrique est excellente. Ensuite, plus on s'approfondit, plus les imprécisions sur la position des objets géologiques s'accroissent. Sur la qualité de la précision du modèle géologique en profondeur, il est possible de définir trois domaines. Le passage d'un domaine à l'autre est progressif de la surface vers la profondeur et s'identifie ainsi (Figure 21) :

- un premier domaine (domaine 1) correspond à la tranche de terrains située à moins de 500 mètres de profondeur. Dans cette tranche, la quantité de données de surface permet de renseigner le modèle géométrique quasiment en tout point. Pour les failles, le degré de précision est moindre, notamment pour les failles peu pentées ou plates. En effet, une variation de leur inclinaison de quelques degrés peut en profondeur modifier le tracé de plusieurs centaines de mètres ;
- le second domaine se situe entre 500 et 1500 mètres (domaine 2). Dans cette zone, la précision du modèle est moyenne. L'absence de données en profondeur (indirecte ou directe) ne permet pas d'avoir une bonne précision sur la position des couches géologiques. Concernant les failles, les imprécisions sont fortes. Ces objets sont certainement présents mais il est impossible d'en préciser la position (incertitude pluri-hectométrique possible) ;
- au sein du troisième domaine (domaine 3), le plus profond, la position des couches géologiques est incertaine. Le modèle calculé se fait avec des données distantes de

plusieurs centaines de mètres ce qui implique une précision de la même dimension. Seule la géométrie de grande longueur d'onde reste valable.

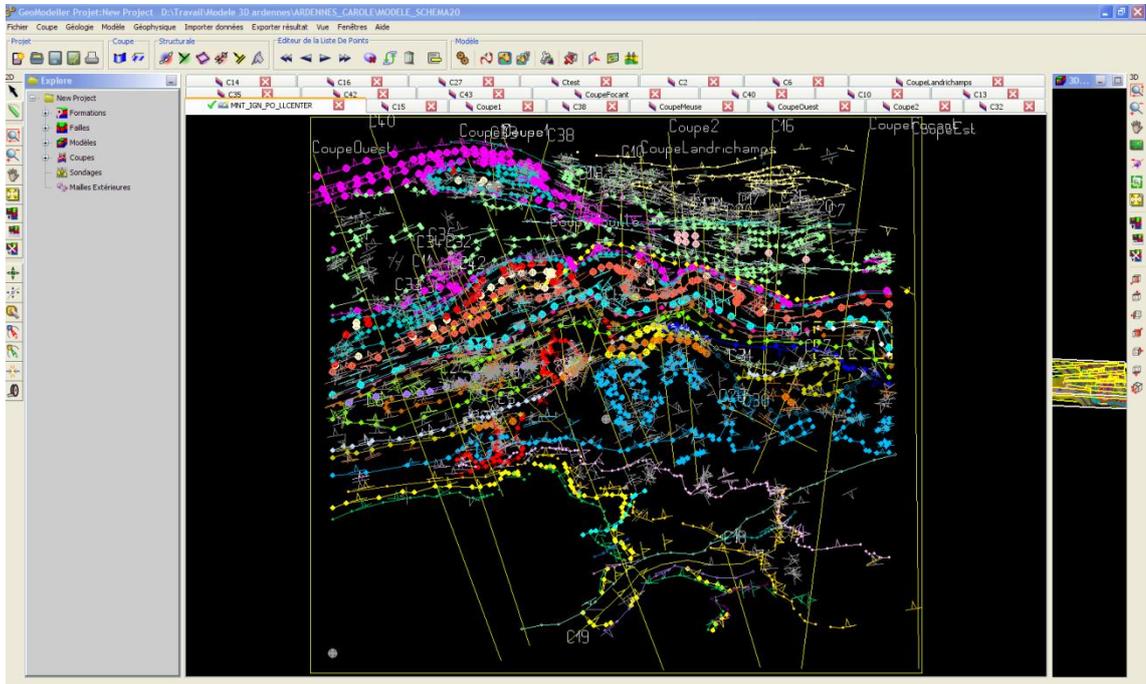


Figure 19 - Fenêtre de travail Geomodeller – intégration des données et calcul du modèle avec 10 couches géologiques.

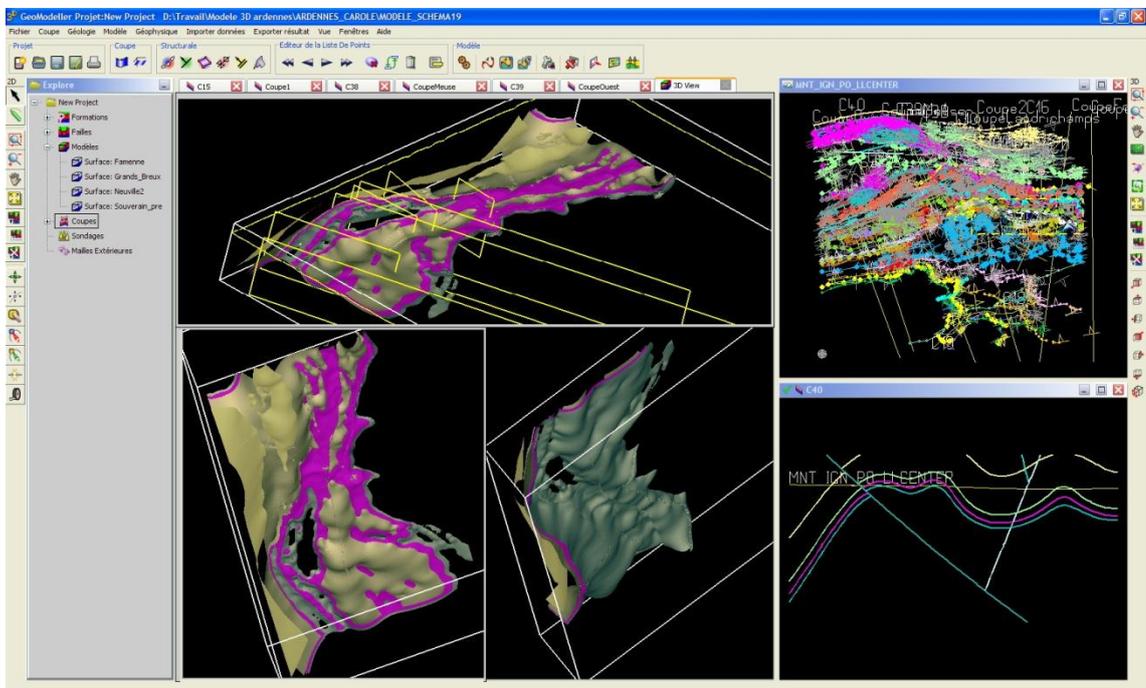


Figure 20 - Fenêtre de travail geomodeller – modélisation de détail de quatre niveaux dans la partie septentrionale.



Figure 21 - Exemple d'une coupe géologique nord-sud habillée des domaines d'incertitudes.

4.3. MODÈLE 3D – VERSION FINALE (CALCUL DE FIN ANNÉE 2011)

Lorsque chaque des étapes décrites dans le processus de réalisation du modèle 3D a été effectuée. Il est alors nécessaire de vérifier que la morphologie des couches, les relations géométriques des couches les unes par rapports aux autres, la géométrie des failles et les relations, entre les failles et leur encaissant, respectent les données de surface et sont cohérentes avec un modèle cinématique de déformation.

Il est alors possible de proposer un modèle géométrique 3D du secteur d'étude. Le modèle a été calculé sur une grande surface afin d'intégrer les observations en Belgique et de contraindre les données en profondeur. L'objectif étant ensuite de se focaliser au territoire de la Communauté de Communes Ardennes Rive de Meuse, un découpage est alors effectué pour visualiser de manière plus aisée la zone d'intérêts (Figure 22). Le nombre de couches ne permet pas de visualiser facilement la géométrie des couches. Il est nécessaire de faire appel aux coupes pour cela ou alors d'ôter du visuel quelques couches géologiques et failles (Figure 23).

