

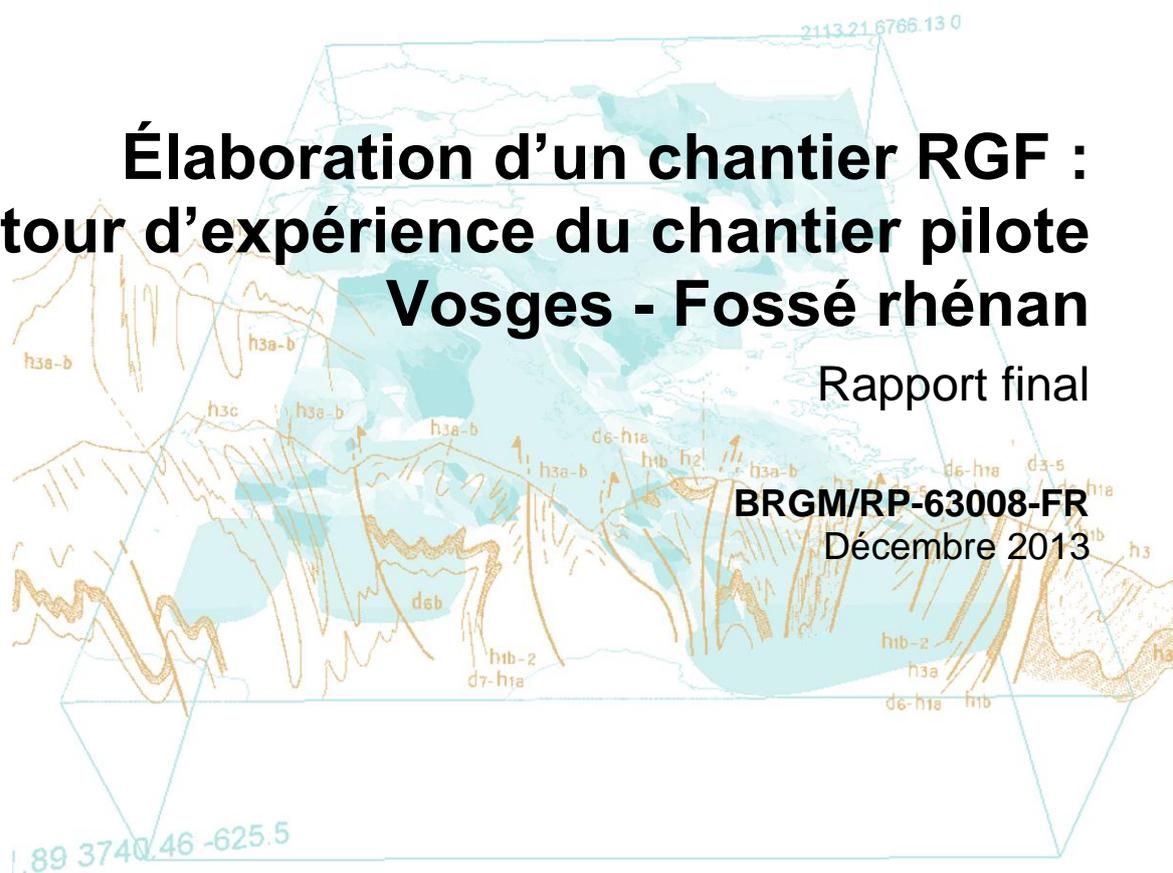


Élaboration d'un chantier RGF : retour d'expérience du chantier pilote Vosges - Fossé rhénan

Rapport final

BRGM/RP-63008-FR

Décembre 2013



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Élaboration d'un chantier RGF : retour d'expérience du chantier pilote Vosges - Fossé rhénan

Rapport final

BRGM/RP-63008-FR

Décembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Recherche scientifique du BRGM 2012-2013

**S. Gabalda, Y. Vernhet, D. Rambourg, C. Prognon, P. Chevremont,
L. Capar, G. Courrioux, A. Guillen, A. Leynet, G. Martelet,
B. Le Bayon, T. Baudin, D. Allier, L. Beccaletto, N. Charles,
D. Dessandier, C. Dezayes, A. Roullé, F. Tertre**

Avec la participation de :

C. Allanic, A.-G. Bader, G. Badinier, G. Bertrand, H. Berthier, O. Bouc, F. Cagnard, D. Cassard, F. Chapuis,
F. Chêne, D. Cruz-Mermy, J.-C. Gallas, S. Guignat, Y. Husson, C. Joannes, F. Lacquement, E. Lasseur, C. Loiselet,
V. Mardhel, F. de Martin, D. Michea, D. Montfort-Climent, J.-L. Nagel, F. Paquet, F. Pasquier, J. Pouderoux, F. Quesnel,
P. Rossi, O. Serrano, B. Tourlière, E. Vanoudheusden et A.S. Tabaud, E. Skrzypek, K. Schulman (Univ. Strasbourg)

<p>Vérificateur :</p> <p>Nom : BAUDIN T.</p> <p>Fonction : Resp. Scientifique de Programme</p> <p>Date : 13/10/2014</p> <p>Signature : </p>

<p>Approbateur :</p> <p>Nom : BONIJOLY D.</p> <p>Fonction : Directeur Adjoint DGR</p> <p>Date : 22/10/2014</p> <p>Signature : </p>

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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Remerciements

Démonstrateur RGF est un projet collaboratif entre le BRGM, l'Université de Strasbourg, l'École et Observatoire des Sciences de la Terre, le Service Géologique Tchèque, le Programme Interreg - Groupe GeORG et Géoderis.



Mots-clés : RGF, Démonstrateur, Mise en cohérence de données, Lexique hiérarchisé, Base de données, Modélisation 3D, Vosges, Fossé rhénan.

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

S. Gabalda, Y. Vernhet, D. Rambourg, C. Prognon, P. Chevremont, L. Capar, G. Courrioux, A. Guillen, A. Leynet, G. Martelet, B. Le Bayon, T. Baudin, D. Allier, L. Beccaletto, N. Charles, D. Dessandier, C. Dezayes, A. Roullé, F. Tertre (2013) - Élaboration d'un chantier RGF : retour d'expérience du chantier pilote Vosges - Fossé rhénan. Rapport final. BRGM/RP-63008-FR, 238 p., 128 fig., 14 tab., 1 dvd.

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le Démonstrateur RGF sur la région Vosges - Fossé rhéna est la première étape dans la mise en œuvre du Référentiel Géologique de la France (RGF). L'objectif est de mettre au point une méthodologie cohérente en vue du déploiement du RGF sur l'ensemble du territoire français et convaincre, les ministères de tutelle du BRGM, la communauté scientifique et industrielle des géosciences, du bien fondé d'un tel programme. La région Alsace a été choisie pour réaliser ce le démonstrateur, car il s'agit d'un territoire bien documenté grâce aux nombreuses recherches qui y ont été conduites récemment : deux thèses sur les Vosges, projet Interreg GeORG, projet BRAR (Banque Régionale de l'Aquifère Rhéna), pour le Fossé rhéna.

a) Traitement des données géologiques et valorisation d'une base de données dédiée

Dix-huit mois ont été dédiés à la mise au point du démonstrateur RGF. Son élaboration a fait appel à trois actions majeures :

- la proposition et le test « grandeur nature » d'une méthodologie de traitement des données en vue de leur mise en cohérence dans les trois dimensions de l'espace ;
- le traitement de ces données géologiques sélectionnées parmi celles existantes sur le territoire Vosges - Fossé rhéna en vue de leur intégration dans le futur RGF ;
- la valorisation de la base de données B2D - RGF qui permet de stocker et gérer l'information du RGF et dont la conception a débuté en 2009.

b) Intérêts démontrés lors du colloque RGF – juin 2013

Présenté en juin 2013 à la Cité des Sciences et de l'Industrie (Paris) ainsi qu'au BRGM, (Orléans et régions), le démonstrateur RGF a permis de tester la faisabilité du RGF et de proposer les étapes de mise en œuvre depuis la collecte des données, jusqu'à leur valorisation en restituant des produits cartographiques et modèles numériques, multi-échelles, cohérents, pour une diversité de thématiques importante.

Ce projet a également montré l'intérêt du RGF pour la plus-value scientifique dans le domaine des géosciences et dans plusieurs cas d'application de celles-ci : risque géologique, gestion de l'eau et des ressources minérales, géothermie, après-mine.

Les programmes, les présentations, les posters et animations vidéo présentés lors de la démonstration sont disponibles sur le DVD joint à ce rapport.

Une page d'information internet dédié au démonstrateur et à ses événements est accessible via les adresses suivantes :

- <http://www.brgm.fr/content/referentiel-geologique-france> ;
- <http://www.brgm.fr/content/demonstrateur-rgf-vosges-fosse-rhenan>.

Avertissements

Compte tenu du délai de un an et demi, ce projet **ne doit pas être considéré comme un véritable chantier**. Le démonstrateur ne prétend pas fournir l'intégralité des données disponibles dans le secteur d'étude. Il a été réalisé sur la base d'une sélection de données traitées et strictement nécessaire à la démonstration du RGF. De même, les produits dérivés du RGF (construits à partir de ces données) ont été développés pour répondre aux besoins de la démonstration, d'autres applications sont réalisables.

Du point de vue méthodologique, les étapes de mise en œuvre du chantier présentées dans ce rapport sont le résultat du retour d'expérience acquis dans le cadre du démonstrateur par l'équipe de projet. La méthodologie proposée traite **exclusivement de la donnée géologique** et ne prétend pas répondre à tous les problèmes qui pourront se présenter dans le cadre des futurs chantiers. Chaque chantier aura ses spécificités et un contexte d'approche particuliers à prendre en compte. Néanmoins, l'expérience du démonstrateur pose les bases absolument nécessaires pour organiser le travail d'un chantier dans le cadre des traitements de l'information géologique dans le contexte de bassin sédimentaire et orogène.

Toutes les thématiques des géosciences n'ont pas été représentées pour la démonstration des applications et intérêts du RGF. Seuls quelques exemples de problématiques liées aux enjeux sociaux économiques ont pu être abordés sur une période restreinte sans qu'il soit possible de les finaliser comme cela devrait être le cas dans le cadre d'études spécifiquement dédiées.

Si le travail effectué a permis d'initier la démarche RGF pour la région Vosges - Fossé rhénan, les procédures de traitement de la donnée, de productions (cartographie, modélisation 3D, etc..), de valorisation, devront se poursuivre à l'avenir pour cette région.

Des outils de saisie, consultation, sélection, stockage, de la donnée doivent être développés et être opérationnels pour l'initiation de futurs chantiers. Le démonstrateur a été construit sur la base d'outils provisoires développés à la demande en fonction des besoins urgents. Ce fut l'occasion de tester en « grandeur nature » le modèle de base de données B2D - RGF. Dans le même temps, le démonstrateur a permis d'initier une plate-forme de gestion et de partage de ces données et des modèles géologiques associés. Toujours en cours de développement, ce prototype de plate-forme a permis de tester un certain nombre de fonctionnalités, actuellement insuffisamment opérationnelles pour permettre la visualisation complète des données et des modèles, acquis dans le cadre du démonstrateur.

À moyen terme, une interface de consultation, de l'ensemble des outils de traitement et de valorisation des données (extraction, gestion), devrait être mise au point. En attendant ce système, l'équipe de projet a mis en place une application SIG sur la base de données de stockage SIG, afin de valoriser et donner accès à l'ensemble des données du démonstrateur et de ses livrables à tous les agents BRGM. L'accès à cette plate-forme SIG est disponible, via un navigateur internet, à l'adresse suivante : http://srv155.brgm.fr/rgf_demo/.

En attendant la validation des résultats du démonstrateur par le comité scientifique du RGF, ce rapport, le contenu du DVD joint tout comme la plate forme SIG sont à **accès réservé aux agents BRGM**.

Sommaire

Remerciements	4
1. Introduction et présentation du projet.....	15
1.1. CONTEXTE : LE RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE	15
1.1.1. Objectifs et principes généraux	15
1.1.2. Une nouvelle méthodologie.....	16
1.2. CHANTIER PILOTE : VOSGES - FOSSÉ RHÉNAN.....	17
1.2.1. Objectif : passer de la théorie à la pratique	17
1.2.2. Choix du chantier pilote.....	18
1.2.3. Organisation du projet.....	19
1.2.4. Délivrables	23
2. Prototype d'accès et de stockage des données du démonstrateur	25
2.1. LA BASE DE DONNÉES RGF, B2D - RGF	25
2.1.1. Contexte.....	25
2.1.2. Mise en œuvre et contexte technique.....	25
2.1.3. Stockage et outils de mise en cohérence des données du démonstrateur RGF	26
2.1.4. Recommandations et perspectives.....	27
2.2. ACCESSIBILITÉ DU RGF	27
2.2.1. Contexte et mise en œuvre	27
2.2.2. Application Web Cartographique dans le cadre de B2D - RGF	28
2.2.3. Application Web « Viewer 3D »	33
2.2.4. Application SIG démonstrateur.....	37
2.3. DONNÉES SIG.....	43
2.3.1. Contexte.....	43
2.3.2. Catalogue des couches SIG et structure	43
3. Inventaire et collecte de l'information	47
3.1. OBJECTIF	47
3.2. TYPES DE DONNÉES	47
3.2.1. Données cartographiques	47
3.2.2. Données ponctuelles : observations de terrain et analyses	51
3.2.3. Données de forages.....	52
3.2.4. Notions de « validation »	55
3.2.5. Donnée géophysiques.....	57
3.2.6. Données bibliographiques.....	63

3.3. RECOMMANDATIONS ET BESOINS POUR LES FUTURS CHANTIERS	64
4. Hiérarchisation et classification : prérequis à la « mise en cohérence »	65
4.1. GÉNÉRALITÉS.....	65
4.1.1. Pourquoi Identifier, classifier et hiérarchiser l'information géologique ?	65
4.1.2. Constitution des lexiques.....	66
4.1.3. Hétérogénéité des cartes géologiques.....	71
4.2. MISE EN OEUVRE DANS LE CADRE DU CHANTIER PILOTE	71
4.2.1. Ensembles géologiques traités	71
4.2.2. Évènements géologiques régionaux	86
4.2.3. Constitution des lexiques « Vosges - Fossé rhénan ».....	88
4.2.4. Préparation à la réalisation de la carte de démonstration du RGF	102
4.3. RECOMMANDATIONS ET BESOINS POUR LES FUTURS CHANTIERS	107
4.3.1. La constitution des lexiques.....	107
4.3.2. Retour d'expérience sur la préparation de la cartographie	109
5. Mise en cohérence	113
5.1. OBJECTIFS	113
5.2. CARTOGRAPHIE	113
5.2.1. Assemblage cartographique	113
5.2.2. Problématique de fusion de cartes d'échelles différentes	118
5.2.3. Résultat	118
5.3. FORAGES	118
5.3.1. Méthode de validation RGF	118
5.3.2. Expérience de validation des logs de forages selon la méthodologie RGF	119
5.3.3. Résultats	128
5.4. INTERPRÉTATIONS SISMIQUES.....	129
5.4.1. Présentation du projet GeORG.....	129
5.4.2. Mise en forme des données.....	130
5.4.3. Résultats	133
5.5. DONNÉES D'OBSERVATION DE TERRAIN.....	134
5.6. PLUS VALUES DE LA MISE EN COHÉRENCE	136
6. Modélisation 3D.....	139
6.1. GÉNÉRALITÉS.....	139
6.2. MODÉLISATION DANS LE RGF	140
6.3. MODÈLE RÉGIONAL	143
6.3.1. Objectif	143
6.3.2. Données	143

6.3.3. Méthodologie	151
6.3.4. Le modèle	152
6.3.5. L'inversion gravimétrique du modèle : une falsification nécessaire !.....	159
6.3.6. Conclusion	168
6.4. MODÈLE DE SÉLESTAT	168
6.4.1. Modélisation des dépôts superficiels allochtones (GDM).....	169
6.4.2. Modèle global.....	174
6.5. MODÈLE DE PECHELBRONN	175
6.6. MODÈLE DE MULHOUSE	176
6.6.1. Objectif.....	176
6.6.2. Réalisation	176
6.6.3. Application	177
6.7. RETOUR D'EXPÉRIENCE ET RECOMMANDATIONS	178
6.7.1. Validation des données	178
6.7.2. Incertitudes	178
6.7.3. Identification des structures à différentes échelles	179
6.7.4. Utilisation des levés géophysiques.....	179
6.7.5. Les outils.....	180
6.7.6. Sondages.....	180
6.7.7. Fusion – Mise à jour des modèles.....	181
6.7.8. Stockage des modèles et métadonnées.....	181
6.7.9. Dans quel but ?.....	182
6.7.10. Diffusion du modèle	182
7. Exemple de plus-value scientifique et socio-économique du RGF.....	183
7.1. GÉOMÉTRIE ET CONTRÔLE STRUCTURAL DES DÉPÔTS SYN-RIFTS DU FOSSÉ RHÉNAN (BRGM/RP-62896-FR).....	183
7.1.1. Actions menés dans le cadre du chantier pilote.....	183
7.1.2. Résultats et retour d'expérience.....	183
7.2. GÉOPHYSIQUE RÉGIONALE (GRAVIMÉTRIE, MAGNÉTISME)	184
7.2.2. Mise à jour des jeux de données sous forme numérique et complément d'acquisition gravimétrique	187
7.2.3. Réinterprétation des données gravimétriques et magnétiques	191
7.2.4. Conclusions	198
7.3. RESSOURCES MINÉRALES	199
7.3.1. Actions menées dans le cadre du chantier-pilote	199
7.3.2. Résultats et retour d'expérience.....	199
7.3.3. Recommandations pour les chantiers futurs.....	201
7.4. REFLEXION AUTOUR D'UN VOLET CARRIÈRES ET MATÉRIAUX POUR LE FUTUR RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE (BRGM/RP-62339-FR).....	201

7.4.1. Actions menées dans le cadre du chantier pilote	201
7.4.2. Résultats et retour d'expérience	202
7.4.3. Recommandations pour les chantiers futurs	203
7.5. RISQUE SISMIQUE.....	204
7.5.1. Actions menées dans le cadre du chantier pilote	204
7.5.2. Résultats et retour d'expérience	205
7.5.3. Recommandations pour les chantiers futurs	207
7.6. HYDROGÉOLOGIE : LA BD-LISA ET LE DÉMONSTRATEUR RGF	208
7.6.1. Actions menées dans le cadre du chantier-pilote.....	208
7.6.2. Résultats et retour d'expérience	208
7.6.3. Recommandations pour les chantiers futurs	210
7.7. GÉOTHERMIE.....	210
7.7.1. Actions menées dans le cadre du chantier-pilote.....	210
7.7.2. Résultats et retour d'expérience	211
7.7.3. Recommandations pour les chantiers futurs	211
8. Conclusion.....	213
8.1. RAPPELS	213
8.2. SYNTHÈSE DE LA PROCÉDURE RGF VOSGES - FOSSÉ RHÉNA	213
8.2.1. Étape 1 : Récolte des données (cf. chapitre 3)	213
8.2.2. Étape 2 : Hiérarchisation et classification de l'information (cf. Chapitre 4)	214
8.2.3. Étape 3 : préparation de la cartographie RGF.....	216
8.2.4. Étape 4 : Mise en cohérence et modélisation 3D (cf. chapitre 5 et 6).....	217
8.2.5. Étape 5 : Validation, diffusion	217
8.3. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS	217
8.3.1. B2D - RGF et accessibilité des données RGF (cf. chapitre 2).....	217
8.3.2. Modélisation 3D.....	218
8.3.3. Utilisateurs du RGF	221
8.3.4. Avenir du « chantier » Vosges - Fossé Rhéna	221
9. Références bibliographiques	223

Liste des illustrations

Figure 1 : Emprises du chantier Vosges – Fosse Rhéna.....	18
Figure 2 : Schéma représentant les principales actions testées dans le cadre de l'élaboration du chantier pilote Vosges - Fossé rhéna.	20
Figure 3 : Application cartographique.....	30
Figure 4 : Application cartographique – Fonctionnalité de recherche.....	30
Figure 5 : Application cartographique - Fiche Unités Lithostratigraphiques.....	31

Figure 6 : Application cartographique - Interaction Viewer 3D.....	32
Figure 7 : Application viewer 3D - Visualisation d'un modèle complet avec les sondages de calage.	34
Figure 8 : Application viewer 3D - Visualisation d'une partie de modèle avec les sondages de calage.	34
Figure 9 : Application viewer 3D - Visualisation d'un modèle (coupé).	35
Figure 10 : Application viewer 3D - Fiche de sondage virtuel.	36
Figure 11 : Application viewer 3D - Fiche de coupe virtuelle.	36
Figure 12 : Application SIG du démonstrateur.	38
Figure 13 : Application SIG - Gestionnaire des couches SIG.	39
Figure 14 : Application SIG - Identification des données.	39
Figure 15 : Application SIG - Fonctionnalités de recherche.	40
Figure 16 : Application SIG - Accès aux lexiques RGF.....	40
Figure 17 : Application SIG - Consultation des documents numériques.....	41
Figure 18 : Application SIG - Fonctionnalités d'extraction.....	41
Figure 19 : Application SIG - Fonctionnalité de dessins et annotations.....	42
Figure 20 : Application SIG - Mise en page et impression.	42
Figure 21 - Localisation des trente coupures géologiques à 1/50 000 disponibles dans le cadre du démonstrateur « Vosges - Fossé rhéna ».....	48
Figure 22 - Localisation des sept cartes départementales harmonisées (projet CHARM-BRGM) disponibles dans le cadre du démonstrateur « Vosges - Fossé rhéna ».....	49
Figure 23 - Carte des formations superficielles de la plaine rhénane (projet BRAR).	50
Figure 24 - Exemple de fiche BSS (indice 01983X1112). Forage portant le numéro 4499 dans l'étude réalisée par la SAEM de Pechelbronn, exécuté sur le huitième de carte n° 3 de la coupure à 1/50 000 n° 0198 d'Haguenau.	53
Figure 25 - Carte de localisation des forages de la BSS et du Guichet H présents et sélectionnés sur la zone du démonstrateur « Vosges - Fossé rhéna » (forages traités en rouge, restant à traiter en noir).....	56
Figure 26 : Exemple de pointé d'horizons le long d'une ligne sismique et niveaux repères issus des puits.....	58
Figure 27 : Exemple de côtes (ms temps double) de niveaux repères – (TWT : two way travel time).	59
Figure 28 : Exemple de failles pointées sur une ligne sismique.	59
Figure 29 : Carte d'is anomalies magnétiques, scannée et géoréférencée – lever Bassin d'Alsace-Lorraine, 1956.	60
Figure 30 : Données gravimétriques numériques disponibles dans la Banque Gravimétrique de la France (BRGM).	61
Figure 31 : Exemple d'interprétation structurale régionale, basée sur l'analyse des données gravimétriques et magnétiques permettant de proposer une cartographie structurale de la zone Vosges - Fossé rhéna (Edel et al., 2007).....	62
Figure 32 : Phases de la modélisation géologique par méthodes gravimétrique et magnétique : depuis le modèle de paramètres géophysiques (en haut), sa synthèse (au milieu) et son interprétation géologique (en bas). Exemple le long d'un profil crustal orienté NW-SE depuis le fossé Lorrain jusqu'au Fossé rhéna (Edel et al., 2009).....	63
Figure 33 : Exemple de hiérarchisation de différentes unités lithostratigraphiques depuis le Super-groupe jusqu'au Membre.	69

Figure 34 : Carte géologique simplifiée du massif hercynien (varisque) des Vosges (dans thèse d'A.S. Tabaud, 2012, p. 19).....	74
Figure 35 : Carte des zones lithotectoniques de la Chaîne varisque en Europe (dans thèse d'A.S. Tabaud, 2012, p. 17).....	75
Figure 36 : Carrière de Trapp - Site de Champenay : Grès feldspathiques rouges (Permien) (Y. Vernhet, 2007).....	77
Figure 37 : Grès vosgien (site internet académie Nancy-Metz).....	78
Figure 38 : Grès Vosgien inférieur de Falkenstein (« Couches » de Rehberg ; site internet Académie Nancy-Metz).....	78
Figure 39 - Conglomérat principal (site internet Académie Nancy-Metz).....	79
Figure 40 - Carrière de Niderviller dans le Grès à Voltzia. © Roger Chalot.....	79
Figure 41 - Carrière de Niderviller : Traces d'Équisetites (Grès à Voltzia). © Roger Chalot.....	80
Figure 42 - Carrière de Niderviller. Rameau de Voltzia(Grès à Voltzia). © Roger Chalot.....	80
Figure 43 - Schistes « carton » (Toarcien) de Creveney (carte Vesoul ; site internet de l'Académie de Besançon).....	82
Figure 44 : Les grandes unités géologiques du Fossé rhénan supérieur (d'après Gall, l'Alsace et les Vosges, Ed. Delachaux et Niestlé ; in site internet Lithothèque Alsace de l'Académie de Strasbourg).....	83
Figure 45 : Massif du Hohneck : granite porphyroïde à biotite, muscovite et cordiérite accessoires, de type Bramont – Granites d'anatexie des Vosges centrales (groupe 63) ; (photo de la partie orientale, située dans le Haut-Rhin, P. Chèvremont, 2012).....	90
Figure 46 : Diatexite à enclaves basiques de Kaysersberg, avec relique de paragneiss métatectiques – Unité des migmatites des Vosges centrales (groupe 73) ; (photo prise dans le village de Kaysersberg, Haut-Rhin, par P. Chèvremont, septembre 2012).....	90
Figure 47 : Galets de nature géologique variée dans la vallée du Rhin (Plaine d'Alsace, Haut-Rhin).....	98
Figure 48 : Organisation des événements de différents ordres.....	101
Figure 49 : Extrait du tableau événementiel.....	102
Figure 50 : Localisation des trente coupures géologiques à 1/50 000 disponibles dans le cadre du démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan ».....	104
Figure 51 : Localisation des sept cartes départementales harmonisées (projet CHARM-BRGM) utilisées dans le cadre de l'emprise régionale du démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan ».....	105
Figure 52 : Exemples de discontinuités des contours et des notations en limite de carte (extrait des cartes à 1/50 000 de Bouxwiller n° 197 et de Haguenau n° 198).....	115
Figure 53 : Mise en cohérence cartographique aux normes RGF de la même zone avec intégration de la 2 ^{ème} édition de la carte Haguenau (extrait des cartes à 1/50 000 de Bouxwiller n° 197 et de Haguenau n° 198, 2 ^{ème} édition).....	115
Figure 54 : Carte géologique numérique Vosges - Fossé rhénan : représenté ici à l'échelle du « Groupe » du lexique « ULS » RGF.....	116
Figure 55 : Légende de la carte géologique numérique Vosges - Fossé rhénan : représenté ici à l'échelle du « Groupe » du lexique « ULS » RGF.....	117
Figure 56 : Mise en cohérence sur un log de forage des observations géologiques sur la base du lexique de référence RGF.....	119
Figure 57 - Localisation des forages présents en BSS et disponibles dans le cadre du projet démonstrateur.....	120

Figure 58 : Modèle conceptuel 2D pour la géologie du site de Soultz-sous-Forêts d'après les forages GPK1-4 et EPS1 (C. Dezayes et A. Genter, 2005).	121
Figure 59 : Sondage dans les formations alluviales quaternaires du fossé du Rhin.	123
Figure 60 : Carottes (avec génératrice tracée dessus) de monzogranite porphyroïde du forage EPS1.	127
Figure 61 : Cuttings du forage GPK3, fin de passe à 5 074 m.....	127
Figure 62 : Carte de repartition des forages validés RGF.....	128
Figure 63 : Schéma relationnel des données associées aux forages.....	129
Figure 64 : Tableau de correspondance des niveaux repères dans le projet GeORG et dans le projet RGF démonstrateur.	131
Figure 65 : Exemple de tableau contenant toutes les failles pour une seule ligne sismique.	132
Figure 66 : Schéma relationnel des données sismiques (brutes et interprétées).	133
Figure 67 : Schéma relationnel des couches SIG du regroupement thématique - Observations géologiques et analyses - volet 1.....	134
Figure 68 : Schéma relationnel des couches SIG du regroupement thématique - Observations géologiques et analyses - volet 2.....	135
Figure 69 : Structure de la couche SIG « Affleurement - Mes. Litage ».....	135
Figure 70 : Cartes « évènementielles » - le cycle hercynien du Massif des Vosges.	137
Figure 71 : Cartes lithologiques (nature des roches dominantes : granite, calcaire, etc.).	137
Figure 72 : Données cartographiques et de forages exprimés selon les mêmes types de regroupement (en haut : groupe, en bas : supergroupe).....	138
Figure 73 : Principe de validation suivant un processus itératif avec la modélisation 3D.....	140
Figure 74 : Emprises des modèles réalisés dans le cadre du projet de démonstration : (A) modèle régional, (B) modèle de Sélestat, (C) modèle de Pechelbronn, (D) modèle de Mulhouse..	141
Figure 75 : Modèles 3D du chantier de démonstration RGF « Vosges - Fossé rhénan ».	142
Figure 76 : Localisation des sondages sur l'emprise du modèle régional.....	143
Figure 77 : Extrait de la carte géologique harmonisée RGF géoréférencée dans l'environnement de modélisation.	144
Figure 78 : Identification des structures majeures à l'échelle du modèle régional sur un extrait de la carte géologique.....	145
Figure 79 : Réseau de failles et horizons du Fossé-Rhénan issus du projet GeORG au format Gocad (seule la base du Trias est représentée).....	147
Figure 80 : Coupe NNW-SSE dans les Vosges du Nord, tirée de la thèse É. Skrzypek (2011).....	148
Figure 81 : Coupe NNW-SSE dans les Vosges du Nord, tirée de la thèse É. Skrzypek (2011).....	149
Figure 82 : Coupe N-S dans les Vosges du Centre, tirée de la thèse É. Skrzypek (2011).....	150
Figure 83 : Répartition des données structurales et anisotropie de susceptibilité magnétique.	151
Figure 84 : Pile géologique du modèle régional.	154
Figure 85 : Dalle de granite d'anatexie (violet) plongeant vers le sud.	155
Figure 86 : Illustration de la géométrie en dôme gneissique des gneiss variés (infrastructure).	156
Figure 87 : Modélisation des trajectoires de foliation dans les gneiss variés.....	156
Figure 88 : Ensemble des points de données utilisés pour le modèle structural du Trias et Tertiaire du modèle régional.....	157
Figure 89 : Modèle régional Mésozoïque (a) et Tertiaire (b).	158

Figure 90 : Pile géologique du modèle régional avec les densités associées.	160
Figure 91 : Anomalie gravimétrique de Bouguer ; Effet du Moho ; Résiduelle = Bouguer – Moho.	161
Figure 92 : Anomalie de Bouguer résiduelle (corrigée du Moho) ; Anomalie calculée à partir du modèle.	162
Figure 93 : Illustration de la convergence de l'inversion gravimétrique.	163
Figure 94 : Histogramme de distribution des densités du granite d'anatexie.	164
Figure 95 : Histogramme de distribution des densités des gneiss variés.	164
Figure 96 : Histogramme de distribution des densités des gneiss monotones.	165
Figure 97 : Histogramme de distribution des densités des gneiss Nord.	165
Figure 98 : Modèle de densité gneiss monotones (en haut) + gneiss variés (en bas).	166
Figure 99 : Modèle de densité gneiss Nord.	167
Figure 100 : Modèle de densité granite d'anatexie (ou fondamental).	167
Figure 101 : Emprise et données du modèle local d'alluvions.	169
Figure 102 : Schéma illustratif des relations d'érosion.	170
Figure 103 : Schéma illustrant les inégalités et points de contrainte.	171
Figure 104 : Épaisseur cumulée des alluvions d'après le modèle de Sélestat.	172
Figure 105 : Coupe dans le modèle (exagération en Z de 10x).	172
Figure 106 : Visualisation en trois dimensions du modèle (exagération en Z de 5x).	173
Figure 107 : Pile du modèle local.	174
Figure 108 : Modèle global sur l'emprise dite « locale » de Sélestat.	175
Figure 109 : Emprise et données du modèle de Mulhouse.	176
Figure 110 : Altitude du toit du Tertiaire dans le modèle de Mulhouse.	177
Figure 111 : Exemple d'interprétation structurale régionale, basée sur l'analyse des données gravimétriques et magnétiques permettant de proposer une cartographie structurale de la zone Vosges - Fossé rhéna (Edel et al., 2007).	185
Figure 112 : Phases de la modélisation géologique par méthodes gravimétrique et magnétique depuis le modèle de paramètres géophysiques (en haut), sa synthèse (au milieu) et son interprétation géologique (en bas).	186
Figure 113 : Profil sismique réflexion crustal ECORS-DEKORP - a) Localisation du profil (ligne rouge), b) Line-drawing interprétatif (Edel et Schulmann, 2009).	186
Figure 114 : Plan de position des stations gravimétriques anciennes (points bleus) et des stations acquises dans le projet (cercles colorés), sur fond de carte d'anomalies de Bouguer.	188
Figure 115 : Carte du gradient vertical de l'anomalie de Bouguer (densité 2,6) obtenue par compilation des données anciennes de la BGF, d'autres données anciennes transmises par l'Université de Strasbourg, des données acquises en 2012.	189
Figure 116 : Carte d'anomalies magnétiques, scannée, géoréférencée et anomalies – lever Bassin d'Alsace-Lorraine, 1956.	190
Figure 117 : Carte d'anomalies magnétiques du lever Bassin d'Alsace-Lorraine 1956, après numérisation, interpolation au pas de 500 m et prolongement vers le bas à élévation constante de 200 m au dessus du relief.	190
Figure 118 : a) Carte d'anomalies de Bouguer et interprétation des grands blocs tectonomorphiques de la zone (modifié d'après Edel et Schulmann, 2009). b) Linéaments	

structuraux issus de l'analyse de la carte de gradient vertical des anomalies de Bouguer.....	191
Figure 119 : a) Carte d'anomalies de Bouguer et interprétation des grands blocs tectonométamorphiques de la zone (modifié d'après Edel et Schulmann, 2009). b) Linéaments structuraux issus de l'analyse de la carte de gradient vertical des anomalies de Bouguer.....	192
Figure 120 : Emprise de la zone du chantier Vosges - Fossé rhéna (lignes noires : emprises « régionale » et « locale ») et localisation des coupes gravimétriques régionales modélisées (pointillés noirs).....	193
Figure 121 : Illustration de la procédure suivie pour intégrer les informations de la littérature dans les nouvelles coupes gravimétriques modélisées.....	195
Figure 122 : Coupes gravimétriques modélisées le long des six profils localisés en Figure 120.	198
Figure 123 : Résultats de la thématique « Ressources Minérales » du démonstrateur RGF Vosges - Fossé rhéna.	200
Figure 124 : Illustration des différents niveaux de complexité de données d'entrée des trois actions « risque sismique » menées dans le cadre du démonstrateur RGF Vosges - Fossé rhéna.	204
Figure 125 : Intensité macrosismique (échelle EMS98) calculée à partir des données géologiques disponibles en 2010 (gauche) et celles issues du RGF (droite) pour le même séisme de scénario.....	205
Figure 126 : Résultat de la simulation 3D de propagation d'ondes sismiques sur la zone de Sélestat suite à un séisme de magnitude Mw = 5,0 sur un segment de la faille Rhénane.	206
Figure 127 : Représentation des logs RGF traduit selon les entités BDLISA.	209
Figure 128 : Dimension de profondeur apportée aux entités hydrogéologiques par le RGF.....	209

Liste des tableaux

Tableau 1 : Membres distingués dans la formation « Monzogranite plus ou moins prophyroïde à biotite et fréquente hornblende, de Soultz-sous-Forêts ».....	93
Tableau 2 - Répartition des super-groupes, groupes, formations et membres du lexique « Couverture » du démonstrateur « Vosges - Fossé rhéna ».	94
Tableau 3 : Classification des formations du Régolithe.	99
Tableau 4 : Classification des formations du Régolithe : détail pour le régolithe allochtone.	100
Tableau 5 : Extrait du tableau Excel « liste des formations pour la carte 271 « Molsheim ».....	103
Tableau 6 : Extrait d' un fichier de mise en correspondance des formations observées sur les cartes géologiques.....	106
Tableau 7 - Tableau récapitulatif du nombre de forages validés aux normes RGF, par thématiques, dans le cadre du démonstrateur « Vosges - Fossé rhéna (juin 2012 à octobre 2013).	122
Tableau 8 : Validation d'un sondage dans les formations alluviales du Fossé rhéna : attributions de formations aux passes.	123
Tableau 9 : Extrait du fichier relatif au forage EPS1.	126
Tableau 10 : Correspondance des codes GeORG et des codes RGF.	146
Tableau 11 : Pile du modèle de formations superficielles allochtones.....	170
Tableau 12 : Pile du modèle des dépôts superficiels allochtone de Mulhouse.....	177

Tableau 13 : Les composants d'un environnement de modélisation.	182
Tableau 14 : Tableau récapitulatif des valeurs de densités des roches de la zone d'étude Vosges – Fossé rhénan, relevées dans la littérature.	194

1. Introduction et présentation du projet

Dans ce présent rapport chaque chapitre traite d'une étape spécifique pour la procédure de mise en œuvre d'un chantier RGF. Chacune d'elles développent les méthodologies testées, les recommandations et retour d'expérience pour les futurs chantiers.

Ce chapitre 1 développe le contexte, l'objectif et les livrables du projet. Il présente son organisation, les acteurs du projet et ses collaborations.

Le chapitre 2 présente les moyens en cours de développement, prototypes de stockage, d'organisation et d'accès des données RGF.

Le chapitre 3 concerne les modalités d'inventaires et de collecte de données disponibles dans le cadre d'un chantier régional.

Le chapitre 4 décrit les actions indispensables à mettre en œuvre en préparation de la mise en cohérence des données.

Le chapitre 5 présente la mise en application des méthodes de mise en cohérence sur les données disponibles et ses résultats.

Le chapitre 6 traite de la modélisation 3D intégrée à la méthodologie pour la validation multi-échelles des structures géométriques.

Le chapitre 7, illustre l'intérêt du RGF d'un point de vue de la recherche académique et des exemples d'applications d'intérêt socio-économique pour des thématiques des géosciences diverses.

Le chapitre 8 présente une conclusion générale de ce rapport et une synthèse des recommandations à prendre en compte pour les futurs chantiers RGF.

1.1. CONTEXTE : LE RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

1.1.1. Objectifs et principes généraux

Le Référentiel Géologique de la France (RGF) est le nouveau programme national de « connaissance géologique » du territoire mis en place par le BRGM dans le cadre de sa mission de Service Géologique National. Le RGF prend ainsi le relai du programme du lever de la carte géologique de France à 1/50 000, pour une durée pluri-décennale, et a pour objectif de renouveler la connaissance tri-dimensionnelle du sous-sol sous forme d'une information numérique continue, homogène et cohérente en y associant la dimension temporelle. Le RGF devra aussi intégrer la constante évolution des concepts scientifiques et agréger « en temps réel » les nouvelles acquisitions réalisées par les divers acteurs de la communauté des Géosciences (universitaires, industriels, établissements publics, etc.).

Les ambitions affichées du RGF ne peuvent se mesurer qu'en regard de l'héritage et du bilan que nous lègue le programme de la carte géologique à 1/50 000. Née en 1913, cette œuvre nationale n'a pris son véritable essor que dans les années 1960 (avec la fusion en 1968 du Service de la Carte avec le BRGM) pour s'achever aujourd'hui. Au final, plus de 3 000 géologues ont participé à cette œuvre collective, devenue presque institutionnelle, qui constitue encore aujourd'hui le socle de la connaissance géologique nationale. Les services rendus du

« cinquante-mille » et de ses produits dérivés sont inestimables, mais aujourd'hui, face aux enjeux du troisième millénaire, (sécurité des personnes et des biens face aux risques naturels, gestion des ressources ou de l'environnement ou adaptation aux nouvelles technologies) la carte géologique connaît des limites qu'il nous faut dépasser.

En effet, la demande socio-économique actuelle impliquant les géosciences, porte non seulement sur la mise à disposition de données fiables mais aussi sur la réalisation de modèles géologiques tridimensionnels à des fins de simulations numériques pour mieux gérer le développement et la préservation de notre sous-sol. Quelle que soit la nature de ces besoins (hydrogéologie, géothermie, ressources, risques, ...) la question posée aux géologues demeure néanmoins identique, il s'agit d'offrir une géométrie de plus en plus élaborée des corps géologiques qui composent le sous-sol et de leur affecter des caractères pétro et physico-chimiques de plus en plus fiables. À elle seule, la carte géologique ne suffit plus à satisfaire à ce type de demande. Un nouvel outil, capable de fusionner et de restituer de façon cohérente l'ensemble des données cartographiques, analytiques, ainsi que celles issues des forages ou de la géophysique, est aujourd'hui nécessaire, et c'est au travers du programme RGF que cet outil va prendre forme.

1.1.2. Une nouvelle méthodologie

Le RGF est basé sur le concept de la « mise en cohérence spatiale des données », quelle que soit la source dont elles sont issues. L'idée, simple en apparence, consiste à coder de façon identique et univoque toute unité géologique (formation, contact, faille, ...) figurant sur une carte, un forage, ou un profil sismique interprété. Dans cette procédure, la modélisation 3D peut déjà être considérée non plus comme une finalité mais aussi comme un moyen de tester la mise en cohérence des données. À l'échelle de la métropole, le travail de fusion des données existantes apparaît d'ores et déjà comme une tâche considérable à accomplir : 1 060 cartes géologiques à harmoniser, intégrer et valider plus de 750 000 sondages issus de la Banque de données du Sous-Sol (BSS), plus de 6 000 forages pétroliers profonds, plus de 360 000 km de profils sismiques, auxquels il faut rajouter l'ensemble des autres données géophysiques telles que les cartes magnétiques, gravimétriques ou radiométriques ou autres données géotechniques. Ce gigantesque travail de mise en cohérence des données mettra en lumière les informations obsolètes ou lacunaires qui nécessiteront des remises à niveau. Une telle entreprise ne serait être envisagée sans un programme de recherche conséquent, répondant à des questions scientifiques majeures et pilotant de nouvelles acquisitions de terrain qu'elles soient géologiques ou géophysiques. À l'instar du programme de la carte géologique à 1/50 000, le RGF sera un programme national fédérateur où l'ensemble de la Communauté des Sciences de la Terres sera mise à contribution.

Il est évident que cette communauté française des Géosciences n'est pas suffisamment armée pour mener de front les travaux sur l'ensemble du territoire. La stratégie du RGF est donc de réaliser cette nouvelle couverture géologique par le biais de grands chantiers régionaux. Ces chantiers, échelonnés dans le temps, d'ampleur et de durée variable, constitueront le cœur de l'activité du RGF. Le RGF se déploiera aussi par ailleurs, à travers les divers autres projets du BRGM au service d'opérateurs publics ou privés.

Les chantiers régionaux vont donc impliquer un bon nombre de géologues, toutes disciplines confondues, sur les mêmes objets géologiques et avec des questions scientifiques partagées. Ils seront le lieu d'acquisitions de nouvelles données réalisées dans le cadre de thèses, de masters et de post doc.

L'ensemble de ces travaux de recherche sera mené conjointement avec des levers de remise à niveau des cartes géologiques. Toutes ces interventions devront répondre aux critères de mise

en cohérence de l'information géologique et pour cela une méthodologie particulière devra être mise en application.

1.2. CHANTIER PILOTE : VOSGES - FOSSÉ RHÉNAN

1.2.1. Objectif : passer de la théorie à la pratique

Le RGF a été longuement conceptualisé sur la base de l'expérience du BRGM et celle du reste de la communauté scientifique. Dans le cadre de ce projet, il s'agit d'appliquer ces concepts à un jeu de données géologiques réel sur une emprise régionale et de mettre en situation un groupe de thématiciens (BRGM, Universités, ...), représentants des futurs acteurs du RGF.

En 2012, une année a été consacrée pour proposer et tester des méthodologies de traitement des données géologiques, permettant de restituer une connaissance géologique cohérente depuis la surface jusqu'en profondeur (mise en cohérence de cartes, sondages, interprétations sismiques, ...).

En 2013, six mois supplémentaires ont été accordés pour préparer une démonstration du RGF, d'une part, en termes de « plus-value scientifique » et d'autre part, en termes de mise en applications de la géologie. Il s'agissait de montrer sur des exemples concrets en quoi la mise à disposition de données mises en cohérence et organisées selon une base de données (projet B2D - RGF, CdP : D. Rambourg) peut permettre d'optimiser la réalisation de produits thématiques en termes de risques naturels, de ressources minérales, matériaux, d'hydrogéologie ou de géothermie.

Le défi à relever a été d'autant plus important que ces démonstrations ont été déterminantes pour convaincre le ministère, la communauté scientifique et industrielle d'adhérer au programme dont le lancement est prévu en 2014.

1.2.2. Choix du chantier pilote

Compte tenu du délai de un an et demi requis la région pilote devait avoir une connaissance géologique récemment actualisée, tant en surface qu'en profondeur, afin de pouvoir limiter les acquisitions de terrain et les nouvelles interprétations. Elle devait également regrouper des contextes géologiques diversifiés mais aussi un fort potentiel en ressources énergétiques et applicabilité des géosciences.

L'emprise régionale Vosges - Fossé rhénan (en vert sur la Figure 1) a été choisie pour les raisons suivantes :

- **un contexte géologique diversifié** : le chantier pilote Vosges - Fossé rhénan est comme son nom l'indique, constitué de deux principales entités, le massif des Vosges, représentant du **domaine de socle**, le fossé rhénan représentant du **domaine de couverture sédimentaire** avec sa plaine rhénane essentiellement représentée en cartographie par le **domaine du Régolithe** (ou formations superficielles) ;

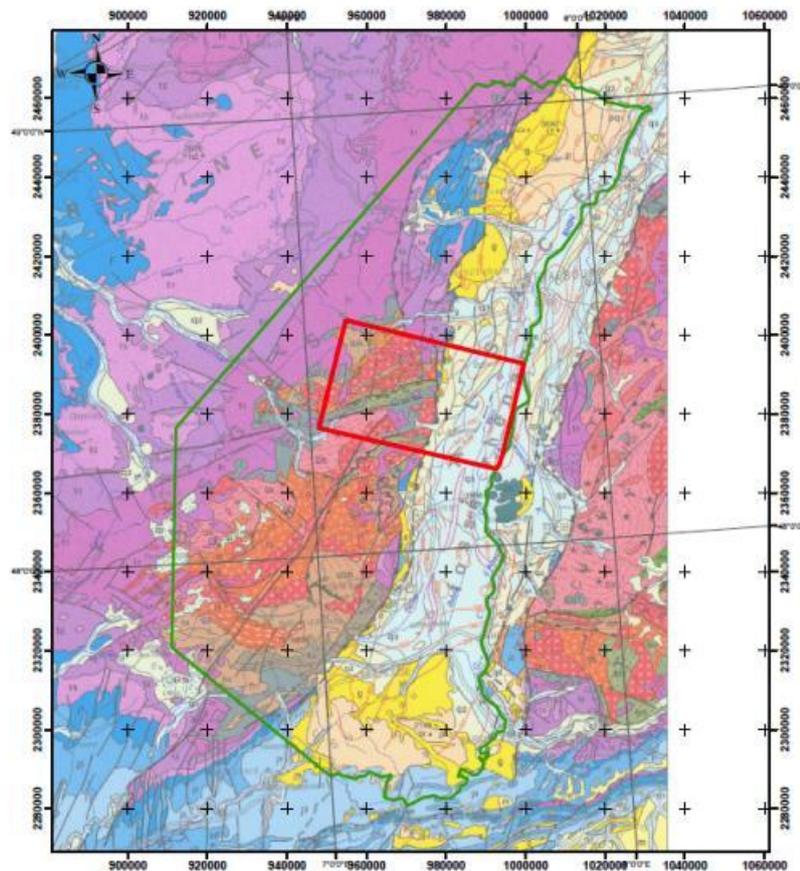


Figure 1 : Emprises du chantier Vosges – Fosse Rhénan.
en vert « l'emprise régionale », en rouge « l'emprise locale » centrée sur la ville de Sélestat

- **des levés cartographiques récents** : en plus des 33 cartes géologiques et 7 cartes départementales aux 1/50 000, cette emprise a récemment bénéficié de la cartographie des formations superficielles de la plaine rhénane avec la carte de BRAR au 1/25 000 (Quesnel F. *et al.*, 2002 ; BRGM/RP-52145-FR), de la carte géologique du Champ-du-Feu au 1/50 000 (Elsass P. et Von Eller J.P., 2008) dans le Bas-Rhin, ainsi que la nouvelle édition de

la carte géologique d'Hagueneau au 1/50 000 (Ménillet F. *et al.*, à paraître) dans le département des Vosges ;

- **des travaux de recherche récents** : deux thèses financées par le BRGM et dirigées en collaboration avec l'université de Strasbourg ont récemment été soutenues par E. Skrzypek (2011) et A.S. Tabaud (2012). Ces deux thèses portent sur de nouvelles interprétations de l'histoire de mise en place du massif sur la base de nouvelles acquisitions cartographiques, géochimie et datations ;
- **des géopotentiels et une applicabilité des géosciences** : historiquement de par un passé industriel riche cette emprise a bénéficié de nombreuses campagnes d'exploration du sous-sol : d'une part dans le fossé rhénan pour des ressources énergétiques fossiles (sondages profonds, profils sismiques) accessibles *via* la BSS et le BEPH, d'autres part dans le massif des Vosges, pour l'exploitation de ressources minérales inventoriées aujourd'hui dans l'inventaire minier de la France. Le projet pilote a bénéficié des bases de données, interprétations et modèles géologiques 3D d'études récentes telles que le projet GeORG pour la partie française du Fossé rhénan (Équipe du projet Georg, 2013, BRGM/RP-61945-FR), les projets d'exploration en géothermie de *Soultz* (Dezayes C. *et al.* 2005 et 2010), la *BD-LISA* pour les ressources en eau (Seguin J.-J. *et al.*, 2012) Pour les ressources minérales et matériaux, le projet a bénéficié de la base de données européenne « *ProMine* » (<http://promine.gtk.fi/>), la base nationale de données des carrières françaises « B2D-Carières » ainsi que d'une revue approfondie de la bibliographie régionale via les nombreux rapports miniers, articles scientifiques, synthèses régionales et cartes disponibles.