Un fichier PDF 3D est également livré dans le cadre de cette étude. Il permet aux utilisateurs de visualiser les surfaces et volumes 3D, d'afficher ou de cacher certaines formations.

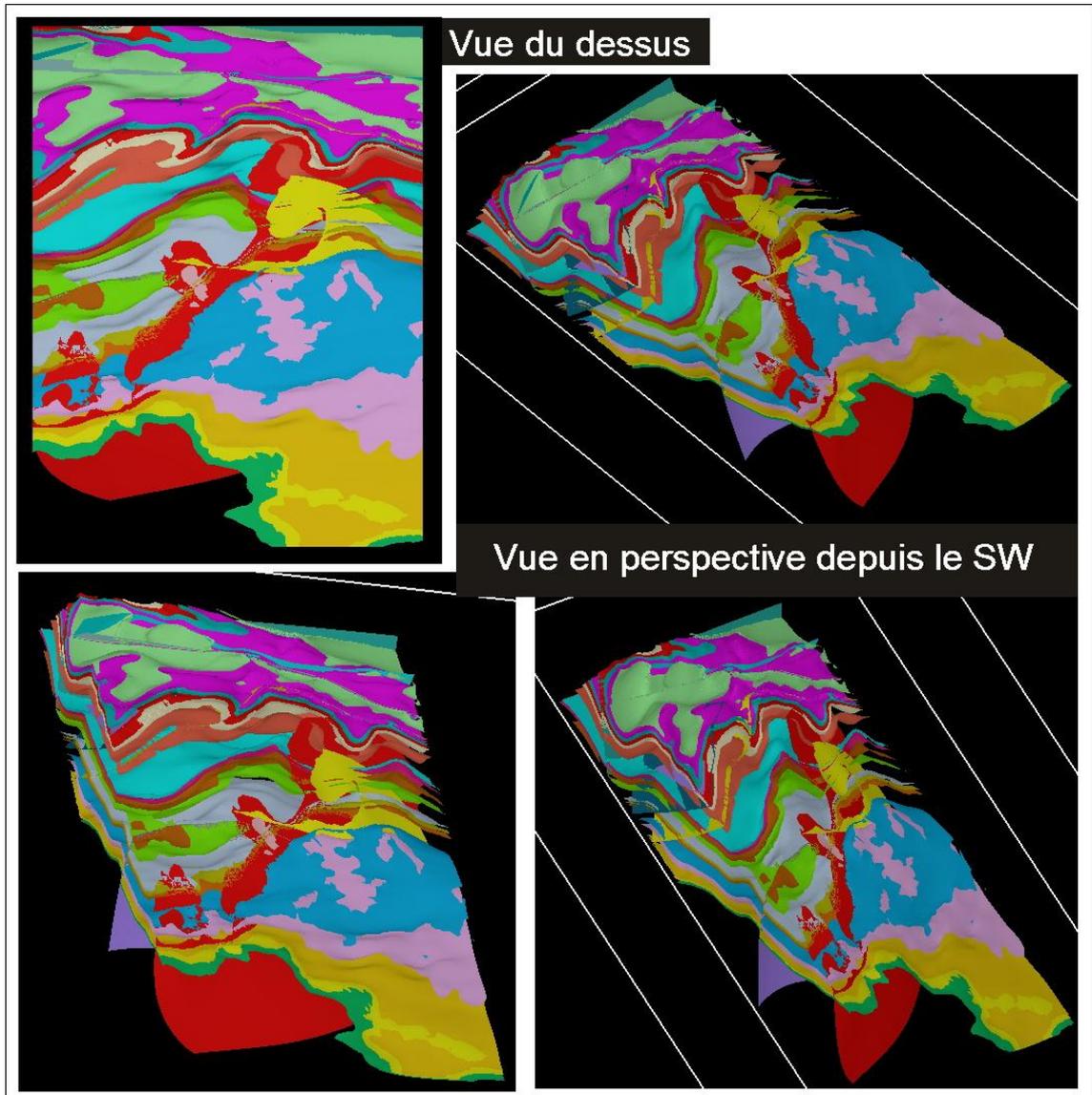


Figure 22 - Série de vues du modèle géologique 3D de la pointe de Givet réalisé à partir de l'ensemble des données disponibles au 30/11/2011.

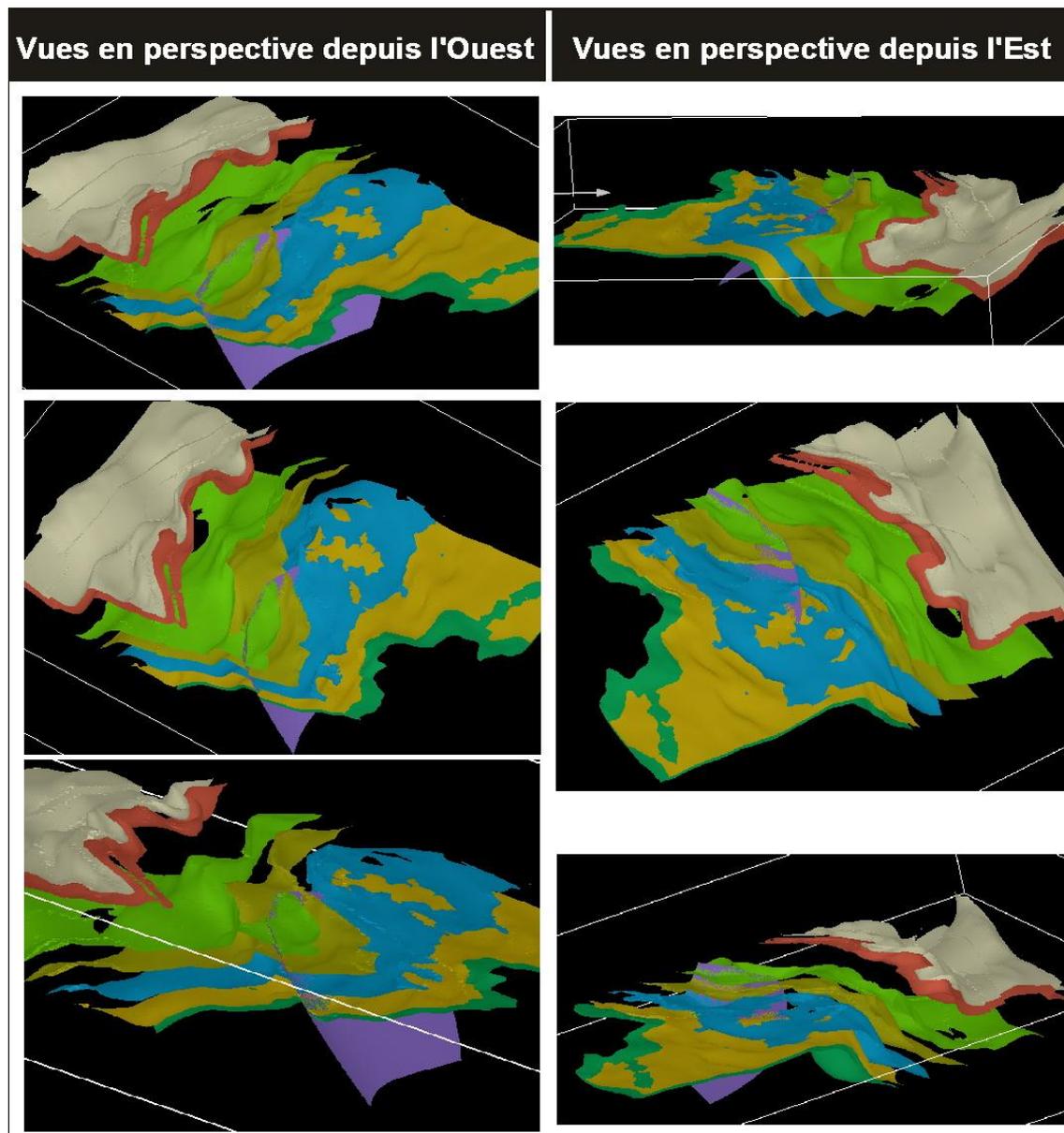


Figure 23 - Série de vues du modèle géologique 3D simplifié à sept couches de la pointe de Givet réalisé à partir de l'ensemble des données disponibles au 30/11/2011.

5. Zones d'intérêts et investigations complémentaires

5.1. ZONES D'INTÉRÊTS

L'objectif du projet est de caractériser le massif rocheux afin de pouvoir identifier les potentialités d'exploitation des eaux souterraines. Il n'y a pas d'informations disponibles en profondeur. Les zones d'intérêts sont donc définies uniquement sur les connaissances de surface.

Les zones d'intérêts ont été définies à partir de trois critères :

- la nature lithologique des roches ;
- les structures tectoniques ;
- la géométrie des corps sédimentaires.

La convergence géographique des critères sera un point à privilégier car cela permettra d'apporter plus de chance pour atteindre les objectifs initialement fixés.

5.1.1. Nature lithologique

Concernant la nature lithologique des roches. La puissante série paléozoïque est caractérisée essentiellement par des roches de nature silico-clastique. Près de 75 % de l'épaisseur totale est constituée de niveaux de grès, siltites et de schistes (Figure 24). Ces niveaux silico-clastiques ne présentent pas d'intérêt dans le cadre d'une recherche en eau souterraine du fait de leur faible perméabilité. En revanche, les niveaux stratigraphiques présentant un intérêt sont les niveaux carbonatés ou les niveaux à ciment carbonaté : ils représentent près de 25 % de l'épaisseur de la pile sédimentaire. Pour pouvoir être intéressants, ces niveaux doivent être suffisamment épais.

Au sein de la série située en France, deux niveaux carbonatés et deux niveaux gréseux à ciment carbonaté sont présents. Les formations géologiques présentant un intérêt sont détaillées ci-dessous (d'après Lacquement *et al.*, 2006) (Figure 24).

- **Les grès d'Anor**, ou Formation d'Anor, constituée par des grès carbonatés blancs (Lochkovien terminal - Praguien inférieur, (épaisseur : 600 m). La formation débute par des shales verts surmontant des quartzites vert pâle du sommet de la Formation de Saint-Hubert et se termine au toit du dernier banc de quartzite vert auquel font suite les shales, siltites et grès carbonatés de la Formation de Villé. Elle est constituée de quartzites, de grès vert, bleu clair à verdâtre, parfois blanc ou crème. Les grès contiennent des galets de shales noir à vert foncé. Les bancs sont généralement lenticulaires et d'épaisseur pouvant atteindre plusieurs mètres. Les bancs gréseux sont intercalés de bancs de shales et de siltites vertes à grises pouvant atteindre 30 cm. Vers le sommet de la formation, et de manière locale, on

observe des shales et des grès noirs en petits bancs (inférieur à 50 cm) sur près d'une vingtaine de mètres d'épaisseur. Sur le terrain, ces shales sont visibles dans la partie sud du méandre de Chooz, à la faveur d'une loupe d'arrachement. Le quart supérieur de la formation contient des niveaux gréseux légèrement coquilliers.

- **La Grauwacke de Hierges**, ou Formation de Hierges. Elle est constituée par des grès, siltites gréseuses à lumachelles, schistes calcaires et calcaires (Emsien supérieur et Eifélien inférieur, épaisseur : 300 m). La Formation de Hierges est composée de deux membres : le membre inférieur dit membre du Bois Chestion, composé de grès quartzitiques, localement fossilifère, à grains fins à moyens de couleur brune et intercalés par deux ou trois intervalles schisteux fins et le membre supérieur dit du Barrage, formé de shales et de siltites pouvant contenir des plages à ciments calcaires. Entre ces sédiments fins s'intercalent des bancs de grès calcaires fossilifères et des grès coquilliers ou non. La limite supérieure de la Formation est située à la base du premier banc de calcaires coquilliers massif caractérisant la base de la Formation de Saint-Joseph.
- **Les calcaires de Couvin**, ou Formation de Couvin. Elle est constituée par des calcaires en bancs centimétriques à décimétriques : calcaires construits et calcaires fossilifères (Eifélien, épaisseur : 50-100 m). Elle est caractérisée par des faciès de type packstone très crinoïdique avec quelques stromatopores et coraux isolés.
- **Les calcaires de Givet** correspondant à l'assemblage de quatre formations géologiques : les formations des Trois Fontaines, du Mont d'Haur, des Terres d'Haur et de Fromelennes. Ces formations sont constituées essentiellement par des calcaires. Dans le détail :
- **Formation des Trois Fontaines** : calcaires gris à *Stringocéphalus Burtini* (Givetien inférieur, épaisseur : 30 à 80 m). Elle constitue la base de la barre carbonatée du Givetien. L'épaisseur de la formation peut rapidement varier : de 80 m à Givet, elle passe à 30 m de puissance à Beuraing. Elle débute au premier banc de calcaire franc au toit des schistes calcaires de la Formation d'Hanonet. Les trois sous-unités de cette formation correspondent à :
 - des calcaires de type wackestone à grainstone gris, crinoïdiques et localement riches en coraux ;
 - un biostrome calcaire en bancs métriques, massifs et lenticulaires (rudstone) à nombreux stromatopores globuleux décimétriques, de crinoïdes et de brachiopodes. Des niveaux calcaires bioclastiques soulignent la stratification qui n'est pas aisée à déterminer au sein des faciès massifs. Ce biostrome est surmonté d'une lumachelle à *Stringocéphalus burtini*, caractéristique de l'étage Givetien. L'épaisseur des deux premières sous-unités est d'environ 20 mètres ;
 - des calcaires gris foncé et gris clair en bancs bien stratifiés, d'épaisseur centimétrique à pluricentimétrique. La série se caractérise par des alternances de calcaires fins, souvent laminaires (algaïres) fréquemment bioturbés et pauvre en macrofaune, de calcaires à débris de coraux ou stromatopores et de calcaires finement laminaires (Préat et Boulvain, 1982). De nombreuses *fenestrae* sont disséminées dans la roche. Localement la dolomitisation est poussée. Quelques niveaux riches en *Stringocéphalus burtini* sont observables. L'épaisseur de cette sous-unité est de 60 mètres.