1.2.3. Organisation du projet

Compte tenu de l'objectif général du projet son organisation se devait d'être multi-thématique tant d'un point de vue scientifique que technique.

a) *Les actions*

Tout d'abord il a été identifié six actions décrites et organisées selon la Figure 2, ci-dessous :

- ***Sélection des données géologiques disponibles (cf. Chapitre 3)***

Dans le délai prévu la totalité des données existantes dans la zone ne pouvaient pas être traitées, il a donc été nécessaire de faire une sélection des données pour la démonstration parmi les thèses, les bases de données existantes et les projets.

- ***Préparation à la mise en cohérence des données géologiques (cf. Chapitre 4)***

La mise en cohérence des données nécessite des prérequis méthodologiques pour permettre d'appliquer le principe de « mise en cohérence » tel qu'il est défini dans le RGF : traitements de la carte géologique, réflexions des domaines géologiques à traiter, choix dans les lexiques à réaliser en fonction de ces domaines, méthode de réalisation des lexiques, expression des besoins pour les outils de traitements de l'information et développement.

- ***Mise en cohérence des données géologiques (cf. Chapitre 5)***

Il s'agit ici de traiter les données sélectionnées pour qu'elles soient codifiées de manière cohérente en surface et en profondeur pour tous les domaines géologiques présélectionnés. Une partie importante est également consacrée à l'organisation de ces données selon le modèle de base de données B2D - RGF.

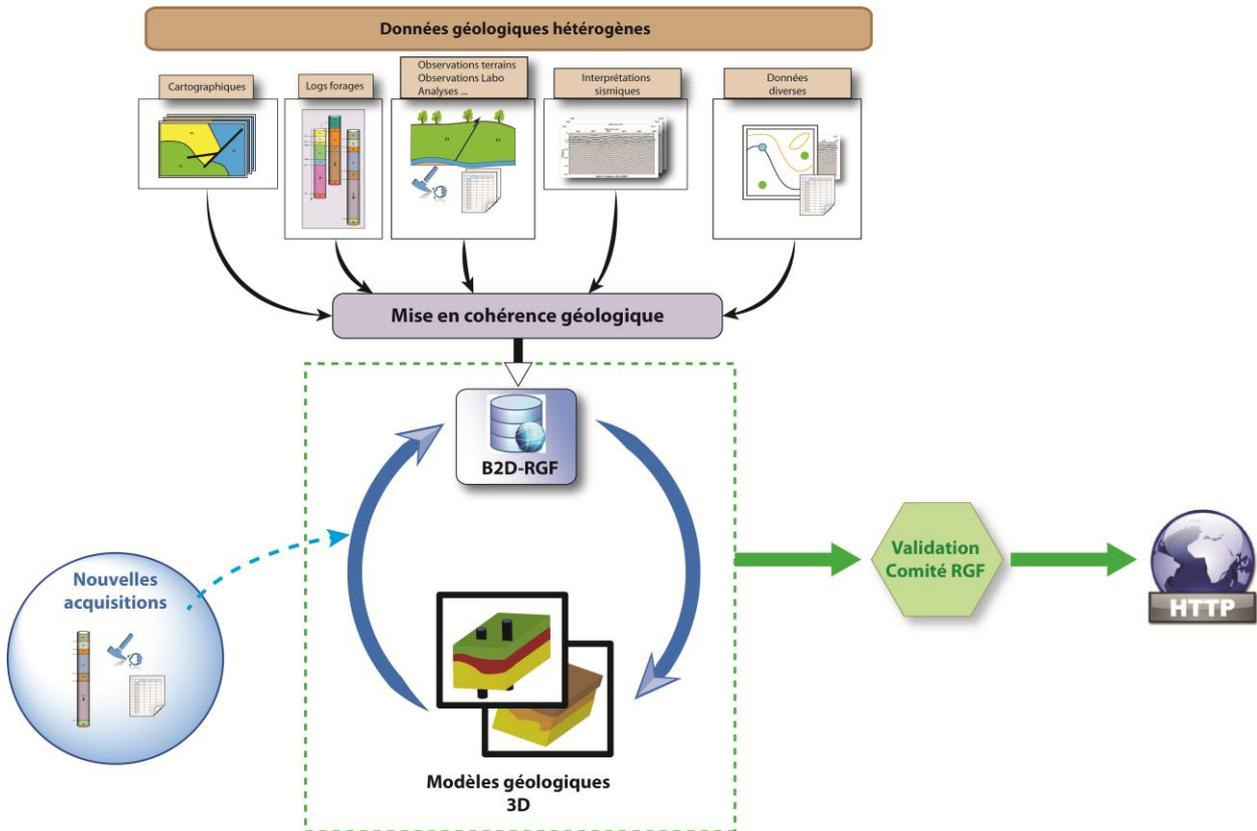


Figure 2 : Schéma représentant les principales actions testées dans le cadre de l'élaboration du chantier pilote Vosges - Fossé rhénan.

- **Accès et visualisation du chantier pilote de démonstration (cf. Chapitre 2)**

Cette action a été prévue dans le but de mettre en application la base de données B2D – RGF (Figure 2, 4a) et imaginer/développer des moyens prototypes d'accès aux données et modèles du démonstrateur pour de potentiels utilisateurs du RGF (Figure 2, 4a). Cette action a été réalisée en collaboration avec le projet B2D - RGF et la DSI pour le développement de prototypes de portail cartographique et de visualiseur des modèles 3D.

- **Modélisation géométrique 3D (cf. Chapitre 6)**

La modélisation géométrique est prévue pour valider la cohérence géométrique des données une fois associées dans un espace tridimensionnel. Cela permet de valider à la fois la mise en cohérence « lexicale » des données mais aussi les interprétations géométriques associées à la carte géologique, les pointées sismiques, les descriptions de sondages, la géophysique (cf. Figure 2, 5a). Cette action permet également d'exprimer des besoins en termes d'acquisition des données nécessaires à la compréhension géologique du système modélisé et des besoins pour les thématiques appliquées nécessitant des produits géologiques en trois dimensions comme aide aux décisions dans le cas d'enjeux socio-économiques divers, (cf. Figure 2, 5b).

- **Plus-value scientifique et mise en application du RGF (cf. Chapitre 7)**

Il s'agit ici de montrer sur des exemples concrets en quoi le programme RGF et les actions précédemment citées peuvent apporter une plus-value scientifique ? En quoi des données cohérentes et organisées selon un système de base de données permettent d'optimiser la réalisation de produits thématiques du risque sismique, de l'hydrogéologie, de la géothermie, des ressources minérales et des matériaux ?

b) Thématiques traitées et répartition des tâches

La mise en œuvre des actions précitées a nécessité l'organisation de groupes de travail multi-thématiques autour de tâches et sous-tâches communes. Certaines de ces tâches ont été réalisées en parallèle par toutes les thématiques abordées. Pour chacune d'elles des responsables chargés de leur suivi ont été nommés en appui au chef du projet.

- **Tâche 1 - « CARTO_BDD » : Traitement des données et lexiques.**

Cette phase consiste à réaliser les sous-tâches liées à la cartographie, les lexiques, le développement de prototypes d'outils de saisie pour la mise en cohérence des données géologiques et la mise en cohérence des données elles - même. Les ensembles géologiques traités sont les suivants :

- **géologie de socle** : il implique la connaissance du massif des Vosges d'un point de vue de la nature et de la composition du massif, ainsi que son histoire de mise en place (géochronologie, géologie structurale, etc.). Cet ensemble a bénéficié de l'expertise « BRGM » avec l'intervention de référents BRGM ainsi que de la collaboration de l'Université de Strasbourg, l'École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST) et du Service Géologique Tchèque ;
- **géologie sédimentaire** : il implique la connaissance liée à la nature des roches sédimentaires depuis les sédiments d'âge permien, jusqu'au tertiaire dans l'emprise du projet, ainsi que de la compréhension de la mise en place du Fossé rhénan. Cet ensemble a bénéficié d'un référent : en géologie sédimentaire et de sondages, en traitements et interprétation des données sismiques issues du projet GeORG (Équipe du projet GeORG, 2013), en données pétrophysiques des roches sédimentaires et enfin le support du géologue régional d'Alsace (BRGM). Une étude préliminaire concernant la caractérisation des dépôts syn-rifts et le rôle des failles bordières sur la marge occidentale du Fossé rhénan (ou graben du Rhin) a été réalisée dans le cadre du projet (L. Beccaletto *et al.*, 2013) ;
- **géologie du régolithe** : il implique la connaissance liée à la nature, l'origine l'âge et la genèse des formations superficielles allochtones et autochtones. Ce domaine a bénéficié d'un référent en géologie des formations superficielles avec le support du géologue BRGM en région d'Alsace, ainsi que des travaux antérieurs en relation avec le projet BRAR (Quesnel *et al.*, 2002 ; BRGM/RP-52145-FR)

Au - delà du traitement de l'information purement géologique, cette tâche inclut également les adaptations de lexiques, les traitements de données complémentaires et nécessaires à la démonstration de l'intérêt du RGF pour les thématiques appliquées telles que la géothermie, l'hydrogéologie, le risque sismique, ressources minérales, carrières et matériaux. Cette tâche est subdivisée en plusieurs sous-tâches comme décrites ci-dessous. Ces sous-tâches se sont déroulées en parallèle dans le temps, leur numérotation ne correspond pas à une chronologie d'action :

- tâche 1.1 : cartographie ;
- tâche 1.2 : réalisation des lexiques ;
- tâche 1.3 : traitements des données de sub-surface (logs et interprétations sismiques)

- **Tâche 2 - « Modèle_3D »**

La modélisation géométrique est prévue pour valider la cohérence géométrique des données traitées dans le cadre de la tâche 1. Les réalisations d'un modèle régional d'échelle crustale sur la totalité de l'emprise et du modèle de Sélestat sur une zone plus « locale » permettent de tester ce principe à différentes échelles (Figure 1) :

- tâche 2.1 : réalisation du modèle régional / crustal ;
- tâche 2.2 : acquisitions de données gravimétriques / confrontation au modèle géologique régional / crustal ;
- tâche 2.3 : modèles locaux (zones de Sélestat, Mulhouse) pour la thématique risque sismique en vue de simulation de propagation d'ondes et cartes d'alea sismique.

- **Tâche 3 « DEMO - PRODUCT » - Représentation thématique (appliquées et des recherches fondamentales)**

La tâche « DEMO - PRODUCT » regroupe toutes les sous-tâches destinées à la démonstration de l'intérêt du RGF pour la recherche fondamentale (géologie au sens large) d'une part et les thématiques plus appliquées d'autre part (risque sismique, ressources minérales, géothermie, etc.) :

- tâche 3.1 : RGF et base de données géothermique - Apport du RGF pour Soultz (correspondant thématique : C. Dezayes, DGR/REG) ;
- tâche 3.2 : RGF et Ressources minérales (correspondant thématique : D. Cassard, DGR/MIN) ;
- tâche 3.3 : Implémentation 3D de BDLISA dans le RGF (correspondant thématique : D. Allier, D3E/EVE) ;
- tâche 3.4 : RGF et risques sismiques (correspondant thématique : A. Roullé, DRP/RSV) ;
- tâche 3.5 : la marge occidentale du graben du Rhin supérieur : géométrie des dépôts syn-rifts, rôle des failles bordières (correspondant thématique : L. Beccaletto, DGR/GBS) ;
- tâche 3.6 : compréhension des mécanismes de mise en place du massif des Vosges, confrontation aux données gravimétriques, petro et géochimique (correspondant thématique : K. Schulmann, Université de Strasbourg) ;
- tâche 3.7 : visualiseur 3D (correspondant thématique : F. Tertre, DSI/ISTN).

- **Tâche 4 - « DEMO-COLLOQUE » Préparation du colloque/workshop RGF**

- tâche 4.1 : rédaction d'un scénario de démonstration du RGF ;
- tâche 4.2 : préparation des éléments de présentations.

- **Tâche 5- « DEMO-Valorisation »**

- tâche 5.1 : rapport ;
- tâches 5.2 : mise en forme du démonstrateur – SIG RGF-DEMO.

- **Tâche 6-« SUIVI » suivi de projet**

Le chef de projet assure la coordination des tâches principales entre elles, T1, T2, T3, T4, T5. Un responsable est nommé pour chaque tâche exceptée pour les tâches T3 pour laquelle a été désigné un correspondant thématique. Pour la tâche T1 « Carto_BDD », des référents pour chaque ensemble géologique (régolithe, socle, couverture, et région) ont été nommés en appui du responsable de la tâche.

c) Les acteurs du projet

Pour toutes ces tâches des rôles de référents scientifiques et techniques ont dû être identifiés. Au total, 46 personnes du BRGM ont participé à ce démonstrateur, issue de la DGR mais aussi, la DAT/ALS, la DRP, la D3E et la DSI.

d) Les projets BRGM collaborateurs

Ont également contribué à ce projet :

- le projet B2D - RGF (Cdp D. Rambourg, DGR/OEG), pour la gestion, la mise en forme et accessibilité des données mises en cohérence ;
- le projet Loglso (Cdp. O. Serrano, DGR/ GBS), pour la validation de forages ;
- le projet SP– Régolithe (Cdp C. Prognon, DGR/ GAT) ;
- le projet GeORG - Fossé rhéna (Cdp L. Capar, DGR/GBS).

e) Les collaborations extérieures

Des collaborations ont été entreprises avec l'Université de Strasbourg, le Service Géologique Tchèque et École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST). Ces collaborations ont impliqué sept intervenants supplémentaires pour l'étude et la caractérisation du massif des Vosges (tâche 3.6). Cela concerne le financement et l'encadrement :

- d'un post-doctorat en 2012 (6 mois) en collaboration avec l'Université de Strasbourg ;
- d'un CDD en 2012 (3 mois) - valorisation de la thèse d'AS Tabaud en collaboration avec le Service Géologique Tchèque et l'Université de Strasbourg ;
- d'acquisitions gravimétriques dans le sud du massif impliquant trois étudiants Master1, en 2012 en collaboration avec École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST) et l'Université de Strasbourg ;
- deux étudiants Master2 en 2012 et 2013, pour des études complémentaires en analyses microstructurales, pétrophysiques des granitoïdes des Vosges, en collaboration avec le Service Géologique Tchèque et l'Université de Strasbourg,

1.2.4. Délivrables

Les résultats de ce projet représentent la **première brique du RGF**, construite avec nos collaborateurs académiques et la majorité des directions du BRGM.

La mise en place d'un Système d'Information SI - RGF, prévu opérationnel pour 2016 par la DSI, répondra aux besoins de gestion et de partage des données autour des projets RGF.

En attendant ce système, l'équipe de projet DGR a mis en place une application SIG (cf. § 2.2.4) sur la base de données de stockage SIG, décrite dans le paragraphe 2.1.3, afin de valoriser et donner accès à l'ensemble des données du démonstrateur et de ses livrables, à tous les agents BRGM. L'accès à cette plate-forme SIG est disponible, via un navigateur internet à accès limité aux agents BRGM, à l'adresse suivante : http://srv155.brgm.fr/rgf_demo/.

L'ensemble des notices d'utilisation sont consultables via cette même application. Cela comprend :

- une sélection de données géologiques, mise en cohérence depuis l'information cartographique jusqu'aux données de sub-surface ;
- une grande diversité de carte thématique (carte lithostratigraphique, lithologique, évènementiel, etc.) ;
- des produits géologiques cohérents en 3D, représentant l'intégration de toute la donnée traitée, à différentes échelles (régional et locale) ;
- la démonstration de l'intérêt du RGF pour des enjeux multithématiques, socio-économiques et scientifiques.

Une démonstration du RGF a été réalisée au sein du BRGM (18 juin 2013) et pour tout public à la Cité des Sciences et de l'Industrie à Paris (19 juin 2013). Ces démonstrations ont été déterminantes pour convaincre le ministère, la communauté scientifique et industrielle d'adhérer au programme pour le lancement prévu en 2014 avec le chantier Pyrénées.

Les programmes, les présentations, posters et animations vidéo présentées pour ces journées sont disponibles sur le DVD joint à ce rapport.

Une page d'information internet dédié au démonstrateur et à ses évènements est accessible via les adresses suivantes :

- <http://www.brgm.fr/content/referentiel-geologique-france> ;
- <http://www.brgm.fr/content/demonstrateur-rgf-vosges-fosse-rhenan>.

2. Prototype d'accès et de stockage des données du démonstrateur

Avant d'aborder la mise en œuvre de la procédure de mise en cohérence dans le cadre du démonstrateur, il apparaît nécessaire de présenter les moyens prototypes qui ont été développés en parallèle pour **traiter** et **stocker** ces données pour les « opérateurs » du RGF (cf. § 2.1), et enfin de présenter les prototypes envisagés pour l'**accès** à ces données (cf. § 2.2).

2.1. LA BASE DE DONNÉES RGF, B2D - RGF

2.1.1. Contexte

Ce projet collaboratif aux chantiers géologiques RGF, débuté depuis 2009, a pour objectif principal d'élaborer et mettre en production une véritable mémoire d'entreprise basée sur un réseau de bases de données géologiques à un niveau national, répondant à des critères d'interopérabilité internationaux.

Le projet B2D - RGF doit, au sein de bases de données, mettre en cohérence et harmoniser les données de subsurface (sondages) et les données de surface (carte) en conservant la traçabilité de la donnée source.

En 2009 et 2010, une première phase de conceptualisation avait été menée à bien aboutissant à un schéma UML (langage de modélisation et conception d'applications) de la future base de données. Dans le même temps, avait été rédigé un document définissant les besoins en matière de base de données pour la future B2D - RGF, ainsi que les perspectives en termes d'outils applicatifs de gestion et de valorisation des données intégrées.

En 2011 et 2012, le modèle conceptuel du B2D - RGF a pu être amélioré en introduisant la conceptualisation des phénomènes d'altération, en lien notamment avec les projets BRGM portant sur le régoïlithé. Cette notion a permis de consolider les concepts d'événements géodynamiques, et de les rendre plus cohérents par rapport aux attentes des futures nécessités. Ce modèle conceptuel a permis de générer un modèle physique de base de données abouti, implémenté par le service DSI. Cette base de données a été alimentée par les lexiques existants, telles que les lexiques lithologiques, minéralogiques, de datations, ...

En 2012 et 2013, le modèle B2D - RGF a pu être mis en phase de test en grandeur nature, sur les principaux concepts intégrés par le stockage des données mises en cohérence dans le cadre du projet Démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan », aboutissant aux journées RGF du 18 et 19 juin 2013.

2.1.2. Mise en œuvre et contexte technique

Dans le cadre du démonstrateur RGF « Vosges - Fossé rhénan », la mise en place de la B2D - RGF a pu se faire en partie avec la collaboration du département DSI.

Suite à la réalisation d'un modèle conceptuel de la base de données B2D - RGF, l'équipe informatique de projet a mis en œuvre un modèle physique de cette base de données, pour finalement réaliser une installation dans l'architecture de bases de données du BRGM.

L'équipe en charge de la réalisation de cette conceptualisation puis de cette mise en œuvre s'est composée de deux intervenants au niveau de la DSI et deux intervenants au niveau de DGR.

La réalisation technique du modèle conceptuel de données (MCD) s'est appuyée sur l'utilisation de l'outil Enterprise Architect. Cet outil permet de réaliser des modèles UML (Unified Modeling Language).

Le MCD permet de représenter la structure du système d'information, du point de vue des données, et définit également **les dépendances ou relations entre ces différentes données**.

Une fois le modèle conceptuel de données réalisé, Enterprise Architect a été réutilisé pour créer le modèle physique de données (MPD) en utilisant les diagrammes logiques Postgres. Ce MPD permet d'implanter la base de données dans un système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR).

Le modèle physique de données a ensuite été implémenté dans un **SGBDR (Système de Gestion de Base de Données Relationnelles)**.

Le SGBDR utilisé ici a été PostgreSQL avec son extension spatiale PostGIS. Les choix techniques réalisés (utilisation d'Enterprise Architect, PostgreSQL/PostGIS) relèvent d'une cohérence au niveau de la politique logicielle du BRGM et de son infrastructure.

Le serveur de recette de base de données PostgreSQL monté dans le cadre du démonstrateur RGF est disponible en interne BRGM. Les modèles conceptuels de données et les modèles physiques de données sont disponibles sur l'espace réseau du projet B2D - RGF(eDop). De même, les scripts SQL de création de la base de données sont aussi disponibles sur cet espace projet.

2.1.3. Stockage et outils de mise en cohérence des données du démonstrateur RGF

La mise en place des procédures de stockage s'est déroulée au même titre que les recherches méthodologiques de mise en cohérence des données géologiques du démonstrateur (cf. chapitre 4 et chapitre. 5).

Ces phases ont permis de consolider le modèle de données, les définitions relationnelles existantes entre les données et les lexiques associées, et de définir des procédures de stockage. Les données ont été collectées dans plusieurs structures de base de données intermédiaires locales, adaptées aux exigences de structure de la future base de données centrale B2D - RGF. Une partie des données géologiques du démonstrateur RGF a été déversée dans la B2D - RGF, avec pour principaux objectifs de fournir des données géologiques cohérentes de tests aux développements autour du SI - RGF et de constituer les livrables présentés aux journées RGF du 18-19 Juin 2013.

Au vue de la complexité du modèle de données B2D - RGF, et de l'avancement de la mise en place du SI - RGF, prévu opérationnel à l'horizon 2016, permettant entre autres la saisie des données RGF, il a été convenu avec l'équipe projet du démonstrateur que les données seraient stockées dans une base de données annexe de stockage.

Cette base de données, en cohérence avec la structuration des données prévue, permettra à moyen terme d'injecter les données dans le SI - RGF et le modèle de données B2D - RGFassocié.

Le choix technique pour la réalisation de cette base de données de stockage est une base de données de type Géodatabase fichier ESRI v10.0, avec une réorganisation des données par thématique pour faciliter leur utilisation, tout en conservant les liens de cohérence entre les divers éléments.

L'ensemble des données du démonstrateur a ainsi pu être implémenté dans cette base de données et l'ensemble des documents numériques associés dans un système arborescent de fichier cohérent.

2.1.4. Recommandations et perspectives

La structuration de la (les) base(s) de données centrale du RGF reste un projet en cours à la fin de ce démonstrateur, et nécessite à court terme de disposer d'un SI - RGF adapté aux besoins de gestion de l'information.

Le déroulement du démonstrateur a permis de faire avancer de manière très importante la structuration de la base de données et de répondre aux besoins nécessaires à la réalisation des livrables du démonstrateur RGF.

Le projet démonstrateur a également permis de relever les forces et faiblesses du modèle et des procédures de stockage. Ainsi, outre la mise en place du SI (Système d'Informations), afin d'assurer un stockage cohérent et centralisée des informations géologiques RGF, il serait nécessaire à court terme :

- de finaliser les concepts thématiques manquants au modèle de données RGF ;
- de finaliser la rédaction du cookbook du modèle conceptuel de données B2D - RGF ;
- mettre en production la base de données afin d'entrer dans le processus de sauvegarde, archivage des environnements de production de la base actuelle ;
- d'assurer la migration des données de recette en production ;
- d'ajouter les informations relatives à la gestion du workflow dans le SI - RGF et intégrer les évolutions du modèle suite aux retours du démonstrateur ;
- de différencier une approche base de données de production et une base de données de diffusion, validés par le comité RGF ;
- d'assurer la compatibilité 100 % avec INSPIRE / Thème « Modèle de données géologiques ».

2.2. ACCESSIBILITÉ DU RGF

2.2.1. Contexte et mise en œuvre

Le démonstrateur « Vosges - Fossé rhéna » a été l'opportunité d'initier la mise en place d'une plate-forme de gestion et partage des données géologiques mises en cohérence et des modèles associées, dans un projet géologique RGF.

Sur cette base, un prototype de consultation, de gestion et d'exploitation des données acquises dans le démonstrateur, a été développé afin de disposer d'un espace d'administration des données et des modèles associées.

Ce prototype, mis en place par la DSI, en collaboration avec les thématiciens de DGR, s'axe sur deux principales applications, devant interagir entre elles, par des relations stockées en base de données :

- une application web cartographique, dédiée à l'administration et la consultation des informations géologiques du démonstrateur, dans un espace cartographique 2D (cf. § 2.2.2) ;
- une application web « Viewer 3D », dédiée à la visualisation et l'exploitation des modèles géologiques 3D réalisées dans le cadre du démonstrateur.

La réalisation de ce prototype a permis de réaliser un certain nombre de fonctionnalités, opérationnelles pour partie, mais insuffisamment complètes pour permettre la visualisation complète des données et des modèles, acquis dans le cadre du démonstrateur. La mise en place d'un Système d'Information SI - RGF, pris en charge par la DSI, prévu opérationnel pour 2016, répondra à moyen terme aux besoins de gestion et de partage des données autour des projets RGF.

Dans l'attente de ce système, l'équipe de projet a ainsi décidé de mettre en place une application SIG (cf. § 2.2.4) sur la base de données de stockage SIG, décrite dans le paragraphe 2.1.3., afin de valoriser et donner accès à l'ensemble des données du démonstrateur et de ses livrables.

2.2.2. Application Web Cartographique dans le cadre de B2D - RGF

a) Contexte

Dans le cadre du projet B2D - RGF, un volet « Application Web Cartographique » a été mis en place afin de développer un prototype d'application permettant l'accès aux données produites au cours d'un chantier RGF, et notamment le démonstrateur « Vosges - Fossé rhéna », à partir de la base de données B2D - RGF.

L'objectif principal de ce volet a été d'amorcer la mise en place d'un SI des données RGF, sur la base des besoins utilisateurs, synthétisés au préalable dans un cahier des charges et de spécifications fonctionnelles.

Ces spécifications nécessitaient une priorisation des actions à mener, afin d'orienter au mieux les développements, dans le temps de réalisation imparti.

L'équipe au sein de DGR pour la constitution du cahier des charges et des spécifications nécessaires s'est composée de plus d'une quinzaine de thématiciens et de deux intervenants de la DSI.

L'équipe au sein de la DSI, en charge de la réalisation des développements de cette application cartographique s'est composée de deux développeurs complétés d'un ergonomiste pour la création des interfaces et un coordinateur.

b) Mise en œuvre et contexte technique

La réalisation du prototype d'application cartographique s'est déroulée en plusieurs phases.

Tout d'abord, la réalisation d'une maquette par l'ergonomiste du BRGM, cette maquette devant s'inscrire dans la lignée des sites actuels du BRGM. La création de cette maquette a été effectuée en utilisant les outils de la suite Adobe (Photoshop et Illustrator), et a été diffusée sous forme de fichiers images et de fichiers Photoshop permettant aux développeurs de réaliser le prototype correspondant.

Suite à cette phase de maquettage, les développeurs se sont basés sur les outils habituels de développement (Eclipse IDE).

La partie cartographique de l'application a été développée en utilisant la librairie Javascript couramment utilisée pour les sites de diffusion cartographique du BRGM, OpenLayers. Cette librairie permet l'utilisation dans un site web d'une carte dont les données proviennent de services cartographiques normalisés.

Ces services sont au nombre de deux, les services délivrant de la carte sous forme d'image (Web Map Service) et les services délivrant de l'information géographique sous forme de données vectorielles (Web Feature Service). Les services cartographiques du BRGM se basant sur ces deux types de services pour diffuser la donnée produite en interne, l'utilisation de cette librairie s'imposait pour rester cohérent avec la politique logicielle de l'établissement.

Un premier prototype a été réalisé proposant quelques-unes des fonctionnalités demandées.

Suite à une proposition faite par DSI pour intégrer le démonstrateur dans le portail InfoTerre des outils cartographiques internes au BRGM, les développements spécifiques RGF ayant déjà été réalisés ont pu être portés dans le nouvel environnement InfoTerre, n'ayant besoin que d'une modification de leur interface graphique mineure pour pouvoir s'intégrer de manière cohérente. La partie cartographique existant déjà, il n'a été alors nécessaire que de réaliser les « branchements » nécessaires pour permettre à l'interface dédiée RGF de pouvoir communiquer avec les outils déjà existants d'InfoTerre.

Les documents de conception sont disponibles sur l'espace réseau du projet B2D – RGF (eDop) :

- recueil des besoins utilisateurs réalisés auprès de différents agents BRGM impliqués ;
- cahier des charges écrit après le recueil des besoins utilisateurs ;
- premiers documents de conceptualisation de l'interface utilisateur ;
- maquettes réalisées pour l'interface du démonstrateur ;
- données utilisables en tant que jeux de test du prototype ;
- documents de conception des fiches de données.

c) Résultats

Cette application cartographique, intégrée dans l'application web Intraterre, présente donc un bouton RGF permettant d'accéder à l'interface spécifique RGF et aux fonctionnalités qui lui sont rattachées. De par l'utilisation du visualiseur cartographique InfoTerre, toutes les couches du catalogue InfoTerre peuvent être utilisées (Figure 3).

Le prototype a permis la réalisation de fonctionnalité de consultation et d'amorcer les travaux sur des fonctionnalités de recherche complexe dans la B2D – RGF suivant des critères que l'utilisateur aura défini.

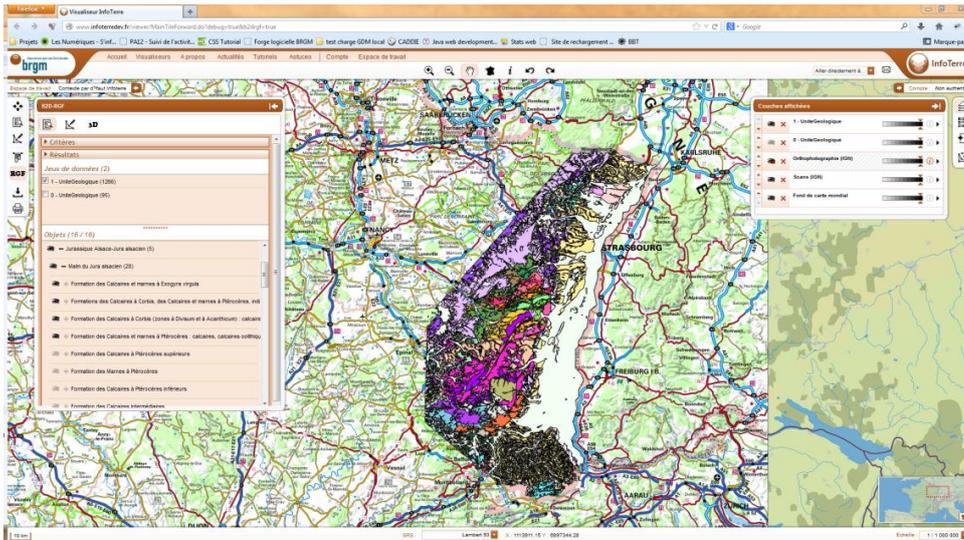


Figure 3 : Application cartographique.

La partie recherche dans la B2D - RGF propose de rechercher sur les objets présents dans la base suivant les thématiques suivantes : Forages, Affleurements, Échantillons, Carottages, Cuttings, Lames Minces, Sections Polies, Unités géologiques, Éléments de contact géologique, Éléments de mouvement cisailant, Éléments de plissement et Éléments de litage (Figure 4). Pour ces thématiques, des filtres peuvent être définis permettant de définir des relations entre les éléments recherchés.

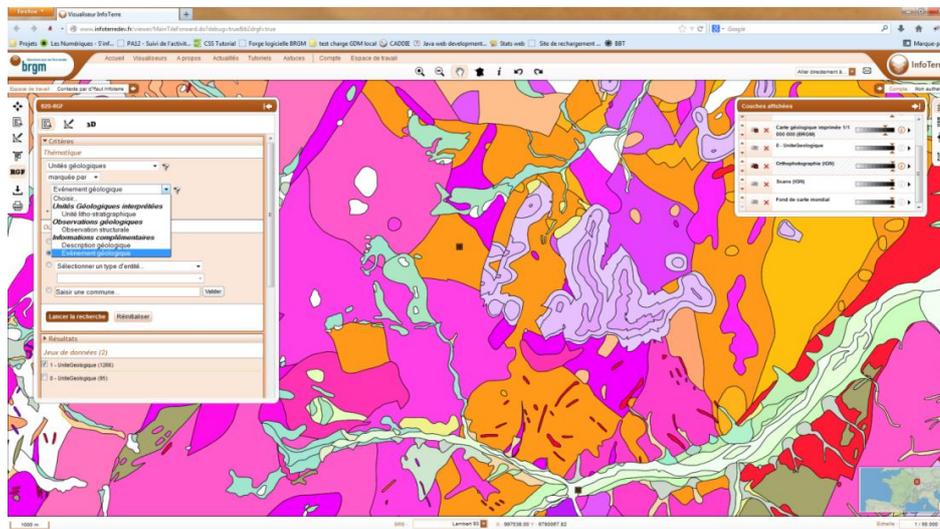


Figure 4 : Application cartographique – Fonctionnalité de recherche.

Plus de détails peuvent être retrouvés dans les documents de conception du projet B2D - RGF. Des filtres géographiques peuvent être aussi définis pour restreindre la recherche dans une certaine zone géographique suivant l'emprise visible par l'utilisateur, ou une emprise correspondant à une entité administrative (région, département ou commune). Tous les filtres possibles n'ont pas été branchés dans le cadre du prototype.

Des fiches Unités lithostratigraphiques, Contacts et Forages permettent de visualiser plus en détails les données affichées sur l'espace cartographique. Dans le cadre du prototype, la fiche des Unités lithostratigraphiques a presque entièrement été réalisée (Figure 5).

Les deux autres fiches n'ont pas vu leur développement terminé.

Fiche descriptive de la donnée
Unité Lithostratigraphie

Informations générales

Définition

Auteur	Yann VERHNET	Date	30/06/2012
Type	Formation		
Notation	E5E		
Nom	Formation des Calcaires à Entroques : calcaires biodastiques, ooliques, à entroques, avec intercalations mameuses		
Symbologie			
Chronostratigraphie	Age début	Muschelkalk supérieur	Age fin
			Muschelkalk supérieur

Commentaires

Calcaires gris clair, jaunes à l'altération, avec quelques intercalations mameuses (partie supérieure). Bancs plus épais, plus massifs dans la partie inférieure avec un ou plusieurs bancs ooliques et bancs à entroques. Plusieurs facès : bancs mort.

Regroupements lithostratigraphique

Auteur	Yann VERHNET	Date	30/06/2012
Type	Groupe		
Notation	t3-5		
Nom	Muschelkalk des Collines sous-vosgiennes		
Symbologie			
Chronostratigraphie	Age début	Muschelkalk inférieur	Age fin
			Muschelkalk supérieur

Description géologique

Auteur	Yann VERHNET	Date	30/05/2013
Description du corps géologique			
Morphologie du corps		Epaisseur	
Type de litage		Motif	Style

Figure 5 : Application cartographique - Fiche Unités Lithostratigraphiques.

Une seconde fonctionnalité d'ajout de ponctuel à un chantier RGF a été ajoutée au prototype

La partie « ajout de ponctuel » permet de créer des points à un chantier RGF. Les ponctuels proposés sont des Forages, Affleurements, Échantillons, Carottages, Cuttings, Lames minces, Sections polies. L'ajout d'un ponctuel se fait en choisissant un chantier RGF, un type de ponctuel, et des coordonnées X, Y en fonction du système de projection choisi.

Néanmoins, cette fonction, permettant d'écrire des objets simples en base n'a pas été finalisée.

Une dernière fonctionnalité a été souhaitée afin de restituer le maintien des liens pérennes entre les données géologiques « brutes » de la B2D – RGF et les modèles 3D réalisés dans le cadre du démonstrateur.

La partie 3D permet de faire le lien entre la partie cartographique 2D et la partie visualiseur 3D. Celle-ci permet d'afficher sur la carte les emprises des modèles 3D disponibles et d'afficher les forages utilisés pour la réalisation des modèles. Deux autres options permettent d'interroger les emprises en lançant le visualiseur 3D pour permettre la consultation du modèle et d'interroger les forages en visualisant la fiche de forage (Figure 6).

Néanmoins, la partie 3D permettant de faire les liens entre la cartographie et les modèles n'a pas été branchée, les emprises des modèles ne permettent pas de rediriger vers le visualiseur 3D, de même, la sélection d'un forage de calage ne permet pas d'afficher la fiche correspondante (à cause d'une distinction entre les identifiants BSS des forages de calage et des identifiants utilisés dans les fiches).

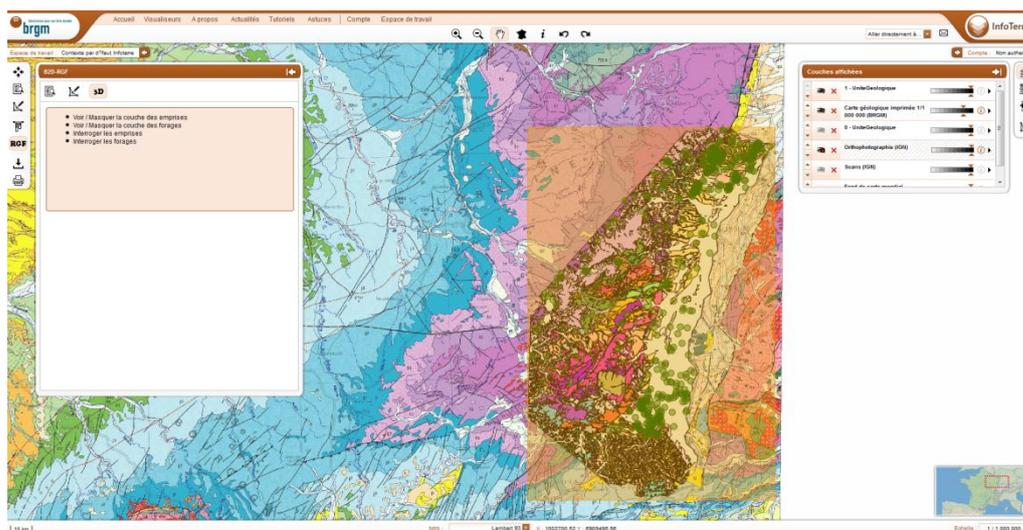


Figure 6 : Application cartographique - Interaction Viewer 3D.

d) **Recommandations et perspectives**

Le démonstrateur RGF a permis de mettre en œuvre, dans un cas de figure concret, les fonctionnalités à amorcer pour la bonne tenue d'un chantier RGF

Cependant, les aspects de spécifications et de développements dans le temps contraint du démonstrateur, n'ont pas permis de donner les outils nécessaires à l'alimentation et au partage des données à la fin de ce démonstrateur.

Plusieurs points d'améliorations peuvent être relevés, tels que :

- disposer d'un retour des utilisateurs sur les interfaces et l'ergonomie générale des interfaces de consultation et de saisie pour spécifier un outil pour la production B2D – RGF et un outil pour la diffusion des contenus ;
- intégrer une démarche de processus dans l'outil, notamment authentification, traçabilité, gestion du processus de qualification, publication, etc. ;
- explorer d'autres pistes de système de recherche de données (ex. Exalead) pour certaines thématiques, qui restent trop complexes ;
- finaliser les fiches de données pour la diffusion d'informations ;
- finaliser les fonctionnalités d'édition attributaires et les règles de gestion associées, indispensables à la saisie des informations géologiques collectées dans le cadre des chantiers RGF ;
- intégrer l'application cartographique dans le nouveau design des sites BRGM.

Il est important de noter que suite aux colloques RGF du 18 et 19 Juin, le BRGM s'est engagé à se doter d'un SI - RGF, opérationnel à l'horizon 2016, dans le cadre d'une mission prioritaire du BRGM.

2.2.3. Application Web « Viewer 3D »

a) *Contexte*

Le second axe de développement mis en place dans le cadre du démonstrateur est la réalisation d'une plate-forme web de visualisation 3D, en interaction avec l'application web cartographique explicitée dans la section 2.2.2.

La réalisation de l'« Application Web Viewer 3D » du démonstrateur RGF s'est concentrée sur la réalisation d'un prototype de visualiseur de modèles 3D géologiques permettant de naviguer dans le modèle pour pouvoir réaliser son observation sous tous les angles, de réaliser des coupes de ce modèle permettant d'avoir une compréhension de l'agencement des différentes couches géologiques, et enfin de réaliser des forages « virtuels » exploitant les volumes du modèle pour tirer une information sur l'empilement à un point donné des différentes couches géologiques.

Les intervenants de DGR ont rédigé les spécifications fonctionnelles envisagées, avec la collaboration de DSI.

L'équipe en charge de la réalisation des développements de ce visualiseur de modèles 3D géologiques s'est composée de deux développeurs en charge du visualiseur 3D, d'un développeur en charge des forages « virtuels » et des coupes et un coordinateur des actions DSI.

b) *Mise en œuvre et contexte technique*

L'affichage de données en trois dimensions dans un navigateur internet se heurte assez rapidement à des contraintes techniques importantes.

Plusieurs solutions existent permettant de réaliser un tel affichage, pour s'affranchir de la contrainte d'utiliser un plugin extérieur au navigateur. La décision a été d'utiliser WebGL permettant une intégration native dans le navigateur. Les contraintes liées à l'utilisation WebGL portent au niveau des navigateurs permettant l'utilisation de cette technologie.

Au moment du démarrage, les navigateurs Firefox et Chrome supportaient cette technologie, cependant l'implémentation faite par Firefox n'était pas suffisamment aboutie et stable pour permettre d'être utilisée. Les développements ont donc été conduits pour être supportés par le navigateur Chrome. Au-delà de cette limitation de navigateurs, la technologie WebGL comporte aussi nativement des limitations par rapport au standard couramment utilisé en 3D OpenGL.

Ainsi, certaines possibilités ne peuvent pas être implémentées du fait du manque de ces fonctions (manque de sélection Buffer, de shaders, de textures 3D, ...).

De plus, de par l'environnement sur navigateur, certaines limitations arrivent assez vite concernant la taille des objets qui peuvent être manipulés et leur nombre. Ainsi par exemple, dans le cadre du démonstrateur, l'affichage de tous les objets d'un modèle n'est pas possible car elle entraîne une consommation excessive de la mémoire conduisant finalement à un arrêt non planifié de l'application.

Les documents concernant le prototype de visualiseur 3D sont disponibles sur l'espace projet. Il s'agit de compte-rendu de réunion et d'un document de conception détaillant les éléments nécessaires pour la bonne réalisation du prototype.

Plusieurs modèles sont disponibles dans ce prototype, le modèle utilisé pour les développements a été celui nommé « Surfacique/Vosges - Fossé rhénan ».

c) Résultats

Le prototype permet donc de visualiser en trois dimensions les puits utilisés pour le calage et les formations sous forme surfacique et non volumique (Figure 7 et Figure 8).

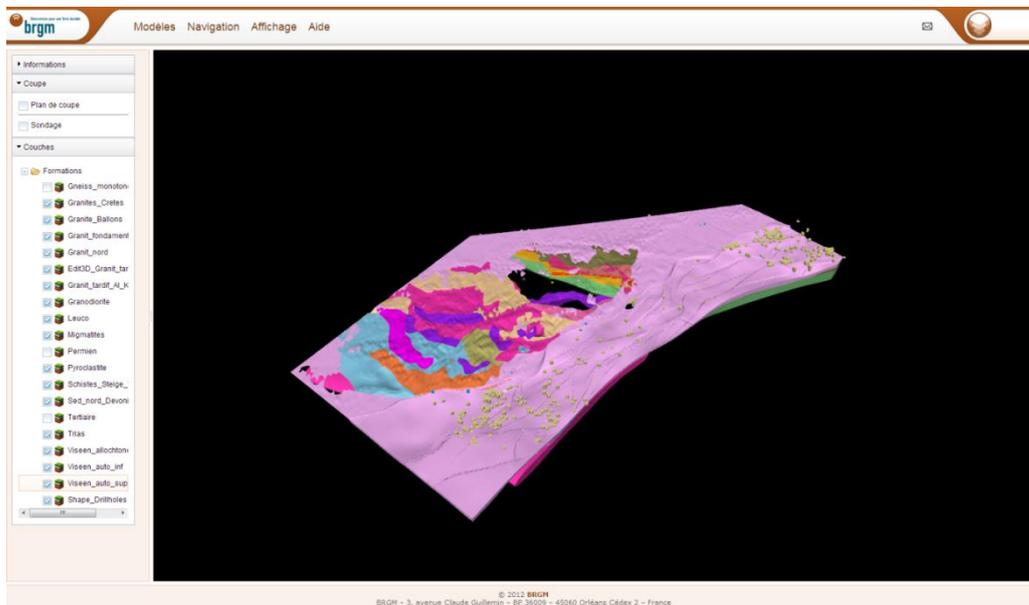


Figure 7 : Application viewer 3D - Visualisation d'un modèle complet avec les sondages de calage.

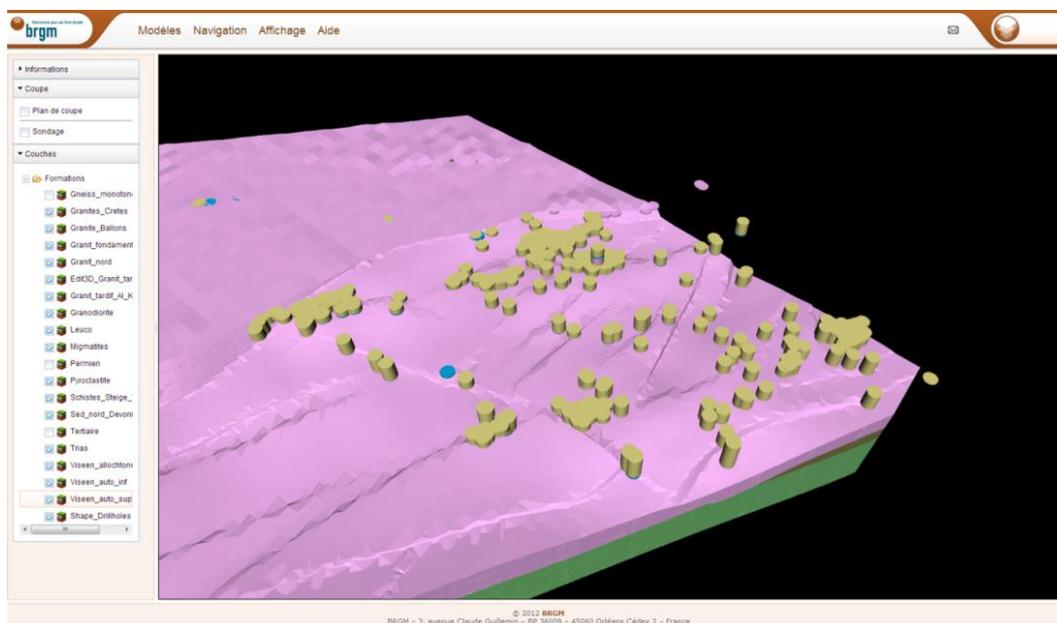


Figure 8 : Application viewer 3D - Visualisation d'une partie de modèle avec les sondages de calage.

Le choix d'une visualisation surfacique des formations et non volumique n'est pas dû à une limitation technique mais à une limitation ergonomique. En effet la visualisation d'un modèle 3D sur un dispositif 2D (en l'occurrence l'écran d'un ordinateur) limite les possibilités offertes.

Les formations sont disponibles dans une liste permettant à l'utilisateur de sélectionner celles qu'il désire visualiser (comme précisé plus haut, à cause de limitation technique, la visualisation de toutes les formations en même temps peut causer des erreurs dans l'application).

Pour chaque formation visualisée, l'utilisateur a la possibilité d'afficher les informations rattachées et de définir un plan de coupe permettant de réaliser une coupe dans le modèle 3D occultant de ce fait les parties des surfaces situées d'un des côtés de la coupe (Figure 9).

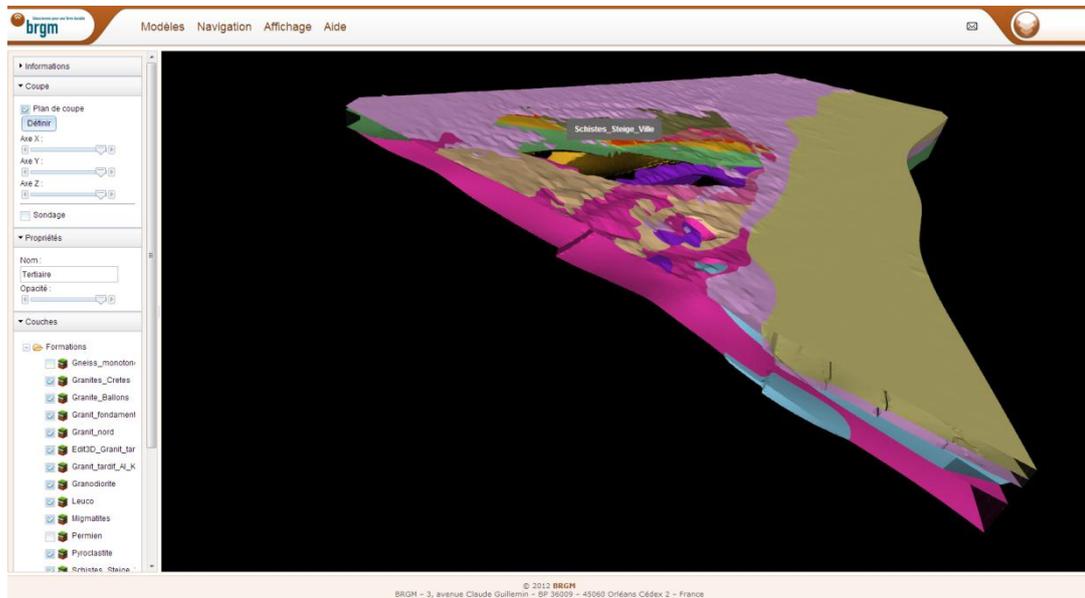


Figure 9 : Application viewer 3D - Visualisation d'un modèle (coupé).

Les contrôles à la souris permettent de naviguer autour du modèle visualisé (zoom, déplacement, etc.). Des raccourcis situés dans la barre de menu permettent de recadrer automatiquement la vue suivant un angle prédéfini, ou bien aussi de changer l'exagération verticale pour permettre une visualisation plus fine des formations.

Associées à cette visualisation en trois dimensions des modèles, deux autres fonctionnalités permettent de réaliser des sondages virtuels et des coupes virtuelles. La fonctionnalité de sondages virtuels permet, comme son nom l'indique, de simuler un sondage dans le modèle, permettant de récupérer le log géologique au point choisi. Celui-ci se présente alors sous forme d'une image présentant le log et d'une légende associée.

Les caissons de la légende comportent des liens vers les entités B2D – RGF correspondantes (Figure 10).

La fonctionnalité de coupes virtuelles est similaire mais permet de réaliser des coupes simples (segment non incliné). La fiche résultante présente une carte permettant de repérer la position de la coupe, la coupe sous format image et la légende en dessous. De même que pour les sondages virtuels, les caissons de la légende comportent des liens vers les entités B2D – RGF correspondantes (Figure 11).

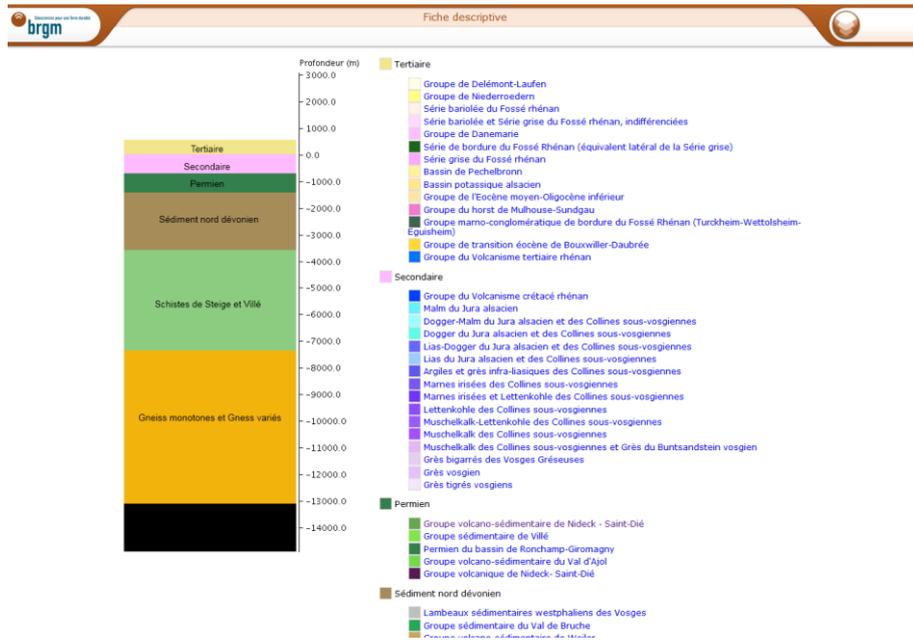


Figure 10 : Application viewer 3D - Fiche de sondage virtuel

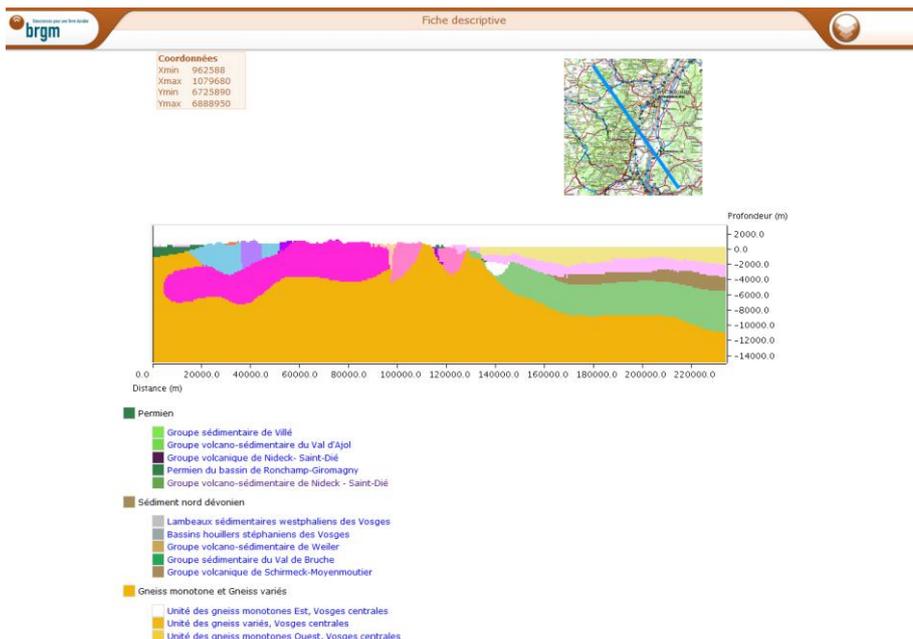


Figure 11 : Application viewer 3D - Fiche de coupe virtuelle

La création de sondage virtuel et de coupe virtuelle n'a pas été branchée dans le prototype actuel.

Les fiches des sondages et coupes sont fonctionnelles, cependant pour arriver à ces fiches, la fonctionnalité qui permet de visuellement choisir un outil permettant de dessiner un point (pour les sondages) ou un segment (pour les coupes), puis de dessiner ce dit point ou segment n'est pas implémenté.

Ainsi, un utilisateur qui voudra afficher une fiche de sondage ou coupe devra entrer manuellement l'URL de la fiche avec les paramètres nécessaires (coordonnées du point ou du segment).

De même, la fonctionnalité qui permet de cliquer sur un forage de référence dans la visualisation du modèle 3D pour ouvrir sa fiche B2D – RGF correspondante n'est pas implémentée. La fonctionnalité qui permet de cliquer sur une formation dans la visualisation du modèle 3D pour ouvrir sa fiche B2D – RGF correspondante n'est pas implémentée.

d) *Recommandations et perspectives*

Ce prototype 3D actuel a démontré les limites à la fois des choix technologiques mais aussi du manque de gestion des données 3D. Les relations entre les données « brutes » et les modèles 3D doivent être renforcées afin de garantir la traçabilité de ces éléments.

Afin d'améliorer cet axe, une ou plusieurs actions doivent être menées afin d'organiser le stockage des modèles géologiques et conserver de manière pérenne, dans ce modèle, les relations avec les données « brutes ».

2.2.4. Application SIG démonstrateur

a) *Contexte*

Les développements réalisés au terme du démonstrateur, sur l'application web cartographique et le Viewer 3D, ne permettent pas à ce jour de donner accès de manière complète aux données géologiques acquises dans le cadre de ce projet.

Bien que ces développements aient permis d'amorcer plusieurs composantes de la mise en place du futur SI - RGF, l'équipe de projet a mis en place une application SIG qui permet l'accès à ces données.

Il a également été décidé que l'accès à cette application SIG et aux données inhérentes ne serait qu'interne au BRGM.

Les principaux objectifs fixés pour cette application sont :

- de consulter l'ensemble données du démonstrateur ;
- de réaliser diverses recherches sur les données par groupement thématique ;
- de permettre la récupération (ou extraction) de données ;
- de centraliser et accéder aux documents numériques et principaux livrables du démonstrateur.

b) *Mise en œuvre et contexte technique*

La mise en place de cette application SIG a été faite au sein de l'unité DGR/OEG par deux intervenants.

Cette application SIG a été conçue avec l'environnement d'ESRI, ArcGIS Server 10.0, mis à disposition par DSI sur le serveur DGR du BRGM et est accessible à partir d'un navigateur internet.

Le choix de cette technologie est argumenté par le fait que sa mise en œuvre est rapide et adaptée aux objectifs fixés. En effet, ce produit met à disposition divers outils de publications de données SIG, ne nécessitant pour la plupart que de simples configurations.

Les données publiées par cette application correspondent à l'ensemble des données contenues dans la base de données de stockage, mis en place dans l'attente du futur SI, comme détaillée dans la section 2.1.3.

L'accès à cette plate-forme SIG est disponible, via un navigateur internet, à l'adresse suivante : http://srv155.brgm.fr/rqf_demo/.

L'ensemble des notices d'utilisation sont consultables via cette même application.

Ces données sont également consultables par l'utilisation des autres produits ESRI, mis à disposition par le BRGM, tels qu'ArcGIS Desktop. Ces données sont consultables via des documents ArcGIS v 10 (*.mxd) pour chacune des groupements thématiques et la base de données de stockage associée.

c) Résultats

L'application SIG est opérationnelle en donnant accès à l'ensemble des données acquises dans le cadre démonstrateur, et mis en forme dans la base de données de stockage SIG (Figure 12).

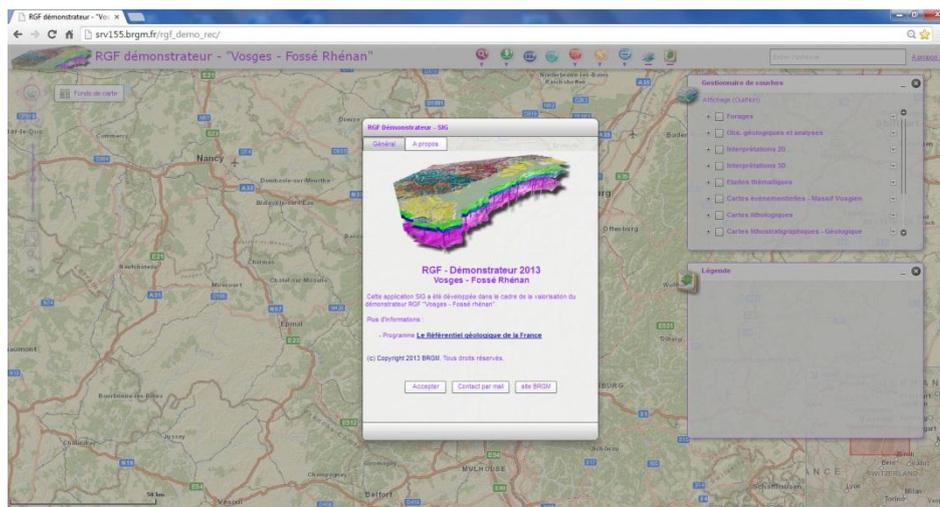


Figure 12 : Application SIG du démonstrateur.

Les données sont accessibles par groupements thématiques, en corrélation avec la structuration des données SIG explicitées dans la section 2.3.

Chacun de ces groupements thématiques sont visualisables par l'intermédiaire d'un « Gestionnaire de couches » (Figure 13), présent dans la barre d'outils en haut de l'application. Ce gestionnaire de couches permet d'accéder à chaque couche SIG mise à disposition, avec la possibilité pour chacune de gérer plusieurs paramètres d'affichage (zoom, déplacement, transparence, ...)

Chaque élément affiché est interrogeable par un simple clic de souris, sur l'élément graphique désirée. Le résultat de cette identification est une popup affichant l'ensemble des informations attributaires attachées, et les informations des couches SIG associées (Figure 14).

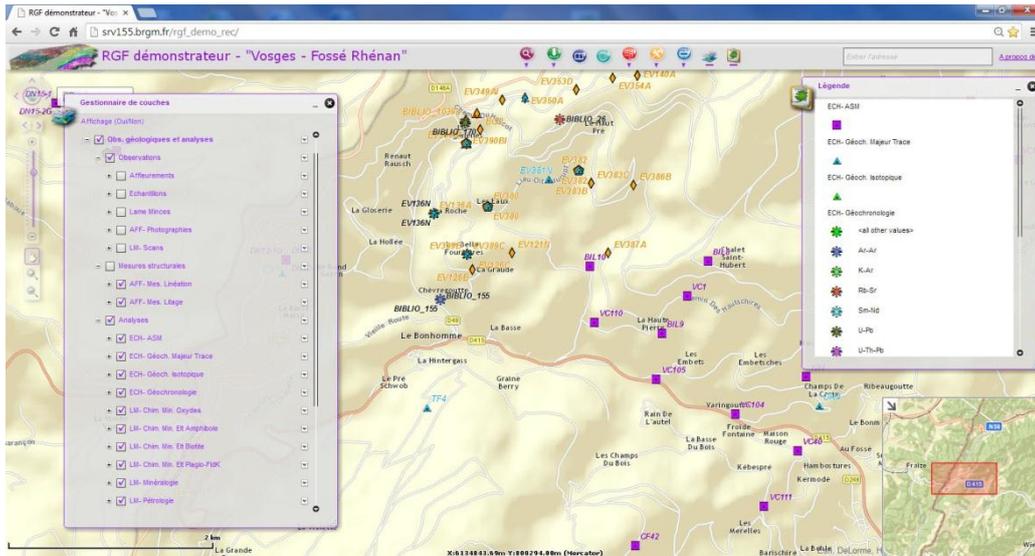


Figure 13 : Application SIG - Gestionnaire des couches SIG.

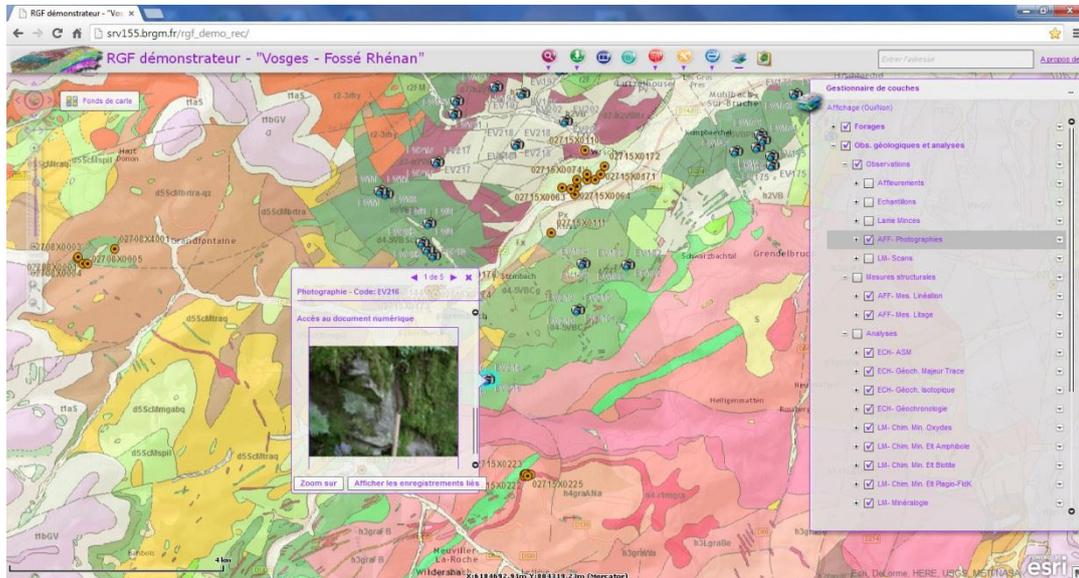


Figure 14 : Application SIG - Identification des données.

Outre les fonctionnalités basiques d'un SIG (contrôle des couches, zoom, déplacement, ...), plusieurs fonctionnalités ont été mises en place pour exploiter au mieux les données du démonstrateur.

Des fonctionnalités de recherche ont été configurées pour chacun des groupements thématiques, permettant de filtrer les données par leurs informations attributaires et/ou spatiale. Ces fonctionnalités sont accessibles dans la barre d'outils en haut, en sélectionnant le groupement thématique désirée. Les résultats sont exportables sous forme de données attributaires (Figure 15).

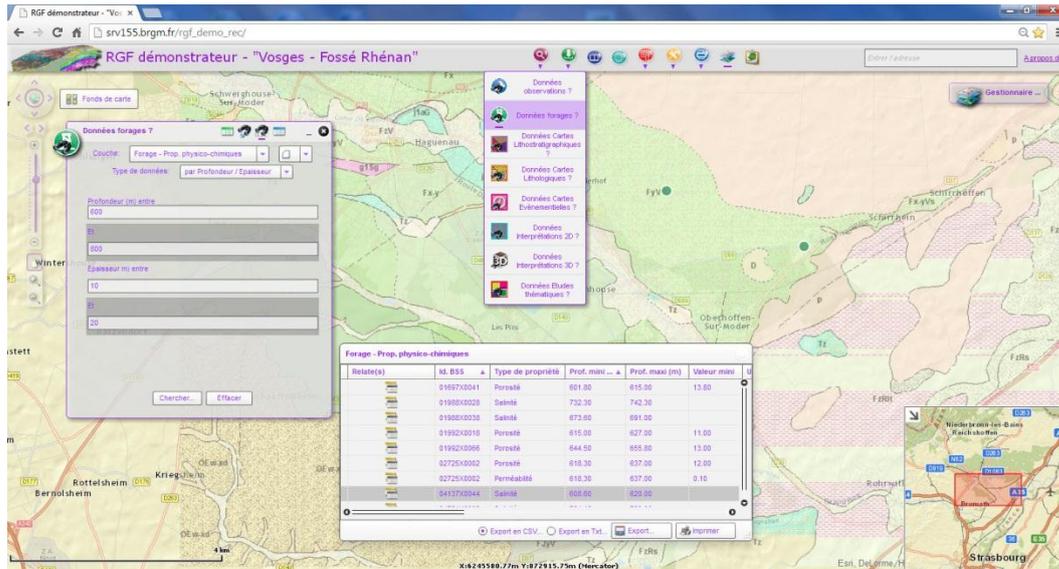


Figure 15 : Application SIG - Fonctionnalités de recherche.

L'ensemble des données de référence du démonstrateur a été centralisé dans cette application.

Les lexiques générés lors du projet démonstrateur ont été mis à disposition, à travers la barre d'outils. Ces lexiques sont accessibles indépendamment les uns des autres sous forme de tableau (Figure 16).

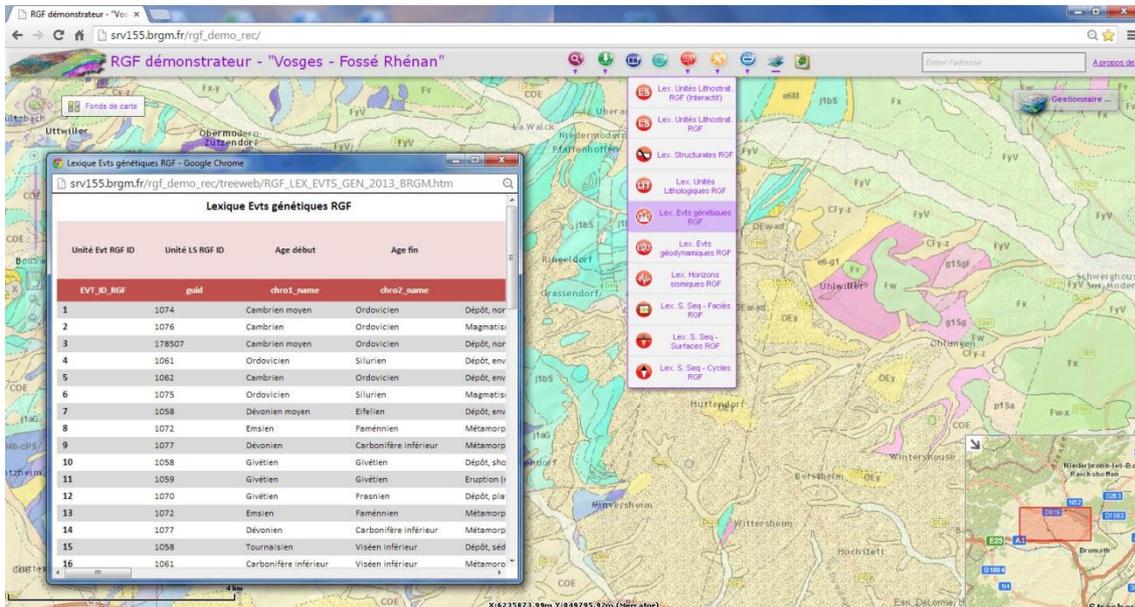


Figure 16 : Application SIG - Accès aux lexiques RGF.

Les données bibliographiques, délivrables du démonstrateur, notices d'utilisation de l'application, etc. sont accessibles par des outils donnant accès à une structure arborescente de fichiers consultables (Figure 17). Ces outils de consultation documentaire sont accessibles par la barre d'outils en haut de l'application.

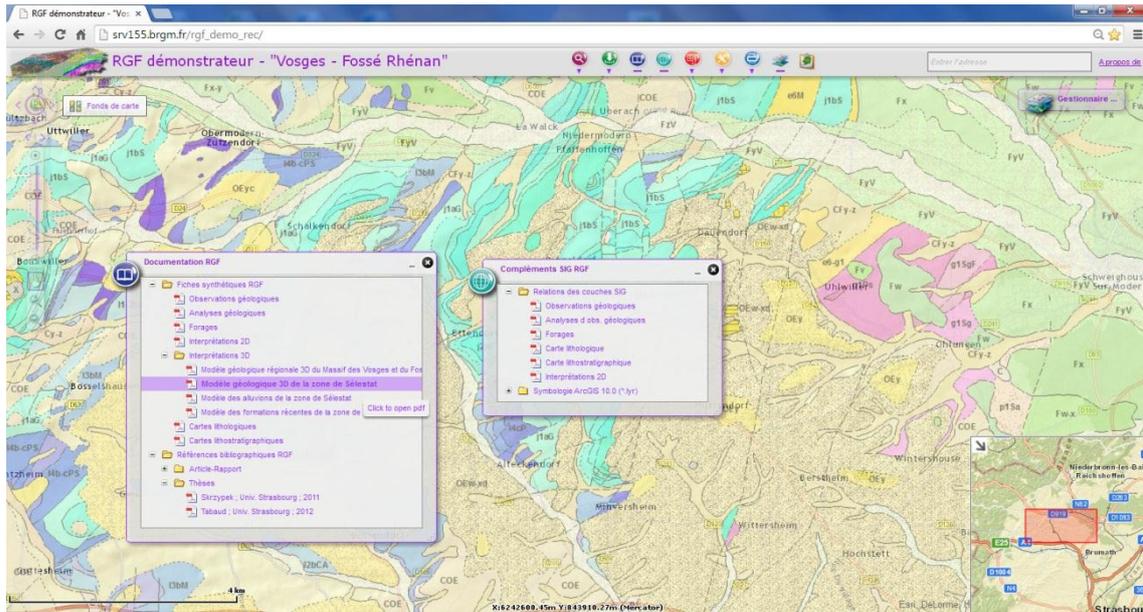


Figure 17 : Application SIG - Consultation des documents numériques.

Des fonctionnalités d'extraction de la base de données SIG ont été mises en place. Cette extraction se fait uniquement par recherche spatiale à l'aide des outils de dessins graphiques, permettant à l'utilisateur de définir de manière interactive sa zone de sélection. Plusieurs formats d'extraction ont été mis en place (ex. ESRI Shapefile, ESRI Geodatabase, AutoCAD, TIFF, ...) (Figure 18).

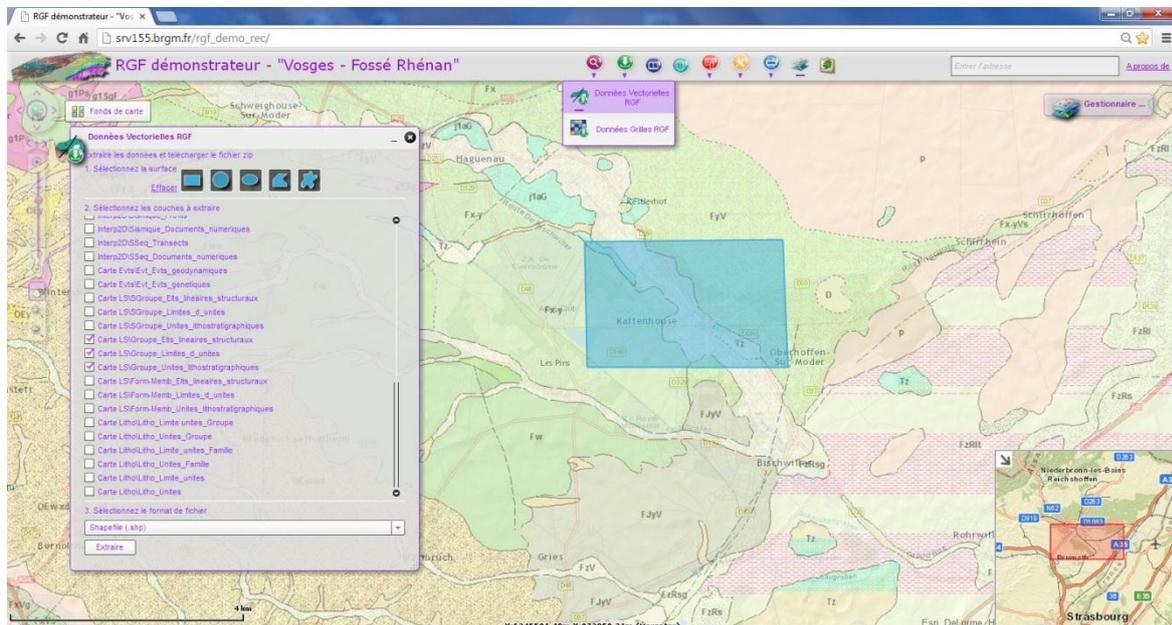


Figure 18 : Application SIG - Fonctionnalités d'extraction.

Des fonctionnalités complémentaires, permettant à l'utilisateur par exemple de se placer sur une zone géographique prédéfinie (ex. étendu d'une carte à 1/50 000), de réaliser des annotations et des dessins (Figure 19), d'importer temporairement des shapefiles personnels, ... ont été mis en place dans la barre d'outils de l'application et sont opérationnels.

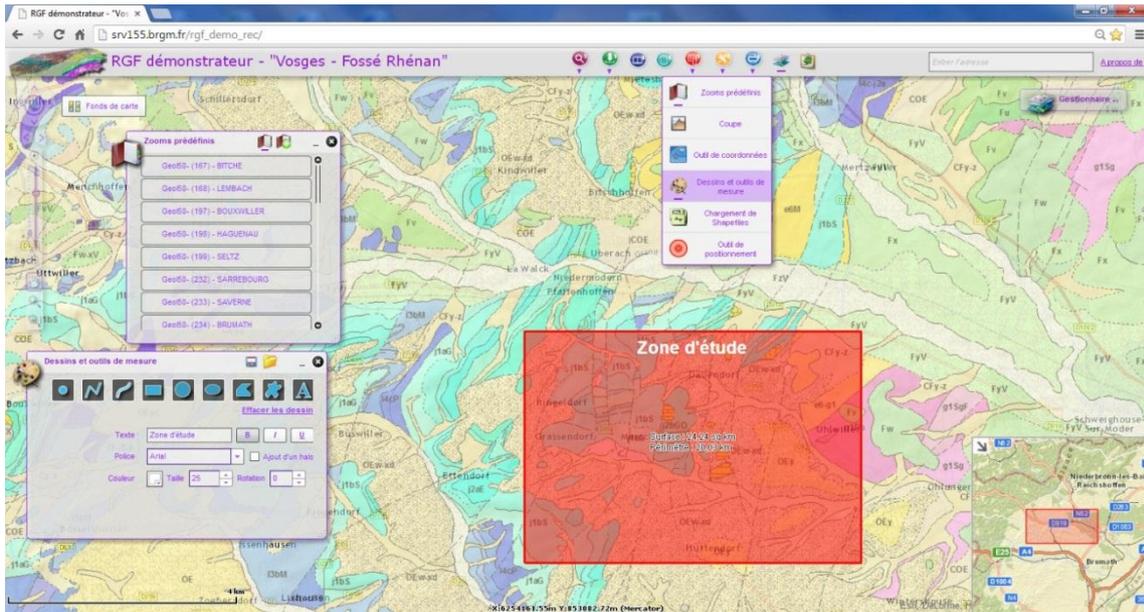


Figure 19 : Application SIG - Fonctionnalité de dessins et annotations.

Une fonctionnalité d'impression et d'export au format image de l'environnement SIG est également disponible dans la barre d'outils. Cette fonctionnalité permet à l'utilisateur de disposer rapidement d'une mise en page de sa fenêtre courante dans l'application SIG, et de l'exporter sous différents formats (Figure 20).

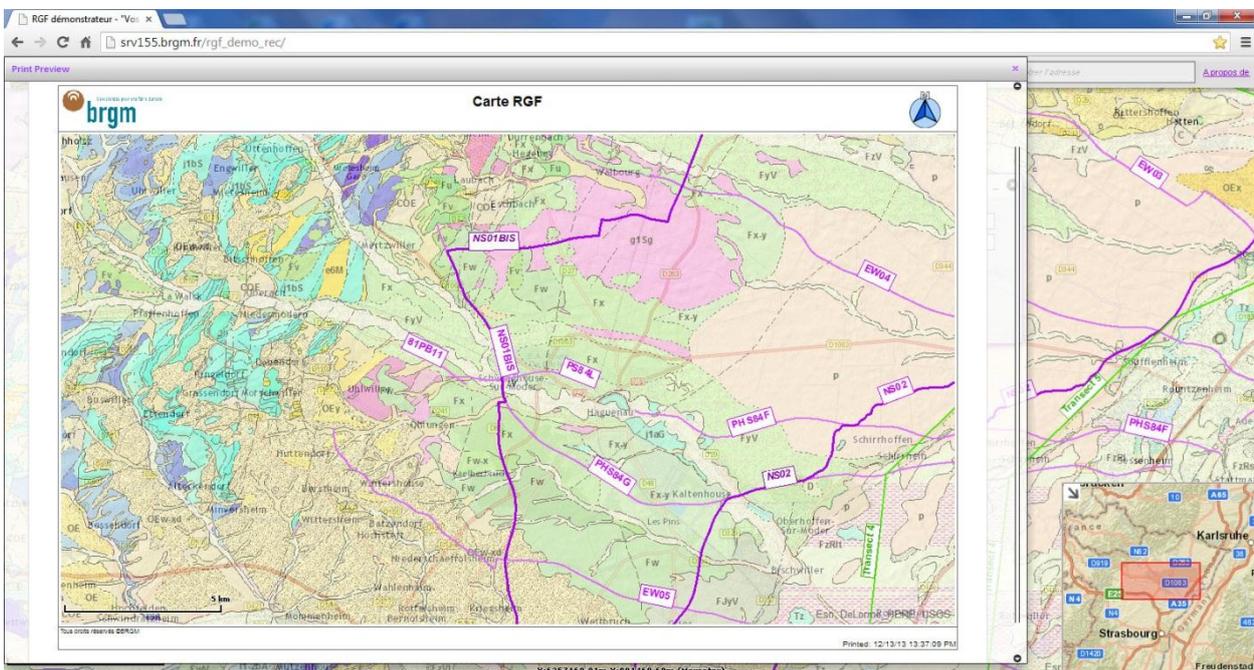


Figure 20 : Application SIG - Mise en page et impression.

d) *Recommandations et perspectives*

Cette application SIG permet de donner accès et de valoriser les travaux réalisés dans le cadre du démonstrateur. Elle permet de consulter, rechercher, et exploiter en partie les données.

Cette application pourra être bénéfique à la mise en place du SI - RGF de par :

- les éventuels retours utilisateurs de cette application, en terme de consultation et d'exploitation, afin d'affiner les recueils de besoins du SI ;
- les points forts et faibles de l'accessibilité aux données.

2.3. DONNÉES SIG

2.3.1. Contexte

Les données SIG sont structurées sous forme de couches SIG (classes d'entités et tables) dans une géodatabase fichier ESRI, de type v10.0 (D. Rambourg, 2013, BRGM/RP-63091-FR).

La structuration de ces données s'est faite sur la base des groupements thématiques suivants :

- **forages** : données et interprétations sur forages ;
- **observations géologiques et analyses** : données de terrains et analyses associées ;
- **interprétations 2D** : données d'interprétations sismiques et de stratigraphie séquentielle ;
- **interprétations 3D** : données et emprises des modèles géologiques 3D ;
- **études thématiques** : emprises et livrables associés des études thématiques, réalisées dans le cadre du démonstrateur ;
- **cartes évènementielles** : cartes résultant de l'étude évènementielle, réalisée dans le cadre du démonstrateur ;
- **cartes lithologiques** : cartes hiérarchisées sur la base des lexiques d'unités lithologiques ;
- **cartes lithostratigraphiques (ou « géologique »)** : cartes hiérarchisées sur la base des lexiques d'unités lithostratigraphiques.

2.3.2. Catalogue des couches SIG et structure

Les tableaux ci-dessous, présentent la structure mise en place dans la base de données SIG, et les couches SIG accessibles par l'application présentée dans la section 2.2.4.

a) *Forages*

Nom Dataset SIG	Nom de la couche SIG	Alias de la couche SIG	Type de la couche SIG	Géométrie
DATA_BOREHOLE_REF	D_BHL_METADATA_REF_RGF	Forage - Métadonnées	Géométrique	Point
DATA_BOREHOLE_REF	D_BHL_OBS_REF_RGF	Forage - Observations géologiques	Géométrique	Point
DATA_BOREHOLE_REF	D_BHL_PROP_PHYS_CHIM_REF_RGF	Forage - Prop. physico-chimiques	Géométrique	Point
DATA_BOREHOLE_REF	D_BHL_PROP_TEMP_REF_RGF	Forage - Températures	Géométrique	Point
DATA_BOREHOLE_REF	D_BHL_ULS_REF_RGF	Forage - Unités LS Form-Membre	Géométrique	Point
DATA_BOREHOLE_DERIVED	D_BHL_ULS_G_RGF	Forage - Unités LS Groupe	Géométrique	Point

Nom Dataset SIG	Nom de la couche SIG	Alias de la couche SIG	Type de la couche SIG	Géométrie
DATA_BOREHOLE_DERIVED	D_BHL_ULS_SG_RGF	Forage - Unités LS Supergroupe	Géométrique	Point
DATA_BOREHOLE_REF	D_BHL_STRUCT_REF_RGF	Forage - Infos. structurales	Géométrique	Point
DATA_BOREHOLE_REF	D_BHL_SISM_REF_RGF	Forage - Marqueurs sismiques	Géométrique	Point
DATA_BOREHOLE_REF	D_BHL_SSQ_FAC_REF_RGF	Forage - S. Seq Faciès	Géométrique	Point
DATA_BOREHOLE_REF	D_BHL_SSQ_SR_REF_RGF	Forage - S. Seq Surfaces	Géométrique	Point
DATA_BOREHOLE_REF	D_BHL_SSQ_CY_REF_RGF	Forage - S. Seq Cycles	Géométrique	Point
	D_BHL_OBS_LITHO	Forage - Infos lithologiques	Table	
	D_BHL_SISM_LOI_VIT	Forage - Lois de vitesse	Table	
	D_BHL_SISM_REF_PRJ	Forage - Références de projet	Table	

b) Observations géologiques et analyses

Nom Dataset SIG	Nom de la couche SIG	Alias de la couche SIG	Type de la couche SIG	Géométrie
DATA_OBS_REF	P_AFF_DATA_OBS_RGF	Affleurements	Géométrique	Point
DATA_OBS_REF	P_ECH_DATA_OBS_RGF	Echantillons	Géométrique	Point
DATA_OBS_REF	P_LM_DATA_OBS_RGF	Lames Minces	Géométrique	Point
DATA_OBS_AFF_DERIVED	P_AFF_DOCNUM_PIC_DATA_OBS_RGF	Affleurement - Photographies	Géométrique	Point
DATA_OBS_LM_DERIVED	P_LM_DOCNUM_SCAN_DATA_OBS_RGF	Lame mince - Scans	Géométrique	Point
DATA_OBS_AFF_DERIVED	P_AFF_LIN_SYNT_DATA_OBS_RGF	Affleurement - Mes. Linéation	Géométrique	Point
DATA_OBS_AFF_DERIVED	P_AFF_LIT_SYNT_DATA_OBS_RGF	Affleurement - Mes. Litage	Géométrique	Point
DATA_OBS_ECH_DERIVED	P_ECH_ASM_OBS_RGF	Échantillon - Données ASM	Géométrique	Point
DATA_OBS_ECH_DERIVED	P_ECH_ANA_GCH_MAJOR_TRACE_ELTS_DATA_OBS_RGF	Échantillon - Géoch. Majeur Trace	Géométrique	Point
DATA_OBS_ECH_DERIVED	P_ECH_ANA_GCH_ISOTOPES_ELTS_DATA_OBS_RGF	Échantillon - Géoch. Isotopique	Géométrique	Point
DATA_OBS_LM_DERIVED	P_LM_CHIMIE_MIN_OXYDE_DATA_OBS_RGF	Lame mince - Chim. Min. Oxydes	Géométrique	Point
DATA_OBS_LM_DERIVED	P_LM_CHIMIE_MIN_AMPHI_ELT_DATA_OBS_RGF	Lame mince - Chim. Min. Elt Amphibole	Géométrique	Point
DATA_OBS_LM_DERIVED	P_LM_CHIMIE_MIN_BIOT_ELT_DATA_OBS_RGF	Lame mince - Chim. Min. Elt Biotite	Géométrique	Point
DATA_OBS_LM_DERIVED	P_LM_CHIMIE_MIN_PLAGIO_FLD_K_ELT_DATA_OBS_RGF	Lame mince - Chim. Min. Elt Plagio-FldK	Géométrique	Point
DATA_OBS_LM_DERIVED	P_LM_ASSOC_MINERALO_DATA_OBS_RGF	Lame mince - Minéralogie	Géométrique	Point
DATA_OBS_ECH_DERIVED	P_ECH_GCH_GEOCHRONO_DATA_OBS_RGF	Échantillon - Géochronologie	Géométrique	Point
DATA_OBS_LM_DERIVED	P_LM_PETRO_DATA_OBS_RGF	Lame mince - Pétrologie	Géométrique	Point
	D_OBS_AFF_LEX_ZONE	Obs. géologiques - Zones d'affleurements	Table	
	D_OBS_ECH_ANA_GCH_GEOCHRONO	Obs. géologiques - Analyse géochronologique	Table	
	D_OBS_ECH_BIBLIO	Obs. géologiques - Références bibliographiques	Table	

c) Interprétations 2D

Nom Dataset SIG	Nom de la couche SIG	Alias de la couche SIG	Type de la couche SIG	Géométrie
DATA_SISM_REF	DATA_SISM_L_LINE_SISM_RGF	Sismique - Profils	Géométrique	Polyligne
DATA_SISM_DERIVED	DATA_SISM_DOCNUM_L_LINE_SISM_RGF	Sismique - Documents numériques	Géométrique	Polyligne
DATA_SISM_REF	DATA_SISM_P_ACQ_INTERP_SISM_RGF	Sismique - Données interprétations	Géométrique	Polyligne
	D_SISM_LINE_TRAIT_DATA	Sismique - Données interprétations	Table	
	D_SISM_LINE_METADATA	Sismique - Métadonnées	Table	
	D_SISM_LINE_TRAIT	Sismique - Infos. Traitement	Table	
DATA_SSQ_REF	DATA_SSQ_L_TRANSECT_RGF	S Seq. - Transects	Géométrique	Polyligne
DATA_SSQ_DERIVED	DATA_SSQ_L_TRANSECT_DOCNUM_RGF	S Seq. - Documents numériques	Géométrique	Polyligne

d) Interprétations 3D

Nom Dataset SIG	Nom de la couche SIG	Alias de la couche SIG	Type de la couche SIG	Géométrie
DATA_I3D_REF	D_I3D_METADATA_RGF	Modèle Geol- Métadonnées	Géométrique	Polygon
DATA_I3D_DERIVED	D_I3D_DOCNUM	Modèle Geol- Docs Num.	Géométrique	Polygon
	D_I3D_PILE3D	Modèle Geol- Pile 3D	Table	

e) Études thématiques

Nom Dataset SIG	Nom de la couche SIG	Alias de la couche SIG	Type de la couche SIG	Géométrie
DATA_THEM_REF	D_THEM_METADATA_RGF	Et. Thématique- Métadonnées	Géométrique	Polygon
DATA_THEM_DERIVED	D_THEM_DOCNUM_RGF	Et. Thématique- Docs Num.	Géométrique	Polygon

f) Cartes évènementielles

Nom Dataset SIG	Nom de la couche SIG	Alias de la couche SIG	Type de la couche SIG	Géométrie
DATA_CARTO_EVT_REF	DATA_CARTO_EVT_S_FGEOL_GEODYN_RGF	Carte Evt. - Evts géodynamiques	Géométrique	Polygon
DATA_CARTO_EVT_REF	DATA_CARTO_EVT_S_FGEOL_GENES_RGF	Carte Evt. - Evts génétiques	Géométrique	Polygon

g) Cartes lithologiques

Nom Dataset SIG	Nom de la couche SIG	Alias de la couche SIG	Type de la couche SIG	Géométrie
DATA_CARTO_LITHO_DERIVED	DATA_CARTO_LIT_L_FGEOL_GL_RGF50K	Carte Lithologie - Limite d'unités Groupe	Géométrique	Polyligne
DATA_CARTO_LITHO_DERIVED	DATA_CARTO_LIT_S_FGEOL_GL_RGF50K	Carte Lithologie - Unités - Groupe	Géométrique	Polygon
DATA_CARTO_LITHO_DERIVED	DATA_CARTO_LIT_L_FGEOL_FL_RGF50K	Carte Lithologie - Limite d'unités Famille	Géométrique	Polyligne
DATA_CARTO_LITHO_DERIVED	DATA_CARTO_LIT_S_FGEOL_FL_RGF50K	Carte Lithologie - Unités - Famille	Géométrique	Polygon
DATA_CARTO_LITHO_REF	DATA_CARTO_LIT_L_FGEOL_L_RGF50K	Carte Lithologie - Limite d'unités	Géométrique	Polyligne
DATA_CARTO_LITHO_REF	DATA_CARTO_LIT_S_FGEOL_L_RGF50K	Carte Lithologie - Unités	Géométrique	Polygon

h) Cartes lithostratigraphiques

Nom Dataset SIG	Nom de la couche SIG	Alias de la couche SIG	Type de la couche SIG	Géométrie
DATA_CARTO_ULS_DERIVED	DATA_CARTO_ULS_L_STRUCT_RG500K	Carte LS Supergroupe- Elts. Linéaires structuraux	Géométrique	Polyligne
DATA_CARTO_ULS_DERIVED	DATA_CARTO_ULS_L_FGEOL_RG500K	Carte LS Supergroupe - Limites d'unités	Géométrique	Polyligne
DATA_CARTO_ULS_DERIVED	DATA_CARTO_ULS_S_FGEOL_RG500K	Carte LS Supergroupe- Unités lithostratigraphiques	Géométrique	Polygone
DATA_CARTO_ULS_DERIVED	DATA_CARTO_ULS_L_STRUCT_RG250K	Carte LS Groupe- Elts. Linéaires structuraux	Géométrique	Polyligne
DATA_CARTO_ULS_DERIVED	DATA_CARTO_ULS_L_FGEOL_RG250K	Carte LS Groupe - Limites d'unités	Géométrique	Polyligne
DATA_CARTO_ULS_DERIVED	DATA_CARTO_ULS_S_FGEOL_RG250K	Carte LS Groupe- Unités lithostratigraphiques	Géométrique	Polygone
DATA_CARTO_ULS_RE F	DATA_CARTO_ULS_L_STRUCT_RG50K	Carte LS Form/Membre - Elts. Linéaires structuraux	Géométrique	Polyligne
DATA_CARTO_ULS_RE F	DATA_CARTO_ULS_L_FGEOL_RG50K	Carte LS Form/Membre - Limites d'unités	Géométrique	Polyligne
DATA_CARTO_ULS_RE F	DATA_CARTO_ULS_S_FGEOL_RG50K	Carte LS Form/Membre - Unités lithostratigraphiques	Géométrique	Polygone

3. Inventaire et collecte de l'information

La première phase de lancement d'un chantier RGF passe par un inventaire et une collecte de l'information disponible et utilisable pour l'ensemble des disciplines des Géosciences.