- **Formations des Terres d’Hairs et du Mont d’Hairs** : calcaires gris noir (Givetien moyen, épaisseur : 170 à 230 m). En raison de la faible densité des affleurements de ces deux formations et des difficultés rencontrées pour les différencier sur le terrain, les formations des Terres d’Hairs et du Mont d’Hairs ont été cartographiées ensembles. La Formation des Terres d’Hairs est essentiellement constituée de calcaires de type wackestone, à gastéropodes. Ces calcaires sont bien stratifiés et présentent parfois un aspect noduleux. La base de la formation correspond à un niveau riche en coraux et en tabulés et se présente sous la forme de « patch-reefs » ou de biostromes (Préat et Boulvain, 1982). L’épaisseur de la formation est de 70 mètres. Le stratotype de cette formation est situé dans les fossés de la forteresse du Mont d’Hairs (Préat et Tourneur *in* Bultynck *et al.*, 1991). Elle est constituée par une alternance de calcaires biostromaux massifs de type packstone, floatstone ou rudstone riche en faune (coraux, stromatopores globuleux et gastéropodes) et de calcaires fins de type wackestone à floatstone en bancs épais. La limite inférieure de cette formation est localisée à la base du premier banc massif à caractère biostromal. Le passage à la Formation de Fromelennes est marqué par une augmentation du caractère argileux des sédiments dans les trente derniers mètres avec l’apparition de schistes calcaires et de calcaires schisteux. La puissance de cette formation est de 160 mètres dans la partie sud de la carte.
- **Formation de Fromelennes** : calcaires gris foncé à Stromatopores (Givetien supérieur, épaisseur : 80 à 135 m). La limite inférieure de cette formation se situe à la base du premier banc calcaire argileux à brachiopodes, surmontant le calcaire compact plus ou moins construit de la Formation du Mont d’Hairs. La formation est caractérisée par une alternance de calcaires construits par des coraux et des stromatopores et de calcaires fins laminés. Sa limite supérieure est située au niveau du dernier banc calcaire situé sous le premier banc de calcaires noduleux riche en gros brachiopodes (zone des monstres). Elle se subdivise en trois membres cartographiés ensemble, avec de la base au sommet :
 - le Membre de Flohimont, épais de 30 m et formé par des calcaires argileux à brachiopodes et coraux interrompus par des passées de schistes ;
 - le Membre du Moulin Boreux, épais de 80 m et formé de calcaires fins parfois dolomitiques dans la partie inférieure du membre et de calcaires construits par des stromatopores ;
 - le Membre du Fort Hulobiet, épais de 25 m et formé de calcschistes et de calcaires argileux noirs laminaires parfois coquilliers.

Au sud, l’épaisseur de cette formation varie entre 110 et 135 mètres. Au niveau du Massif de Philippeville, elle est de 80 mètres. Les calcaires ont été exploités de manière artisanale comme pierre de construction (carrière du Cul d’Houille au sud de Fromelennes).

La Formation de Hierges bien qu’à ciment carbonaté présente un intérêt moindre du fait de la grande proportion d’argile et de silt dans la matrice. La Formation de Couvin présente également un moindre intérêt du fait de sa faible puissance. Ces deux formations sont donc écartées des investigations complémentaires.

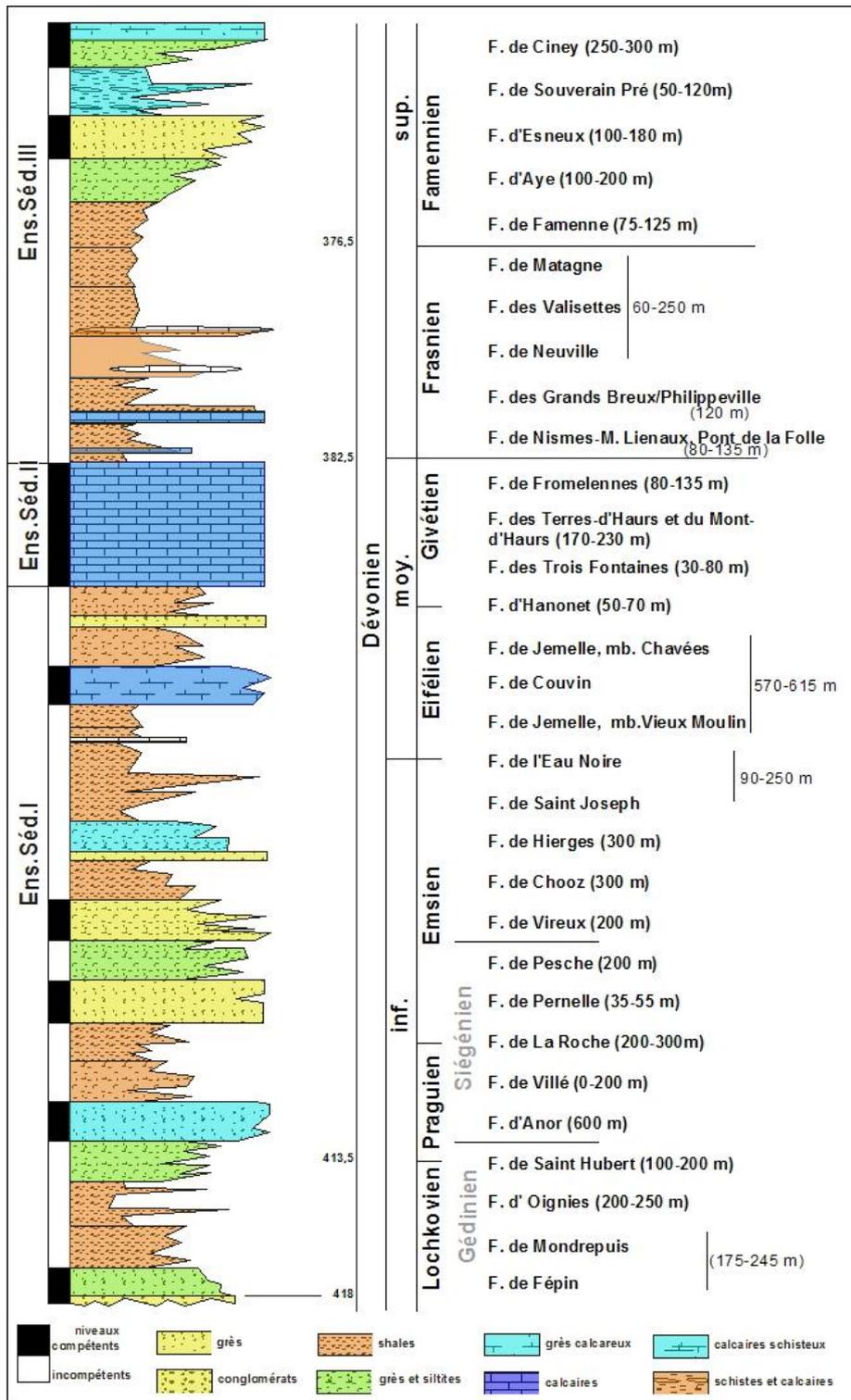


Figure 24 - Colonne litho-stratigraphique du Dévonien et du Carbonifère dans la région de Givet, modifiée d'après Lacquement (2001).

5.1.2. Structures tectoniques

Structures syn-raccourcissement varisque

Dans la région, les structures tectoniques sont très nombreuses et complexes : elles tirent leur origine de la structuration varisque (formation de la chaîne varisque il y a 295 Ma). Elles sont essentiellement planes, subhorizontales et associées au raccourcissement varisque. La plupart du temps, elles sont associées à des structures plissées. L'une des plus belles carrières laissant apparaître cette association de structures plissées et faillées est située en rive droite de la Meuse, face au village d'Aubrives (Figure 25).

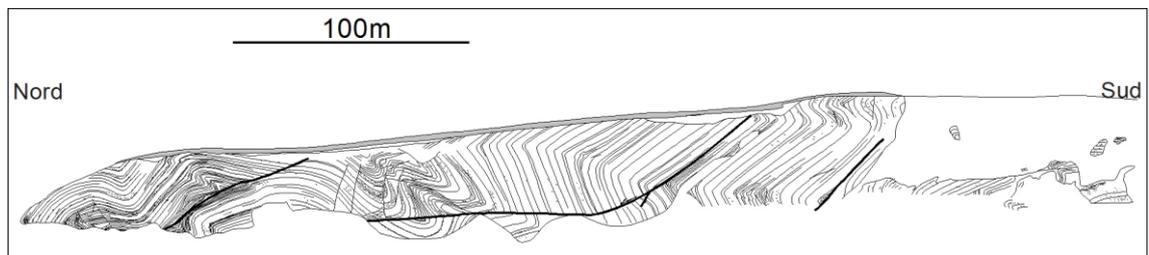


Figure 25 - Carrière d'Aubrives, d'après Lacquement (2001).