3.1. OBJECTIF

Elle vise à rechercher et réunir l'ensemble de l'information pour un même chantier, la référencer et la rendre accessible de manière à optimiser l'exécution la phase de « mise en cohérence » de ces données.

Dans le contexte du démonstrateur, toute l'information existante sur l'emprise Vosges - Fossé rhénan ne pouvait pas être traitée. Une sélection a été réalisée dans cette zone parmi les thèses, les bases de données existantes et les projets antérieurs. Les données y sont essentiellement géologiques (cartes géologiques, données d'affleurement, forages, ...), géophysiques (interprétation de la sismique 2D, gravimétrie, magnétisme). Néanmoins d'autres types de données spécifiques aux thématiques appliquées sont utilisées (cf. Chap. 7).

3.2. TYPES DE DONNÉES

Au commencement d'un chantier, les sources d'information à rassembler sont multiples. La partie développée ci-dessous énonce des types et sources de données exploitables, suivie de recommandations pour les futurs chantiers sur la base de l'expérience vécue dans le cadre de ce projet pilote.

3.2.1. Données cartographiques

Elle regroupe l'ensemble des données cartographiques géologiques disponible sur le secteur d'étude concernée et comprend en particulier :

- les cartes à 1/80 000 couvrant la zone d'études (à intégrer dans la base notamment pour les secteurs dépourvus de levés à 1/50 000) ;
- les cartes à 1/50 000 du Programme national de lever de la carte France (1^{ère}, 2^{ème}, voire 3^{ème} édition) ;
- les cartes départementales « harmonisées » réalisées par le BRGM dans le cadre du projet « aléa retrait-gonflement des argiles » et/ou du projet CHARM ; accessoirement (pour signaler leur existence), la carte à 1/1 000 000 de la France, les cartes géologiques à 1/250 000 ;

mais également les cartes thématiques pour les domaines : minier, matériaux, hydrogéologie, risques naturels, géothermie, géophysique et également les cartes obtenues dans le cadre de projets plus spécifiques, régionaux ou locaux, notamment dans le cadre de thèses, projets de recherche avec thématiques diverses (gîtologie, géothermie, risques naturels, géophysique, etc.), projets commerciaux.

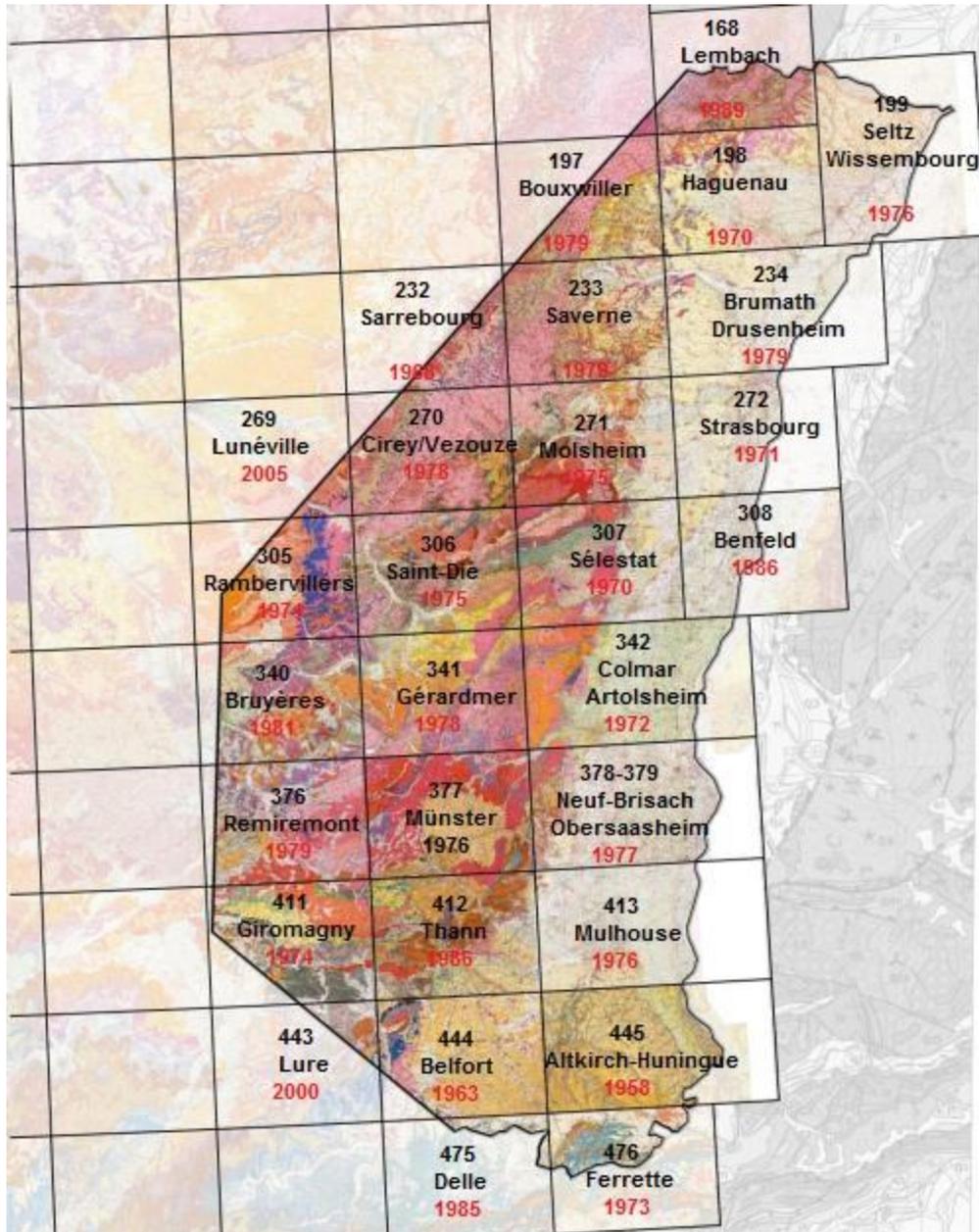


Figure 21 - Localisation des trente coupures géologiques à 1/50 000 disponibles dans le cadre du démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan ».

Les données cartographiques sélectionnées et utilisées dans le cadre du projet démonstrateur représentent :

- 30 cartes géologiques à 1/50 000 couvrant la zone et issues du Programme national de lever de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/50 000 (Figure 21) ;
- la 2^{ème} édition de la carte à 1/50 000 – feuille Haguenau, à l'état de maquette, non encore publiée ;
- la carte géologique du massif du Champ du Feu et de ses alentours, réalisée dans le cadre du programme de la carte géologique de la France en vue d'une réactualisation future (2^{ème} édition) de la carte géologique à 1/50 000 - feuille Sélestat ;

- 7 cartes départementales « harmonisées » des départements de la Meurthe-et-Moselle (54), de la Moselle (57), du Bas-Rhin (67), du Haut-Rhin (68), du Territoire de Belfort (90) de la Haute-Saône (70) et des Vosges (88) (Figure 22) ;
- les cartes à 1/50 000 issues des thèses d'E. Skrzypek et A.S Tabaud (Université de Strasbourg) ;
- les cartes des formations superficielles du Fossé rhénan réalisée à l'échelle du 1/25 000 par le BRGM, avec la région Alsace et l'agence de l'eau « Rhin-Meuse » dans le cadre du projet « BRAR » (Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan) (Figure 23).

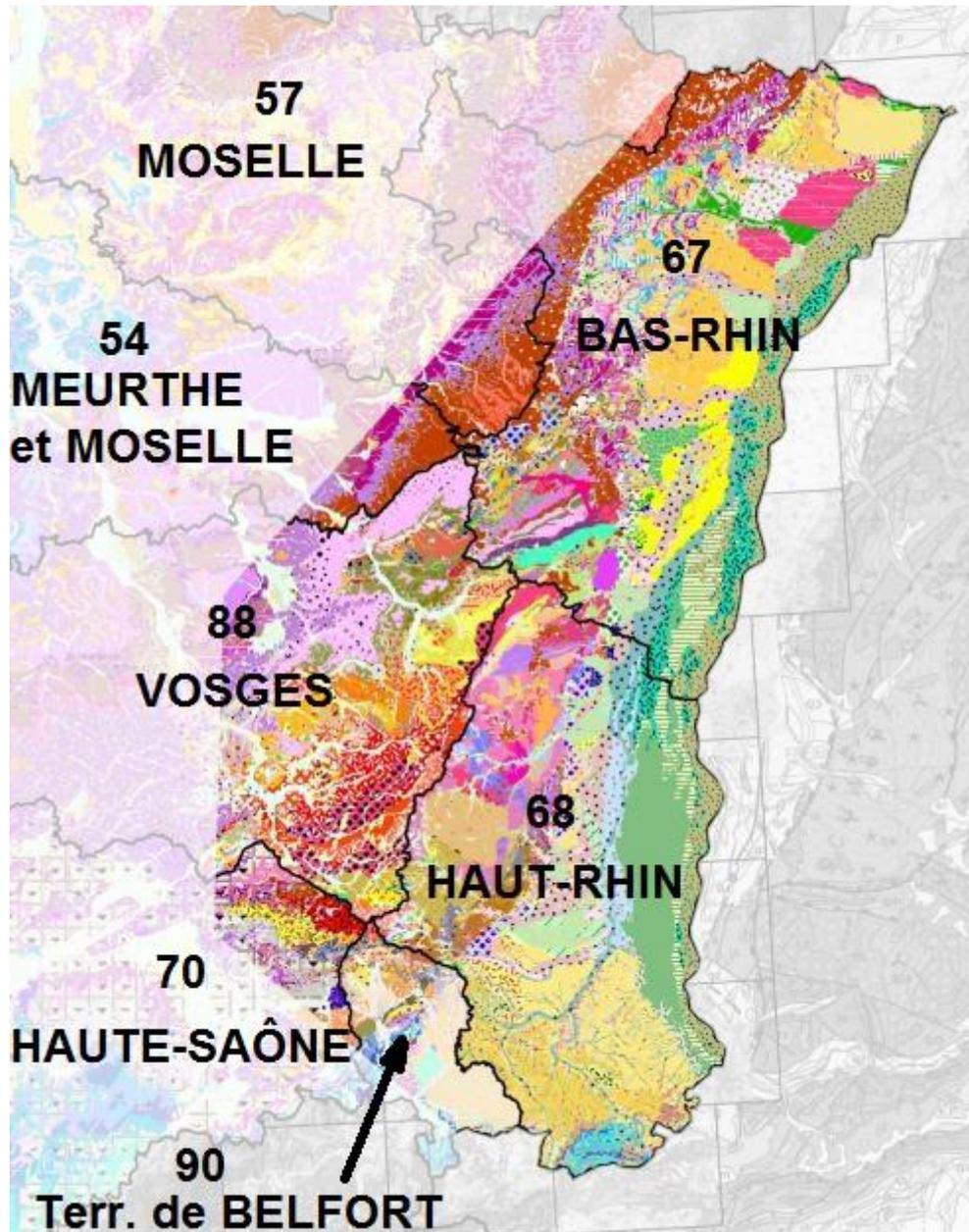


Figure 22 - Localisation des sept cartes départementales harmonisées (projet CHARM-BRGM) disponibles dans le cadre du démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan ».

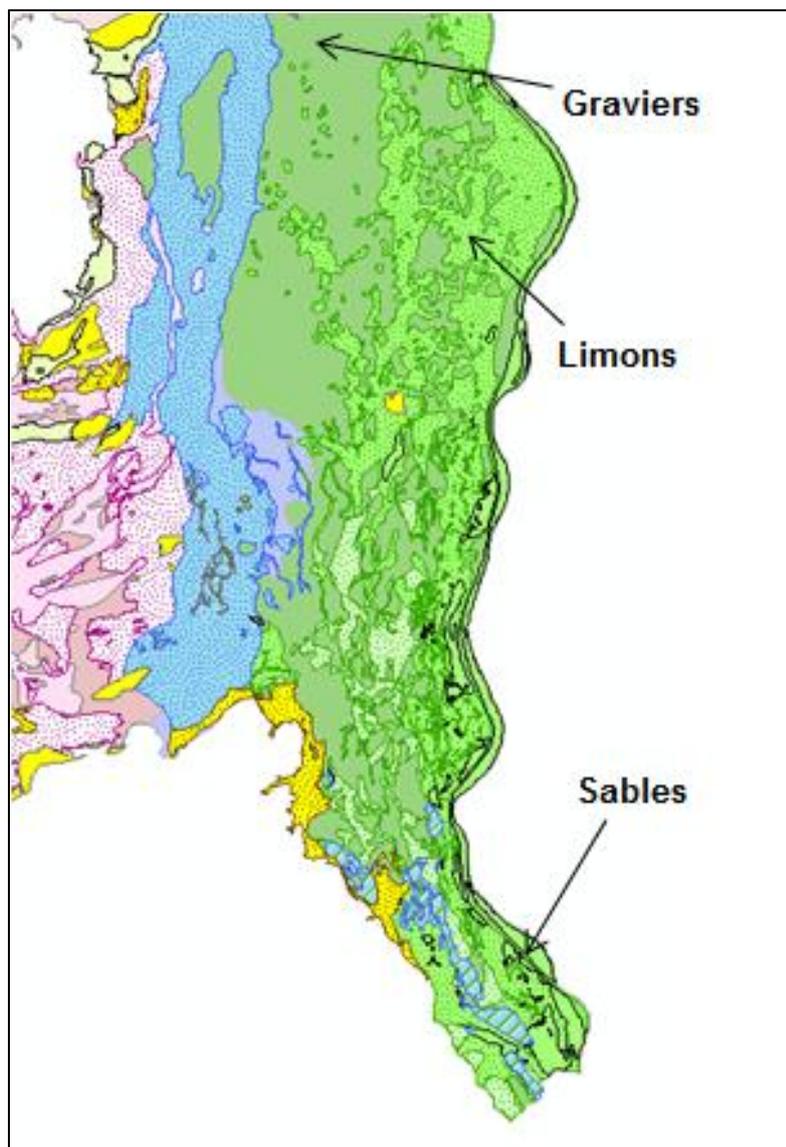


Figure 23 - Carte des formations superficielles de la plaine rhénane (projet BRAR).

Discussion sur les données sélectionnées

La couverture cartographique à 1/50 000 est globalement ancienne et nécessite une réactualisation, notamment pour la couverture où certains terrains n'ont pas pu être individualisés et demeurent à l'état de regroupements de formations. Pour les formations superficielles, hormis la zone d'étude de la BRAR, la cartographie du régolithe est réduite ou inexistante et nécessite une réactualisation des cartes sur ce sujet, pour le socle. Néanmoins, la qualité pour le substratum à l'échelle du 1/50 000 et à l'échelle départementale est bonne. De plus, nous avons bénéficié des apports cartographiques nouveaux, comme la carte 2^{ème} édition d'Haguenau, mais aussi ceux du projet BRAR qui constituent un apport majeur pour préciser la cartographie des formations superficielles. L'absence de validation des cartes géologiques départementales harmonisées laisse « planer » un doute sur la qualité de rendu de ces cartes, de plus les recherches bibliographiques sur la donnée cartographique n'ont pas pu être approfondies dans le cadre de ce projet. Il existe très probablement d'autres documents, notamment de thèses qui auraient permis d'affiner et de préciser la cartographie géologique de ce secteur.

3.2.2. Données ponctuelles : observations de terrain et analyses

Plusieurs types de données entrent dans cette catégorie. Bien qu'étant généralement associées à un rapport d'études ou à une publication, elles devront être extraites de leur contexte pour alimenter la base de données RGF.

Parmi ces données, les données de surface associées à un point d'observation, un affleurement, géo-référencé avec notamment :

- les données structurales :
 - mesure de stratification et pendage associé,
 - mesure de schistosité et pendage associé,
 - mesure de linéation et pendage associé,
 - mesure d'axe de plis et plongement associé ;
- les données ASM :
 - mesure de stratification,
 - mesure de linéation,
 - mesure de schistosité ;
- les données obtenues en laboratoire telles que :
 - des analyses géochimiques (éléments majeurs et traces),
 - des analyses isotopiques (traçage ou datation),
 - des analyses physico-chimiques et minéralogiques qualitatives et quantitatives ;
 - des essais physiques pour la caractérisation des minéraux, roches ou matériaux (exemple : mesures de porosité, de perméabilité, de salinité, etc.),
 - des analyses à la microsonde ou au MEB,
 - des études minéralogiques (lame mince, microscope, microsonde, MEB),
 - des études métallographiques (étude des minéralisations),
 - des expertises minéralogiques sur minéraux en grains (notamment alluvionnaires).

a) *Données sélectionnées pour le démonstrateur*

La majorité des données analytiques enregistrées dans le cadre de ce projet démonstrateur est issue des travaux réalisés par E. Skrzypek (2011) et A.-S. Tabaud (2012), tous deux de l'université de Strasbourg sur le socle vosgien (Université de Strasbourg)

1 841 affleurements ont été référencés, avec près de 2 300 points de mesure, sur lesquels ont été réalisés et enregistrés au total : 1 809 photos, 13 analyses en radiochronologie, 14 lames minces étudiées en LPA/LPNA :

- en mesures structurales : 212 mesures de linéation, 2344 mesures de stratification ;
- en mesures structurale ASM : 714 mesures de linéation, 722 mesures de stratification, 37 analyses en géochimie, 858 analyses en chimie minérale, 278 analyses de lame mince ;
- auxquels il faut rajouter, extraites de la bibliographie : 247 analyses radiochronologiques, 52 analyses en pétrologie ;
- 390 affleurements avec : en géochimie majeurs et traces 184 analyses, en géochimie isotopique 25 analyses, en géochimie minérale 1 002 analyses, en ASM 238 analyses, en radiochronologie 180 analyses, plus des documents numériques dont 268 scans MEB.

b) Discussions sur les données sélectionnées

Si la zone couverte dans ces deux thèses est relativement importante, il n'en demeure pas moins qu'au moins une moitié de la zone du démonstrateur n'est pour le moment ni documentée, ni renseignée. On trouvera certainement dans la bibliographie d'autres données, notamment en géochimie et en radiochronologie, majoritairement des documents papier. Néanmoins, les mesures disponibles via ces deux thèses sont nombreuses et ont permis de tester et contribuer à préciser le modèle de base de données B2D - RGF. Elles sont géo-référencées et accessibles via le « SIG-RGF démo » (cf. § 2.2.4).

3.2.3. Données de forages

Le forage peut être réalisé selon deux méthodes : i) en mode destructif (rotation, roto-percussion hors et fond de trou) avec réduction de la roche en éléments (cuttings) remontés par injection d'un fluide ou d'air, ii) en mode carotté (poinçonnement ou rotation) à l'aide d'un carottier, permettant de découper et de récupérer la roche sans la détruire. Les échantillons récupérés, fragmentés ou en carottes, permettent de reconstituer la succession des terrains traversés et d'en réaliser l'étude. C'est le log géologique.

Tous les forages réalisés en France et dépassant 10 m de profondeur sont, quels que soient leurs objectifs (minier, hydrogéologique, géotechnique, géothermie, scientifique, etc.), enregistrés dans la banque nationale du sous-sol (BSS) gérée, elle-même, par le BRGM. Les documents relatifs aux forages réalisés en France par les compagnies pétrolières depuis 1958 et appartenant au Bureau d'Exploration et de Production des Hydrocarbures (BEPH) sont également archivés au BRGM (Guichet Hydrocarbures BEPH).

Chaque forage, sondage, ou puits, enregistré dans la BSS est accompagné d'une fiche signalétique comportant (Figure 24) :

- le numéro de l'indice ;
- la désignation (n° dans l'étude) ;
- la position géographique (région, département, commune, adresse) ;
- les coordonnées x, y, z du point d'implantation (en Lambert 1 ou 2 étendu) ;
- la profondeur atteinte ;
- le diamètre de l'ouvrage ;
- la date d'achèvement de l'ouvrage ;
- le maître d'œuvre ;
- l'objet de la recherche.

		Indice 01983X1112 Désignation 4499																		
SGR/ALS																				
Région	VALLEE-DU-RHIN																			
Département	67 BAS-RHIN																			
Commune	379 PREUSCHDORF																			
Adresse ou Lieu-dit	HOELSCHLOCH 4499																			
Basin versant																				
Nature	SONDAGE																			
Profondeur atteinte (m)	700	<table border="1"> <tr> <td>Zone Lambert 1</td> <td>X(m)=1001130</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Y(m)=150640</td> </tr> <tr> <td>Lambert 2 étendu</td> <td>X(m)=1001418.4</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Y(m)=1450586.7</td> </tr> <tr> <td>WGS 84</td> <td>Latitude= 48.9276</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Longitude= 7.81579</td> </tr> <tr> <td>Référentiel 2006</td> <td>X(m)=1052651</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Y(m)=6880487</td> </tr> <tr> <td>Précision Z EPD</td> <td>Z(m)=201</td> </tr> </table>	Zone Lambert 1	X(m)=1001130		Y(m)=150640	Lambert 2 étendu	X(m)=1001418.4		Y(m)=1450586.7	WGS 84	Latitude= 48.9276		Longitude= 7.81579	Référentiel 2006	X(m)=1052651		Y(m)=6880487	Précision Z EPD	Z(m)=201
Zone Lambert 1	X(m)=1001130																			
	Y(m)=150640																			
Lambert 2 étendu	X(m)=1001418.4																			
	Y(m)=1450586.7																			
WGS 84	Latitude= 48.9276																			
	Longitude= 7.81579																			
Référentiel 2006	X(m)=1052651																			
	Y(m)=6880487																			
Précision Z EPD	Z(m)=201																			
Diamètre ouvrage (mm)	165																			
Date FIN de Travaux	01/01/1949																			
Mode d'Exécution																				
Etat	REBOUCHE																			
Maître d'Oeuvre	PECHELBRONN SAEM																			
Propriétaire																				
Exploitant																				
Entrepreneur																				
Objet Recherche	HYDROCARBURE																			
Objet Exploitation																				
Objet Reconnaissance																				
Utilisation																				
Prof Eau Sol (m)		le																		
Z Coupe (m)	Précision	le																		
Auteur coupe																				
Gisement																				
Echantillons conservés	Non																			
Documents	PLAN-SITUATION																			
Références																				
Dossier instruit par	T.VVEIL	Date du Dossier : 21/08/2002																		
Confidentialité	Public	Importance : 1																		
		Réseau																		

Figure 24 - Exemple de fiche BSS (indice 01983X1112). Forage portant le numéro 4499 dans l'étude réalisée par la SAEM de Pechelbronn, exécuté sur le huitième de carte n° 3 de la coupe à 1/50 000 n° 0198 d'Haguenau.

Cette fiche est normalement accompagnée d'une description géologique des terrains recoupés, en données brutes ou interprétées, formalisée dans la majorité des cas sous la forme d'un log.

Selon les documents fournis par l'opérateur « forages » on pourra également disposer :

- d'un log technique caractérisant la méthodologie utilisée (carottage ou destruction), avec le diamètre de foration, unique ou variable selon la profondeur forée, l'avancement du forage, la pose du ou des différents tubages, les arrivées d'eau, les incidents techniques, etc. ;
- dans le cas de forages hydrogéologiques, de courbes d'essais de pompage destinées à visualiser les rabattements et fluctuation de la nappe et à quantifier les ressources possibles ;
- toujours dans ce même cas, d'analyses chimiques et microbiologiques pour caractériser la qualité de l'eau dans le cas d'une production destinée à la consommation ;
- de diagraphies instantanées réalisées au cours de la foration et prenant en compte les paramètres tels que la vitesse d'avancement, la poussée sur l'outil ou les fluides de forages, l'examen des boues de forage et des déblais ;
- de diagraphies différées réalisées à la fin du forage, selon différentes méthodes, électriques ou électromagnétiques, soniques, ou nucléaires.

Les forages sont référencés dans la BSS avec une fiche d'identification comportant :

- le numéro d'enregistrement dans la BSS ;
- la désignation du forage ;
- le point d'implantation (région, commune, lieu-dit) avec coordonnées X, Y, Z ;
- la profondeur atteinte ;
- le diamètre de l'ouvrage ;
- le maître d'ouvrage ;
- l'objet du forage.

Les documents originaux (documents « foreur ») permettent d'avoir des indications sur la méthodologie utilisée (destructif ou carotté), et sont accompagnés d'une coupe technique, plus ou moins détaillée, précisant la nature des terrains traversés ainsi que d'éventuelles arrivées d'eau, et présence d'huiles et de gaz.

Ces forages peuvent également être accompagné d'un échantillonnage au niveau des cuttings remontés ou des carottes avec des études diverses permettant d'avoir des indications sur :

- la lithologie de la roche ;
- sa granulométrie ;
- sa couleur ;
- sa composition minéralogique ;
- la présence d'éventuels fossiles ;
- ses caractères physico-chimiques (perméabilité, porosité, perméabilité, salinité, etc.)

À ces ouvrages peuvent être associés des méthodes d'investigation géophysiques ou diagraphies, réalisées en instantané ou en différé, permettant de mesurer différents paramètres (perméabilité, porosité, température, etc.) au sein des terrains recoupés. Parmi ces méthodes :

- les diagraphies de conductivité des roches ;
- les diagraphies de résistivité ;
- les diagraphies Gamma-Gamma (mesures de densité) ;

- les diagraphies Gamma-Ray naturel (mesure de la radioactivité naturelle de la roche et corrélation avec un faciès lithologique précis) ;
- les diagraphies micro-sismiques (vitesse sismique dans la roche) ;
- les diagraphies neutron-gamma (détermination qualitative de la présence de tout ou partie des éléments chimiques suivants : Ca, Si, S, Fe, Al, Na) ;
- les diagraphies neutron-neutron (enregistrement des variations qualitatives des teneurs en eau volumiques en fonction de la profondeur) ;
- les diagraphies soniques.

Les forages constituent par conséquent, selon le niveau de description et d'études qui y ont été apportées (notamment les forages miniers et pétroliers), une source d'informations et de données considérable pour la connaissance des couches moyennes et profondes, tant au niveau lithologique que lithostratigraphique et structurale, que ce soit en contexte sédimentaire ou magmatique. Leur étude peut également permettre l'individualisation des phases de transformation dites événementielles de la roche telles que les processus d'altération ou de métamorphisme.

3.2.4. Notions de « validation »

Les forages et logs associés de la BSS (et au Guichet H) sont disponibles sous deux versions :

- **forages « non validés »** à l'état de documents « papier », scannés ou en cours de scannage, avec un log interprété par le foreur ou le responsable de l'étude. Aucun traitement complémentaire n'est effectué sur ce log, il est uniquement enregistré en BSS.
- **forages « numérisés »** dans le cadre du projet Loglso avec une saisie sous Access des passes forées, des descriptions lithologiques du foreur, et la mise en base de données des constituants lithologiques. À ce log est associée une interprétation qui met en relation chaque passe décrite avec une formation lithostratigraphique définie dans la base de données Loglso. Celle – ci parfois enregistrée sous plusieurs dénominations et non hiérarchisée dans le contexte géologique régional.

a) Forages sélectionnés pour le démonstrateur

Près de 5 700 forages ont été sélectionnés dans la Banque de données du sous-sol (BSS) et dans le Guichet H (Figure 25) pour être traités et répondre aux besoins des livrables attendus dans le cadre du démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan ».

Parmi ceux-ci, 1 497 forages prioritaires dont :

- près de 500 forages courts destinés à la modélisation du régolithe sur emprise restreinte ;
- 18 forages localisés dans le socle ;
- 970 forages profonds destinés à la reconnaissance de la couverture.

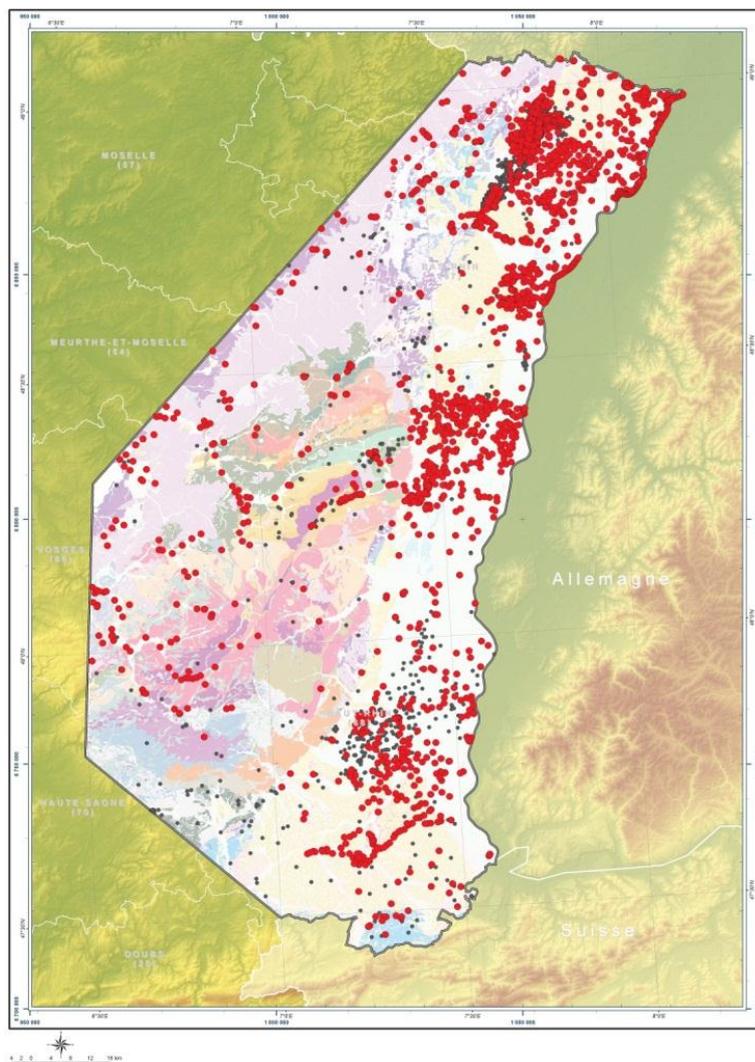


Figure 25 - Carte de localisation des forages de la BSS et du Guichet H présents et sélectionnés sur la zone du démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan » (forages traités en rouge, restant à traiter en noir).

b) *Discussions sur les forages sélectionnés*

Pour le socle paléozoïque, le nombre de forages profonds ayant atteint le socle est extrêmement restreint, probablement inférieur à une trentaine. Hormis certains des forages profonds géothermiques de Sultz-sous-Forêts, les rares forages ayant touché le socle n'en fournissent généralement que des indications et descriptions très succinctes ne permettant pas de caractériser avec certitude la nature et le calage des terrains recoupés.

Pour la couverture sédimentaire mézo-cénozoïque, la densité des forages est très forte au niveau de la couverture tertiaire, mais moindre dans les terrains jurassiques et primaires. Cela est en liaison avec les activités de recherches et d'extraction d'huiles asphaltiques (Pechelbronn), de potasse et de sel gemme (Bassin potassique d'Alsace) avec des profondeurs pouvant dépasser les 5 000 m. Le calage lithostratigraphique est globalement correct, au moins dans le Tertiaire et affiné pour une partie des forages par des études diagaphiques. En générale les diagaphies sont présentes mais à l'état « de papier ou de scan ». Pour la couverture infra-tertiaire, si l'on ne retrouve pas le niveau de détail des formations du Tertiaire, le calage entre les grands ensembles lithostratigraphiques qu'ils soient sédimentaires

(Jurassique, Keuper, Muschelkalk, Buntsandstein, Permien) ou cristallins (socle hercynien) est globalement correct. Il existe quelques mesures physico-chimiques diverses, telles que la température, la perméabilité, la porosité ou la salinité quelques mesures structurales (stratification, schistosité) et l'identification des zones faillées avec dans certains cas l'estimation du rejet.

Pour le régolithe, malgré la multitude des forages les descriptions sont en général insuffisantes, voire même absentes ne permettant pas toujours d'avoir une vision détaillée de la succession lithostratigraphique. Aucun évènement d'altération des formations n'est clairement précisé dans les descriptions des terrains comme pour la couverture, quelques mesures physico-chimiques existent mais encore trop peu. Néanmoins, certains forages sont très bien décrits en particulier en termes de lithologie et de proportions des constituants granulométriques.

3.2.5. Donnée géophysiques

a) Description générale

Les différentes méthodes utilisées en géophysique ont pour but de définir les caractéristiques physiques des terrains traversés et sont largement utilisées pour explorer le sous-sol. Elles peuvent être mises en place soit directement au sol, soit pour certaines avec un support aéroporté permettant d'augmenter la zone d'investigation.

Parmi les principales méthodes susceptibles d'être utilisées lors d'un chantier RGF citons :

- la gravimétrie mesurant des variations de pesanteur, étroitement liées à la densité des roches (modélisation de la structuration géologique, caractérisation de structures particulières telles que les dômes de sel du Bassin potassique alsacien) ;
- le magnétisme basé sur des variations du champ magnétique (caractérisation de corps à forte aimantation mais également d'interfaces) ;
- la sismique, basée sur la vitesse de propagation des ondes dans le sol, par réflexion ou réfraction (détection des interfaces géologiques ou des cavités) ;
- les méthodes électromagnétiques basées sur la propagation des ondes électromagnétiques dans le sol selon la résistivité et la permittivité des roches (détection de zones humides, fracturées, d'interfaces) ;
- le radar géologique basé également sur la propagation des ondes électromagnétiques, applicable à la tranche de terrain superficielle (zones humides, fracturation, cavités) ;
- la polarisation spontanée PS basée sur la mesure de différences de potentiels électriques naturels du sous-sol (caractérisation des milieux à circulation d'eau (poreux, faillés), de cavités ou de zones minéralisées) ;
- la radiométrie mesurant à faible profondeur le rayonnement gamma émis par différents types de roches et variable selon leurs teneurs en radioéléments (K, U, Th).

Pour répondre aux besoins des livrables attendus dans le cadre du démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan », les données géophysiques ont été exploitées sous plusieurs formes et provenant de projets divers.

b) Données et interprétations géophysique sélectionnées dans le cadre du démonstrateur

• **Données issues du projet GeORG**

Pour la zone Fossé rhénan, ce sont des données issues du projet GeORG (Équipe de projet GeORG, 2013) déjà interprétées et converties en profondeur et interpolées sous forme de grilles 3D (horizons et failles) qui ont dû être exploitées (cf. § 5.2).

Ces données sont constituées :

- des côtes, en mètre, des différents niveaux repères, issues des puits (Figure 26) ;
- des côtes, en millisecondes temps double (Figure 27), des différents horizons sismiques, pointés le long des lignes sismiques, correspondant aux différents niveaux repères, issus des puits (Figure 26) ;
- des positions des failles le long des lignes sismiques (Figure 28) ;
- les grilles 3D (horizons et réseau de failles) issues du modèle réalisé sous le logiciel GoCAD et référencé en unité métrique pour la profondeur.

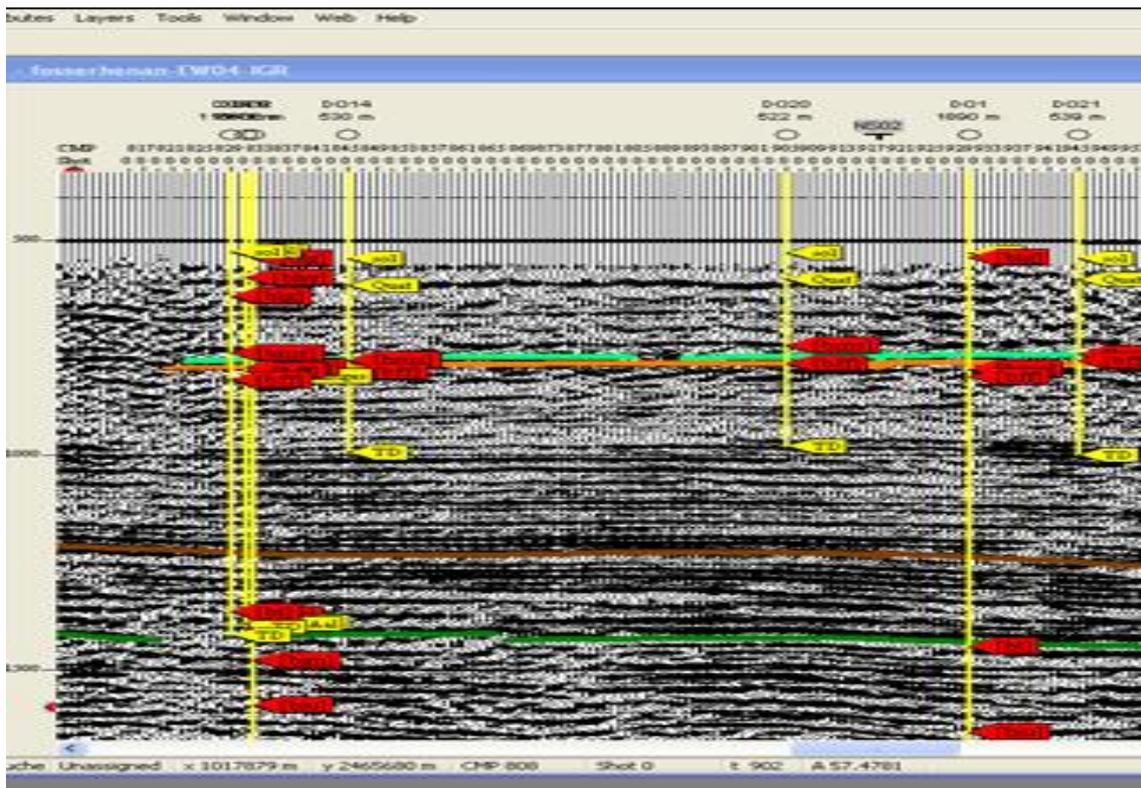


Figure 26 : Exemple de pointé d'horizons le long d'une ligne sismique et niveaux repères issus des puits.

Line	CDP	X	Y	Horizon	Time
73HUV10	207	968518.6	2287103.3	B_Mnes-Foraminiferes	0.37833
73HUV10	208	968509.2	2287126.5	B_Mnes-Foraminiferes	0.38125
73HUV10	209	968499.8	2287149.7	B_Mnes-Foraminiferes	0.38417
73HUV10	210	968490.4	2287172.8	B_Mnes-Foraminiferes	0.38708
73HUV10	211	968481	2287196	B_Mnes-Foraminiferes	0.39
73HUV10	212	968472.1	2287219.4	B_Mnes-Foraminiferes	0.3905
73HUV10	213	968463.1	2287242.8	B_Mnes-Foraminiferes	0.391
73HUV10	214	968454.2	2287266.1	B_Mnes-Foraminiferes	0.3915
73HUV10	215	968445.3	2287289.5	B_Mnes-Foraminiferes	0.392
73HUV10	216	968436.3	2287312.9	B_Mnes-Foraminiferes	0.3925
73HUV10	217	968427.4	2287336.3	B_Mnes-Foraminiferes	0.393
73HUV10	218	968418.4	2287359.6	B_Mnes-Foraminiferes	0.3935

Figure 27 : Exemple de côtes (ms temps double) de niveaux repères – (TWT : two way travel time).

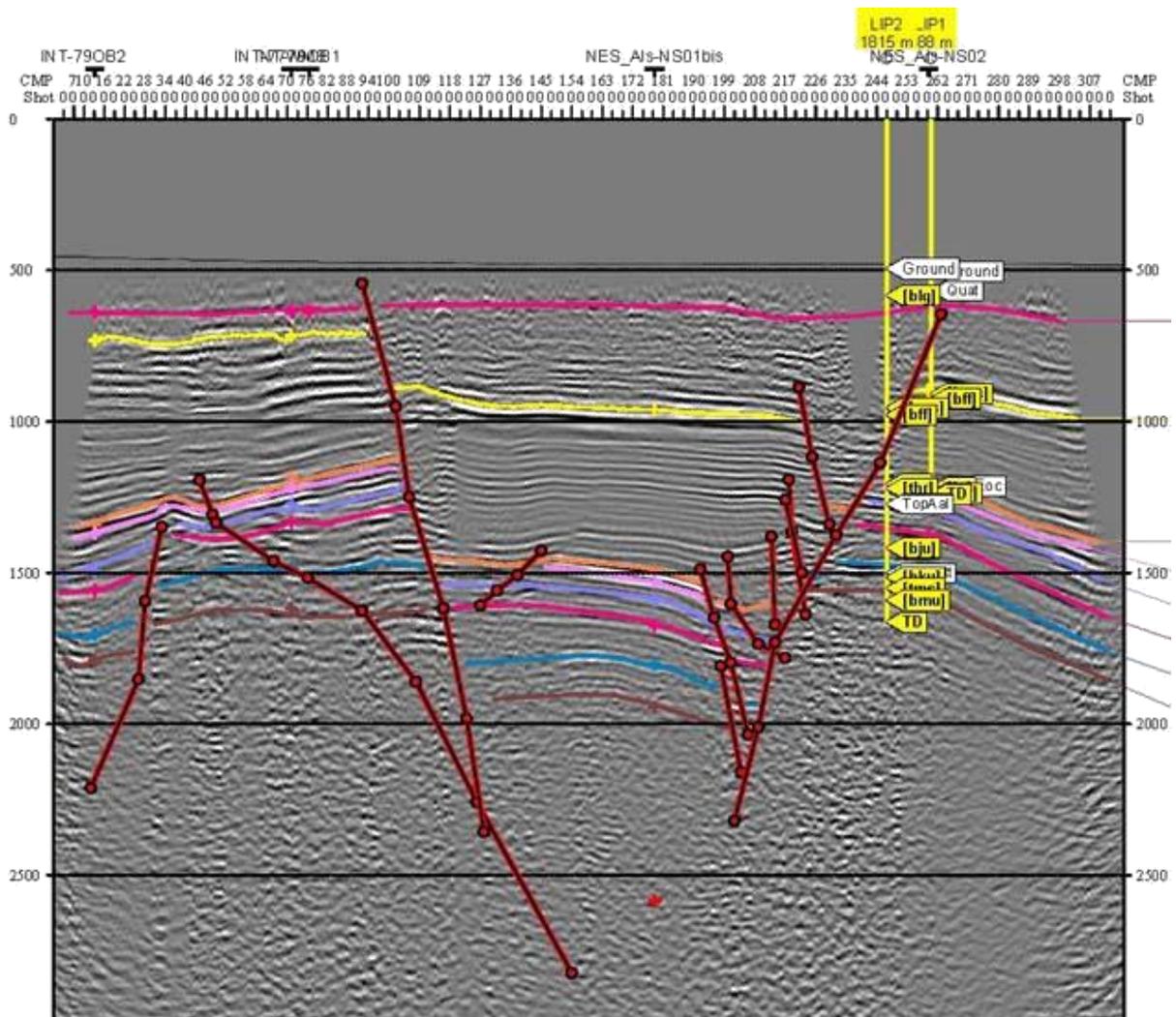


Figure 28 : Exemple de failles pointées sur une ligne sismique.

- **Données projets européens ECORS-DEKORP-Sud**

Pour les structures profondes notamment dans la zone des Vosges, des profils sismiques profonds issus des projets européens ECORS-DEKORP-Sud ainsi que la littérature associée (Wenzel *et al.*, 1991 ; Brun *et al.*, 1992 ; Rousset *et al.*, 1993) ont été consulté comme aide à la caractérisation des structures profondes. Mais pour l'essentiel de ces structures se sont les données gravimétriques, magnétiques couplées à la modélisation 3D qui ont été déterminantes.

- **Données magnétiques**

Sur la zone d'étude, seul le levé aéromagnétique Bassin d'Alsace-Lorraine (1956), a pu être récupéré, sous forme de carte papier (Figure 29). Ce levé est de résolution moyenne :

- espacement des lignes de vol de 2 km ;
- altitude de vol constante à 600 m / 1 200 m (levé constitué de deux blocs).

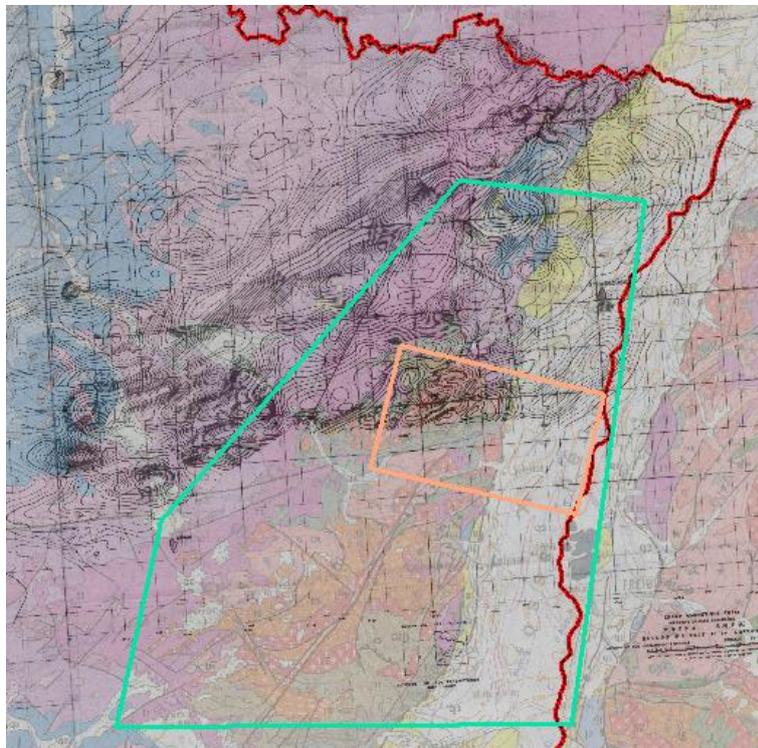


Figure 29 : Carte d'is anomalies magnétiques, scannée et géoréférencée – lever Bassin d'Alsace-Lorraine, 1956.

Cette carte a été géo-référencée puis numérisée dans le cadre du projet. Des traitements ont ainsi pu être appliqués (gradients, signal analytique, etc.) de manière à en extraire une information pertinente pour la connaissance géologique régionale. Une large moitié sud de la zone du projet n'est pas couverte en magnétisme. À noter qu'en toute fin de projet J.B. Edel a transmis une grille de données magnétiques mesurées au sol, couvrant une partie du fossé rhénan (Campos Enriquez, 1980). Ces données n'ont pas été prises en compte dans les travaux du projet.

- **Données gravimétriques**

Des données gravimétriques numériques, de bonne qualité, sont disponibles dans le BGF (Banque Gravimétrique de la France) gérée au BRGM.

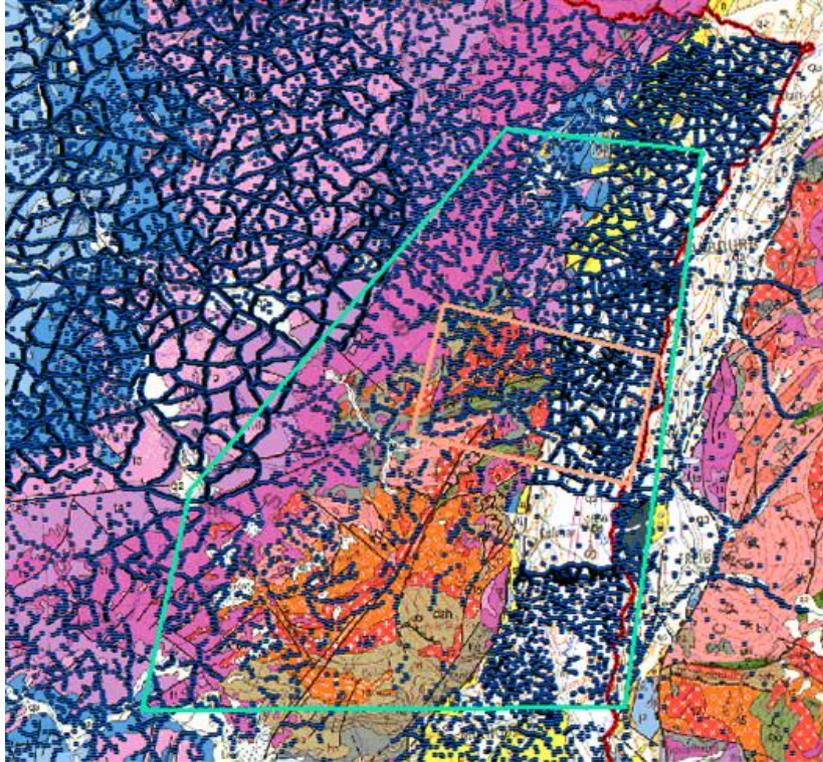


Figure 30 : Données gravimétriques numériques disponibles dans la Banque Gravimétrique de la France (BRGM).

- **Exemples d'études publiées utilisant ces données géophysiques**

En plus des études dédiées au profil sismique ECORS, les études publiées utilisant les données régionales mentionnées au-dessus se divisent principalement en deux grandes catégories : (a) les études apportant une information de nature cartographique et (b) celles apportant une information sur les géométries du bâti en profondeur (en coupes ou en 3D).

Il s'agit principalement d'études gravimétriques et/ou magnétiques, qui portent sur (Figure 31) :

- la **structuration du bâti géologique** (en surface et sous les bassins) ; il s'agit d'études locales à régionales ;
- la **cartographie du toit du socle sous les bassins** (géométrie + nature), en relation avec ce qui est connu (terrain, sismique, forages, etc.) – à différentes échelles.

Il s'agit principalement d'études gravimétriques et/ou magnétiques, qui fournissent une imagerie locale à régionale de la surface jusqu'à plusieurs km en profondeur (Figure 32) :

- sous forme de cartes isobathes ;
- sous forme de coupes modélisées en 2D présentant des géométries géologiques.

Ces études s'appuient sur les autres informations géologiques et géophysiques disponibles (terrain, sismique, forages, etc.).

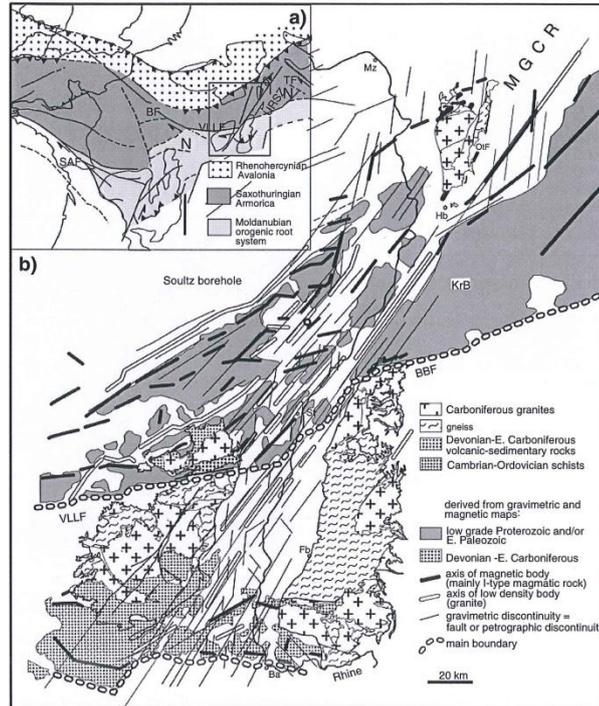
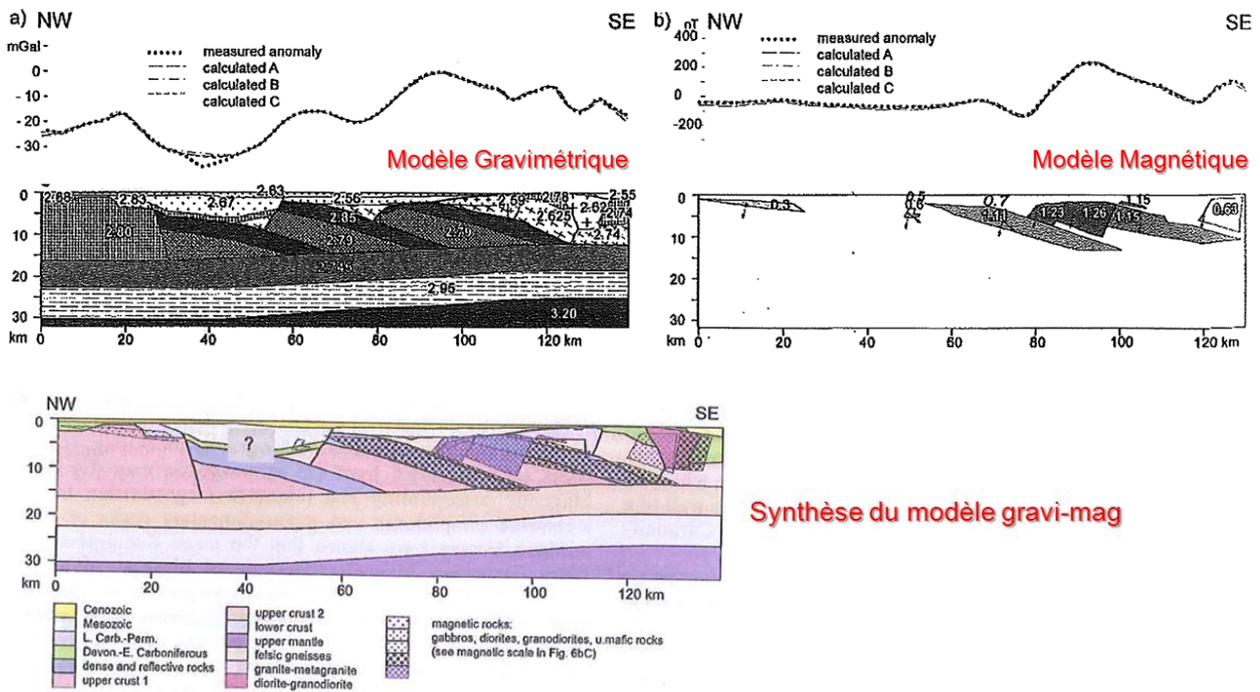


Figure 31 : Exemple d'interprétation structurale régionale, basée sur l'analyse des données gravimétriques et magnétiques permettant de proposer une cartographie structurale de la zone Vosges - Fossé rhénan (Edel et al., 2007).



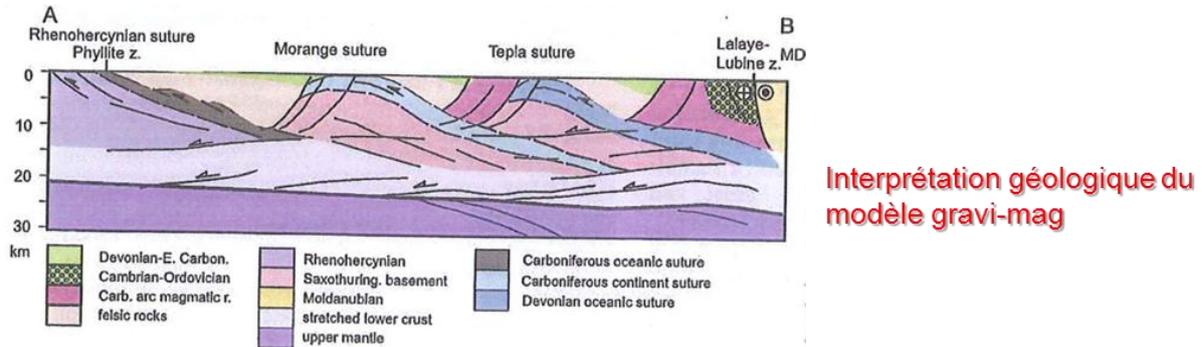


Figure 32 : Phases de la modélisation géologique par méthodes gravimétrique et magnétique : depuis le modèle de paramètres géophysiques (en haut), sa synthèse (au milieu) et son interprétation géologique (en bas). Exemple le long d'un profil crustal orienté NW-SE depuis le fossé Lorrain jusqu'au Fossé rhénan (Edel *et al.*, 2009).

3.2.6. Données bibliographiques

Elles correspondent aux informations disponibles dans différents types d'ouvrages et susceptibles de renseigner le « chantier » sur des thématiques des géosciences aussi variées que la lithologie, la stratigraphie, la pétrographie, le volcanisme, le magmatisme, la minéralogie, la gîtologie, la paléontologie, les datations, la géochimie, l'hydrogéologie, la géophysique, etc. Parmi ceux-ci :

- les rapports d'études et publications scientifiques à thématiques variées utilisant les types de données citées ci-dessus ;
- les thèses et mémoires universitaires ou de grandes écoles ;
- les notices de carte géologique.

Pour ce projet, la bibliographie du projet repose sur les notices des 30 cartes géologiques couvrant la zone d'étude auxquelles il faut rajouter :

- les thèses d'E. Skrzypek (2011) et de A.S Tabaud (2012) (université de Strasbourg) ;
- le rapport de P. Elsass, J.-P. von Eller et J.-M. Stussi (2008) sur la carte géologique du massif du Champ du Feu et de ses abords ;
- les rapports réalisés sur les formations superficielles dans le cadre du projet BRAR (Quesnel *et al.*, 2002 ; Bitler *et al.*, 2006) ;
- les rapports techniques du BRGM pour projet Georg, les projets de Soultz-sous-Forêts ;
- les travaux récents, avec notamment des datations, réalisés sur les terrasses alluviales et les lœss de la vallée du Rhin (Boenigk et Frechen, 2006 ; Choi, Preusser, Radtke, 2007 ; Cordier *et al.*, 2009) ;
- les publications scientifiques couvrant la thématique de la géophysique régional (Rousset *et al.*, 1992 et Papillon, 1995 ; Genter *et al.*, 2004 ; d'après Edel *et al.*, 2002 ; Rotstein *et al.*, 2006 ; Edel *et al.* 2007, 2009, etc.) ;
- et nombreux autres ouvrages et publications référencés à la fin de ce rapport.

Discussion des données sélectionnées

- **Données du projet GeORG**

Malgré une importante couverture en données sismiques 2D celles-ci sont exprimées en profondeur « temps – double » et donc difficilement exploitable pour une mise en relation avec les sondages référencés en unité métrique. Dans ces conditions la validation du calage entre les descriptions des sondages et les interprétations sismiques sera problématique pour la mise en cohérence tridimensionnelle à venir. Celles – ci devront de préférence être exprimées en profondeur métrique et/ou jointes des lois de vitesses associées. Dans le cadre du démonstrateur, ce problème a été « détourné » pour la réalisation du modèle régional (cf. § 6.3) en utilisant les surfaces interpolées du modèle 3D réalisé dans le cadre du projet Georg et déjà converties en profondeur.

- **Données gravimétriques**

La couverture des stations est moyenne à haute : 0,5 à 2 pt. / km² ; certaines parties de la moitié sud de la zone d'étude restent cependant peu ou pas couvertes (Figure 30). Elle fera l'objet d'acquisitions gravimétriques complémentaires en collaboration avec l'Université de Strasbourg et École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST) (cf. § 7.2).

3.3. RECOMMANDATIONS ET BESOINS POUR LES FUTURS CHANTIERS

Le lancement d'un projet RGF implique une importante phase de recherche bibliographique à mener aussi bien en interne via toute la documentation BRGM, qu'en externe avec la collaboration des différents organismes qui travaillent dans le domaine des géosciences (universités, entreprises).

Elle demande un travail de préparation important vérification et identification de la source des données brutes et interprétations. En effet, quelle que soit le type de donnée, il est nécessaire de l'enregistrer dans son « intégralité » et dans son contexte (thèse, étude, article, etc.) : c'est le principe de **la traçabilité** permettant de retourner à la source de l'information.

Etant donnée l'ampleur d'un chantier RGF (étendue géographique, diversité des terrains et des études réalisées), la quantité d'information récupérables sera sans aucun doute considérable, et nécessitera une gestion organisée et un espace de stockage dédié à la donnée.

Cet espace de stockage devra **être géré par un administrateur** en charge d'organiser cette espace et délivrer les droits d'accès lecture/écriture en fonction des profils d'utilisateur.

4. Hiérarchisation et classification : prérequis à la « mise en cohérence »

4.1. GÉNÉRALITÉS

La phase précédente a permis d'accumuler une masse d'informations considérable mais « disparate » avec : des cartes, des analyses, et autres données diverses. Ces informations sont associées à des interprétations en termes de sédimentologie, géologie structurale, métamorphisme. Ces disciplines ont elles même évoluées au cours des dernières décennies en fonction des auteurs mais également des « écoles » et des « modes ».

Ces évolutions sont étroitement liées au développement des méthodes et techniques d'analyse, de datation, de traitement, des concepts scientifiques, etc., mais également pour ces dernières années de la prise en compte des besoins et enjeux sociétaux axés notamment sur l'approvisionnement en eau, ressources minérales et énergétiques ainsi que sur toutes les problématiques portant sur l'environnement et l'aménagement du territoire.

L'objectif majeur du RGF est de mettre en cohérence l'ensemble de ces données et hiérarchiser l'information collectée de manière à fournir une connaissance géologique de référence sans cesse actualisée. Cela passe dans un premier temps par le traitement de la donnée déjà disponible en attribuant à chaque domaine géologique, chaque unité lithostratigraphique, chaque faciès pétrographique, chaque unité structurale, et autres, une dénomination et une codification uniques et hiérarchisées qui serviront de référence, à l'échelle nationale et à l'ensemble des disciplines des géosciences (la géologie *s.l.*, l'hydrogéologie, la métallogénie, les risques naturels la géothermie, etc.).

C'est un « langage scientifique commun » doit être établi sur des données labellisées et cohérentes, alimentant la base de données du chantier RGF. Cette codification passe impérativement par la définition de **lexiques hiérarchisés** construits sur la base de la classification de l'information géologique.

Dans le cadre du RGF-demo seuls les lexiques lithostratigraphique et évènementiel (pour l'histoire de mise en place du massif des Vosges uniquement) ont pu être traités, les lexiques des éléments structuraux et le domaine de la stratigraphie séquentielle restent à faire.

4.1.1. Pourquoi Identifier, classifier et hiérarchiser l'information géologique ?

La codification des différentes unités géologiques répond à deux types de classification, l'une spatiale et l'autre temporelle, toutes deux sous forme de lexiques hiérarchisés. La première classification, spatiale, consiste à établir pour une région géologique donnée, l'inventaire exhaustif de toutes les *unités géologiques* identifiées sur les cartes ou dans les forages. Un schéma conceptuel est établi pour décrire les relations latérales et verticales, de chacune des unités. Chaque unité est ensuite regroupée dans un lexique hiérarchisé selon les normes internationales en vigueur. Par exemple, pour les roches sédimentaires, on distingue : les membres et les formations (qui sont représentées sur les cartes géologiques à 1/50 000), les sous-groupes, les groupes et les super-groupes ; les roches magmatiques, quant à elles seront classifiées en « suites magmatiques », etc. Ce principe de lexique hiérarchisé est également étendu à d'autres objets tels que les failles ou les filons.

La seconde temporelle est une composante intrinsèque de la géologie, toutes les roches résultent de processus de formations et de transformations (métamorphiques ou d'altérations

de tous types) qui peuvent se relayer dans le temps à différentes reprises. Une roche est donc caractérisée par différents marqueurs (ou attributs) acquis lors de sa genèse, puis au cours des diverses transformations mécaniques ou chimiques qu'elle a subies au cours du temps jusqu'à nos jours.

Se pose alors la question de la représentation de ces roches dans une carte géologique et de leur description dans une base de données. Généralement, la plupart des cartes géologiques ont pour vocation de restituer l'état actuel des corps géologiques et de fait, représente sans nuance possible, le « faciès » dominant de la roche. La carte géologique privilégie donc, dans sa représentation, un évènement marquant enregistré dans une roche (qu'il soit génétique, tectono-métamorphique ou d'altération) au détriment de tous les autres caractères.

Ainsi, les roches altérées sont majoritairement sous représentées au bénéfice de leur protolithe ; certains orthogneiss sont identifiés comme des granites, des marbres figurent sous l'appellation de calcaires et les roches métamorphiques apparaissent avec le faciès dominants ou parfois le faciès P-T maximum relictuel. Le choix du faciès de représentation d'une roche sur une carte géologique est donc arbitraire et dépend de la finalité de la carte géologique mais le plus souvent de la sensibilité du géologue cartographe. Néanmoins, la description complète de la roche figure dans la notice explicative qui accompagne la carte et permet, dans la plupart des cas, à un géologue de reconstituer la véritable nature de la roche.

Aujourd'hui, les technologies d'informations numériques peuvent permettre de dépasser les limites imposées par la représentation graphique de la carte géologique. Le principe de la nouvelle carte géologique du RGF est de pouvoir intégrer les différents éléments de description d'une roche selon l'ordre chronologique de leur apparition. La carte RGF devra intégrer une ligne temps qui permettra de connaître les différents états traversés par une entité géologique depuis sa formation jusqu'à son état actuel. Ce nouveau concept de carte géologique numérique est appelé « carte géologique événementielle » et constitue l'un des produits innovant du RGF.

Dans la carte géologique événementielle, chaque polygone et chaque polyligne porteront les attributs traduisant l'évolution des terrains au cours du temps :

- attributs portant sur la formation du protolithe (sédimentaire, magmatique ou hydrothermal) ; la genèse de la roche correspond à « l'évènement 0 » ;
- attributs, décrivant les transformations diagénétiques, tectono-métamorphiques ou d'altération des roches. Un objet géologique dans son actuel est le résultat d'une succession de processus qui sont appréhendés à travers des marqueurs physiques observés dans la roche (néo-minéraux, déformation, ...). C'est à partir de ces traces reliques que l'on peut retracer l'histoire des objets géologiques en question.

La réalisation de la carte géologique RGF qui s'ouvre sur une dimension temporelle nécessite l'élaboration d'un lexique régional événementiel, qui sera hiérarchisé à l'instar du lexique lithostratigraphique.

4.1.2. Constitution des lexiques

Si le résultat final correspond à la définition de lexiques lithostratigraphique et événementiel globaux pour l'ensemble du chantier RGF, il paraît logique de définir auparavant des « lexiques intermédiaires ».

Ces derniers traiteront par exemple de domaines de spécialités tels que : l'identification et la classification des formations du régolithe, de la couverture sédimentaire sous-jacente ou

encore du domaine du socle. De même pour les lexiques intermédiaires de type « événementiels » qui caractériseront pour différentes périodes des temps géologiques, l'identification et la hiérarchisation de processus de genèse, de mise en place, de déformation et autres types d'évolutions subit par la roche qu'elles soient d'ordre métamorphique ou d'altération (hydrothermale ou supergène). Ils devront intégrer des concepts tels que les séquences/cycles stratigraphique et orogéniques.

Ce travail préalable revient in fine à constituer **une synthèse géologique globale sur l'ensemble du chantier intégrant toutes les spécialités et compétences des géosciences**, sur la base des données disponibles.

a) *Lexique lithostratigraphique*

Identification des unités lithologiques : la démarche consiste à reconstituer, banc par banc, unité lithologique par unité lithologique, l'empilement des différentes strates sédimentaires (Régolithe et Couverture) ou suites et associations (Socle). Cette reconstitution, majoritairement verticale, doit bien entendu intégrer les variations latérales de faciès pouvant apparaître dans chaque domaine.

Le lexique est à ce stade purement lithologique et basé sur la définition suivante: « *une unité lithologique correspond à un ensemble de terrains caractérisé par la nature lithologique élémentaire de ou des roches le composant, celles-ci pouvant être en terme de proportion, aussi bien uniques, que dominantes ou mineures* ».

Hiérarchisation des unités lithologiques : la suite de la procédure consiste à hiérarchiser cet empilement sédimentaire ou magmatique non plus seulement sur le plan lithologique mais sur le plan « organisation dans le temps et dans l'espace » en caractérisant les différentes phases et périodes de mises en place et d'évolution des bassins sédimentaires et des massifs volcaniques ou plutoniques. Cette procédure est basée sur les normes et définitions établies par Hedberg et Hollis (1979) selon lesquelles une unité lithostratigraphique correspond à un ensemble de strates ou corps (massif), constitué de roches sédimentaires, magmatiques /ou métamorphiques, et caractérisé par une lithologie ou une association lithologique majeures et homogènes, avec ses caractéristiques propres (couleur, texture, granulométrie, composition minéralogique, constituants paléontologiques, etc.) et dont le mode de mise en place résulte du même processus génétique. Les relations spatiales entre ces différentes unités reposent principalement pour le domaine sédimentaire sur les lois de la superposition (« tout niveau géologique superposé à un autre niveau est plus récent que celui-ci », du dépôt horizontal et de la continuité latérale (principes de Sténon) et sur les lois de recoupement et de l'inclusion pour les roches magmatiques. L'âge de ces terrains peut être précisé par la présence de fossiles « marqueurs » (datation relative=biochronologie), ou par datation radiométrique par des méthodes de géochimie isotopique (^{14}C , U-Pb, U-Th-Pb, Rb-Sr, K-Ar, ^{39}Ar - ^{40}Ar , Sm-Nd, etc.) sur roches totales ou sur minéraux séparés. La classification et la hiérarchisation de ces unités lithostratigraphiques reste toujours basée selon les modalités définies par Hedberg et Hollis en 1979 (Guide stratigraphique international : Classification, terminologie et règles de procédures). On distingue ainsi au niveau le plus élevé de la hiérarchisation, le « *super-groupe* » correspondant au regroupement de plusieurs groupes et le *groupe*, associant plusieurs formations.

La *formation* constitue l'*unité de référence* de la classification lithostratigraphique, étant suffisamment homogène pour être reconnaissable en différents points sur le terrain ou en forage. Elle peut être subdivisée en un ou plusieurs membres (non obligatoire). La succession de deux ou plusieurs formations contiguës associées et ayant en commun un facteur d'unification, lithologique ou autre, constitue la base de la constitution du groupe.

Enfin, au sein du membre ou de la formation, on peut éventuellement distinguer ce qui constitue la plus petite unité lithologique à savoir la *couche*, avec des caractéristiques lithologiques très spécifiques telles que par exemple au sein d'une formation des niveaux à minéralisation en fer, à sel gemme ou à charbon. À ce stade, les unités sont maintenant classées, hiérarchisées, en membres, formations, groupes, voire super-groupes si cela est possible.

Mode de codification /indexation : au niveau de l'indexation, chacune de ces subdivisions (membre, formation etc.) se voit attribué une appellation, une notation et un code numérique, spécifiques et uniques qui servent de référence et sont inscrits dans la base de données RGF. La notation est régie par les règles du Comité de la Carte Géologique 1/50 000 de la France et définie par une lettre précédant un chiffre, la lettre caractérisant la série ou époque (exemple : j pour le Jurassique, t pour le Trias), le chiffre marquant l'âge (étage) de la formation (exemple : j5 = Oxfordien). Suivant la complexité de la formation (individualisation de plusieurs membres, délimitation d'unités inférieures, moyennes, supérieures), cette notation à deux composants peut être complétée selon les cas par une ou plusieurs lettres ou symboles (cf. note d'orientation pour l'établissement de la carte géologique de la France à 1/50 000 ; Andreieff, 1997).

Pour le domaine de couverture sédimentaire, celle-ci doit se référer dans la mesure du possible à une localité-type faisant référence (stratotype reconnu, ou définie par un auteur de référence) telle que par exemple la Formation de Printzheim du Toarcien alsacien. Cette dénomination peut être affinée par l'indication de la nature du ou des constituants (Formation des marnes de Gundershoffen, en Alsace). En l'absence de localité type ou par référence à des dénominations anciennes, cette appellation peut également se rapporter à un fossile caractéristique (ex : la Formation du grès à Voltzia) ou à une lithologie majeure caractéristique du dépôt (sables, graviers, galets). Dans certains cas, la même formation peut apparaître sous plusieurs dénominations. Il convient alors si les deux ou trois appellations sont à valeur régionale et suffisamment éloignées les unes des autres de les conserver afin d'en garder la spécificité régionale, soit si ces formations sont très proches d'opter pour l'appellation la plus communément utilisée. Les noms des groupes sont et doivent normalement être définis par rapport à des entités géologiques et géographiques (exemples du démonstrateur Vosges - Fossé rhénan : Horst de Mulhouse ; Bassin de Thann-Giromagny ; Association Mg-K de type Ballons, Vosges du Sud ; Unité des migmatites, Vosges centrales).

Pour les formations superficielles du Régolithe, la dénomination des formations est quelque peu différente dans la mesure où leur mode de classification est essentiellement basé sur leur genèse. On utilise maintenant préférentiellement à la place du terme de « formation » celui de « dépôt », couramment utilisé actuellement pour désigner ces terrains (ex : Dépôts alluviaux rhénans) et ceci sur la base de la classification définie par le BGS (BGS Classification Scheme, Volume 4, Classification of artificial (man-made) ground and natural superficial deposits ; McMillan and Powell, 1999)

Pour les unités magmatiques du socle, le terme de « formation » apparaît totalement inadapté et impose d'utiliser une terminologie basée sur les termes de « suite, de complexe, ou d'association ». Les appellations de ces unités magmatiques ou métamorphiques font à la fois référence à la lithologie, au chimisme et à la localisation géographique de celles-ci (exemple sur le démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan » : Granite du Bilstein, Granites d'anatexie Al-K des Vosges centrales, Association Mg-K de type Ballons, Suite dioritique du Champ-du-Feu sud).

Au final, le recensement, la mise en cohérence, et la hiérarchisation de toutes ces données, effectués pendant ces deux premières phases d'un chantier aboutissent à la constitution d'un lexique lithostratigraphique RGF (Figure 33) qui va servir de **base lithostratigraphique**

de référence, unique, utilisable pour toutes les études géologiques menées sur la zone d'études, que ce soit en cartographie, en traitement de forages, en interprétation sismiques, en hydrogéologie, géothermie, etc. Il assure une **cohérence et une homogénéité dans le langage géologique et informatique entre les différentes thématiques**.

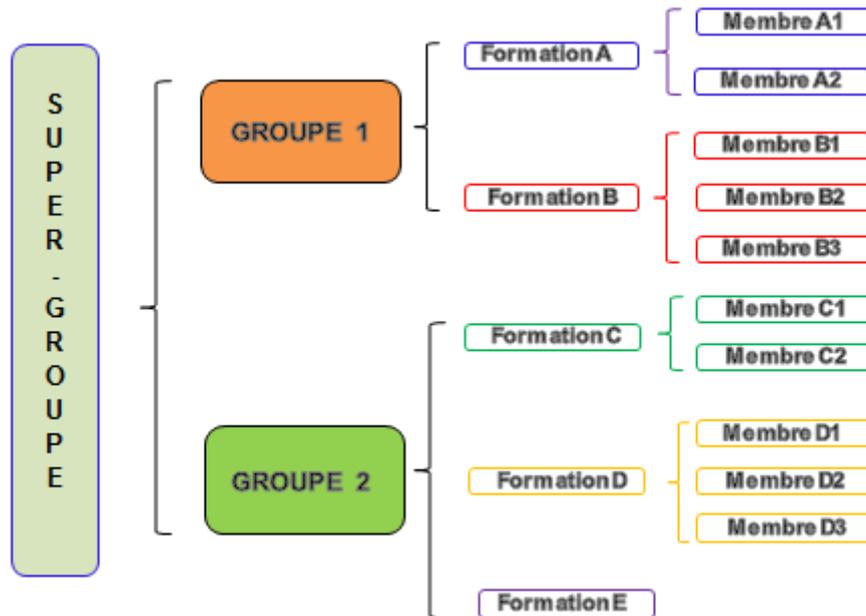


Figure 33 : Exemple de hiérarchisation de différentes unités lithostratigraphiques depuis le Super-groupe jusqu'au Membre.

Remarque importante : la figure présentée ci-dessus schématise la hiérarchisation des différentes unités lithostratigraphiques telle qu'elle devra apparaître dans le lexique RGF. À signaler cependant que si les formations sont parfaitement individualisées dans le lexique, dans certains cas, il sera nécessaire d'introduire dans ce lexique des notions de « regroupements de formations ». C'est notamment le cas pour la carte géologique où sur certaines cartes à 1/50 000 les auteurs n'ont pu vu les conditions d'affleurement, individualiser deux, voire trois formations (exemple Formations A+B de la figure) qui ont par conséquent au niveau cartographique été figurées sous un même caisson (A+B). Dans ce cas présent, ce regroupement A+B doit impérativement être renseigné dans le lexique afin de pouvoir répondre aux exigences de la phase « carte géologique ».

b) *Lexique évènementiel hiérarchisé : principes*

Le premier principe de la base de données cartographique du RGF est de bien distinguer la « donnée factuelle » de la donnée interprétée tout en ayant conscience qu'en géologie **la limite entre ces deux notions n'est pas toujours évidente**. Par exemple, la mesure d'un plan structural est en soit une donnée brute mais l'identification de ce plan (en tant que S0, S1, S2, etc.) relève déjà d'une première interprétation. On peut généraliser cet exemple à l'ensemble des données géologiques mesurées sur le terrain ou analysées en laboratoire.

• *Éléments marquants*

Le lexique évènementiel donne alors la possibilité d'organiser les données factuelles, observées ou analysées, selon une classification des processus en termes d'évènements géologiques. On distingue pour cela une « unité évènementielle » (UE) qui constituera un lien entre différentes données factuelles.

Par exemple une unité évènementielle notée UE1 sera attribuée aux données factuelles suivantes (par le géologue) et constituera le lien évènementiel entre celles-ci :

- mesures de schistosités S1 associées à UE1 ;
- mesures de linéations associées L1 associées à UE1 ;
- paragenèses inscrites dans S1 associées à UE1 ;
- analyses microsondes sur les minéraux de la paragenèse associées à UE1 ;
- datations isotopiques sur un minéral de la paragenèse associées à UE1.

À l'instar de l'Unité Géologique (UG), l'Unité Évènementielle (UE), qui constitue une entité indivisible du lexique pourra être mise en équivalence avec d'autres UE ; l'ensemble étant regroupé dans des « contenants » hiérarchisés en trois ordres supérieurs.

Classe d'évènements ordre 1	Classe d'évènements ordre 2	Classe d'évènements ordre 3	Unité Évènementielle UE
Échelle continentale	Échelle supra régionale (ex Pyrénées)	Échelle régionale	Échelle locale

• *Des marqueurs aveugles*

Il faut noter que les UE décrites ci-dessus sont attachées aux marqueurs physiques d'un évènement (observés, mesurés ou analysés). Il existe cependant des types d'unités évènementielles qui ne sont pas visibles ou mesurables mais sont déduites d'observation indirectes (marqueurs aveugles).

On peut citer comme exemple : l'évènement « exhumation d'un granite » : aucun marqueur pour identifier ce processus dans le pluton mais ce dernier est recouvert en discordance par une série sédimentaire. Dans ce cas l'objet qui porte directement le marqueur de l'exhumation sera la trace de la discordance, il faudra néanmoins que l'objet granite porte un attribut lié à l'évènement exhumation.

Un autre exemple de marqueurs aveugles : une formation de « quartzites polymétamorphiques », aucune paragenèse associée, mais les métasédiments environnants révèlent plusieurs stades métamorphismes successifs (polyphasés). Les différentes conditions P-T devront être affectées à la formation de quartzites.

L'élaboration du lexique évènementiel hiérarchisé incite donc le géologue à une réflexion permanente sur la genèse et l'évolution de chaque entité géologique au cours du temps.

4.1.3. Hétérogénéité des cartes géologiques

Bien que l'ensemble de la couverture géologique de la France soit maintenant levé, il n'en demeure pas moins que ces 1 060 cartes géologiques sont loin d'être homogènes et font preuve d'une certaine disparité liée notamment :

- au temps qui a été nécessaire pour couvrir l'ensemble du territoire, temps pendant lequel les techniques, méthodes, connaissances et concepts géologiques ont profondément évolué. Ceci explique par exemple les différences d'interprétation pouvant exister entre deux cartes situées côte à côte mais réalisées avec plusieurs dizaines d'années d'écart ;
- au profil même des géologues ayant participé aux levés, issus d'écoles différentes, et ayant chacun leur propre vision du terrain ;
- aux besoins qui conditionnaient le lever de la carte, essentiellement axés sur la connaissance scientifique jusque dans les années 1990, et de plus en plus conditionnés depuis par les enjeux sociétaux notamment au niveau de la tranche superficielle dans le cadre des problématiques environnementales et d'aménagement du territoire.

Ceci explique les problèmes de discontinuité qu'il peut y avoir au passage d'une carte à l'autre, avec dans certains cas des contours de formation non continus ou décalés les uns par rapport aux autres, et des appellations et notations divergentes selon les auteurs.

L'un des objectifs du RGF est par conséquent de remédier à tous ces problèmes cartographiques en essayant le mieux possible d'homogénéiser et de mettre en cohérence cartographique l'ensemble de ces levés à 1/50 000.

4.2. MISE EN OEUVRE DANS LE CADRE DU CHANTIER PILOTE

Cette partie développe la façon dont ont été mis en œuvre les objectifs fixés dans le paragraphe précédent, à partir des données sélectionnées sur la zone du démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan ».

La zone d'études a été subdivisée en trois ensembles géologiques :

- les terrains cristallins, métamorphiques, et sédimentaires anciens en domaine orogénique, correspondant à la thématique « Socle » paléozoïque ;
- les terrains sédimentaires correspondant à la thématique « Couverture » ;
- les formations de surface correspondant à la thématique « Régolithe ».

Chacun de ces trois ensembles a été confié à un géologue « référent » ayant en charge la réalisation :

- des lexiques intermédiaires des unités lithostratigraphiques (lexique ULS) ;
- du lexique évènementiel testé, ici, uniquement pour la thématique « Socle » paléozoïque ;
- la réalisation de la carte de démonstration dites « VO ».

4.2.1. Ensembles géologiques traités

a) Socle paléozoïque

Dans l'emprise régionale du chantier pilote Vosges - Fossé rhénan affleurent d'une part la majeure partie du massif hercynien (varisque) des Vosges et, d'autre part, deux « îlots » de socle situés dans la partie la plus septentrionale de l'emprise, dans le département du Bas-Rhin : la granodiorite de Windstein et les schistes de Weiler, ces derniers se poursuivant sur

le territoire allemand vers le Nord. À la granodiorite de Windstein sont associés spatialement et génétiquement deux monzogranites calco-alkalins cachés, recoupés à partir de 1 400 m de profondeur par les forages du site géothermique de Soultz-sous-Forêts : un monzogranite porphyroïde à biotite et fréquente amphibole et un monzogranite leucocrate à deux micas intrusif dans le monzogranite mésocrate précédent.

La connaissance géologique du massif des Vosges a bénéficié des apports récents de deux thèses de l'Université de Strasbourg : la thèse d'Étienne Skrzypek (2011) et celle d'Anne-Sophie Tabaud (2012). La réalisation de ces deux thèses constitue l'une des raisons majeures du choix du chantier pilote Vosges - Fossé rhénan. Ces deux thèses n'ont pas amené de modifications de contours sur les cartes géologiques, mais elles ont apporté de nombreuses données nouvelles, qui ont permis entre autres d'établir une carte simplifiée du massif hercynien des Vosges (Figure 34) et de réaliser une synthèse « up to date » des événements magmatiques, métamorphiques et tectoniques ayant marqué l'histoire géologique de ce massif. Cette synthèse a permis d'affiner le lexique lithostratigraphique (cf. § 4.2.3) et de mieux contraindre la géologie événementielle concernant le socle vosgien.

Le socle hercynien (varisque) des Vosges est « classiquement » divisé en deux domaines, séparés par la faille majeure de Lalaye-Lubine (Figure 34) : (i) le domaine des Vosges septentrionales, rattaché à la zone saxothuringienne de l'orogénèse varisque et (ii) le domaine des Vosges moyennes à méridionales, rattaché à la zone moldanubienne de cette même orogénèse (cf. par exemple carte géologique de la France à 1/1M – 6^e édition, 1996). Cette séparation est reprise dans les thèses d'É. Skrzypek (2011) et d'A.S. Tabaud (2012, Figure 35). Cependant elle est sujette à polémique et un concept « moderne » consiste à situer les deux domaines dans la zone moldanubienne (Figure 35), mais avec un entre autres différences un diachronisme des événements magmatiques : 360 à 320 Ma dans les Vosges moyennes et du Sud, contre 335 à 295 Ma dans les Vosges du Nord.

L'histoire du socle commence par la mise en place de protolites au Néoprotérozoïque supérieur-Cambrien-Ordovicien et se poursuit encore actuellement avec les phénomènes d'altération et d'érosion.

- ***Nature et âge des protolites des unités métamorphiques***

Les unités métamorphiques dérivent de protolites constituées de roches sédimentaires et/ou volcaniques dont les dépôts – sur la marge nord du Gondwana – datent d'une période allant du Néoprotérozoïque supérieur au Silurien.

De rares vestiges de fossiles se trouvent dans les Vosges du Nord :

- l'Unité métamorphique de Villé et du Climont renferme des lentilles du « Porphyroïde du Hang », qui est un métatuf acide à Spongiaires, datés du Cambro-Ordovicien ;
- les « Schistes de Steige », métamorphisés dans l'anchizone, renferment localement des Chitinozoaires du Silurien probable.

En revanche dans les Vosges moyennes et méridionales le métamorphisme régional varisque, plus intense, a effacé toute trace de fossile (le cas échéant) et a fortement à complètement oblitéré la nature des protolites.

Dans les Vosges méridionales un cas particulier est celui de la « Ligne des klippes », qui est une unité hétéroclite structurellement « coincée » entre les formations viséennes du Markstein au nord et d'Oderen au sud. Cette unité hétéroclite comprend entre autres :

- des gneiss et mylonites dérivant d'un protolite cambro-ordovicien ;

- des reliques d'une portion d'ophiolite mise en place dans un contexte d'arrière-arc et constituée de lherzolite mantellique serpentinisée et d'un gabbro daté à 372 ± 18 Ma par la méthode Sm-Nd (*in* Tabaud, 2012) ;
- des conglomérats ;
- et les Schistes du Treh, attribués au Dévonien.

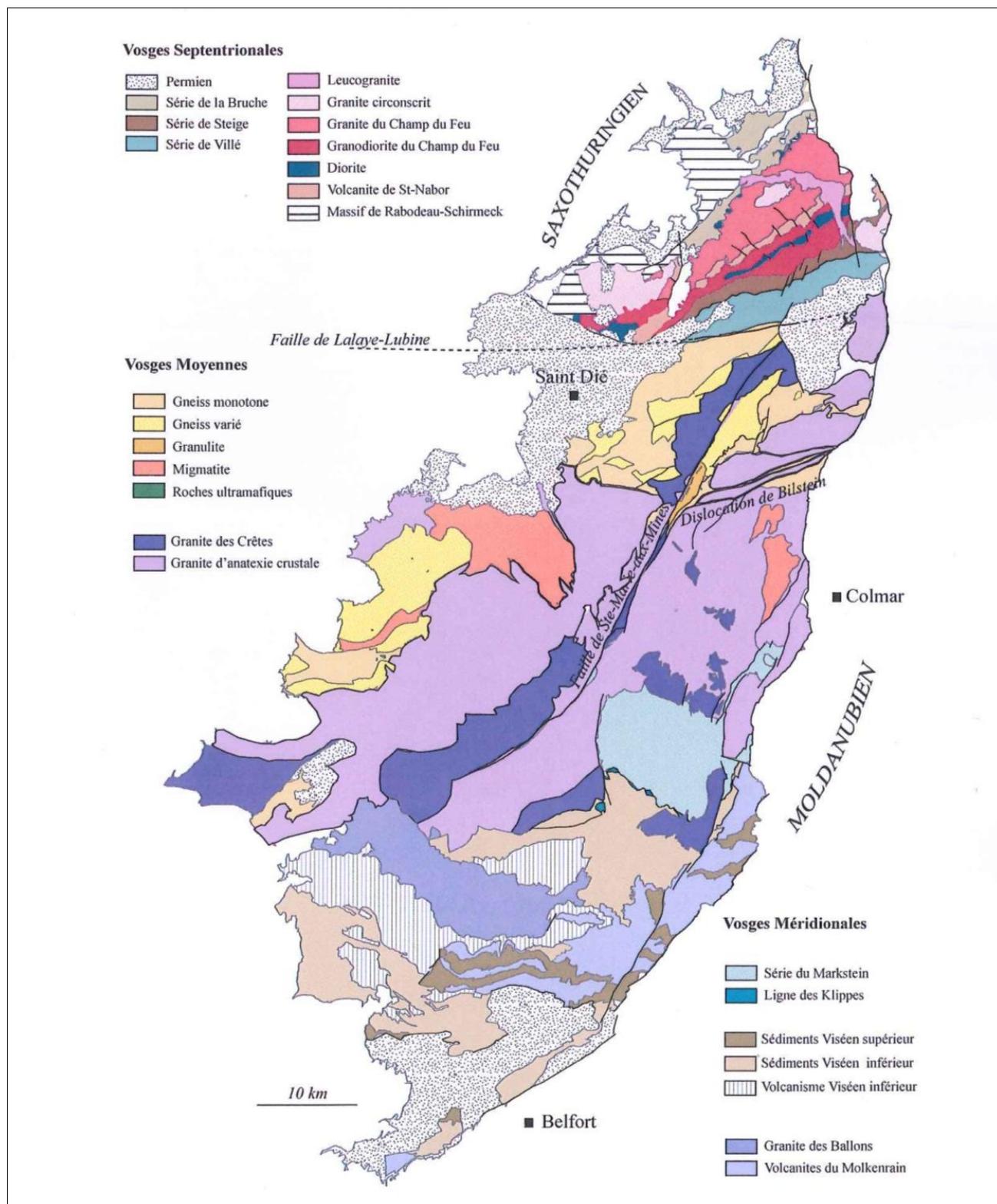


Figure 34 : Carte géologique simplifiée du massif hercynien (varisque) des Vosges (dans thèse d'A.S. Tabaud, 2012, p. 19).

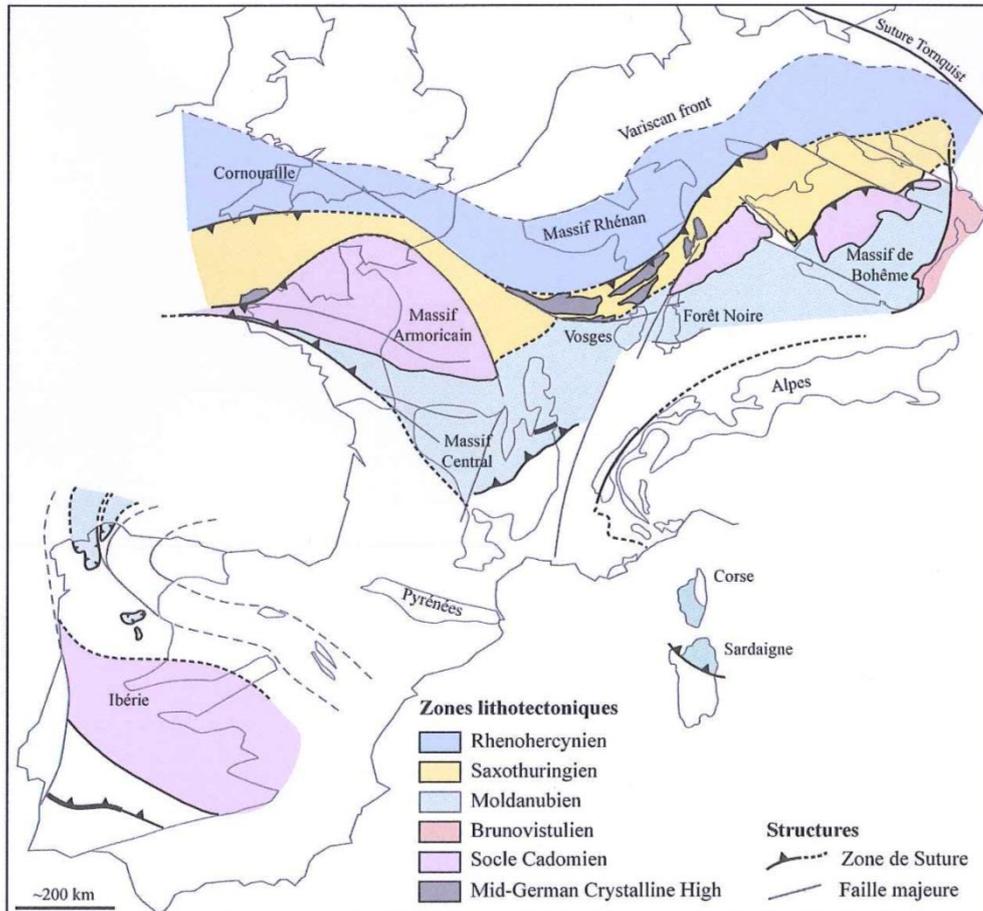


Figure 35 : Carte des zones lithotectoniques de la Chaîne varisque en Europe (dans thèse d'A.S. Tabaud, 2012, p. 17).

- **Les formations sédimentaires et/ou volcaniques viséennes des Vosges méridionales**

Comme le montre la Figure 34, la partie la plus méridionale du massif des Vosges est occupée par des formations volcaniques et/ou sédimentaires viséennes, qui se répartissent en cinq groupes :

- le Groupe du Markstein (Viséen inférieur à supérieur) constitué de sédiments détritiques ou volcano-détritiques (grauwackes), localement cornéifiés au contact d'intrusions de massifs de granite de type Crêtes ;
- le Groupe sédimentaire d'Oderen (Viséen inférieur à supérieur), constitué de sédiments détritiques ou volcano-détritiques (grauwackes), localement injectés de filons de microsyénite-microgranite liés au granite des Crêtes ;
- le Groupe sédimentaire de Thann-Giromagny (Viséen supérieur), également constitué de sédiments détritiques ou volcano-détritiques (grauwackes), avec une intercalation volcanique : les tufs et ignimbrites rhyodacitiques de Lepuis-Gy ;
- le Groupe volcanique de Thann-Giromagny (Viséen supérieur) qui comprend les Formations de Thann-Giromagny, du Molkenrain et du Crémillot, ainsi que les brèches de la Formation de Lorette et Belhafy ;
- le Groupe volcanique de Malvaux et du Plancher-Bas (Viséen supérieur), constitué de tufs, de laves et de brèches.

- **Les formations sédimentaires westphaliennes**

Dans la partie nord-est des Vosges moyennes de petits bassins westphaliens sont encastrés dans le socle paléozoïque antérieur, notamment dans le massif de granite porphyroïde à biotite de Thannenkirch et des Verreries. Ces bassins sont constitués de conglomérats, arkoses, schistes uranifères et veines de houille.

- **Les formations sédimentaires stéphanien**

Elles remplissent de petits bassins, encastrés dans le socle paléozoïque antérieur, dans deux secteurs de la zone couverte par l'emprise régionale du démonstrateur :

- en limite nord des Vosges moyennes, le long de la faille majeure de Lalaye-Lubine et en bordure nord du massif de granite à deux micas de Dambach-Scherwiller ;
- dans la partie la plus au Sud des Vosges méridionales, la partie nord du bassin stéphanien de Ronchamp en Haute-Saône, encastré dans la Formation d'Oderen (Viséen), et plus à l'Est, le petit bassin d'Eloie dans le Territoire de Belfort.