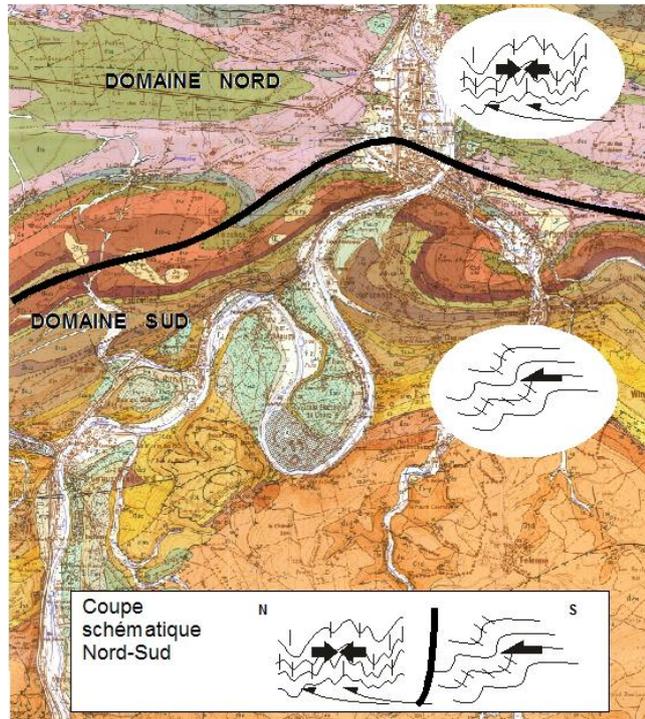


Figure 26 - Limite cartographique entre les deux principaux domaines structuraux.

Les structures planes subhorizontales se rencontrent aisément jusqu'à Givet. Puis elles changent pour devenir subverticales en atteignant la Belgique. Le couloir faillé

passant par Givet est constitué de failles verticales orientées globalement E-W formant un accident majeur séparant deux unités structurales bien différentes (Figure 26). Au sud de cet accident majeur, on trouve une unité structurale constituée des plis déjetés vers le nord associées à des failles plates. Au nord de cet accident majeur, on y observe des failles subverticales et des plis droits.

Le couloir de failles constitue une barrière structurale majeure du fait de la géométrie des structures plissées qu'il sépare ainsi que du fait des lithologies engagées dans la zone faillée. En effet, les formations qui y sont présentes correspondent aux séries les plus argileuses de la pile sédimentaire (frasnienne).

Les structures faillées planes subhorizontales ne constituent pas des « ascenseurs » structuraux qui permettraient à l'eau de circuler aisément dans le massif.

La Faille de Vireux

Dans la région de Vireux, une faille majeure découpe la série paléozoïque, elle borde un anticlinal localisé au nord de la faille (Figure 27 et Figure 28). Cette faille porte le nom de Faille de Vireux. La majorité des auteurs, hormis Asselberghs (1938, 1939 et 1946) et Godefroid et Stainier (1988), s'accordent à la lui donner une pente sud avec un fort pendage au niveau de la vallée de la Meuse. Au sud, les séries décrivent un large synforme à fond plat. Le décalage sur le plan de faille indique que le compartiment méridional s'est affaissé d'au moins 200 à 300 mètres. Sur le terrain, la faille se compose de plusieurs plans présentant parfois des minéralisations de barityne. L'étude de la zone faillée lors de la réalisation de la carte géologique a permis de mettre à jour une histoire complexe de cette zone. En effet, vers l'est, la faille s'aplati pour devenir subhorizontale alors que les plans de stratifications se redressent pour devenir subverticaux (vallée de la Houille).

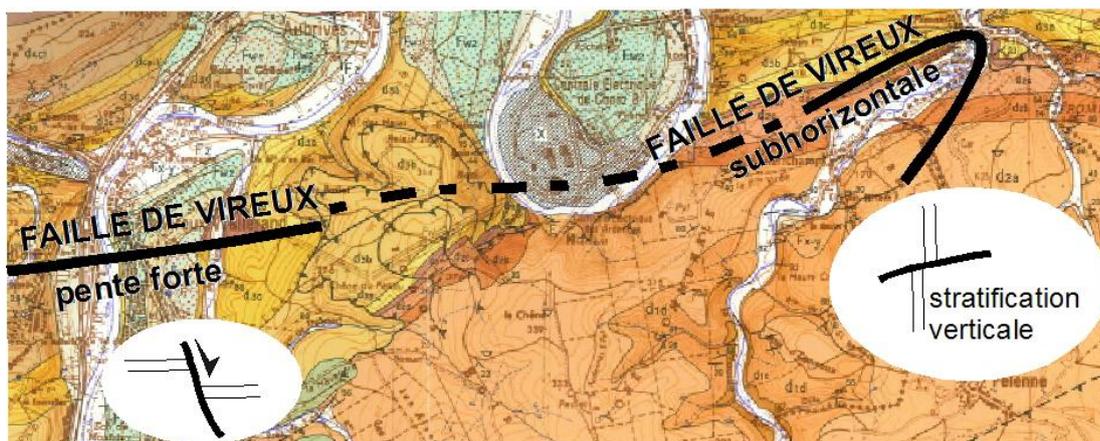


Figure 27 - La faille de Vireux.

Le long du parcours du plan de faille, plusieurs affleurements permettent de reconstituer l'histoire de la faille. Ils permettent d'en conclure que la faille de Vireux correspond à une faille normale précoce synsédimentaire. Au cours du

raccourcissement varisque, elle est déformée. Là où la série sédimentaire reste subhorizontale, la faille reste fortement pentée vers le sud. Lorsque la série sédimentaire est verticalisée, la faille est alors mise à l'horizontale. La zone de faille synsédimentaire est alors vrillée (Figure 29). Lors de la relaxation des contraintes, le plan de faille mis à l'horizontal n'est pas réactivé. Lorsque la faille est suffisamment redressée, elle rejoue alors en jeu normal, ce qui est le cas de la région de Vireux.

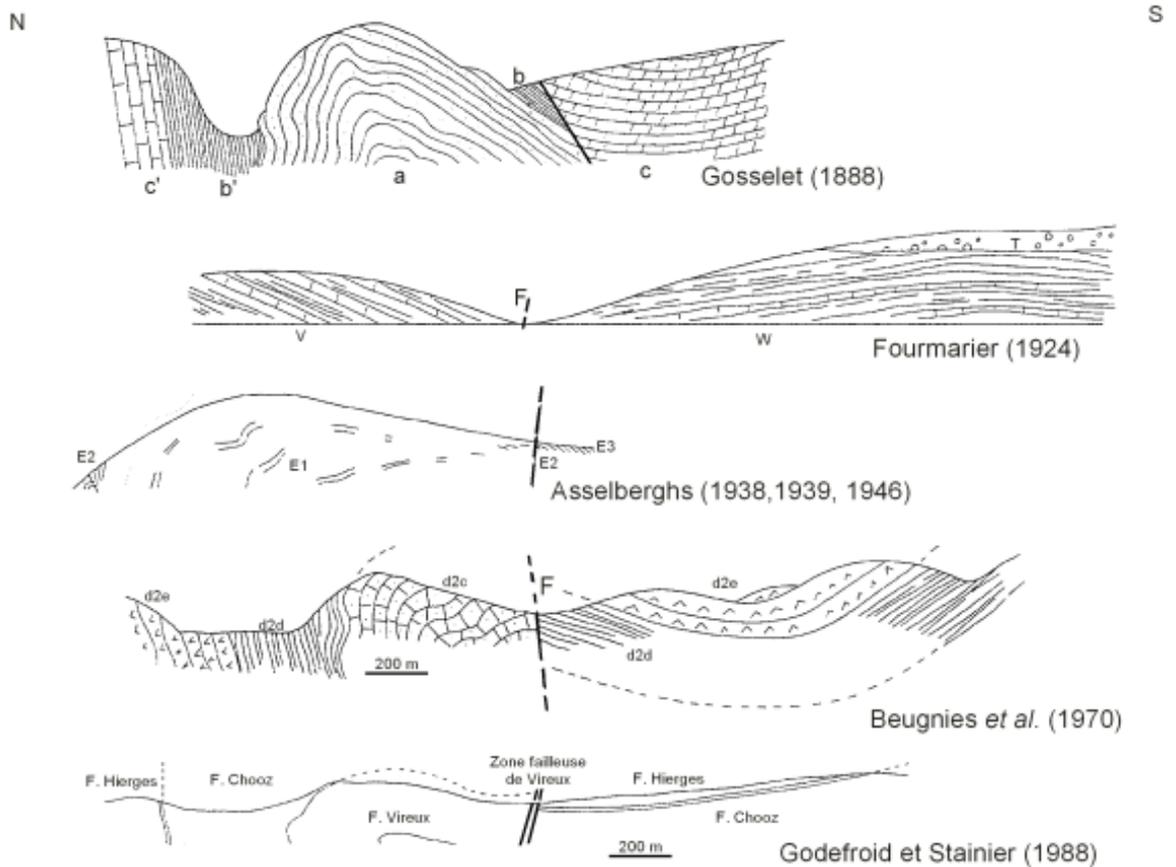


Figure 28 - Différentes propositions de relations géométriques pour la faille de Vireux.