Les formations stéphanien sont constituées de conglomérats, arkoses et schistes noirs houillers. Elles sont l'unique constituant du groupe « Bassins houillers stéphanien des Vosges », lui-même seul constituant du Supergroupe « Stéphanien vosgien ».

b) Couverture sédimentaire Post-Stéphanien

La tranche de terrains attribué à l'ensemble « Couverture sédimentaire » s'étale depuis la base du Permien (Autunien) pour la limite la plus ancienne jusqu'au Pliocène pour les niveaux les plus récents. La limite inférieure a été fixée arbitrairement en prenant en compte le fait que les terrains permien présents se sont globalement post-orogénèse varisque. Cette limite est quelque peu arbitraire dans la mesure où les terrains « houillers » stéphanien sont également en partie post-varisques et reposent en discordance sur le socle vosgien. Le bassin de Ronchamp a d'ailleurs un remplissage stéphanien-permien, avec cependant un contact faillé (carte Giromagny-411 à 1/50 000) entre le Carbonifère et le Permien.

La limite supérieure se base essentiellement sur la transition entre le Néogène le Quaternaire, siège de la grande majorité de la mise en place des dépôts et formations superficielles.

- **Le Permien**

En dehors de quelques forages qui les ont atteints, les terrains permien sont relativement localisés à l'affleurement et essentiellement cantonnés dans des bassins d'effondrement ou sillons d'extension variable, initiés par le jeu ou le rejeu d'accidents cassants de direction majeure ENE-WSW, tels que ceux de Ronchamp-Giromagny, le plus important, de Champenay, du Val d'Ajol, de Saint-Dié-Villé ou du Nideck. Les sédiments à l'origine du comblement de ces cuvettes sont d'origine continentale, fluviales à fluviolacustres, avec des structures chenalisantes caractéristiques, et résultent de l'érosion de la Chaîne hercynienne. Ces dépôts, étagés depuis l'Autunien jusqu'au Saxonien, s'effectuent en climat aride ; ils sont majoritairement très immatures et essentiellement représentés par des grès feldspathiques, des arkoses, des siltites et argilites, avec quelques décharges conglomératiques, en particulier vers la base. La sédimentation devient de plus en plus fine vers le sommet avec cependant quelques récurrences gréseuses sommitales et très localement des horizons dolomitiques (anciens calcaires lacustres probables ; formation de Saint-Dié). L'une des particularités de ces terrains est leur couleur, grisâtre à la base, mais devenant rapidement brun-rouge à rouge (Figure 36). Quelques horizons volcano-

sédimentaires peuvent également y être observés tels que des tufs pyroclastiques (formation du Meisenbuckel) avec localement une activité volcanique plus développée caractérisée par l'édification de petits édifices volcaniques à coulées acides (rhyolites et ignimbrites du Nideck, Saxonien-Thuringien) ou intermédiaires à basiques (trachy-andésites et basaltes du Saxonien).



Figure 36 : Carrière de Trapp - Site de Champenay : Grès feldspathiques rouges (Permien) (Y. Vernhet, 2007).

- **Le Trias**

À la fin du Permien, l'intense érosion de la Chaîne hercynienne et le comblement quasi-total des bassins précédemment évoqués aboutit à la formation d'une vaste pénéplaine au niveau de laquelle va se mettre en place un système fluvial de grande ampleur. Cette pénéplaine correspond à l'échelle européenne au vaste bassin germanique couvrant l'Alsace, la Lorraine et une grande partie de l'Allemagne et de la Pologne.

Ce « Trias germanique » se subdivise classiquement en trois grands termes : à la base le Buntsandstein, suivi du Muschelkalk, et enfin du Keuper. Ce dernier est lui-même divisé en un terme basal, la Lettenkohle, un terme moyen largement dominant correspondant au Mittelkeuper et enfin, au sommet, le Rhétien.

- **Le Buntsandstein**

La sédimentation détritique grossière amorcée à la fin du Permien va s'intensifier au cours du Buntsandstein qui est essentiellement caractérisé par une puissante série gréseuse d'origine fluviale, avec à la base les *Grès de Senones* (ou latéralement, *Grès d'Annweiler*) à classement déjà mieux organisé que dans le Permien, et notamment très riches en feldspaths. Le passage au Buntsandstein moyen se traduit par la mise en place d'un premier niveau conglomératique, surmonté par une épaisse série gréseuse avec quelques lentilles argileuses. Il s'agit de la *Formation du Grès vosgien* (200 à 300 m - Figure 37) caractérisant des dépôts en plaine inondable et de chenaux, mais également d'origine éolienne. Postérieurement à ces dépôts gréseux on assiste à la fin du Buntsandstein moyen à une importante décharge de matériels grossiers : le Conglomérat principal (ou Poudingue de Sainte-Odile - Figure 39) recouvrant pratiquement toute la région vosgienne. Ce conglomérat est essentiellement constitué de galets de quartz filonien, de quartzites d'âge ordovicien à silurien, et de lydiennes du Silurien. Dans certains secteurs, sa partie supérieure peut être argilisée, ferruginisée, localement dolomitisée (*la zone limite violette*) en liaison avec des

phénomènes d'altération associés à un arrêt de la sédimentation et à l'épuisement des apports dans un contexte de climat semi-aride (paléosols).



Figure 37 : Grès vosgien (site internet académie Nancy-Metz).



Figure 38 : Grès Vosgien inférieur de Falkenstein (« Couches » de Rehberg ; site internet Académie Nancy-Metz).



Figure 39 - Conglomérat principal (site internet Académie Nancy-Metz).

Le Buntsandstein supérieur marque la reprise de la sédimentation détritique, toujours en contexte continental fluvial, avec la mise en place dans un premier temps d'un ensemble de grès roses à lie-de-vin souvent argileux à lentilles de silts argileux (*les Couches intermédiaires*), surmontés ensuite par 20 à 30 mètres de grès, le *Grès à Voltzia* (Figure 40). Celui-ci est dans sa partie inférieure, fin et clair, en bancs massifs, à lentilles argileuses, et riche en restes de plantes et d'animaux (Figure 41 ; Figure 42), caractérisant déjà le passage d'un milieu de sédimentation purement continental fluvial vers un milieu palustre, lagunaire à deltaïque avec une influence marine se marquant de plus en plus. Sa partie supérieure est représentée par un grès plus argileux rouge à lie de vin avec des petites intercalations de grès bruns à coquilles marines.



Figure 40 - Carrière de Niderviller dans le Grès à Voltzia. © Roger Chalot.



Figure 41 - Carrière de Niderviller : Traces d'Équisetites (Grès à Voltzia). © Roger Chalot.



Figure 42 - Carrière de Niderviller. Rameau de Voltzia(Grès à Voltzia). © Roger Chalot.

- **Le Muschelkalk**

L'invasion progressive de la mer va s'accroître tout au long de cette période avec à la base encore des niveaux détritiques gréseux mais à ciment dolomitique et caractérisés par des rides de courant et de vagues (*Grès coquillier*). Ils sont surmontés par des faciès de plus en plus dolomitiques (*Dolomie à Orbicularis*) puis par un ensemble marneux rouge, gris, et blanc caractérisant un milieu sursalé (Muschelkalk moyen : *Couches rouges, Couches grises, Couches blanches*) à lentilles et nodules de gypse, passées sableuses à gréseuses, passées à sel gemme, anhydrite et gypse (*Couches grises*) et prédominance de bancs de dolomie ou calcaire dolomitique dans la partie supérieure (*Couches blanches*).

À la fin de cette épisode, la sédimentation carbonatée l'emporte, la salinité normale et le milieu devient plus agité. On assiste à la mise en place de différentes formations carbonatées : successivement les *Calcaires bioclastiques à entroques*, les *Calcaires et marnes à cératites* et les *Calcaires à térébratules*.

- **Le Keuper (Lettenkohle, Mittelkeuper, Rhétien)**

Il débute par la Lettenkohle qui correspond globalement à un terme de transition entre les calcaires supérieurs du Muschelkalk et les marnes irisées du Mittelkeuper, et se caractérise par un milieu de sédimentation moins agité et un envasement du milieu. D'une vingtaine de mètres d'épaisseur, celle-ci est représentée par trois formations majeures, successivement de bas en haut : la *Dolomie inférieure* à crustacés (Esthéria), écailles de poissons et ossements de vertébrés, les *Marnes à plantes* renfermant également outre des débris végétaux flottés des mollusques typiques d'un milieu saumâtre, et enfin la *Dolomie-limite*, excellent niveau-repère en sondage (transition avec les marnes sus-jacentes), à lumachelles de *Myophoria goldfussi*.

Le Mittelkeuper débute par une importante série marneuse : les *Marnes irisées inférieures*, marquant une forte augmentation de la salinité du milieu avec des dépôts fortement chargés en gypse et anhydrite (en couches anciennement exploitées) localement à bancs lenticulaires de dolomie. Au Mittelkeuper moyen on assiste à un retour très limité à une sédimentation détritique plus grossière, avec la mise en place de grès fins feldspathiques et micacés à restes de végétaux notamment des prêles (*Équisetites* ; *Grès à roseaux*). Ceux-ci sont surmontés par des argiles bariolées à traces de gypse, puis par une dalle dolomitique (la *Dolomie de Beaumont*), peu épaisse (de l'ordre de 5 m) mais constituant également un excellent niveau-repère dans la série. La partie supérieure du Mittelkeuper marque le retour à des faciès argileux à argilo-dolomitiques avec les *Argiles rouges de Chanville* et les argiles et marnes dolomitiques bariolées.

Le Rhétien correspond au dernier étage du Keuper et marque la fin de la série triasique germanique. Le milieu de sédimentation de type vasière prend un cachet plus marin, tout en restant confiné, à l'exception de chenaux où se déposent des sables micacés. Il est caractérisé par deux formations : la première à la base, grés-argileuse (*Grès rhétiens*) à *Avicula concorta*, la seconde essentiellement composée de marnes et d'argiles rouges à grises, les *Argiles de Levallois*.

- **Le Jurassique**

Le milieu de sédimentation de type marin épicontinental demeure relativement stable durant tout le Lias. La grande transgression marine jurassique ne modifie pas la dominante silteuse dans la sédimentation, mais apporte une phase carbonatée non magnésienne, épisodiquement prédominante. Dans ce contexte différents niveaux de marnes et calcaires vont se mettre en place, tels que les *Marnes et calcaires à gryphées* de l'Hettangien-Sinémurien, les calcaires argileux et d'importants niveaux de marnes argileuses noires au Pliensbachien et, au cours du Toarcien, des marnes papyracées (*Schistes « carton »*) constituant un excellent niveau-repère et suivies par une alternance de marnes et de calcaires (Figure 43). La présence à l'Aalénien de calcaires oolithiques ferrugineux caractérise différents niveaux de condensation. À partir de l'Aalénien, le milieu devient progressivement plus agité et évolue vers un domaine de plate-forme où vont alterner durant le Dogger et le Malm, des épisodes de sédimentation bioclastique et oolithique (« *Grande Oolithe* » du Bajocien), voire récifale (*Calcaires à polypiers*) le climat étant chaud, et des épisodes d'envasement avec d'importants dépôts de boues plus ou moins carbonatées (*Marnes callovo-oxfordiennes*).

Les derniers dépôts jurassiques observés sur la région sont attribués à l'Oxfordien supérieur-limite Kimméridgien inférieur. Le contexte régional laisse supposer que l'ensemble de la région a émergé à la fin du Jurassique (Tithonien).

Aucun dépôt du Crétacé et du Paléocène n'a été jusqu'à présent distingué sur cette région, soit simplement en liaison avec un décapage total de ces dépôts, lié à des processus de

dégradation et d'altération de ces niveaux très développés, soit simplement du fait de l'émersion de cette zone durant toute cette période.



Figure 43 - Schistes « carton » (Toarcien) de Creveney (carte Vesoul ; site internet de l'Académie de Besançon).

Si aucun témoin sédimentaire de cette époque n'a été décelé c'est cependant au cours du Crétacé supérieur que vont se manifester les premiers phénomènes de distension qui seront à l'origine de la mise en place du « Fossé rhénan », phénomènes marqués notamment par la mise en place du filon de néphéline à olivine des Trois Épis, qui figure sur la carte à 1/50 000 – feuille Colmar-Artolsheim et qui a été daté à 93 Ma d'après la notice de cette carte (p. 19).

- ***Le Tertiaire (mise en place du Fossé rhénan)***

Au cours de cette période la région est soumise aux premières phases de l'orogénèse alpine entraînant une compression NNE-SSW de la couverture sédimentaire. À partir de l'Éocène moyen (Lutétien), la zone correspondant à l'emplacement du futur Fossé rhénan commence à subir les premiers effets de la subsidence favorisant la reprise de la sédimentation notamment au niveau de petits lacs tels que celui de Bouxwiller, avec des dépôts alternant de calcaires lacustres et d'argiles souvent riches en lignite et fossiles (ostracodes, poissons, mammifères, gastéropodes d'eau douce) (Figure 44). En dehors de ces petites cuvettes, cette période éocène sous climat tropical se marque par des dépôts dits « sidérolithiques » résultant de l'altération superficielle des calcaires jurassiques et se concrétisant par des marnes et argiles bariolées à pisolithes ferrugineux. Ces faciès correspondent à ce qui est appelé « *l'Éocène de transition* ».

La subsidence s'accroît au cours de l'Éocène supérieur-Oligocène sous les effets d'une distension E-W, le fossé s'individualise très distinctement avec cependant un affaissement nettement plus marqué dans sa partie méridionale avec des bordures constituant des reliefs relativement élevés, de l'ordre du millier de mètres. Les eaux de la mer-péri-alpine vont plus ou moins pénétrer dans ce couloir rhénan et favoriser la formation – au sein de zones lagunaires – de marnes à gypse et anhydrite, alors que sur les bordures s'accumulent – sous les effets de l'érosion – d'importants niveaux détritiques notamment conglomératiques (conglomérats « côtiers »). D'importants dépôts de sel gemme et de potasse associés à des marnes grises ou vertes (plusieurs centaines de mètres) se mettent en place dans la partie

méridionale du bassin (**Bassin potassique**) (*Zone salifère inférieure*) alors que dans le Nord (**Bassin de Pechelbronn**), les influences marines et saumâtres sont nettement moins marquées et associées à une sédimentation détritique correspondant à la *Zone dolomitique* et surmontée par un niveau repère majeur : la *Couche rouge* (marnes rouges massives à anhydrite). Dans les deux cas ce sont déjà plusieurs centaines de mètres de terrains qui vont s'accumuler sur cette zone.

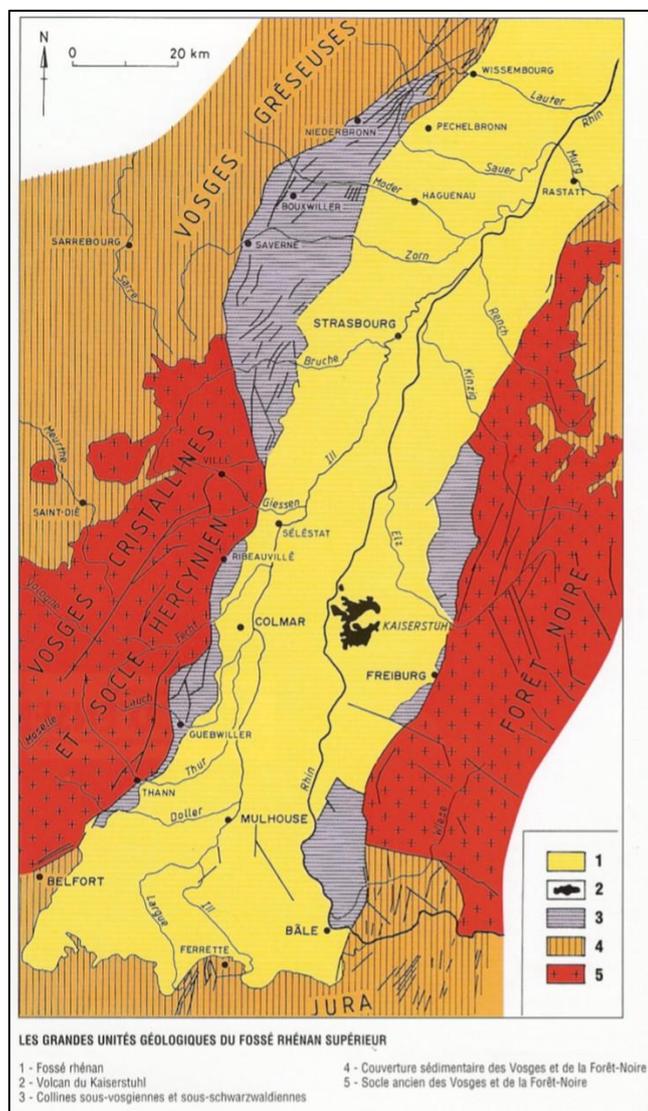


Figure 44 : Les grandes unités géologiques du Fossé rhénan supérieur (d'après Gall, l'Alsace et les Vosges, Ed. Delachaux et Niestlé ; in site internet Lithothèque Alsace de l'Académie de Strasbourg).

Progressivement, avec l'extension vers le Nord de la transgression laguno-marine, on assiste à la mise en place des *Couches de Pechelbronn*, inférieures à supérieures, avec notamment un niveau remarquable situé au passage entre les couches moyennes et les couches supérieures de Pechelbronn : la *Zone à hydrobies*. Tous ces terrains sont essentiellement constitués de marnes à passées gypseuses ou anhydritiques, renfermant quelques niveaux sableux, gréseux, calcaires ou conglomératiques, localement accompagnés d'asphalte ou de lignite. Ils constituent les premiers réservoirs pétrolifères anciennement exploités en Alsace et représentent l'équivalent latéral des *Zones salifères moyennes et supérieures* du Bassin potassique. Ces dépôts peuvent également atteindre plusieurs centaines de mètres avec des variations importantes selon que l'on soit au milieu ou en bordure du bassin.

Par la suite, si peu à peu on assiste à une nette diminution de la phase d'alimentation dans ce fossé au cours de l'Oligocène, la subsidence et les failles de bordure n'en demeurent pas moins actives, avec la mise en place de nouveaux conglomérats côtiers, et l'ensemble du bassin est envahi par la mer rupélienne. Plusieurs cycles sédimentaires correspondant à la *Série grise* (*Marnes à foraminifères*, *Schistes à poissons*, *Marnes à melettes puis à cyrènes*) vont se succéder, marquant une extension et un approfondissement de la mer qui se terminera par un retrait progressif de celle-ci vers le Nord.

Au cours de l'Oligocène supérieur, le fossé se relève au Sud, et l'on assiste au retour d'une sédimentation en eau douce, avec des sédiments fluvio-lacustres carbonatés : la *Molasse alsacienne* au Sud et les *Couches bariolées inférieures de Niederroedern* au Nord.

Un discret volcanisme oligocène se traduit par la mise en place de quelques filons d'ankartrite, c'est-à-dire de basanite à néphéline, sombre par suite de sa richesse en clinopyroxène.

Au cours du Miocène (Aquitarien), suite à important basculement abaissant le fossé septentrional (distension W-E et décrochements senestres), une sédimentation en contexte marin résiduel s'installe avec des épisodes de salure et de dessalure. Elle correspond aux *Couches supérieures de Niederroedern*, à hydrobies corbicules et cérithes.

À partir du Miocène moyen, l'ensemble du fossé est émergé, et une longue période d'altération commence avec quelques dépôts détritiques fluviaux tels que les *Sables et marnes à *Dinotherium bavaricum** et des conglomérats polygéniques (bassin de Delémont), ou des dépôts de calcaires lacustres (bassin de Laufen).

Au cours du Miocène se met par ailleurs en place le célèbre volcan du Kaiserstuhl, situé sur le territoire de la carte à 1/50 000 – feuille Colmar-Artolsheim (342), mais immédiatement à l'Est du Rhin et donc en Allemagne. Cet édifice volcanique est constitué de laves et de tufs alcalins, avec une carbonatite correspondant au terme ultime de la différenciation magmatique.

Le début du Pliocène correspond à une phase de réactivation tectonique avec d'importants mouvements verticaux, dont celui de la faille rhénane, entraînant de part et d'autre du fossé un soulèvement des Vosges et de la Forêt noire et des zones d'avant-monts situées en bordure du Fossé rhénan. Ces mouvements associés aux phénomènes de désagrégation et d'altération des terrains vont se traduire par la mise en mouvement d'importantes masses de matériaux détritiques constituées de sables graviers et galets, qui vont s'accumuler sous la forme de cône et de zone « deltaïque ». En période de stabilité relative, ces faciès peuvent être accompagnés d'argiles lacustres riches en tourbe et en lignite. Ces faciès correspondent par exemple aux formations de *Soufflenheim*, de *Riedseltz*, ou du *Sundgau* dans la région de Mulhouse.

À la fin du Pliocène, la région se situe en domaine continental et correspond probablement à une vaste plaine plus ou moins marécageuse avec une multitude d'étangs, traversée par un cours d'eau précurseur du Rhin s'écoulant probablement vers la plaine de la Saône.

c) Régolithe

Dans le cadre du démonstrateur le Régolithe est présent dans les deux « domaines » que sont le domaine Vosgien et le domaine Fossé rhénan. Le Régolithe du démonstrateur ce sont des terrains allant du Carbonifère à l'actuel. En ce qui concerne le Régolithe autochtone, ou altérites, plusieurs grandes phases d'altération ont été enregistrées. À l'intra-carbonifère, au Trias, avec le développement de grands profils présentant plus de 150 m d'horizon fissuré, à la fin du Jurassique/Crétacé inférieur avec par exemple une karstification

des calcaires jurassiques avec remplissage des cavités par des limons argileux bruns à rougeâtres à pisolithes. Une autre phase est enregistrée au Tertiaire, plus précisément au Paléogène inférieur voire au Miocène, puis au Quaternaire avec par exemple une altération des terrains alluviaux.

En ce qui concerne le Régolithe allochtone, du Quaternaire moyen à l'époque actuelle, la nature des dépôts est liée aux fluctuations climatiques. Durant tout le Quaternaire, la plaine rhénane a fonctionné comme un piège à sédiments (avec des épaisseurs de 25 m à Bâle, 250 m à Neuf-Brisach, 80 m à Strasbourg) en lien avec une subsidence tectonique active, irrégulière. Les alluvions rhénanes proviennent des Alpes et du Jura et les alluvions vosgiennes de l'érosion du massif des Vosges. Les alternances glaciaires/interglaciaires (époques froides et tempérées plus ou moins humides) ont engendré des périodes de creusement et d'alluvionnement successives. Le Rhin a divagué sur toute la largeur de la plaine d'Alsace entre Mulhouse et Strasbourg. Dans la basse plaine les rivières d'origine jurassienne ou vosgienne occupent d'anciens bras du Rhin. À l'Holocène, la largeur de la plaine s'est réduite et les graviers ont été recouverts de limons d'inondation. Les plus grossiers datent du début des périodes froides. Les périodes plus tempérées sont marquées par l'altération des formations déposées lors des périodes froides qui les précèdent et par des dépôts d'inondation plus fins, limoneux, fertilisant le fossé. Le Rhin taille alors des terrasses alluviales et développe d'énormes méandres, chenaux, bancs et îles qui se modifient souvent à chaque crue du fleuve lors des fontes de neiges. La largeur du Rhin pouvait atteindre 20 km et avant le début de sa domestication, le paysage rhénan ressemblait au paysage amazonien : nombreuses îles, bras morts, forêt alluviale humide, marais. L'alternance des périodes d'alluvionnement et de creusement a finalement abouti au développement d'un système de terrasses découpées aujourd'hui par le Rhin et l'III. Les loëss ont été déposés dans des zones de moindre turbulence pendant les périodes froides et sèches en domaine périglaciaire. On retrouve des épaisseurs allant jusqu'à 15-20 m. Les loëss recouvrent les terrasses lors des derniers épisodes glaciaires du Quaternaire. Pendant les périodes post-glaciaires, les dépôts loëssiques ont été souvent altérés (décarbonatation et argilisation) pour donner des lehms et remaniés car très mobilisables en bas de versants et fonds de vallons

Le Quaternaire marque les reliefs vosgiens par une série de glaciations y laissant leurs empreintes (cirques glaciaires, moraines, parois polies ou striées par la glace...), surtout dans les Hautes-Vosges. Durant ces périodes, les glaciers s'installent sur les sommets de plus de 800 m. En descendant vers l'aval, ils creusent les vallées en forme d'auge ou de U, laissant un fond plat visible par exemple dans la vallée de la Wormsa. Lors de leur fonte, des blocs erratiques sont libérés, comme « la boule du diable » de la vallée de la Vologne. Les phénomènes périglaciaires tels que cryoturbation, gélifluxion et cryoreptation, ont une étendue large et ont localement marqué, déformé et remanié les dépôts et les altérites des plateaux et des versants.

Les dépôts gravitaires sont bien représentés en raison du contexte géologique particulier avec un graben souligné par une faille bordière. La mise en place des dépôts s'est faite pendant les périodes de dégel (à la fin des grandes périodes froides du Quaternaire). Le sol dégelé et gorgé d'eau a engendré d'importants glissements sur les pentes. Une multitude de types de dépôts de versant existent du fait de la diversité lithologique du secteur, de la raideur et de l'exposition des pentes.

4.2.2. Évènements géologiques régionaux

a) *Évolution varisque*

Le massif hercynien des Vosges, à l'instar du Massif armoricain et du Massif central, est un témoin privilégié de l'orogénèse varisque en France.

La collision varisque, dont l'évolution géologique polyphasée est à l'origine de la structuration complexe observée de nos jours à l'affleurement, a été active pendant le Dévonien et le Carbonifère. Des travaux récents, s'appuyant sur de nombreuses campagnes de terrain et une approche analytique pluridisciplinaire, ont permis d'affiner l'évolution tectono-métamorphique de l'orogénèse varisque dans les Vosges (thèses de Skrzypek, 2011 et de Tabaud, 2012). Un des résultats importants issu de ces études est la découverte d'une discontinuité intra-orogénique majeure dans la croûte moyenne, formée vers 340 Ma en relation avec des phénomènes de sous-plaquage à la base du système orogénique. Cette discontinuité influence dès lors toute la suite du processus orogénique pendant le Carbonifère, contrôlant aussi bien le découplage des déformations compressives à l'échelle crustale, que l'exhumation de l'ensemble du système orogénique à la fin de l'histoire varisque. L'évolution tectono-métamorphique et magmatique polyphasée au cours de l'orogénèse varisque

Dans les Vosges moyennes à méridionales se trouvent également d'autres petits corps de roches ultrabasiques serpentinisées, ainsi que des reliques d'éclogites, plus ou moins serpentinisées, qui constituent les témoins d'un métamorphisme précoce de haute pression et de moyenne température (650-750 °C), qui pourrait dater du Silurien (435-410 Ma) par analogie avec l'histoire éovarisque du Massif central. Les corps ultrabasiques des Vosges moyennes se situent au sein d'une « Unité granulitique », limitée du côté ouest par la faille majeure de Ste-Marie-aux-Mines (Figure 34).

L'évolution dévono-carbonifère peut être divisée (Skrzypek, 2011 ; Tabaud, 2012) en quatre épisodes majeurs :

- au Dévonien moyen à supérieur (375-360 Ma), début de la collision continentale :
 - dans la partie la plus septentrionale des Vosges du Nord : mise en place des tholéiites continentales de la Formation de Schirmeck-Moyenmoutier et sédimentation proximale avec dépôt de la Formation du Val de Bruche ; plus au Sud : compression E-W, métamorphisme régional dans l'anchizone pour les Schistes de Steige et dans le faciès schistes verts pour l'Unité de Villé et du Climont,
 - dans les Vosges moyennes, métamorphisme régional 1 dans le faciès granulite (Unité granulitique) à amphibolite (Unités des gneiss variés et des gneiss monotones) ;
- au Viséen inférieur (345-335 Ma) compression E-W, extrusion de la racine de la chaîne, avec mise en place dans les Vosges du Nord du volcanisme calco-alcalin des massifs de Rabodeau et de la bande médiane du Champ du Feu, et mise en place des granites magnésio-potassiques des Crêtes (Vosges moyennes) et des Ballons (Vosges du Sud) ;
- au Viséen supérieur (335-325 Ma) : compression N-S, indentation du Gondwana, métamorphisme régional 2 dans l'Unité de Villé et du Climont (Vosges du Nord) et les unités des granulites, gneiss variés et gneiss monotones (Vosges moyennes) ; mise en place des diorites (329 ± 2 Ma) et de la granodiorite calco-alcaline du Hohwald (326 ± 2 Ma) dans les Vosges du Nord et, encore plus au Nord (carte Haguenau à 1/50 000), mise en place des monzogranites calco-alcalins de Soultz-sous-Forêts.
- Au Namurien-Westphalien-Stéphanien (325-295 Ma) et Permien : extension N-S, effondrement gravitaire de la chaîne avec :

- dans les Vosges moyennes une importante anatexie (fusion crustale) générant des migmatites et des granites aluminopotassiques,
- et dans le massif du Champ du Feu (Vosges du Nord) une succession d'intrusions granitiques acides : granites calco-alcalins du Champ du Feu Nord (318 ± 2 Ma) puis des massifs circonscrits de Senones, Natzwiller et Andlau (312 ± 2 Ma), et enfin intrusion tardive du leucogranite du Kagenfels, dont l'âge, controversé, est probablement saxonien car il est associé génétiquement et spatialement aux rhyolites et ignimbrites du Nideck.

L'évolution tardi- à post-orogénique est quant à elle caractérisée par le développement de bassins sédimentaires stéphaniens et/ou permien, témoins directs de la transition avec la sédimentation mésozoïque sus-jacente.

b) *Évolution méso-cénozoïque*

L'évolution mésozoïque de la zone aujourd'hui représentée par les Vosges et le Fossé rhénan est directement connectée à celle du Bassin de Paris. Les failles sont peu nombreuses et les sédiments, d'âge allant du Trias au Jurassique supérieur (absence de dépôts crétacés), enregistrent alors le remplissage d'un bassin épicontinental sous l'influence d'événements géodynamiques lointains. Si l'on se réfère à la datation à 93 Ma du mince filon de néphéline à olivine des Trois Épis (in notice de la carte à 1/50 000 – feuille Colmar-Artolsheim) c'est au cours du Crétacé supérieur que se manifestent les premiers phénomènes de distension qui seront à l'origine de la mise en place du « Fossé rhénan ».

Ce n'est qu'à partir du Cénozoïque que s'individualisent les Vosges et le Fossé rhénan, sous l'influence de la tectonique pyrénéenne puis alpine. La phase de rifting principale du Fossé rhénan, d'âge Éocène supérieur à Oligocène, se caractérise par des dépôts sédimentaires épais de plus de 2 000 m, discordants sur les séries sédimentaires mésozoïques sous-jacentes. Elle s'accompagne d'un volcanisme discret se traduisant par la mise en place de quelques filons d'ankaratrite.

L'histoire post-rift se caractérise ensuite, dès le début du Miocène, par une réorganisation des contraintes tectoniques régionales se traduisant par une activité tectonique décrochante significative : se développent alors de nombreuses failles et structures transtensives recoupant indifféremment les séries pré- et syn-rift. Au cours du Miocène se met par ailleurs en place le célèbre édifice volcanique alcalin du Kaiserstuhl, situé sur le territoire de la carte à 1/50 000 – feuille Colmar-Artolsheim (342), mais immédiatement à l'est du Rhin et donc en Allemagne.

Les sédiments mésozoïques et cénozoïques, tout comme les structures tectoniques associées, sont aujourd'hui particulièrement bien préservés en subsurface sous la couverture sédimentaire Quaternaire, où ils sont observables dans les forages et sur les profils sismiques.

c) *Évolution plio-quaternaire*

La subsidence du Fossé rhénan est encore active au Pliocène et au Quaternaire. Au Pliocène, dans le fossé méridional, il y a érosion. Des gouttières se forment en Basse Alsace. Elles sont probablement liées à des jeux tectoniques locaux et piègent des sables provenant de la désagrégation des Grès vosgiens et surtout de l'érosion des arènes granitiques des Vosges et de la Forêt-Noire. La flore indique une température encore assez chaude et un climat sub-tropical à méditerranéen.

Au début du Quaternaire, le Rhin s'écoule vers la Saône ; la Basse Alsace est une aire marécageuse où se déposent des vases grises. Puis des mouvements d'affaissement reprennent dans le Fossé rhénan méridional et permettent au Rhin de s'écouler vers le Nord, selon son cours actuel.

Du Quaternaire moyen à l'époque actuelle, la nature des dépôts est liée aux fluctuations climatiques. En Basse Alsace une importante phase de creusement a lieu au Weichsélien, liée à un enfoncement très tardif de la partie centrale du Fossé rhénan. À la fin du Weichsélien une période de remblaiement débute et se poursuit pendant tout l'Holocène. L'alternance des périodes d'alluvionnement et de creusement aboutit finalement au développement d'un système de terrasses découpées par le Rhin et l'III. Recouvertes de loess sur une quinzaine de mètres environ lors des derniers épisodes glaciaires du Quaternaire, ces terrasses dominent aujourd'hui le lit du fleuve de 5, 10, 15, 20 et 50 m.

Dans les Vosges, au pléistocène inférieur et moyen les rivières sont encore peu encaissées et elles s'approfondissent au Pléistocène supérieur. Le Quaternaire marque les reliefs par une série de glaciations y laissant leurs empreintes. Durant ces périodes, les glaciers s'installent sur les sommets de plus de 800 m. En descendant vers l'aval, ils creusent les vallées en forme d'auge ou de U, laissant un fond plat. Lors de leur fonte, des blocs erratiques sont libérés, comme « la boule du diable » de la vallée de la Vologne. Les phénomènes périglaciaires tels que cryoturbation, gélifluxion et cryoreptation, ont une étendue large et ont localement marqué, déformé et remanié les dépôts et les altérites des plateaux et des versants.

4.2.3. Constitution des lexiques « Vosges - Fossé rhénan »

Les modalités de construction ont été définies dans le paragraphe 4.1.2, pour rappel elles consistent à :

- recenser les différentes unités lithologiques présentes sur la zone ;
- hiérarchiser en tant qu'unité lithostratigraphique, en membre, formation, groupe et supergroupe (ou termes similaires mais adaptés pour le Régolithe et le Socle), selon les concepts de lithostratigraphie définis par Hedberg et Hollis, (1979 ; Guide stratigraphique international : Classification, terminologie et règles de procédures) et les principes de Sténon ;
- mettre en cohérence de ces différentes unités lithostratigraphiques avec une appellation, une notation et un codage numérique, **uniques**.

a) Lexique ULS « Socle paléozoïque »

Dans le lexique RGF nous avons introduit un **super-groupe 8** intitulé « **Socle paléozoïque des Vosges** ». Ce super-groupe est subdivisé en 31 groupes.

Les cinq groupes les plus anciens sont constitués d'unités métamorphiques dont le protolite a un âge cambro-ordovicien. Le groupe le plus jeune est constitué de filons hydrothermaux, qui comportent des filons minéralisés dont la mise en place est stéphanienne à hettangienne voire tertiaire, mais qui sont encaissés dans des terrains plus anciens et qui sont de ce fait mis dans le super-groupe « Socle paléozoïque des Vosges » ; il en est de même pour trois entités tardi- à post-varisques : des filons subvolcaniques, des filons plutoniques et la Suite des granites tardifs des Vosges du Nord, entités intrusives dans des terrains antérieurs. En revanche, les bassins houillers stéphaniens des Vosges sont mis dans le super-groupe 9, qui ne comprend que ces bassins.

En dehors des quatre entités tardi- à post-varisques, le super-groupe 8 comprend 27 groupes lithostratigraphiques que nous avons classés en fonction de deux critères

principaux : le domaine auquel ils se rattachent et leur âge. Les deux domaines, séparés par la faille majeure de Lalaye-Lubine, sont (i) celui des Vosges du Nord et (ii) celui des Vosges centrales et du Sud. Dans chacun d'eux les groupes sont classés par ordre d'âge croissant de haut en bas et comprennent une ou plusieurs formations, subdivisées en membres le cas échéant.

- **Le domaine des Vosges du Nord**

Il coïncide *grosso modo* avec l'emprise locale ou petite emprise du démonstrateur RGF, comprend, outre le groupe correspondant à la « Suite des granites tardifs des Vosges du Nord » (50), 12 groupes, qui sont de haut en bas :

- les « Lambeaux sédimentaires westphaliens » (groupe 51) ;
- cinq suites de roches plutoniques (groupes 52 à 56), d'âge namurien à viséen inférieur ;
- quatre groupes (57 à 60) constitués de formations volcaniques et/ou sédimentaires, d'âge viséen supérieur à dévonien ;
- les « Schistes de Steige » (groupe 61), d'âge silurien à ordovicien
- l'« Unité métamorphique de Villé et du Climont » (groupe 62) dont le protolite est attribué au Cambro-Ordovicien.

- **Le domaine des Vosges centrales et méridionales**

Il comprend quinze groupes :

- quatre groupes (63 à 66) de granitoïdes, soit alumino-potassiques (Figure 26), soit magnésio-potassiques ;
- cinq groupes (67 à 71) constitués de formations volcaniques et/ou sédimentaires des Vosges du Sud, d'âge viséen supérieur à néoprotérozoïque ;
- la « Ligne des klippes » (groupe 72), située dans les Vosges du Sud et constituée d'un assemblage de schistes, conglomérat, roches ultrabasiques à basiques, gneiss et mylonites, d'âge tournaisien à néoprotérozoïque supérieur (briovérien) ;
- cinq groupes (73 à 76) de roches métamorphiques dont le protolite est attribué au Cambro-ordovicien : migmatites (Figure 27) et gneiss monotones des Vosges centrales, gneiss variés, granulites, péridotites + éclogites des Vosges du Sud.

Au total, le super-groupe 8 comprend 176 formations, qui correspondent aux 176 caissons de la légende de la carte harmonisée. La légende de la carte simplifiée comprend quant à elle 31 caissons correspondant aux 31 groupes que comporte le super-groupe 8. En outre dans le lexique, de nombreuses formations sont divisées en membres, qui correspondent à des entités lithologiques non distinguées sur les cartes à 1/50 000, mais définies dans les descriptions de terrain des notices et/ou distinguées dans des forages.

Notion de « Formations » pour les unités du « socle paléozoïque des Vosges », le terme de « formation » n'est adapté que pour les entités sédimentaires et/ou volcaniques dans lesquelles le métamorphisme régional est soit nul, soit suffisamment faible pour pouvoir identifier facilement la nature du protolite. Les entités du socle paléozoïque pour lesquelles le terme de formation est inadapté sont celles qui sont constituées de roches hydrothermales, subvolcaniques, plutoniques ou fortement métamorphiques.

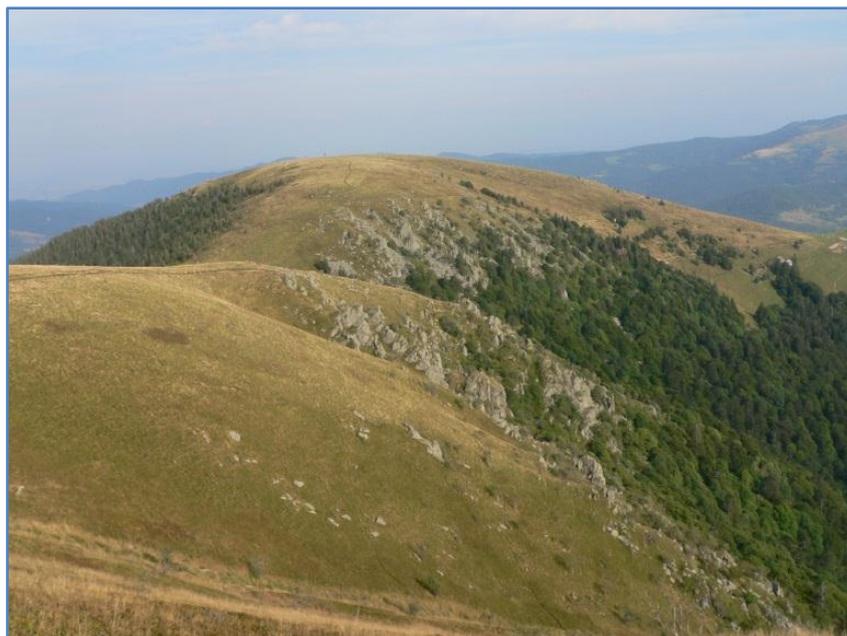


Figure 45 : Massif du Hohneck : granite porphyroïde à biotite, muscovite et cordiérite accessoires, de type Bramont – Granites d’anatexie des Vosges centrales (groupe 63) ; (photo de la partie orientale, située dans le Haut-Rhin, P. Chèvremont, 2012).

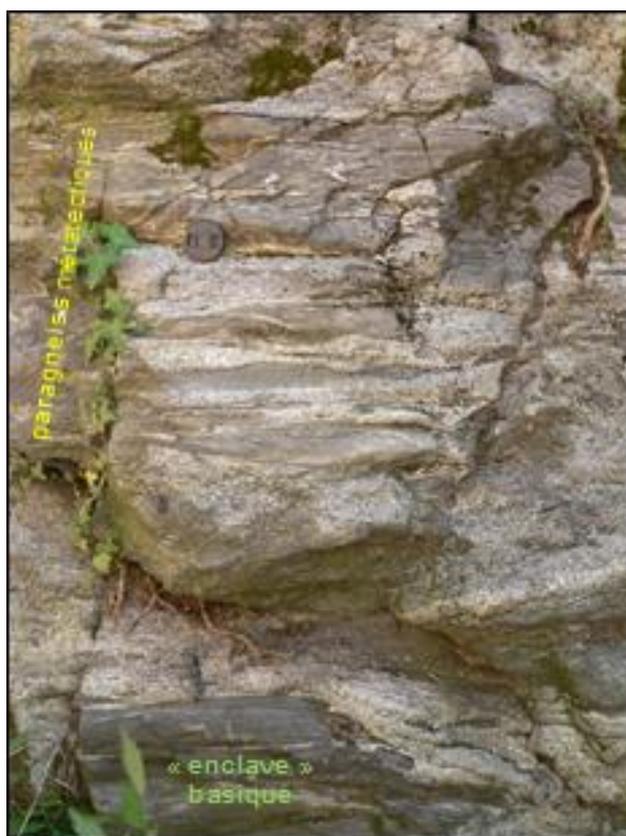


Figure 46 : Diatexite à enclaves basiques de Kaysersberg, avec relique de paragneiss métatectoniques – Unité des migmatites des Vosges centrales (groupe 73) ; (photo prise dans le village de Kaysersberg, Haut-Rhin, par P. Chèvremont, septembre 2012).

Roches sédimentaires et/ou volcaniques pas ou peu affectées par un métamorphisme régional. C'est par exemple le cas pour la « formation du Val de Bruche » (VB), qui est

cependant subdivisée en six entités lithostratigraphiques, ayant rang de formation et distinguées de la façon suivante :

h2VB, Formation du Val de Bruche : grauwackes, schistes phylladiques et schistes versicolores (Viséen)
d7-h2VBBr, Formation du Val de Bruche : psammites, conglomérats, schistes, arkoses ; brèche polygénique de J. de Lapparent (Famennien-Viséen)
d5-6VBPh, Formation du Val de Bruche : schistes, schistes phylladiques, schistes gréseux, grauwackes, arkoses (Givétien-Frasnien)
d4-5VBSk, Skarn à hématite, pyrite, scheelite, etc. de Grandfontaine, développé aux dépens de calcaires du Givétien, au contact d'un granite caché probablement de type Natzwiller (Eifélien-Givétien)
d4-5VBSch, Formation du Val de Bruche : schistes gréseux gris, grauwackes, rares conglomérats (Eifélien-Givétien)
d4-5VBCa, Formation du Val de Bruche : calcaires bréchiques et dolomitiques plus ou moins recristallisés, lentilles de calcaires récifaux (Eifélien-Givétien)

C'est également le cas pour la « formation de Villé et du Climont » (VC), dont le protolite d'âge cambro-ordovicien a subi, lors de l'orogénèse varisque (hercynienne), un métamorphisme régional dans le faciès schistes verts. Cette entité est subdivisée en huit entités lithostratigraphiques, distinguées de la façon suivante :

k-oVCξq, Formation de Villé et du Climont : grès, psammites et quartzo-phyllades (Cambrien-Ordovicien)
k-oVCpξ, Formation de Villé et du Climont : « Porphyroïdes » (Cambrien-Ordovicien)
k-oVCξ, Formation de Villé et du Climont : schistes et phyllades (Cambrien-Ordovicien)
k-oVCt, Formation de Villé et du Climont - Schistes et phyllades : faciès tacheté de l'auréole de contact du granite d'Andlau (Cambrien-Ordovicien)
k-oVCbrξ, Formation de Villé et du Climont : brèche grauwackeuse (Cambrien-Ordovicien)
k-oVCoξ, Formation de Villé et du Climont : schistes noirs œillés (Cambrien-Ordovicien)
k-oVCξg, Formation de Villé et du Climont : micaschistes à grenat et quartzites clairs (Cambrien-Ordovicien)
k-oVCmyξ1, Formation de Villé et du Climont : gneiss mylonitiques, mylonites, gneiss œillés (1ère et 2ème écaïlle) (Cambrien-Ordovicien)

Il est à noter que parmi ces huit entités, mises au rang des « formations » :

- l'une (k-oVCt) correspond à un faciès tacheté, développé – par métamorphisme de contact – aux dépens de schistes et phyllades, lors de l'intrusion du granite d'Andlau ;
- une autre (k-oVCmyξ1) concerne un faciès mylonitique, situé en bordure de la faille majeure de Lalaye-Lubine, qui sépare les Vosges du Nord des Vosges moyennes.

Un exemple de formation à prédominance volcanique mais comportant des sédiments détritiques est celui de la « formation du Molkenrain » datée du Viséen supérieur et subdivisée en quatre entités :

h2TGvs1, Formation du Molkenrain : tufs rhyolitiques, pyromérides, ignimbrites, conglomérats, grauwackes (Viséen supérieur-Viséen supérieur)
h2TGip3-1, Formation du Molkenrain : tufs rhyolitiques, ignimbrites à amphibole, ignimbrites rhyolitiques latitiques inférieures (Viséen supérieur-Viséen supérieur)
h2TGip3-2, Formation du Molkenrain : ignimbrites rhyolitiques latitiques, moyennes à supérieures (Viséen supérieur-Viséen supérieur)
h2TGταq, Formation du Molkenrain : latites quartzifères (Viséen supérieur-Viséen supérieur)

Roches hydrothermales. Elles constituent des filons encaissés dans le socle paléozoïque mais d'âge mal connu : Stéphanien à Hettangien, voire Tertiaire pour certains. Ces filons hydrothermaux sont subdivisés en deux entités ayant rang de formation :

Q, Filons de quartz stérile (Stéphanien-Hettangien)
Qm, Filons minéralisés indifférenciés (Stéphanien-Hettangien)

Roches subvolcaniques (hypovolcaniques). Elles constituent soit des filons, soit des faciès de bordure de massifs de roches plutoniques. Les filons et les bordures non rattachées à une Suite de roches plutoniques (cf. plus loin) sont subdivisés en trois entités ayant rang de formation :

h5-r1 ρ , Filons de rhyolite (Stéphanien-Autunien)
h5-r1 ν , Filons de lamprophyres, microdiorites, diabases (Stéphanien-Autunien)
h4-r1 $\mu\gamma$, Filons (ou bordures) de microgranites porphyriques ou non, granophyre, rhyolite (Westphalien-Stéphanien)

Roches plutoniques. En dehors du cas particulier de « Filons de leucogranites aplitiques ou pegmatitiques (Viséen-Stéphanien) », les roches plutoniques sont classées dans des « Suites » ayant rang de Groupes et sont distinguées au niveau de la « formation » par des appellations faisant référence à la composition modale, à la texture, au chimisme, à la localisation géographique et à l'âge. Par exemple, le Groupe que constitue la « Suite monzogranitique du Champ-du-Feu nord – Soultz-sous-Forêts (Viséen supérieur-Namurien) » comprend six entités ayant rang de formation :

h3 γ 3Sn, Monzogranite porphyroïde Mg-K, à biotite et amphibole, de Senones (Namurien-Namurien)
h3L γ 3Be, Monzogranite calco-alcalin de Belmont - faciès leucocrate (Namurien-Namurien)
h3 γ 3Be, Monzogranite calco-alcalin, à biotite et rare amphibole, de Belmont (Namurien-Namurien)
h3 γ 3FB, Monzogranites calco-alcalins, à biotite et parfois amphibole, de Fouday et de Barembach (Namurien-Namurien)
h3 γ 3Wa, Monzogranite calco-alcalin, à biotite et rare amphibole - faciès à enclaves diverses de Waldersbach (Namurien-Namurien)
h2-3L γ S, Monzogranite leucocrate à deux micas de Soultz-sous-Forêts (327 \pm 7 Ma) (Viséen supérieur-Namurien)

Il est à noter que le « Monzogranite leucocrate à deux micas de Soultz-sous-Forêts (327 \pm 7 Ma) (Viséen supérieur-Namurien) » est une « formation » qui n'affleure pas : ce monzogranite n'a été observé qu'au sein des forages du site géothermique de Soultz-sous-Forêts, mais il appartient au même Groupe que la granodiorite de Windstein, qui elle affleure.

Cas particuliers de la Ligne des Klippes et des Péridotites et écloğites. La Ligne des klippes constitue, dans les Vosges du Sud, un Groupe particulier, hétéroclite, comprenant les trois « formations » suivantes :

d6-7LKS, Ligne des Klippes : Schistes du Treh (Famennien-Frasnien)
π c γ LK, Ligne des Klippes : roches ultrabasiques à basiques et conglomérat (Cambrien-Frasnien)
ζ c γ LK, Ligne des Klippes : gneiss et mylonites (Briovérien ¹ -Ordovicien)

Les Péridotites et écloğites constituent un autre Groupe particulier, comprenant les trois « formations » suivantes :

π a, Péridotite serpentinisée à amphibole (Cambrien-Ordovicien)
π g, Péridotite serpentinisée à grenat (Cambrien-Ordovicien)
ψ , Ecloğite, écloğite amphibolitisée (Cambrien-Ordovicien)

¹¹ Briovérien = Néoprotérozoïque supérieur

Roches fortement métamorphiques. En dehors des gneiss et mylonites de la ligne des Klippes et des éclogites, les roches fortement métamorphiques sont classées dans des « Unités » ayant rang de groupe. Ces Unités sont au nombre de 4 :

M, Unité des migmatites, Vosges centrales (Cambrien-Ordovicien)
ζm, Unité des gneiss monotones, Vosges centrales (Cambrien-Ordovicien)
ζv, Unité des gneiss variés, Vosges centrales (Cambrien-Ordovicien)
Gv, Unité granulitique, Vosges centrales (Cambrien-Ordovicien)

Chacune de ces quatre unités métamorphiques comprend plusieurs « formations ». Par exemple, « l'Unité des gneiss variés » comprend les 6 « formations » suivantes :

ζSM, Gneiss à lithologie variée, kinzigites (Cambrien-Ordovicien)
δSM, Amphibolites et intercalations amphibolitiques (Cambrien-Ordovicien)
cSM, Lentilles de cipolin (Cambrien-Ordovicien)
ζgSM, Gneiss perlé à grenat (Cambrien-Ordovicien)
ζγSM, Gneiss perlé à grenat, granitisé (Cambrien-Ordovicien)
λsSM, Leptynites à nodules de sillimanite (Cambrien-Ordovicien)

Membres. La subdivision d'une « formation » en membres est particulièrement utile dans le cas de forages carottés, qui permettent une description très fine des variations lithologiques et/ou structurales. Un bon exemple est celui de la « formation » intitulée « Monzogranite plus ou moins porphyroïde, à biotite et fréquent hornblende, de Sultz-sous-Forêts » qui comprend treize membres, définis à partir du log du forage EPS1 (2030 m) entièrement carotté de 830 à 2032,70 m de profondeur recalculée, le toit du socle monzogranitique se trouvant à 1418,22 m. Ces treize membres sont donnés dans le tableau 1.

Suite granodioritique à monzogranitique de Windstein-Sultz-sous-Forêts	Monzogranite leucocrate à deux micas de Sultz-sous-Forêts	h2-3LyS	h2-3LgrS	Viséen supérieur	Namurien	327 ± 7 Ma	
	Monzogranite plus ou moins porphyroïde, à biotite et fréquente hornblende, de Sultz-sous-Forêts	h2y3S	h2grS	Viséen inférieur	Viséen inférieur	334 ± 4 Ma	
	13 MEMBRES						
	Cumulat de feldspath potassique	h2cfsK	h2cfsK				
	Monzogranite porphyroïde riche en biotite et/ou amphibole	h2mélayS	h2grmélagrS				
	Xénolite	h2xS	h2xS				
	Monzogranite porphyroïde altéré	h2yalS	h2galS				
	Monzogranite bréchifié	h2ybrS	h2grbrS				
	Monzogranite porphyroïde cataclasé et hydrothermalisé	h2ycalyS	h2grcalyS				
	Monzogranite porphyroïde cataclasé	h2ycataS	h2grcataS				
	Monzogranite porphyroïde hydrothermalisé	h2yhyS	h2grhyS				
	Monzogranite porphyroïde riche en feldspath potassique	h2yrfkKS	h2grfkS				
	Monzogranite porphyroïde standard	h2ystdS	h2grstdS				
	Zone mylonitique	myS	myS				
Zone protomylonitique	pmyS	pmyS					
Zone microbréchique	ubrS	mbrS					
Granodiorite à biotite et hornblende de Windstein	h2-4W	h2grdW	Viséen inférieur	Viséen inférieur	342-339 Ma		
Lexique RGF pour la Suite granodioritique à monzogranitique de Windstein - Sultz-sous-Forêts suite calco-alcaline à tendance magnésio-potassique							

Tableau 1 : Membres distingués dans la formation « Monzogranite plus ou moins porphyroïde à biotite et fréquente hornblende, de Sultz-sous-Forêts ».

b) Lexique ULS « couverture sédimentaire »

Le lexique a été en majeure partie réalisé sur la base des informations fournies par les 30 notices accompagnant les trente cartes géologiques à 1/50 000 du secteur d'études, ainsi que de quelques documents bibliographiques, en particulier sur le Fossé tertiaire rhénan. La hiérarchisation et la mise en cohérence des différentes unités lithostratigraphiques recensées a permis d'établir un lexique de la Couverture sédimentaire se décomposant en (Tableau 2) près de **260 formations** au sein desquelles ont été individualisés un peu plus de **80 membres**.

En fonction des différentes phases de sédimentation, continentale à marine, des différentes périodes de transgression et de régression, de l'évolution tant sédimentaire que structurale des bassins sédimentaires, ces 260 formations et 80 membres associés ont permis de définir et de rattacher ces unités lithostratigraphiques à une **trentaine de groupes** caractérisant toute l'histoire géologique sédimentaire régionale présentée dans le paragraphe précédent (cf. § 3.2.2). L'association et le regroupement de ceux-ci a permis de définir quatre **super-groupes**, se rapportant essentiellement à de grandes périodes de sédimentation à caractère régional telles que le Fossé rhénan d'âge tertiaire ou la période sédimentaire jurassique présente en Alsace et dans le Jura alsacien.

Super-groupes définis	Groupes définis	Formations définies	Membres définis
Fossé rhénan	12	67	53
Jurassique d'Alsace et du Jura alsacien	5	115	6
Trias des Vosges et de l'Alsace	10	65	17
Permien des Vosges	4	12	6
TOTAL	33	261	82

Tableau 2 - Répartition des super-groupes, groupes, formations et membres du lexique « Couverture » du démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan ».

• *Notations et appellations*

Concernant les notations attribuées à ces différentes unités lithostratigraphiques, elles sont basées sur les normes fixées par le Comité de la carte géologique de la France (CCGF) (cf. § 3.1.3).

Pour ce qui concerne les appellations (cf. § 3.1.3) celles utilisées pour les formations dans le cadre de ce démonstrateur correspondent globalement à celles définies dans les notices de la carte géologique à 1/50 000, et utilisées de façon courante par les auteurs de celles-ci, dont un certain nombre font référence, et ceci même si à l'exemple du Bassin de Paris, elles ne sont pas véritablement enregistrées en tant que telle. Ces noms de formations font ici aussi bien référence à une localité où cette unité lithostratigraphique est particulièrement représentative (ex : formation de Griesbach, de Soufflenheim, de Gundershoffen, de Grassendorf), qu'à un nom de fossile, caractéristique de la formation et déjà utilisé depuis plusieurs dizaines d'années, et associé à une lithologie (formation du grès à Voltzia, des marnes et calcaires à gryphées), ou encore simplement à une lithologie de référence à valeur dépassant en général le cadre régional (formation de la Grande Oolithe, des Schistes « cartons »).

En revanche, contrairement à certaines régions où la terminologie de formation est clairement précisée et écrite, elle n'est ici sur cette zone « Vosges - Fossé rhénan » que très peu utilisée et fréquemment remplacée par le terme de « Couches ». Il conviendra par conséquent pour les chantiers à venir et, ainsi que cela a été réalisé ici pour ce projet, de

faire apparaître clairement dans la formulation le terme de « formation ». Concernant les membres ils sont, de par leur position hiérarchisée au sein de la formation, simplement définis par la lithologie qui les caractérise voire par un contenu faunistique remarquable.

Au niveau des groupes, la dénomination de ceux-ci a été choisie arbitrairement, en l'absence sur cette région de toute classification préalablement définie par les auteurs précédents. Les appellations introduites ici ont été essentiellement axées sur des grandes entités sédimentaires et géographiques telles que le Groupe du Bassin de Pechelbronn, ou le Groupe du bassin de Ronchamp-Giromagny. Si l'on peut néanmoins se poser la question de la validité de ces dénominations, et dans certains cas d'une éventuelle introduction d'une hiérarchisation intermédiaire (sous-groupe), il faut signaler que dans un tel contexte que celui de « Vosges - Fossé rhéna » où rien n'était encore défini il fallait au moins pour faire avancer le projet faire des propositions.

Concernant les classifications en « super-groupes », des propositions ont été faites, basées essentiellement sur une terminologie géographique régionale et géologique. L'attribution d'un nom à ces « super-groupes » est autant sinon plus complexe que pour celle des groupes dans la mesure où elle est censée caractériser un ensemble qui dépasse dans la majorité des cas (à l'exception du « Graben tertiaire rhéna ») largement le cadre régional du démonstrateur « Vosges - Fossé rhéna », tels que par exemple ces grands ensembles sédimentaires du Jurassique ou du Trias qui s'étendent sur une bonne partie du territoire français mais également bien au-delà de nos frontières.

Cette notion de « groupe » et « super-groupe » nécessite certainement d'être revue et adaptée, non seulement dans le cadre du projet pilote « Vosges - Fossé rhéna » mais également pour les futurs chantiers RGF, pour lesquels une réflexion majeure devra être menée par le comité scientifique du RGF.

• **Résultats**

Le lexique « Couverture » réalisé dans le cadre du démonstrateur « Vosges - Fossé rhéna » constitue une synthèse des terrains recensés et hiérarchisés présents et mis en place sur cette zone depuis le Permien jusqu'au Pliocène.

Les quatre « super-groupes » évoqués précédemment se rapportent globalement aux grandes périodes géologiques à savoir, le Permien, le Trias, le Jurassique et le Paléogène-Néogène (Tertiaire rhéna).

Le premier « super-groupe » correspondant au « Graben tertiaire rhéna » a été décomposé en 12 groupes au sein desquels 67 formations et 53 membres ont été identifiés. Ces groupes correspondent globalement aux vastes dépôts sablo-graveleux du Pliocène et aux différentes formations à dominante marneuse qui se sont mises en place dans le fossé rhéna depuis l'Éocène jusqu'à l'Aquitainien :

- au nord dans le Bassin de Pechelbronn caractérisé par ses fins horizons sablo-gréseux à asphalte ;
- plus au sud dans le Bassin potassique avec d'importantes couches de sel gemme et de sylvinite ;
- enfin dans la région de Mulhouse au niveau du Horst de Mulhouse-Sundgau.

Ces différents niveaux se mettent en place dans des contextes de sédimentation très variés et surtout très évolutifs d'une marge à l'autre du bassin (continental, lagunaire, à marin). Si des groupes comme celui de la Série grise sont communs à l'ensemble du Fossé, aussi bien au niveau du Bassin de Pechelbronn que du Bassin potassique ou du Horst de Mulhouse-

Sundgau, les formations qui les composent comme les Marnes à mélettes, les Schistes à poissons, les Marnes à foraminifères ou les Marnes à Cyrènes ont été déclinées en y rajoutant la localisation géographique (Pechelbronn, bassin potassique, Horst de Mulhouse) afin d'avoir la terminologie la plus précise au niveau de la validation des logs de forage.

Le deuxième « super-groupe » comprend l'ensemble des terrains mis en place dans le Jura alsacien et les collines sous-vosgiennes au cours du Malm, du Dogger et du Lias (Jurassique). Cinq groupes y ont été distingués totalisant 115 formations et 6 membres. Les terrains s'étagent depuis l'Hettangien jusqu'au Bathonien pour l'ensemble de la région (Lias-Dogger), atteignant le Kimméridgien (Malm) dans la partie alsacienne du Jura. Cette série jurassique est représentée par une alternance plus ou moins régulière de marnes et de calcaires (bioclastiques, crayeux, oolithiques, lithographiques, récifaux, etc.), avec des périodes à dominante tantôt argilo-marneuse, tantôt carbonatée, auxquelles peuvent être associées des périodes d'apports détritiques. Ces alternances caractérisent des variations du niveau de la mer avec une succession de transgressions et de régressions, une augmentation ou une diminution de la bathymétrie et des dépôts proximaux ou distaux.

Le troisième « super-groupe » caractérise les dépôts triasiques visibles au niveau des collines sous-vosgiennes, depuis le Buntsandstein jusqu'au Rhétien. Il a été subdivisé en dix groupes totalisant 65 formations et 17 membres. Si la partie supérieure terminale est à dominante détritique (Rhétien), les termes sous-jacents du Mittelkeuper, de la Lettenkohle et du Muschelkalk apparaissent essentiellement constitués par une succession de marnes et de calcaire ou dolomie, avec prépondérance de l'un ou l'autre des faciès et renfermant quelques passées restreintes détritiques. Les faciès sous-jacents du Buntsandstein caractérisent en revanche un milieu de sédimentation en domaine continental avec des termes très caractéristiques tels que le Grès à Voltzia ou le Grès vosgien. D'importantes décharges conglomératiques y sont également associées telles que le Conglomérat principal ou « Poudingue de Sainte-Odile ».

Le quatrième « super-groupe » associe toutes les formations d'âge permien identifiées sur cette zone d'études dans les bassins de Saint-Dié, du Val d'Ajol, de Villé et de Ronchamp-Giromagny. Quatre groupes, correspondant à ces bassins, y ont été identifiés avec douze formations et six membres individualisés. Les caractéristiques de ces dépôts attestent majoritairement d'un milieu de sédimentation continental, avec de nombreux débris végétaux entraînant localement la formation de petites couches de charbon, et une forte alimentation en matériaux volcanogènes (cinérites, tufs). Ces dépôts sont à dominante de grauwackes, de silts argileux d'arkoses et de conglomérats à éléments du socle cristallin

Au final, le lexique qui a été réalisé dans le cadre de la couverture sédimentaire du secteur « Vosges - Fossé rhéna » est déjà relativement bien fourni et détaillé mais cependant loin d'être complet, ceci en raison du temps, très restreint, qui était imparti pour la réalisation de cette tâche. S'il a néanmoins permis de tester les différentes procédures à mettre en place pour les futurs chantiers RGF, notamment au niveau mise en cohérence et hiérarchisation de la donnée, il n'en demeure pas moins qu'il reste incomplet et qu'il mériterait d'être amélioré, complété et mené à terme. Il serait en effet regrettable d'attendre qu'il y ait dans 10, 15, 20, voire 25 ans un chantier RGF sur le domaine « Vosges - Fossé rhéna » pour repartir de ce qui aura été fait en 2012-2013, alors que la donnée est actuellement disponible et qu'il suffit de quelques mois pour la traiter et l'incorporer, aussi bien au niveau lexique, cartographie, base de données, dans ce qui a été réalisé avec le démonstrateur « Vosges - Fossé rhéna ».

c) **Lexique ULS « Régolithe »**

La grande complexité de certaines formations du Régolithe et notamment des conditions de leur évolution et la diversité des processus responsables de leur genèse ont souvent été source de confusion. La multiplicité des approches et des concepts développés : formations du Régolithe, formations superficielles, formations quaternaires, formations pédologiques... a encore compliqué les choses.

Compte tenu de l'extrême diversité des formations du Régolithe, tant dans leur lithologie que dans les conditions de leur formation, la classification de ces formations a varié au cours du temps en fonction des critères retenus. En effet, elles peuvent être abordées sous des angles divers. Les ouvrages classiques traitant de cartographie, de stratigraphie, de chronologie, de paléoécologie, de paléogéographie, de géologie appliquée se sont employés à les décrire, utilisant toutefois des critères différents : critères granulométriques, critères texturaux, critères génétiques, critères d'âge, critères climatiques. L'élaboration d'une classification unique et consensuelle des formations du Régolithe est de ce fait un but difficile à atteindre.

Pour le géologue, la classification génétique est la plus évidente, de loin la plus pratique et de ce fait la plus couramment utilisée. Elle peut être mise en œuvre à partir d'observations de terrain même sommaires. Deux clefs sont nécessaires pour appliquer une classification de type génétique : l'identification des conditions de genèse de la formation et aussi des conditions de leur évolution dans le temps. Ainsi, la classification génétique intègre les notions d'origine, d'espace et de temps. En premier lieu, cette approche permet d'établir une classification des formations du Régolithe selon qu'elles sont d'origine naturelle ou artificielle (liée à l'anthropisation). En second lieu, leur rapport au substrat est pris en compte, permettant de distinguer les formations autochtones, formées *in situ*, des formations allochtones, résultant d'un transport et alors sans rapport avec leur substrat. Cette méthode présente toutefois quelque difficulté tant il est difficile d'être absolument sûr du mode de genèse d'une formation.

Cette méthode génétique de classification des formations du Régolithe a maintenant été consacrée par l'usage (pour les références les plus récentes : Campy & Macaire, 1989 ; Taylor & Eggleton, 2001 ; Dewolf & Bourrié, 2009) permettant des rapprochements judicieux avec les formations anciennes.

Afin d'obtenir une classification représentative des formations du Régolithe, nous nous sommes notamment appuyés sur la classification établie par le British Geological Survey (BGS Classification Scheme, Volume 4, Classification of artificial (man-made) ground and natural superficial deposits ; McMillan and Powell, 1999).

Le tableau 3 présente la subdivision génétique des formations du Régolithe et le regroupement en super-groupe et groupe. Les formations du Régolithe naturelles sont ainsi distinguées suivant la dynamique de leur mise en place : formations non transportées ou autochtones et formations transportées ou allochtones. Ce niveau d'information correspond au **super-groupe**. Le niveau de subdivision suivant fait appel au mode de genèse des formations et constitue les **groupes**. Les formations autochtones sont ainsi subdivisées en 3 catégories principales : les formations d'origine chimique, les formations organiques et biologiques, les formations résiduelles. Les formations allochtones sont, quant à elles, subdivisées en plusieurs catégories selon leur genèse, leur lithologie ou leur environnement de mise en place... : les formations gravitaires, les formations hydrodynamiques, éoliennes, glaciaires et périglaciaires (Tableau 4).

Dans le cadre du démonstrateur, les **formations** ont été différenciées selon plusieurs concepts :

- pour les dépôts allochtones et les dépôts autochtones organiques :
 - le premier niveau d'identification concerne le détail génétique. C'est le cas des dépôts alluviaux séparés en dépôts alluviaux s.s. et dépôts alluviaux torrentiels,
 - le second niveau d'identification concerne l'origine du dépôt. Citons par exemples les dépôts alluviaux d'origine rhénans ou d'origine vosgiens,
 - le troisième niveau d'identification concerne l'âge du dépôt. Citons les dépôts alluviaux rhénans holocènes et les dépôts alluviaux rhénans weichséliens ;
- pour les dépôts autochtones résiduels, les formations sont identifiées selon leur protolite lorsque celui-ci est connu : altérites de loess, altérites de calcaires ..., puis identifiées selon leur âge si celui-ci est connu.

Lorsque cela était possible des **membres** ont été identifiés au sein d'une même formation. Nous avons choisi d'introduire les notions de lithologie. Citons par exemple la formation des dépôts alluviaux rhénans holocènes, huit membres ont été définies en fonction de leur lithologie : sableux, argileux, sablo-argileux, graveleux (Figure 47).



Figure 47 : Galets de nature géologique variée dans la vallée du Rhin (Plaine d'Alsace, Haut-Rhin).

SUPERGROUPE	GROUPE
	Formations résiduelles
	Formations d'origine chimique
	Formations d'origine organique
	Formations gravitaires
	Formations hydrodynamiques
	Formations éoliennes
	Formations glaciaires
	Formations périglaciaires
Formations autochtones	
Formations allochtones	
Formations du Régolithe	

Tableau 3 : Classification des formations du Régolithe.

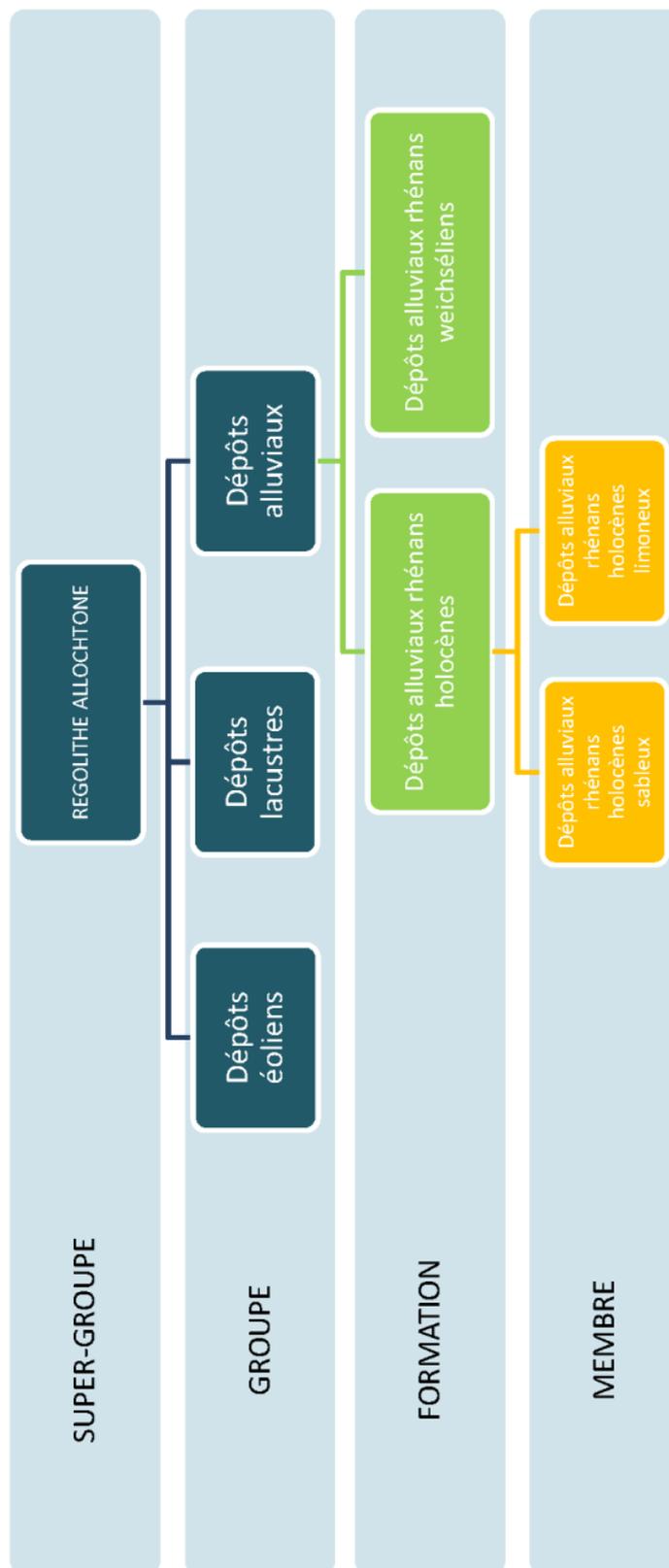


Tableau 4 : Classification des formations du Régolithe : détail pour le régolithe allochtone.

d) Lexique évènementiel « Vosges - Fossé rhénan »

La première étape de ce travail est de réaliser un lexique hiérarchisé concernant les principaux types d'événements géologiques que l'on pouvait rencontrer : dépôt, diagenèse, déformation, métamorphisme, magmatisme, Altération.

Dans le cadre du démonstrateur ce lexique a été complètement adapté à la terminologie utilisée dans le cadre des deux thèses à l'origine des données (thèses d'Étienne Skrzypek, 2011 et d'Anne-Sophie Tabaud, 2012), ce qui signifie qu'il n'existe pas vraiment de lexique utilisable pour d'autre projet.

Dans l'avenir un lexique hiérarchisé, détaillé devra être réalisé. Les événements de type déformation, métamorphisme, etc., seront inclus dans des événements d'ordre supérieur propres à la zone d'étude.

Exemple : l'événement « métamorphisme » nommé EV1 sera inclus dans l'événement ÉO-VARISQUE qui lui-même est inclus dans l'événement VARISQUE (Figure 48).

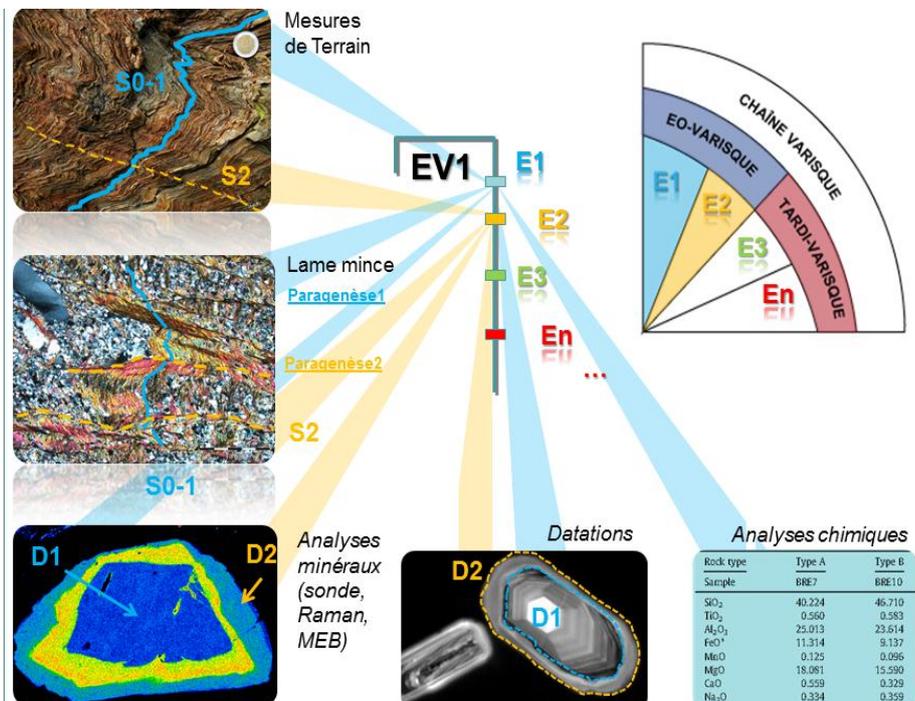


Figure 48 : Organisation des événements de différents ordres.

La deuxième étape consistait à affecter une chronologie d'événements à chacun des groupes du lexique ULS, représenté sur la carte géologique pour le socle paléozoïque.

Dans le cadre du démonstrateur, ce travail a été réalisé par Étienne Skrzypek et Anne-Sophie Tabaud, qui ont réalisé un tableau xls dont un extrait est présenté ci-dessous (Figure 49).

Chaque ligne comporte le nom et le code du groupe, le type d'événement associé, l'âge du début et de fin de l'événement et quelques détails sur l'événement, exemple : Le Groupe des Schistes de Steige a subi un métamorphisme régional du Carbonifère inférieur au Viséen inférieur, ce métamorphisme étant de basse pression et de basse température (BP/BT).

	CODE_EVT	GROUP	CODE_GROUPE	EVT_TYPE	CODE_EVT_TYPE	STRATI_DEBUT	STRATI_END	E_DETAIL1	E_DETAIL2	E_DETAIL3	E_DETAIL4
38	E0_SST	Schistes de Steige	1061	Dépôt		2 Ordovicien	Silurien	Sédimentati	Climat chaud		
39	E1_SST	Schistes de Steige	1061	Diagenèse		8 Ordovicien	Silurien				
40	E2_SST	Schistes de Steige	1061	Métamorphisme		6 Carbonifère inférieur	Viséen inférieur	BP/BT	Anchimetamorphisme		
41	E3_SST	Schistes de Steige	1061	Déformation		4 Viséen inférieur	Viséen moyen	Compression	Plissement de S0		
42	E4_SST	Schistes de Steige	1061	Déformation		4 Viséen moyen	Viséen moyen	Compression	Schistosité S1	Syn-métamorphisme	Contact
43	E5_SST	Schistes de Steige	1061	Métamorphisme		6 Viséen moyen	Viséen moyen	Contact			

Figure 49 : Extrait du tableau événementiel.

Avertissement : pour cette tâche, le principe de lexique événementiel n'a pu être que brièvement testé sur les unités de socle paléozoïque, sans traiter l'évènement ultime d'altération. Pour la même raison, les événements de mise en place du fossé rhéna et son étude spécifique dans le cadre de ce projet n'ont pas pu être intégrés dans ce lexique. Cela pourra être traité plus longuement dans les travaux futurs du RGF.

4.2.4. Préparation à la réalisation de la carte de démonstration du RGF

Dans le cadre du démonstrateur, des réflexions pour la réalisation de la carte RGF ont été menées mais fortement contraintes par l'obligation de délivrer dans le premier semestre du projet une première version de carte géométriquement continue, avec une codification homogène sur la totalité de l'emprise. Cette expérience a néanmoins permis d'identifier certains problèmes qui peuvent être rencontrés et de proposer une méthodologie réalisable dans le contexte d'un véritable chantier. L'expérience acquise a montré que la cartographie « RGF » devra se décomposer en plusieurs phases préparatoires successives énoncées ci-dessous.

a) Première phase : contrôle de la donnée cartographique

Avant toute chose il sera primordial de vérifier la qualité des documents cartographiques disponibles aussi bien au niveau du format papier que du format numérique.

b) Deuxième phase : assemblage des cartes existantes

Une fois les versions numériques des cartes à 1/50 000 vérifiées et corrigées, la deuxième phase consiste à assembler l'ensemble des coupures à 1/50 000, afin d'avoir une vue d'ensemble et une couverture géologique complète de la zone d'études. Pour ceci, toutes les données de chaque carte sont récupérées, actuellement au BRGM sous ARCGIS ou MICROSTATION, et exportées sous forme de tableaux Excel récapitulant la liste des formations y figurant.

À ce stade précédant la mise en cohérence, toutes les cartes à 1/50 000 sont assemblées côte à côte sous la forme d'un fichier unique. Le prérequis cartographique disponible ne constitue encore qu'une ébauche de la future carte RGF, mais permet déjà d'avoir une idée précise sur la répartition :

- des grands ensembles sédimentaires qu'ils soient de couverture ou régolithiques ;
- des massifs plutoniques et des terrains volcaniques ;
- des zones de métamorphisme ;
- de la structuration globale et des accidents majeurs.

N° Carte	Code légende	Notation	Description	N° Couleur
271	131	brÅ3	Dévonien : Volcanisme givétien du massif de Schirmeck : Brèches spillitiques et « schalsteins »	Brush (51,0,4161535)
271	132	tfd	Dévonien : Dévonien inférieur à moyen : Roches pyroclastiques et dépôts volcaniques	Brush (8,8355711,1,2533504)
271	133	cid	Dévonien : Dévonien inférieur à moyen : Cinérites fines	Brush (2,12533504)
271	134	o-sC(1)	Dévonien : Silurien : Schistes de Steige métamorphiques : Coméennes grenues litées grésopélitiques	Brush (70,16711680,11691596)
271	135	o-sC(2)	Dévonien : Silurien : Schistes de Steige métamorphiques : Coméennes hyperalumineuses	Brush (2,11691596)
271	136	o-sCC	Dévonien : Silurien : Schistes de Steige métamorphiques : Faciès polymétamorphique à andalousite rétomorphosée	Brush (3,16711680,11691596)
271	137	ã4	Terrains cristallins : Domaine du Champ-du-Feu : Granodiorite du Champ-du-Feu sud et du Hohwald sud	Brush (2,16760767)
271	138	pã3-4L	Terrains cristallins : Domaine du Champ-du-Feu : Granodiorite du Hohwald nord, faciès Louisenthal ; faciès grossier à tendance porphyroïde	Brush (3,16711680,16760767)
271	139	ã3	Terrains cristallins : Domaine du Champ-du-Feu : Granite à biotite, parfois à amphibole : Granite de Fouday-Grendelbruch	Brush (2,16744319)
271	140	aã3	Terrains cristallins : Domaine du Champ-du-Feu : Granite saccharoïde acide à deux micas de Grendelbruch	Brush (18,16711680,16744319)
271	141	ã3A	Terrains cristallins : Domaine du Champ-du-Feu : Granite à biotite du Champ-du-Feu nord	Brush (2,15040383)
271	142	Eã3-4	Terrains cristallins : Domaine du Champ-du-Feu : Granite à enclaves de Waldersbach	Brush (70,65280,15040383)
271	143	iã2	Terrains cristallins : Domaine du Champ-du-Feu : Bande à faciès microdioritique	Brush (70,16777215,15040511)
271	144	pã3-4	Terrains cristallins : Domaine du Champ-du-Feu : Granites porphyroïdes à biotite de Natzwiler et d'Andlau	Brush (8,16711680,16727935)
271	145	ã1	Terrains cristallins : Domaine du Champ-du-Feu : Granite acide hyperalcalin du Kagenfels	Brush (2,16711807)
271	146	ã1(1)	Terrains cristallins : Domaine du Champ-du-Feu : Granite acide hyperalcalin du Kagenfels, faciès granophyrique de bordure	Brush (18,0,16711807)
271	147	pë3	Terrains cristallins : Domaine du Champ-du-Feu : Diorites porphyriques à hornblende de type Muckenbach	Brush(2,6723916)
271	148	ë	Terrains cristallins : Domaine du Champ-du-Feu : Diorite et diorite quartzifère de la bande du Neuntelestein : types grenus ou hétérogènes	Brush(2,11711052)
271	149	piã3-4	Terrains cristallins : Roches filoniennes : Microgranites porphyroïdes	Brush (2,15023999)
271	150	oiã1	Terrains cristallins : Roches filoniennes : Microgranites fins, granophyres, rhyolites	Brush (2,16711680)
271	151	iã	Terrains cristallins : Roches filoniennes : Microgranites divers sans apparemment et "Granit-porphyre" à tendance granodioritique	Brush (2,15007871)
271	152	ië	Terrains cristallins : Roches filoniennes : Microdiorite	Brush (2,6730316)
271	153	i	Terrains cristallins : Roches filoniennes : Lamprophyres et semi-lamprophyres	Brush (2,32767)
271	154	Q	Terrains cristallins : Roches filoniennes : Quartz	Brush (2,16776960)

Tableau 5 : Extrait du tableau Excel « liste des formations pour la carte 271 « Molsheim ».

Au niveau du système géographique de référence, on vérifiera que toutes les coordonnées concourant à la description géométrique des données répondent aux caractéristiques suivantes :

- système géodésique : RGF ;
- ellipsoïde : IAG GRS80 ;
- méridien origine : Greenwich ;
- projection : Lambert 93 ;
- unité : mètre.

Au stade de préparation de réalisation de la carte de démonstration nous disposons d'une mosaïque des cartes à 1/50 000 couvrant la zone d'étude. La zone d'emprise régionale du démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan » est couverte par trente coupures à 1/50 000 (Figure 50) de 1^{ère} édition réalisées entre 1967 et 2008 (dont pour la feuille Haguenau (198) à 1/50 000, la maquette de la 2^e édition, réalisée par F. Ménillet).

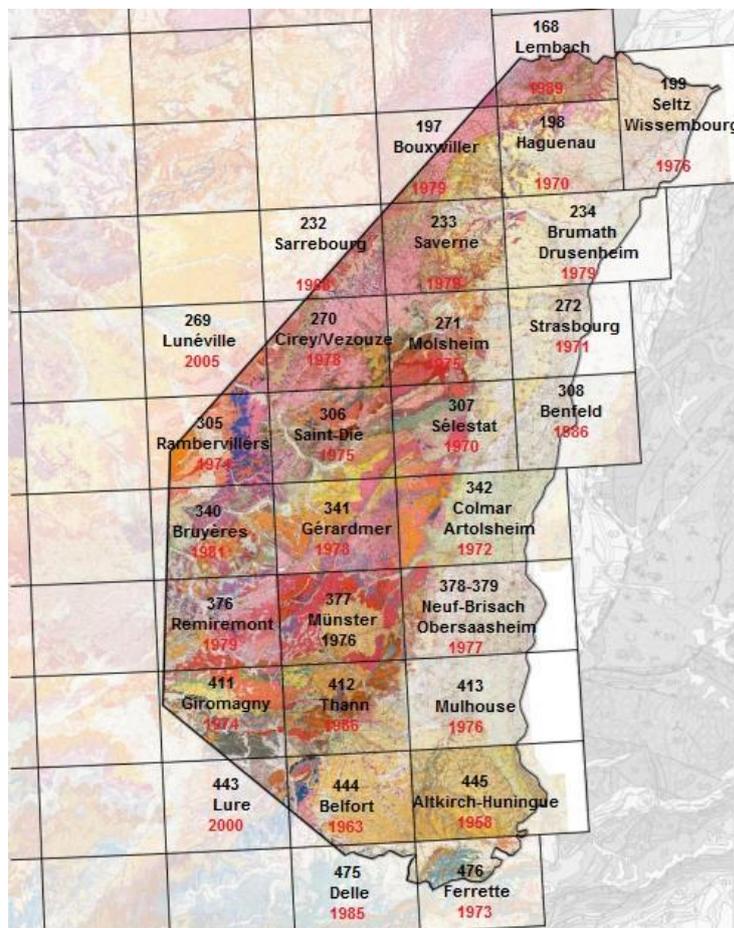


Figure 50 : Localisation des trente coupures géologiques à 1/50 000 disponibles dans le cadre du démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan ».

Le point de départ de ce travail pour un chantier RGF classique doit être la cartographie de référence à 1/50 000.

Néanmoins, dans le contexte du projet de démonstration (temps restreint) il a été choisi de se baser sur les coupures à 1/50 000 des cartes géologiques harmonisées pour les sept départements concernés par l'emprise régionale (Figure 51). Ces cartes résultent chacune de « l'harmonisation » réalisée dans le cadre du projet « CHARM » en grande partie par des intervenants du projet démonstrateur. Elles sont tout comme la carte à 1/50 000 accompagnées d'un fichier récapitulatif la liste des formations inventoriées et constituant la « couche géologique ».

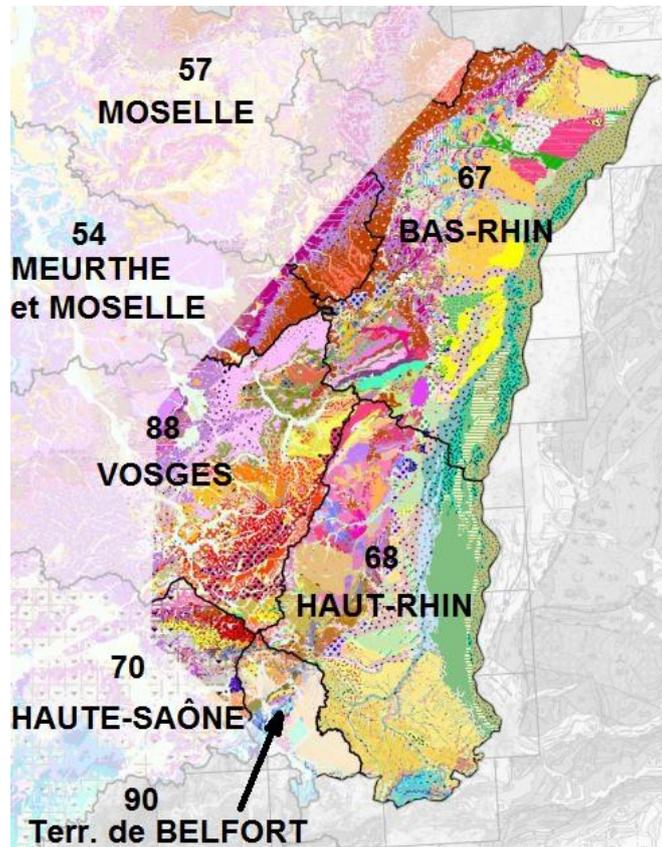


Figure 51 : Localisation des sept cartes départementales harmonisées (projet CHARM-BRGM) utilisées dans le cadre de l'emprise régionale du démonstrateur « Vosges - Fossé rhénan ».

En prenant comme point de départ les cartes géologiques à 1/50 000 ou les cartes départementales, le concept reste globalement le même. La mise en cohérence et la hiérarchisation des données cartographiques sont directement liées au lexique des unités lithostratigraphiques (ULS) de référence réalisé au préalable pour ce chantier (cf. § 4.2.3). La méthode consiste à mettre côte à côte et à fusionner les fichiers rattachés à chaque carte géologique. On obtient ainsi un tableau d'assemblage de l'ensemble des coupures mettant en corrélation (de carte à carte) les différentes formations identifiées par les différents auteurs (cf. Tableau 6).

À chacune de ces formations corrélées leur sont attribués :

- une appellation unique ;
- une notation unique ;
- un codage numérique unique ;

et cela conformément au lexique RGF « Vosges - Fossé rhénan » défini au préalable.

CODE NUM.	NOTATION	DESCR	SYMB_MI	COD_LEG	306	307	341	342	377	378	412	413	444	445	475	476
124	t3C-D	Muschelkalk inférieur Indifférencié	Brush(52,1 6777215,15 007973)	130	ST-DIE	SÉLE STAT	GERARD MER	COLMAR	MUNSTER	NEUFBRISACH	THANN	MULHOUSE	BELFORT	ALTKIRCH	DELLE	FERRETTE
126	t3C	Grès coquillier (Muschelkalk inférieur)	Brush(5,16 777215,125 17503)	132				t3a		t3a						
127	t2-3	Grès à Voltzia + Couches intermédiaires (Buntsandstein supérieur)	Brush(2,12 550117)	133				t2		t2	t2					
128	t2-3V	Grès à Voltzia (Buntsandstein supérieur)	Brush(18,1 6777215,12 550117)	134					t2b	t2b	t2b	t2b				

Tableau 6 : Extrait d' un fichier de mise en correspondance des formations observées sur les cartes géologiques.

4.3. RECOMMANDATIONS ET BESOINS POUR LES FUTURS CHANTIERS

4.3.1. La constitution des lexiques

Cette phase de réalisation des lexiques constitue une étape majeure et incontournable dans la mesure où elle va conditionner toutes les opérations qui suivent. Cela implique :

- **du temps** pour étudier les données collectées au préalable et « **s'imprégner** » de la **géologie du secteur** ;
- **des référents thématiques** spécialisés pour chaque domaine géologique traité ;
- **un esprit de synthèse** indispensable pour comprendre et interpréter ce que, dans certains cas, les auteurs ont voulu dire ou décrire. Il faut en effet parfois savoir « lire entre les lignes » pour déterminer la formation à laquelle l'auteur fait référence ;
- **une coordination et discussion entre les intervenants** est primordiale non seulement en interne mais surtout avec les collaborateurs extérieurs. C'est **un travail d'équipe** dont la cohésion est indispensable. Le lexique « Vosges - Fossé rhéna » n'aurait pas pu voir le jour dans des délais aussi courts sans les nombreuses discussions et les échanges entre les référents thématiques.
- **une disponibilité importante des intervenants** sur de longues périodes. Cela implique **des moyens humains**. Il aurait été très difficile de réaliser ce travail sans une disponibilité presque totale et simultanée des référents géologiques et techniques impliqués pour cette tâche ;

a) *Sur le plan méthodologique*

- **les lexiques n'ont pas seulement un intérêt cartographique** mais également une utilité pour la validation des logs de forages.
- **toutes les informations sont à considérer**, les critères de granulométrie, le contenu faunistique, la composition chimico-minéralogique, qui doivent être intégrées dans la base de données et pourront servir ultérieurement à distinguer un faciès.
- **il est important de bien identifier et détailler les différentes unités lithostratigraphiques**, la référence étant la formation et ses éventuelles subdivisions en membres, en enregistrant pour chacune d'elles le maximum d'informations.

Si de façon globale la procédure a relativement bien fonctionné, quelques problèmes scientifiques ou techniques sont à souligner et à résoudre pour les prochains chantiers :

- **au niveau de la classification** (formation, membre, groupe, super-groupe), la terminologie employée ici semble être cohérente, bien qu'elle ne soit pas précisément définie dans la bibliographie. En l'absence de référence préexistante, la hiérarchisation en terme de « groupe » et « super-groupe » a posé de nombreuses questions pour attribuer une formation (ou un membre) à un groupe plutôt qu'un autre. Ce problème n'est pas spécifique à la région Vosges - Fossé rhéna mais se posera à l'ensemble du territoire. Il sera donc utile que des discussions soient menées au sein du comité scientifique du RGF, pour que les futurs chantiers puissent bénéficier d'orientation d'attribution de la part de la communauté scientifique;
- **les appellations attribuées aux formations ou membres** sont celles les plus couramment utilisées dans la bibliographie. Il sera important de garder une trace des autres dénominations et de répertorier les équivalents latéraux ;

- **au niveau des descriptions préexistantes**, des problèmes de terminologie persistent encore depuis quelques années pour le Jurassique avec l'utilisation de termes « désuets » (tels que « Rauracien », « Séquanien » ou « Argovien »). Elles rendent parfois plus difficile l'identification de la tranche d'âge considérée. La création de ce lexique lithostratigraphique est donc l'occasion de replacer et renommer les unités selon les normes actuelles.
- **des incohérences d'attribution lithostratigraphique** peuvent préexister sur des documents de référence. Pour exemple, certains forages se voient attribuer l'Aalénien au toit du Lias alors qu'il se situe, dans la classification actuelle, à la base du Dogger (j1). De nouveau, la relecture de ces attributions dans le cadre du RGF est l'opportunité de corriger des erreurs préexistantes.

b) Sur le plan « informatique »

Les outils RGF n'étant pas encore opérationnels, nous avons utilisé des applications temporaires, développées en fonction de besoins immédiats. Des besoins pour le développement des futurs d'outils sont précisés ci-dessous :

- la procédure de constitution de lexique via des tables « Excel » a bien fonctionné, grâce à l'expérience acquise sur le projet « CHARM ». Néanmoins, la ressaisie manuelle des formations, membres, pour la constitution du lexique lithostratigraphique final a été une étape particulièrement chronophage. Il sera important de mettre disposition un outil limitant la saisie manuelle d'information (nom, appellation, notation) ce qui est, souvent, source d'erreurs ou de répétitions involontaires.
- une fois retranscrit dans ce fichier, le lexique était figé pour les intervenants, ces derniers ne pouvant plus modifier ou rajouter une formation sans passer par le référent B2D - RGF. À l'avenir, il serait utile qu'un système convivial soit développé pour permettre aux référents thématiques, eux-mêmes, d'éditer/ modifier le lexique dont ils sont responsables.