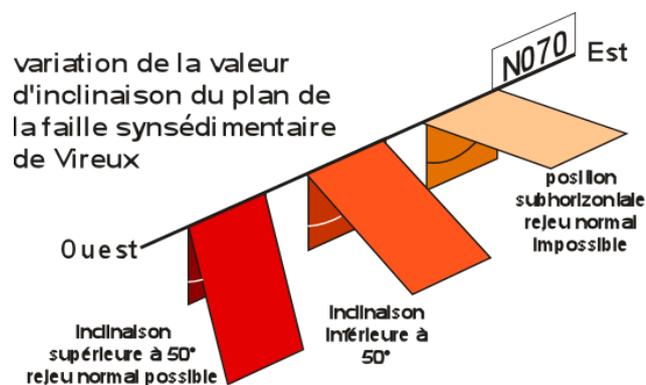


Figure 29 - Variation de la géométrie de la zone de faille de Vireux depuis la Meuse jusqu'à la Houille.

L'importance régionale de cette zone faillée, la présence localement de minéralisations, la réactivation des plans de failles postérieurement au raccourcissement varisque constituent l'intérêt majeur de cet objet dans le cadre de cette étude.

Fracturation nord-sud

Déconnecté des effets du raccourcissement varisque, on note la présence d'une fracturation nord-sud subverticale mal caractérisée sur la carte géologique. Sur le terrain, cette fracturation semble être peu importante en dimension et en intensité. Toutefois, lorsqu'on analyse la carte topographique et notamment le réseau hydrographique en surface on voit clairement que l'ensemble des cours d'eau sont de direction nord-sud (Figure 30), à l'exception des secteurs méandriformes qui existent du fait de la présence de fortes hétérogénéités lithologique et qui guident l'érosion et le parcours du fleuve Meuse. Les tracés linéaires strictement nord-sud de la Meuse et de ses affluents révèlent la présence d'un guide structural majeur qui n'est pas bien mis en évidence sur le terrain. Ainsi, cette fracturation nord-sud serait bien plus importante en intensité (longueur des fractures et largeur d'ouverture des plans) au point d'être le guide principal de l'eau en surface.



Figure 30 - Photographie aérienne de la pointe de Givet (Google Maps) avec mise en évidence des linéaires nord-sud hydrogéologiques (traits blancs).

5.1.3. Géométrie des corps sédimentaires

La réalisation du modèle géologique 3D permet de mettre en évidence les morphologies en grand des structures plissées et faillées (Figure 23).

Deux grandes zones peuvent être définies. Au sud d'une ligne passant par la faille de Vireux, la série sédimentaire est constituée des formations du Dévonien inférieur décrivant globalement un grand monoclinal plissé. Au nord de la ligne passant par la faille de Vireux, les séries du Dévonien moyen décrivent de grands plis de longueur d'onde kilométrique. Ces plis plongent vers le nord-ouest. L'intensité du plongement s'accroît d'ouest en est. L'ensemble de ces structures plissées est dissymétrique à vergence nord-nord-ouest.

Les séries supérieures du Dévonien moyen (à partir du Frasnien) se sont décollées de leur substratum Givetien et présentent des géométries très complexes. Les plis sont droits et ont des orientations transverses aux séries qu'ils surmontent.

5.1.4. Profondeur d'investigation

Dans le cadre d'une recherche en potentialité en eau profonde, il est nécessaire de réaliser des investigations à grande profondeur. La profondeur d'investigation recommandée est de 600 mètres au minimum. L'élévation de la température en fonction de la profondeur (3 degrés Celsius par 100 mètres) permet d'estimer une température d'environ 30 °C des fluides à cette profondeur.

5.1.5. Combinaison des critères et détermination des zones d'intérêts

À partir de l'ensemble des remarques faites ci-dessus et des objectifs recherchés, deux régions ont été sélectionnées. L'identification de ces régions s'est basée sur les critères suivants :

- présence de lithologies cibles retenues (Formation d'Anor et Calcaires du Givetien) ;
- présence d'une fracturation récente, susceptible d'être ouverte ;
- présence de barrières naturelles ;
- géométries des couches et des structures permettant de drainer les eaux vers des points bas ;
- couches cibles situées à au moins 600 mètres de profondeur.

Deux zones d'intérêts sont sélectionnées : la première région est située dans les secteurs des communes de Vireux-Wallerand et Vireux-Mohain, la seconde à l'est de Givet.

La région de Vireux

Elle correspond à la zone située au sud de la Faille de Vireux (Figure 31). Les roches-cibles dans ce secteur sont les grès d'Anor. Ils devraient se situer entre 500 et 1 000 mètres de profondeur. Les plans de stratifications doivent décrire un large synforme à fond plat. La probable fracturation nord-sud subverticale se situant sous la Meuse permet de centrer la zone d'intérêt sur la Meuse.

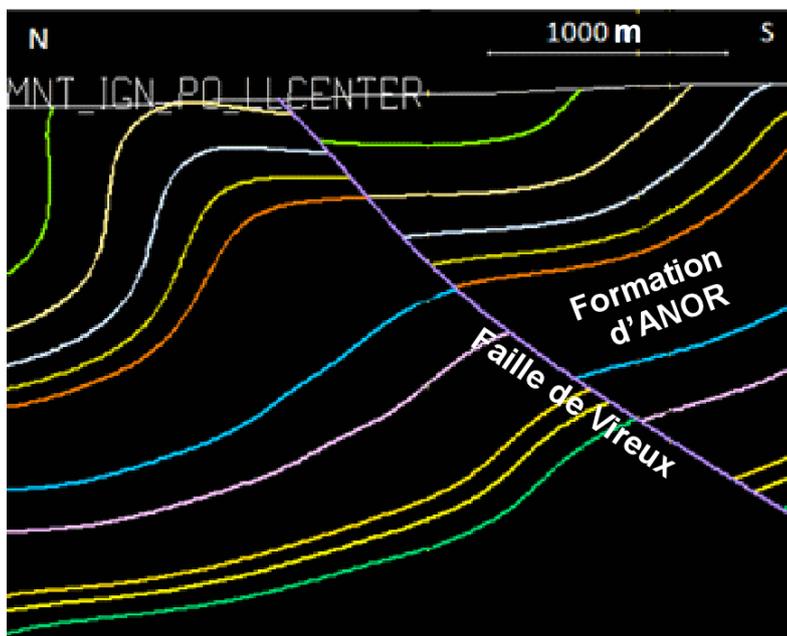
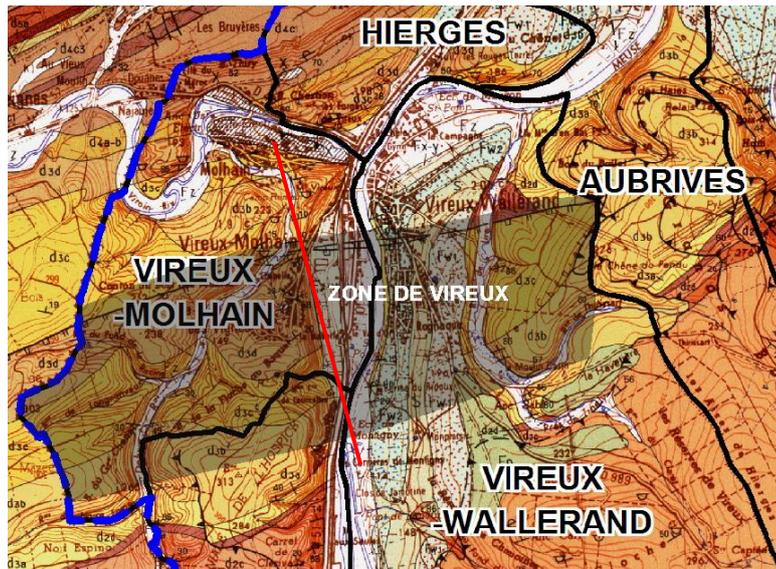


Figure 31 - Zone d'intérêt de Vireux (en grisé sur la carte) et coupe prévisionnelle nord-sud avec la Formation d'Anor située entre les courbes bleue et orange.

La région de Givet

Elle correspond au secteur dans lequel se situe le prolongement de la structure plissée anticlinale de Givet (Figure 32). Les roches-cibles dans ce secteur sont les formations calcaires du Givetien. Selon qu'elles se situent dans un flanc normal ou inverse, les profondeurs atteintes par ces formations peuvent être très importantes (plus de 1 km possible). Elles affleurent au niveau du Mont d'Hairs et entre Flohimont et Fromelennes. La fracturation nord-sud est également susceptible d'être présente dans le prolongement de vallée de la Houille, située au sud de la zone d'intérêt. Cette zone s'arrête au nord lorsqu'on atteint les structures plissées et faillées subverticales qui affectent les séries du Frasnien et du Famennien.

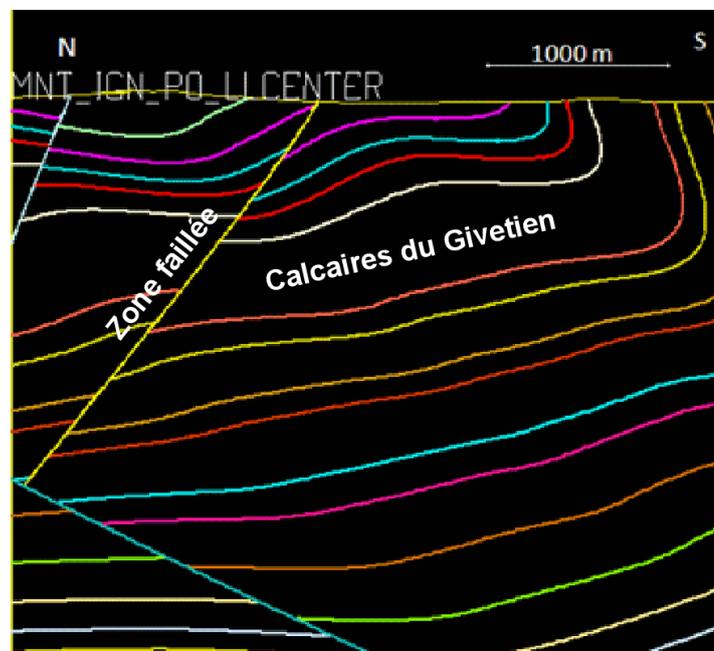
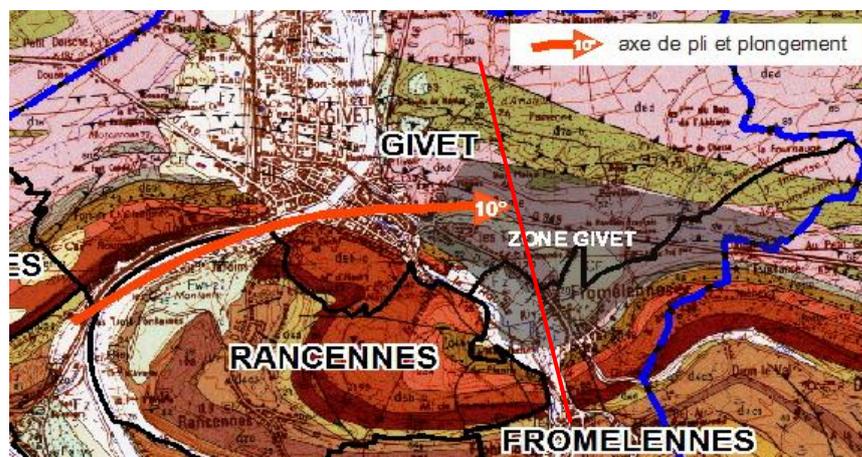


Figure 32 - Zone d'intérêt de Givet (en grisé sur la carte) et coupe prévisionnelle nord-sud avec les calcaires du Givetien situés entre les courbes blanche et orangée.

5.2. FORMULATION DES BESOINS POUR INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES

Le modèle géologique est bâti presque uniquement avec des données de surface. Par conséquent, plus l'on s'éloigne de la surface, moins le modèle est contraint. Pour définir précisément les profondeurs à laquelle seront atteintes les roches-cibles, il est nécessaire d'acquérir des informations plus précises pour déterminer la géométrie en profondeur des structures tectoniques et des corps sédimentaires et ainsi d'en définir leurs extensions.

Pour chacune des zones cibles, il est proposé de réaliser des profils sismiques réfraction à haute résolution. Cette méthodologie se base sur les variations de propagation de la vitesse des ondes sismique en fonction de la nature lithologique des roches.

Cette méthodologie d'imagerie géophysique est indirecte et permet de mettre en évidence la géométrie des roches en profondeur. Plus précisément, cette méthodologie permettrait :

- de caler les profondeurs des formations géologiques-cibles et d'affiner leurs géométries ;
- d'identifier les structures faillées de Vireux pour la zone cible de Vireux et la zone faillée qui affecte le Frasnien et le Famennien pour la zone cible de Givet, les localiser et définir précisément leurs géométries en profondeur ;
- de mettre en évidence les fractures nord-sud.

En parallèle à la détermination précise de la géométrie des structures, il est nécessaire d'acquérir des informations sur les caractéristiques hydrogéologiques des formations-cibles dans leur contexte. En effet, un rapide état des lieux de la connaissance locale met en évidence la faible quantité d'informations les caractérisant. Il serait notamment souhaitable d'acquérir des informations sur les porosités, les perméabilités et le degré de fracturation en profondeur par forage. Leur distribution n'est pas nécessairement uniforme. Par exemple, une formation dotée en surface de propriétés pétrophysiques jugées adéquates ne présente pas systématiquement les mêmes caractéristiques en profondeur du fait des phénomènes d'altération qu'elle aurait pu subir en surface.

La connaissance de la distribution en profondeur de ces caractéristiques hydrogéologiques couplée à la géométrie des couches est donc *in fine* indispensable si l'on veut effectuer des simulations d'écoulements de façon réaliste.

6. Conclusions

Cette étude a permis de réaliser un modèle 3D avec le logiciel Geomodeller 3D de la région de Givet. Il est basé sur les données des cartes géologiques, des données complémentaires publiées permettant de contraindre la modélisation en profondeur ainsi que des données originales non publiées mais acquises lors de la réalisation des cartes géologiques françaises. Au total, près de 1 400 mesures d'orientation ont été utilisées.

Ce modèle a pu être réalisé grâce à une base de données très riche en données structurales et une cartographie très fine des différents niveaux et chevauchements qui les affectent. Ces données ont permis d'aboutir à un modèle assez bien contraint en subsurface (0-500 m). Au-delà et du fait de la quasi absence de données en profondeur (directes ou indirectes), il est largement extrapolé et donc incertain. Aujourd'hui, il illustre notre état de connaissance factuelle sur la géométrie de la géologie du paléozoïque supérieur de la région de la pointe de Givet.

Dans le cadre d'une recherche en eaux souterraines, quatre critères ont été retenus afin d'identifier des zones cibles. Ces critères sont :

- lithologique avec une cible devant se trouver dans une formation permettant la circulation de fluides ;
- géométrique avec une cible devant se situer dans une zone où les eaux circulent vers la zone cible ;
- structurale avec la présence d'une fracturation pouvant faciliter la circulation de fluide ;
- les couches cibles devront se trouver à au moins 600 mètres de profondeur.

À partir de ces critères, deux zones cibles potentielles pour des investigations complémentaires sont identifiées :

- **La région de Vireux** où les roches-cibles sont les grès d'Anor. Situées entre 500 et 1 000 m de profondeur, elles doivent décrire une large synforme à fond plat. La probable fracturation nord-sud subverticale se situant sous la Meuse permet de centrer la zone d'intérêt sur la Meuse.
- **La région de Givet** où les roches-cibles sont les formations calcaires du Givétien. Elles affleurent au sud au niveau du Mont d'Hairs et plongent vers le nord-est. Les profondeurs atteintes par ces formations peuvent être très importantes (plus de 1 km possible). La fracturation nord-sud est également susceptible d'être présente dans le prolongement de vallée de la Houille.

La poursuite de l'étude de recherche en eau souterraine nécessite désormais l'acquisition de données complémentaires afin de préciser la géométrie des objets géologiques et d'acquérir des informations sur les objets ciblés. Dans ce cadre, il est proposé de :

- préciser la géométrie en profondeur des formations géologiques en réalisant des sondages et profils sismiques haute résolution ;
- caractériser les formations géologiques d'un point de vue pétrophysique, y compris en profondeur.

7. Bibliographie

- Asselberghs E.** (1938) - La Faille de Vireux (Ardenne française). *Bull. Soc. Belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie*. T. 48 (2), p. 210-217.
- Asselberghs E., Waterlot G. et Dubar E.** (1938) - Carte géologique de Givet à 1/80 000, n° 15, 2^e édition. Institut de Géographie de Paris.
- Asselberghs E.** (1946) - L'éodévonien de l'Ardenne et des régions voisines, Bibliothèque des Sciences Exactes, Louvain, Belgium. 598 p.
- Beugnies A. et Waterlot G.** (1965) - Carte géologique détaillée de la France à 1/50 000, feuille [53] Fumay. – Paris, Service de la carte géologique de la France, 1 feuille, notice 8 p.
- Beugnies A., Bonte A., Dumont P., Parent J., Waterlot G.** (1970) - La faille de Vireux a l'est de la Meuse. *Annales - Société Géologique du Nord*, vol. 90, Part 1, p. 9-14.
- Boulvain F. et Coen-Aubert M.** (1997) - Le sondage de Focant : lithostratigraphie et implications structurales. *Memoirs of the geological Surveys of Belgium*. n° 43, 74 p.
- Calcagno A., Chiles J.P., Courrioux G., Guillen A.** (2008) - Geological modelling from field data and geological knowledge. Part I. *Phys. Earth Planet. Interiors* (2008), doi:10.1016/j.pepi.2008.06.013.
- Dumoulin V. et Marion J.-M.** (1997) - Carte géologique de Sautour – Surice, 58/1-2 à 1/25 000. Région Wallonne. 103 p.
- Dumoulin V. et Coen M.** (2008) - Carte géologique d'Olloy-sur-Viroin – Treignes, 58/5-6 à 1/25 000. Région Wallonne. 103 p.
- Godefroid J. et Stainier P.** (1988) - Les Formations de Vireux et de Chooz (Emsien inférieur et moyen) au bord sud du synclinorium de Dinant entre les villages d'Olloy-sur-Viroin (Belgique) à l'ouest et de Chooz (France) à l'est. Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique. *Sciences de la Terre*, vol. 58, p. 95-173.
- Gosselet J.** (1888) - L'Ardenne. *Mém. Serv. carte Géol. France*. 881 p.
- Goudalier M.** (1998) - Dolomitisation de calcaires du Frasnien moyen de la Belgique : contrôle sédimentaire, diagénétique et tectonique. Thèse de l'Université de Lille 1, 185 p.
- Fourmarier P.** (1924) - La Faille de Vireux. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*. T.XLVII, 3 livraisons, p. B229-231.

Hakim M. (2008) - Caractérisation cartographique d'une différenciation verticale et horizontale de la déformation : application à la couverture sédimentaire de la plateforme ardennaise. Thèse de l'université des sciences et technologies de Lille. 209 p.

Lacquement F. (2001) - L'Ardenne Varisque. Déformation progressive d'un prisme sédimentaire pré-structuré, de l'affleurement au modèle de chaîne. Publication n° 29 de la Société Géologique du Nord. 285 p.

Lacquement F., Averbuch O., Mansy J.-L. Szaniawski R., Lewandowski M. (2005) - Transpressional deformations at lateral boundaries of propagating thrust-sheets: the example of the Meuse Valley Recess within the Ardennes Variscan fold-and-thrust belt (N France–S Belgium). *Journal of Structural Geology*, Vol. 17, Iss. 10, p. 1788-1802.

Lacquement F., Mansy J.-L., Meilliez F., Van Vliet Lanoë B. (2006) - Notice explicative de la feuille de Givet à 1/50 000. BRGM, 64 p.

Lajaunie C., Courrioux G. and Manuel L. (1997) - Foliation fields and 3d cartography in geology: principles of a method based on potential interpolation. *Mathematical Geology* 29, p. 571-584.

Lemonne E. et Dumoulin V. (1998) - Carte géologique d'Agimont – Beauraing, 58/3-4 à 1/25 000. Ministère de la Région Wallonne. 66 p.

Mansy J.-L., F. Lacquement, Meilliez F. et Van Vliet Lanoë B. (2006) - Carte géologique à 1/50 000 de Givet. BRGM.

Meilliez F. (1989) - Importance de l'Événement calédonien dans l'Allochtone Ardennais. Essai sur une cinématique Paléozoïque de l'Ardenne dans la chaîne varisque. Thèse de doctorat ès Sciences de l'Université du Maine, 8 septembre, 519 p.

Préat A. et Tourneur F. (1991) - Formations d'Hanonet, de Trois-Fontaines, des Terres d'Haus et du Mont d'Haus. In P. Bultynck, M. Coen-Aubert, L. Dejonghe, J. Godefroid, L. Hance, D. Lacroix, A. Préat, P. Stainier, Ph. Steemans, M. Streel & F. Tourneur : Les Formations du Dévonien Moyen de la Belgique. Commission Nationale de Stratigraphie du Dévonien, p. 45- 59, Ministère des Affaires Economiques, Administration des Mines. Mémoire n° 30 pour l'Explication des Cartes Géologiques et Minières de la Belgique.

Préat A. et Boulvain F. (1982) - Étude sédimentologique de calcaires Givetien à Vaucelles (bord sud du synclinorium de Dinant). *Ann. Soc. géol. Belg.*, 105, p. 273-282.

Raoult J.F. (1988) - Le front varisque Nord de la France : Interprétation des principales coupes d'après les profils sismiques, la géologie de surface et les sondages. Profil Nord de la France. *Edit. Technip*, p. 171-196.



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

Service géologique régional Champagne-Ardenne
Pôle technologique Henri Farman
12, rue Clément Ader, BP 137
51685 – Reims Cedex 2 – France
Tél. : 03 26 84 47 70