4.3.2. Retour d'expérience sur la préparation de la cartographie

Pour cette phase préparatoire, il sera primordial de vérifier la qualité des documents cartographiques disponibles aussi bien au niveau du format « papier » que du format numérique.

a) *Contrôles et corrections des cartes existantes*

- **Calage Géologie - IGN**

Il est important de vérifier que le chantier bénéficie d'une couverture géologique complète à 1/50 000, en principe géo-référencée et parfaitement calée sur le fond IGN.

- **La carte « papier »**

Bien que la carte géologique ait été validée et contrôlée par le CCGF (Comité de la carte géologique de la France) quelques erreurs ont subsisté au niveau du codage de certains polygones. Il est donc nécessaire de contrôler la concordance entre la légende figurant sur la carte et le document cartographique pour s'assurer qu'il n'y a pas de discordance majeure. Dans quelques cas nous avons remarqué, sur les cartes imprimées, des inversions d'intitulés entre deux caissons. L'idéal dans ce type de cas, serait de pouvoir se référer **au « document de l'auteur »** pour assurer ce contrôle.

- **La carte « numérique »**

La vérification de la conformité des cartes numériques vis-à-vis des cartes « papier » est fondamentale. En effet, d'après l'expérience vécue sur le chantier Vosges - Fossé rhénan, si la version numérique est (la plupart du temps) conforme, il semblerait que l'étape « numérisation-vectorisation » ait fait l'objet d'erreurs portant aussi bien sur :

- les contours qui peuvent être assimilés à des failles (ou vice versa) ;
- des éléments topographiques (courbes de niveau, chemins, etc) qui peuvent être localement assimilés et numérisés en tant que contours géologiques ;
- des notations non respectées et entraînant des discontinuités cartographiques majeures au passage d'une carte à l'autre ;
- des problèmes de géo-référencement entre la carte vecteur et la carte raster ;
- l'absence de certains contours et/ou d'éléments ponctuels, des erreurs orientation de pendages;
- l'absence de polygones et caissons numériques correspondant à des caissons de la légende de la carte papier ;
- la description des caissons (légende) et le non-respect de l'ordre stratigraphique (chronologie des caissons de la légende) ;
- le codage de certains polygones au cours de la numérisation, par exemple pour la carte Thann (n° 412) à 1/50 000, des filons minéralisés ont été codés par erreur avec le même code que les filons de microgranite (tous les deux ayant sur la carte une teinte rouge très similaires, cf (Figure 16)). Cette erreur a été corrigée dans la carte du démonstrateur.

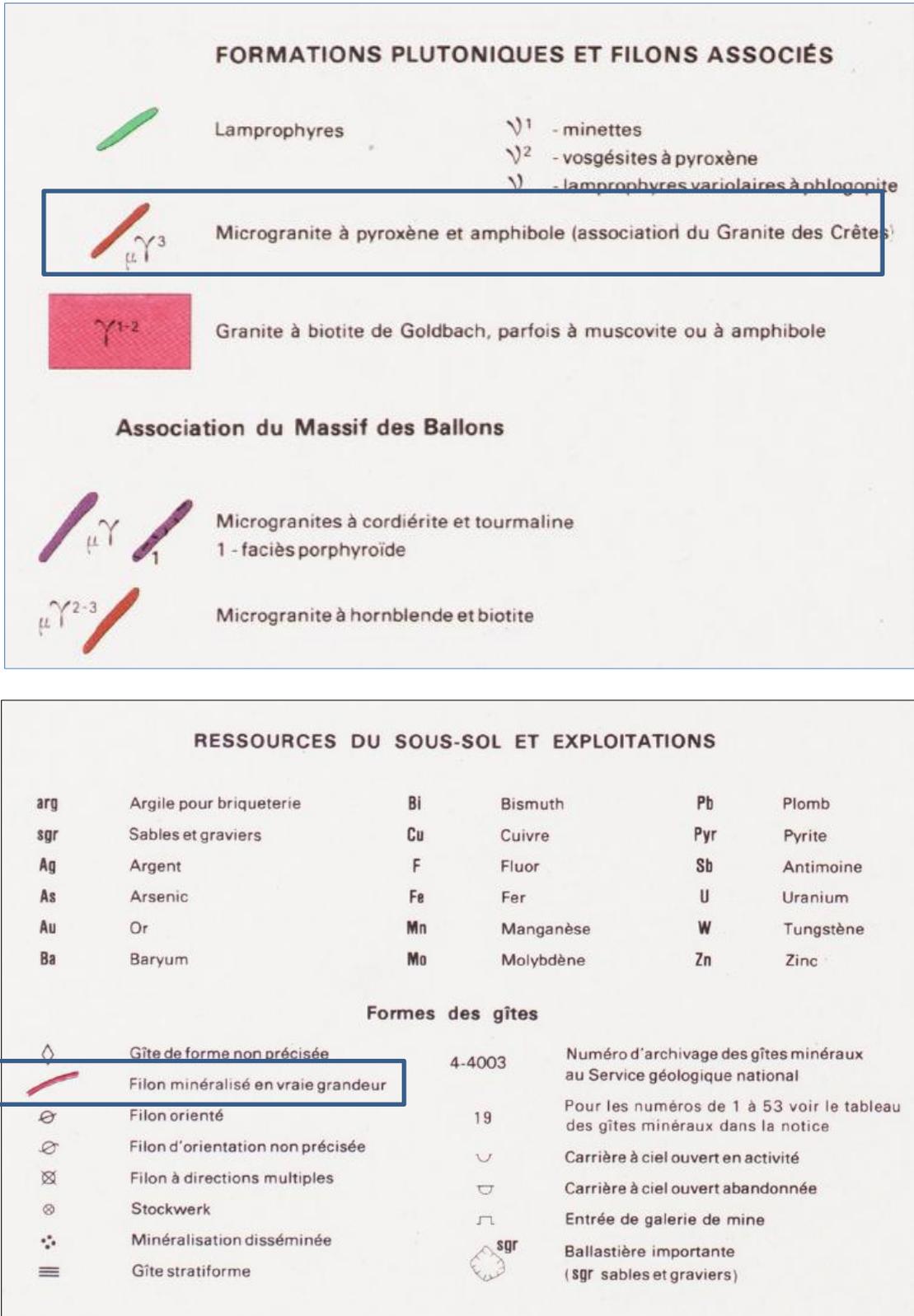


Figure 16 : Exemple d'erreur de codage, concernant la version vectorisée de la carte Thann (512) à 1/50 000.

- ***Fusion de documents d'échelles différentes***

C'est une difficulté majeure. Cela a notamment été le cas pour le démonstrateur avec la cartographie à 1/25 000 des formations superficielles rhénanes du projet BRAR. Il conviendra donc à ce niveau d'être particulièrement vigilant, d'avoir des calages et des points géoréférencés précis et certifiés afin d'éviter tout décalage et de retrouver, par exemple, des zones alluviales en dehors du réseau hydrographique ou des alluvions perchées au sommet des collines.

- ***Répertorier les zones posant cartographiquement un problème***

Des campagnes de terrain devront être programmées dans le cadre d'un chantier, pour les zones où, des formations ont été regroupées, les formations superficielles n'ont pas été levées et où, des incohérences géométriques peuvent subsister (notamment à l'intersection de plusieurs cartes). Ceci n'a pu être réalisé dans le cadre du projet pilote en raison des délais impartis mais constitue l'un des objectifs majeurs du RGF dans le cadre de l'amélioration de la connaissance du sous-sol national et des enjeux sociétaux pouvant y être liés.

5. Mise en cohérence

5.1. OBJECTIFS

Après les étapes successives de collecte de la donnée, définition des différents lexiques de référence et prérequis cartographiques, cette phase constitue le stade d'intervention portant sur :

- la mise en cohérence « de carte à carte » des différents contours géologiques délimitant cartographiquement chaque unité lithostratigraphique, ainsi que des structures linéaires associées à des failles ou des accidents majeurs (chevauchement, etc.) ;
- la mise en cohérence « lexicale » des données de sub-surface sélectionnées avec la carte assurant un langage commun et unique ;
- la validation tridimensionnelle de cette mise en cohérence à l'aide des moyens connus en interpolation géométrique 3D.

5.2. CARTOGRAPHIE

À ce stade du projet, l'assemblage de l'ensemble des documents cartographiques disponibles a été réalisé sous la forme d'un document unique, numérique et géo-référencé. Toutes les unités lithostratigraphiques figurant sur cette carte numérique sont répertoriées, mises en cohérence et hiérarchisées en conformité avec le lexique RGF « Vosges - Fossé rhéna ». Elles constituent la légende de la carte géologique RGF « Vosges - Fossé rhéna » et sont répertoriées dans un fichier d'assemblage sous Excel (cf. § 4.2.4).

Chacune de ces formations (ou caissons) de la carte (et légende) est identifiée par des attributs qui lui sont uniques et spécifiques :

- une notation ;
- une appellation ;
- un code numérique (ou label).

5.2.1. Assemblage cartographique

L'opération « informatique » menée va s'effectuer sous Arcgis ou Microstation en utilisant le tableau d'assemblage « Excel » décrit précédemment. Un attribut spécifique est affecté à tous les polygones présents qui décrivent une même formation lithostratigraphique (généralement la notation, plus accessoirement le code numérique).

La notation est préférée dans la mesure où elle permet de visualiser plus facilement les éventuelles erreurs. Lorsque tous les polygones sont codés, le dernier stade consiste à raccorder géométriquement les contours et les éléments linéaires structuraux d'une carte à l'autre.

Plusieurs cas peuvent alors se présenter (Figure 52, Figure 53). Dans le cas le plus simple, le contour associé à la formation est cohérent et se prolonge d'une carte à l'autre sans aucun problème. Le processus est identique pour les failles et accidents majeurs. Dans les autres cas :

- la formation peut être continue d'une carte à l'autre mais avec un décalage des contours en limite de carte. La solution consiste alors à raccorder ces contours de la façon la plus logique possible, en se basant sur les courbes topographiques. Cela peut nécessiter dans certains

cas de modifier quelque peu la surface d’affleurement de la formation pour garder une certaine cohérence dans le tracé ;

- pour le cas de deux formations différentes accolées (face à face) en limite de deux cartes, la mise en cohérence consistera à garder l’information présente sur les deux cartes à 1/50 000 en évitant autant que possible toute simplification par regroupement de formations. Par exemple :
 - si une formation appartenant au substratum est face à une formation de type superficiel, les contours de la formation superficielle seront fermés sur l’une ou l’autre carte en prenant en compte la topographie, la géométrie des polygones, et la répartition globale de cette formation. L’objectif étant de rester cohérent et d’éviter de trop grande erreur d’extension des formations en l’absence de données de terrain ;
 - pour deux formations différentes F_A (sur une carte « A ») et F_B (sur une autre carte « B ») appartenant au substratum, c’est le contexte géologique qui permet, en général, de relier telle ou telle formation d’une carte à l’autre. Les contours sont alors redessinés de la façon la plus logique possible, en se basant sur la topographie, mais également sur le niveau de détails des deux cartes en présence et leur ancienneté. En général, la carte la plus récente est considérée comme étant la plus fiable, ce qui n’est pas toujours le cas ;
 - pour deux formations de type substratum, F_{1A} et F_{2A} (avec F_{2A} reposant sur F_{1A}) individualisées sur une carte « A » et juxtaposées latéralement à une formation F_B sur une autre carte « B ». Si F_B correspondant au regroupement de F_{1A} et F_{2A} , le contour supérieur de F_B sera relié au contour supérieur de la formation F_{2A} , tant dis que le contour inférieur de F_B sera corrélé avec le contour inférieur de F_{1A} . Le passage entre F_B et $F_{1A}+F_{2A}$ n’étant pas un contact structural, il sera marqué par un contour en zigzag identique à celui utilisé pour marquer les changements latéraux de faciès.

Dans certains cas, la mise en cohérence peut s’avérer presque impossible, certains secteurs étant nettement plus ou nettement moins détaillés que d’autres. Ils nécessiteront un retour sur le terrain.

En l’absence de nouvelles données, on s’appuiera sur le contexte géologique local, en proposant des contours qui soient les plus réalistes possibles et en utilisant, si elles existent dans l’environnement immédiat, les discontinuités naturelles telles que les failles ou les rivières permettant de bloquer artificiellement les contours des polygones concernés.

Enfin un dernier cas, relativement fréquent, est l’arrêt brutal d’une faille au passage d’une carte à l’autre. En absence d’information, celle-ci sera prolongée simplement de quelques millimètres sur la carte voisine. Si une discontinuité, une forte variation de puissance ou un lien quelconque avec le réseau hydrographique peuvent être distingués et aider à la compréhension du terrain, cette faille pourra alors être prolongée de quelques centimètres, dans la limite du raisonnable et de la logique.

Dans tous les cas, toute modification de trait doit impérativement être représentée sur la carte par des contours **en tiretés**, différents de ceux utilisés généralement (carte à 1/50 000) pour les contours des formations superficielles, afin de signaler qu’ils sont **supposés** en l’absence de tout contrôle de terrain.



Figure 52 : Exemples de discontinuités des contours et des notations en limite de carte (extrait des cartes à 1/50 000 de Bouxwiller n° 197 et de Haguenau n° 198).



Figure 53 : Mise en cohérence cartographique aux normes RGF de la même zone avec intégration de la 2^{ème} édition de la carte Haguenau (extrait des cartes à 1/50 000 de Bouxwiller n° 197 et de Haguenau n° 198, 2^{ème} édition).

Avertissement : compte tenu des impératifs de démonstration, la cartographie « Vosges - Fossé rhénan » a été réalisée en partant de sept cartes géologiques « harmonisées » (CGH) départementales du projet CHARM. Pour les futurs chantiers, cette étape devra obligatoirement passer par la carte à 1/50 000 et par des vérifications et corrections des versions vectorisées

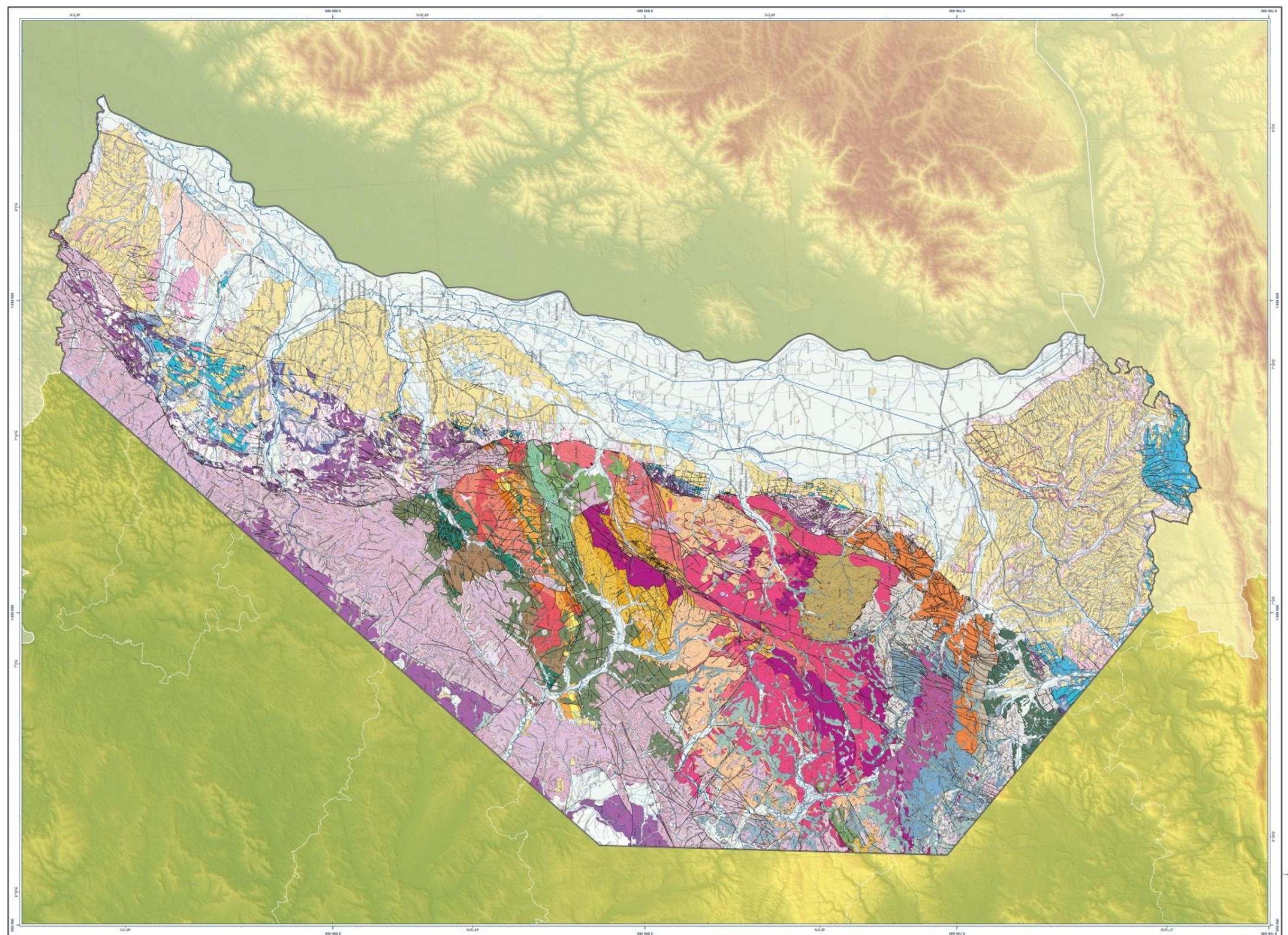


Figure 54 : Carte géologique numérique Vosges - Fossé rhénan : représenté ici à l'échelle du « Groupe » du lexique « ULS » RGF.

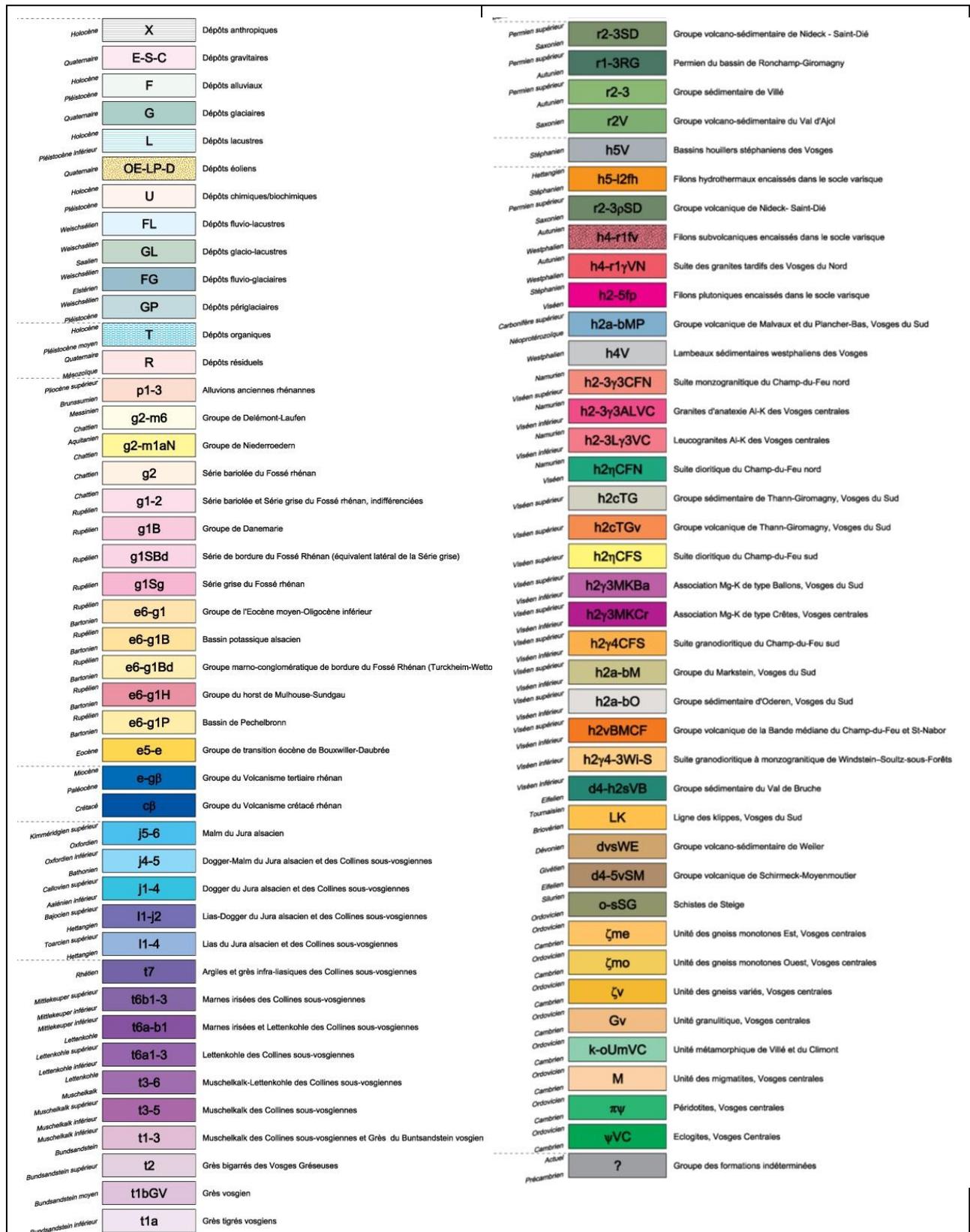


Figure 55 : Légende de la carte géologique numérique Vosges - Fossé rhénan : représenté ici à l'échelle du « Groupe » du lexique « ULS » RGF.

5.2.2. Problématique de fusion de cartes d'échelles différentes

L'intégration de la carte à 1/25 000 des formations superficielles du projet BRAR a nécessité une mise à l'échelle 1/50 000 de celle-ci pour laquelle il a fallu trouver des points de référence permettant de caler correctement la carte, les courbes topographiques figurées sur les cartes à 1/25 000 et à 1/50 000 n'étant pas identiques.

5.2.3. Résultat

La carte RGF du chantier (Figure 54 et Figure 55) est une version intermédiaire (dite « V0 ») car elle est construite, sur la base de la cartographie existante corrigée mais n'ayant pas encore été confronté aux données du sous-sol, ni aux vérifications sur le terrain pour la justification de contours incertains.

Elle représente une base de travail cartographique cohérente et continue à l'échelle régionale et destinée à évoluer au rythme du processus de mise en cohérence des données. Les contours cartographiques existants sont néanmoins mis en cohérence et à chaque polygone de la carte est attribuée une notation de référence conforme au lexique « ULS » RGF.

Le résultat est une carte dont l'échelle de référence est le 1/50 000, accompagnée d'une légende homogène dont les caissons sont en cohérence et hiérarchisés conformément au lexique « ULS » RGF. Cette carte peut ainsi être déclinée à différentes « échelles lexicales » (exemple une cartographie à l'échelle des groupes) tout en conservant l'échelle des contours géologiques à 1/50 000, (Figure 54 et Figure 55). Elle devra, à l'avenir, être confrontée à la validation du comité scientifique du RGF avant toute parution pour utilisation publique.

5.3. FORAGES

5.3.1. Méthode de validation RGF

La méthode de validation « RGF » est une méthode qui demande une saisie intégrale des données descriptives « foreur » permettant à tout moment de revenir à la donnée d'origine (notion de traçabilité de la donnée). Toutes les informations qu'elles soient d'ordre lithologique, paléontologique, minéralogique, liées à la couleur, la granulométrie, etc., sont saisies. Cela exclue toute simplification et tout regroupement de passe. Cette première phase de saisie constitue par conséquent une étape primordiale dans la validation aux normes RGF.

Dans un second temps, elle impose la hiérarchisation de chaque passe en termes de lithostratigraphie assurant un langage commun entre la cartographie, le forage et les interprétations des profils sismiques (Figure 56).

Cette mise en cohérence implique l'interprétation des passes conformément au lexique RGF tout en conservant intégralement les descriptions d'origine mais aussi la capacité de :

- enregistrer des observations faites sur carottes (lithologie, proportions relatives ; couleur, granulométrie, dureté, texture, composition minéralogique, indices paléontologiques, etc.) ;
- intégrer des données structurales et des structures (polarité, stratification, schistosité, linéation, faille avec indications de rejet et nom, si cela est précisé) ;
- intégrer des résultats d'analyses diverses (géochimies, porosité, perméabilité, température, salinité, etc.) ;
- intégrer les marqueurs indiquant la mise en correspondance « lexicale » avec les horizons interprétés en sismique (voir pour exemple le tableau de correspondance des niveaux repères dans le projet GeORG et dans le projet RGF démonstrateur en Figure 64) ;

- intégrer les interprétations en stratigraphie séquentielle, quand les données diagraphiques le permettent ;
- identifier les ensembles ayant subi des processus d'altération ou de métamorphisme (type de processus, âge, etc.).

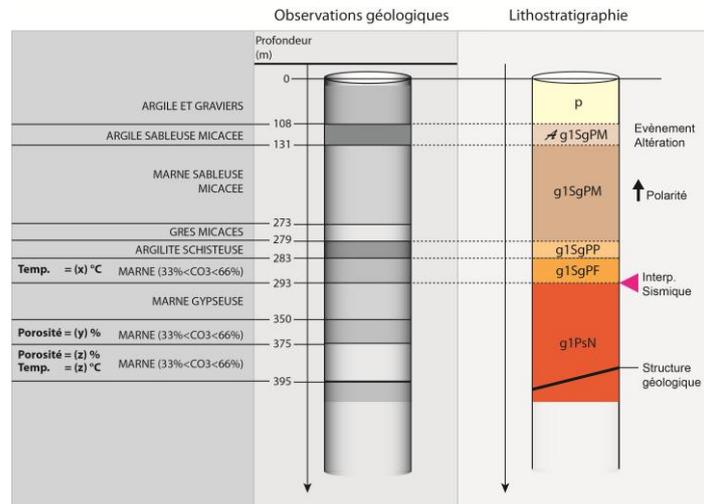


Figure 56 : Mise en cohérence sur un log de forage des observations géologiques sur la base du lexique de référence RGF.

5.3.2. Expérience de validation des logs de forages selon la méthodologie RGF

La zone du démonstrateur « Vosges - Fossé rhéan » a fait l'objet dans un premier temps d'une pré-sélection dans la BSS et le BEPH d'environ 1 500 forages prioritaires présentant un intérêt majeur sur cette zone pour les différentes thématiques, c'est-à-dire :

- le socle avec environ une vingtaine de forages, dont les cinq forages du site géothermique de Soultz-sous-Forêts ;
- la couverture, avec près d'un millier de forages, sélectionnés dans un cadre régional mais également dans un contexte plus spécifique en aide à la stratigraphie séquentielle.
- le régolithe avec près de 500 forages courts sélectionnés sur une zone choisie au préalable.

a) Forages sélectionnés

En dehors du régolithe, les critères de sélection de ces forages portaient sur la profondeur (>150 m) et l'accès aux versions de logs numérisés (Loglso) pour répondre aux délais impartis.

Le projet disposait également d'une réserve de 4 200 forages « non validés », soit au total près de 5 700 forages (Figure 57).

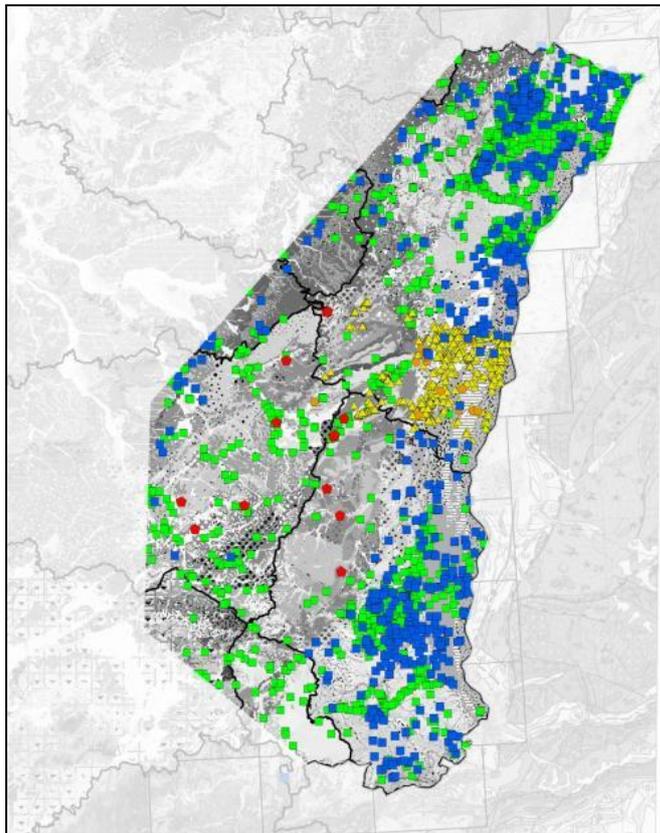


Figure 57 - Localisation des forages présents en BSS et disponibles dans le cadre du projet démonstrateur.

En dehors des forages destinés à l'étude du Régolithe, en général de l'ordre d'une dizaine de mètres au maximum, les autres ouvrages sont essentiellement issus des recherches effectuées au siècle dernier par plusieurs sociétés pour la prospection d'hydrocarbures (SAEM de Pechelbronn, PREPA de Strasbourg, SNEA(P), TOTAL, SHELL, GEOREX, etc.), de sel gemme et/ou de potasse (Mines de potasse d'Alsace). Il faut rajouter à cette liste les cinq forages réalisés dans le cadre du projet géothermique de Soultz-sous-Forêts, à une profondeur variant de 2 030 à 5 093 m (Figure 58).

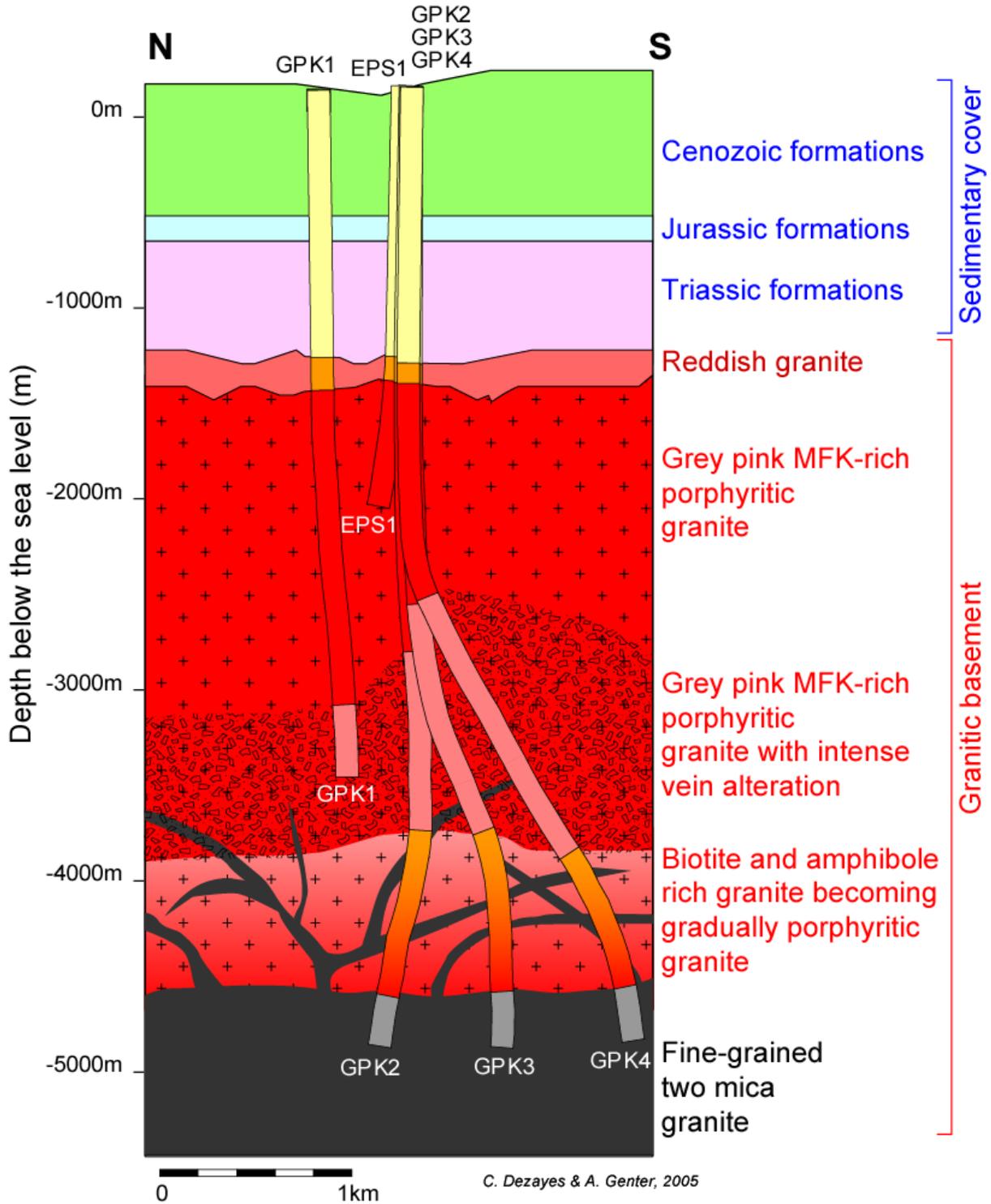


Figure 58 : Modèle conceptuel 2D pour la géologie du site de Soultz-sous-Forêts d'après les forages GPK1-4 et EPS1 (C. Dezayes et A. Genter, 2005).

Au total, sur la zone d'études du démonstrateur « Vosges - Fossé rhéna », **3557 forages** « numérisés Loglso » ou à l'état « papier ou de scan » ont été validés aux normes RGF entre juin 2012 et octobre 2013 (Tableau 7) dont :

- 494 pour le Régolithe ;
- 19 pour le socle, dont les cinq forages profonds du site géothermique de Soultz-sous-Forêts ;
- 3 044 autres pour l'intégralité des ensembles traités (couverture, socle, régolithe).

Nombre de forages validés RGF : 3 557		
Régolithe	Couverture	Socle
494	3 044	19

Tableau 7 - Tableau récapitulatif du nombre de forages validés aux normes RGF, par thématique, dans le cadre du démonstrateur « Vosges - Fossé rhéna » (juin 2012 à octobre 2013).

Au niveau de la saisie des logs, une grande partie des informations devant être transcrites (cf. méthodologie) a été enregistrée. Il reste néanmoins quelques rubriques à renseigner (couleur, minéralogie, paléontologie, etc.), travail qui ne pourra être fait que lorsque les lexiques adéquats auront été mis en place.

Outre la hiérarchisation de la donnée lithologique, on insistera également sur la mise en corrélation réalisée avec les données sismiques du projet GeORG (cf. § 5.2.2) et la caractérisation sur un certain nombre de logs de la couverture et du socle de l'événement « Altération » pour une zone cartographiquement déficiente au niveau de la représentation du Régolithe.

Suite aux travaux réalisés sur cette zone, l'ensemble des forages « numérisés » a été pour ce secteur mis aux normes RGF. Hormis les forages « courts » de moins de 100 m, il reste encore à mi-octobre 2013 près de **2400 forages profonds** (>100 m) à traiter sur la zone « **Vosges - Fossé rhéna** ».

b) Spécificité pour les domaines géologiques traités

- **Régolithe**

La validation par le référent régolithe a porté sur une sélection de 494 forages, de moins de 1 m à plus de 150 m de profondeur, sur la petite emprise (points jaunes, Figure 57). Il s'agit de forages qui n'étaient pas initialement numérisés dans le cadre de Loglso. Un exemple de est présenté ci-dessous (Figure 59 ; Tableau 8)

Profondeur	Lithologie	Stratigraphie	Attribution RGF
De 0 à 0.7 m	TERRE VEGETALE	QUATERNAIRE	T
De 0.7 à 2.35 m	LOESS	QUATERNAIRE	Oey
De 2.35 à 6.2 m	GRAVIER GRIS 30-50MM, AVEC 50% SABLE FIN	QUATERNAIRE	Fy
De 6.2 à 12.9 m	GRAVIER GRIS ET NOIR 35MM MAXI, AVEC 40% SABLE FIN	QUATERNAIRE	Fy
De 12.9 à 15.1 m	GRAVIER 10-30MM, SABLE 10%	QUATERNAIRE	Fy
De 15.1 à 16.7 m	GRAVIER GRIS ET BLANC 50MM, GROS CAILLOUX, SABLE 50%	QUATERNAIRE	Fy
De 16.7 à 18.8 m	GRAVIER FIN ROUGE GRIS ET BLANC DE 2-10MM 80%, 10-35MM 10%, SABLE 10%	QUATERNAIRE	Fw
De 18.8 à 21.2 m	GRAVIER MAX 90MM, SABLE 10%	QUATERNAIRE	Fw
De 21.2 à 22.1 m	SABLE FIN GRIS ET JAUNE	QUATERNAIRE	Fw
De 22.1 à 24 m	GRAVIER GRIS AVEC QUELQUES CAILLOUX, SABLE 10%	QUATERNAIRE	Fw
De 24 à 25.6 m	GRAVIER MAX 35MM, SABLE 60% UN PEU ARGILEUX	QUATERNAIRE	Fw
De 25.6 à 26.7 m	GRAVIER GROSSIER 50MM, SABLE 30% UN PEU ARGILEUX	QUATERNAIRE	Fw
De 26.7 à 29.5 m	GRAVIER GRIS GROSSIER MAX 80MM, SABLE 60% VEINES D'ARGILE	QUATERNAIRE	Fw

Tableau 8 : Validation d'un sondage dans les formations alluviales du Fossé rhénan : attributions de formations aux passes.

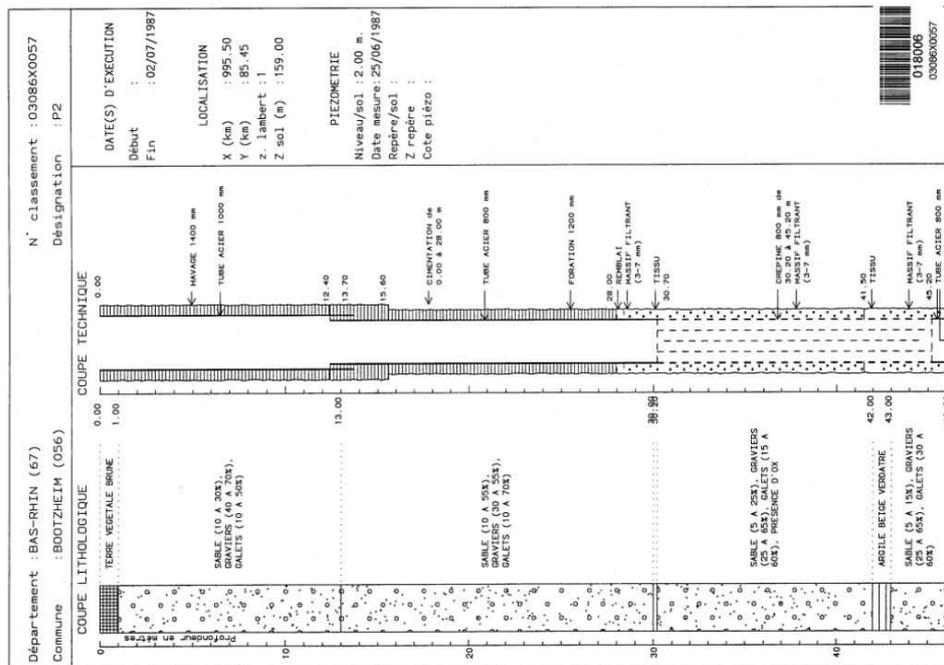


Figure 59 : Sondage dans les formations alluviales du fossé du Rhin.

- **Couverture sédimentaire**

Ils correspondent dans la majorité des cas à des forages « profonds » atteignant une profondeur moyenne se situant entre 400 et 1 000 m. Majoritairement pétroliers dans la partie nord de la zone (Bassin de Pechelbronn ; SAEM de Pechelbronn, TOTAL, SNEA(P), miniers dans la partie sud (Bassin potassique ; Société des Potasses d'Alsace), ces forages constituent des ouvrages d'un intérêt primordial pour la connaissance de la géologie régionale avec, des descriptions remarquables souvent accompagnées de diagraphies. Ils ont dans leur grande majorité été réalisés dans le Tertiaire rhénan et permettent d'avoir un excellent calage des différentes unités lithostratigraphiques constituant ce fossé, telles que celles :

- de Niederroedern (Oligo-Miocène) ;
- de la Série grise ;
- de Pechelbronn ;
- de la Couche rouge ;
- de la Zone dolomitique ;
- et de leurs équivalents latéraux dans le Bassin potassique (Zones salifères supérieure à inférieure) et le Horst de Mulhouse.

Plusieurs niveaux remarquables, utilisés par les pétroliers, ressortent très distinctement tels que :

- le contact Pliocène-Tertiaire,
- les marnes à foraminifères de la base de la Série grise et marquant le passage entre celle-ci et les Couches de Pechelbronn ;
- l'horizon du Glaswinkel situé à la base des Couches supérieures de Pechelbronn, bien qu'identifiable que dans certains secteurs géographiques du bassin ;
- la Zone à hydrobies, niveau marqueur remarquable assurant que ce soit dans le Bassin de Pechelbronn, le Bassin potassique ou le horst de Mulhouse systématiquement la transition entre les Couches supérieures de Pechelbronn et les Couches moyennes ou Zone fossilifère ;
- la Couche rouge constituant également un excellent niveau-repère, calé entre les Couches de Pechelbronn au sommet et la Zone dolomitique à la base ;
- enfin pour le Tertiaire, la zone basale dite « de transition » caractérisant le passage entre l'Eocène et le Jurassique (Lias ou Dogger selon les cas).

Pour les forages atteignant le Jurassique et se prolongeant pour certains jusqu'au socle, les descriptions deviennent en revanche nettement plus restreintes, moins précises, l'objectif « hydrocarbures ou potasse-sel gemme » étant essentiellement situé dans le Tertiaire. Quelques niveaux remarquables sont cependant identifiables tels que pour le Jurassique :

- la formation bajocienne de la « Grande Oolithe » pour laquelle plusieurs forages de reconnaissance ont été réalisés en vue de détecter un éventuel réservoir pour hydrocarbures ;
- les schistes cartons du Toarcien inférieur à moyen, plus ou moins bitumineux qui permettent d'avoir un calage partiel de la couverture jurassique.

Pour les forages descendant très bas dans la série, majoritairement jusqu'au Muschelkalk, pour certains jusqu'au Buntsandstein, plus exceptionnellement jusqu'au Permien voire au socle

cristallin, les descriptions ne permettent pas de distinguer avec précision les différentes formations. Par contre les contacts entre ces différents ensembles sédimentaires sont relativement bien tranchés tels que :

- le passage du Lias au Rhétien-Mittelkeuper ;
- le contact Lettenkohle-Muschelkalk ;
- le contact Muschelkalk-Buntsandstein ;
- le passage du Buntsandstein au Permien ;
- enfin le contact entre la couverture sédimentaire (Buntsandstein ou Permien) et le socle cristallin.

Concernant les terrains situés dans la partie supérieure des forages, en particulier les formations quaternaires et le Pliocène lorsqu'il celui-ci est présent, ils sont en général négligés et peu ou pas décrits. La carte géologique et les forages voisins peuvent cependant fournir quelques indications permettant de préciser partiellement la répartition de ces différents terrains.

Enfin, il faut encore une fois insister pour le régolithe et la phase événementielle « Altération » sur l'intérêt de ces forages qui ont permis pour certains d'identifier des zones d'altération supergène, dans un contexte cartographique majoritairement dépourvu de toute représentation du régolithe.

Au niveau structural, plusieurs failles majeures ont pu être identifiées.

- **Socle paléozoïque**

Les forages ayant recoupé, de manière significative, le socle paléozoïque sont relativement peu nombreux et généralement peu profonds (≤ 250 m) à l'exception notoire des cinq sondages du site géothermique de Soultz-sous-Forêts, situé dans le Bas-Rhin sur le territoire de la carte Haguenau (n° 198) à 1/50 000. Ces forages ont atteint 2 030 à 5 093 m de longueur pour reconnaître un massif monzogranitique dont le toit se situe vers 1 400 m de profondeur.

Pour des forages numérisés dans BSS, la validation par le référent socle aux normes RGF a porté sur une sélection de quatorze forages, de 52,7 à 250 m de profondeur. En général, les parties supérieures de ces forages se situent dans des formations superficielles développées aux dépens du socle (altérites) ou déposées au-dessus (formations alluviales, glaciaires...), de sorte que la validation de ces forages a été complétée le référent régolithe.

L'essentiel du travail a porté sur les cinq forages profonds et en partie carottés du site géothermique de Soultz-sous-Forêts qui ne figuraient pas parmi les logs numérisés, mais se trouvaient accessibles via des rapports du BRGM, sous forme pdf, avec des illustrations de logs synthétiques des forages GPK1, GPK3 et EPS1. Pour saisir les cinq forages, il a fallu récupérer auprès de DGR/REG des fichiers donnant, pour chacune des passes renseignées : la profondeur « fin de passe » recalculée, la description lithologique et la stratigraphie (cf. Tableau 9)

Z fin	Polarité	Nature info	Lithologie	N° formation ou membre RGF
m				
830,00			Non renseignée	
850,00	Normale	Passe standard	Formations du Lettenkohle	10291
959,20	Normale	Passe standard	Formations du Muschelkalk supérieur	10298
1008,15	Normale	Passe standard	Formations du Muschelkalk inférieur	10308
1020,65	Normale	Passe standard	Formation des Grès à Voltzia	10326
1044,15	Normale	Passe standard	Formation des Couches intermédiaires supérieures	100151
1060,19	Normale	Passe standard	Formation des Couches intermédiaires inférieures	100153
1064,78	Normale	Passe standard	Formation des Couches intermédiaires - conglomérat de Bitche	10331
1085,09	Normale	Passe standard	Formation des Couches intermédiaires (Obere Felszone)	10332
1177,45	Normale	Passe standard	Formation du Grès vosgien supérieur - couches de Karlstal	10334
1350,13	Normale	Passe standard	Formation du Grès vosgien inférieur - couches de Rehberg et de Trifels	10336
1409,09	Normale	Passe standard	Formation des Grès d'Annweiler	10337
1418,22	Normale	Passe standard	Formation des Grès permien	10341
1418,85	Normale	Passe standard	Monzogranite hydrothermalisé verdâtre	170347
1423,79	Normale	Passe standard	Monzogranite porphyroïde vert-orangé	170341
2232,07	Normale	Passe standard	Monzogranite porphyroïde gris-rose	170341

Tableau 9 : Extrait du fichier relatif au forage EPS1.

Remarque : Il reste à compléter la rubrique « altérations », qui pose le problème d'une confusion local entre altérations supergène et hydrothermale, mais pour cela il convient de réexaminer les forages, notamment le forage EPS1, entièrement carotté dans le socle entre 1 418,85 et 2 032,07 m de profondeur recalculée.

Pour valider ces forages nous avons complété le lexique RGF en créant un groupe « Suite granodioritique à monzogranitique de Windstein–Sultz-sous-Forêts (Viséen supérieur-Namurien) » comportant – outre la granodiorite de Windstein, qui affleure, deux formations spécifiques, uniquement visibles en forages :

- « Monzogranite plus ou moins porphyroïde, à biotite et fréquente hornblende, de Sultz-sous-Forêts (334 ± 4 Ma) » ;
- « Monzogranite leucocrate à deux micas de Sultz-sous-Forêts (327 ± 7 Ma) », intrusif dans le précédent,

et en subdivisant le premier monzogranite en treize membres, définis à partir des données du forage carotté EPS1.

Le forage EPS1 a recoupé, en le carottant, le massif monzogranitique de Sultz-sous-Forêts de 1 418,85 à 2 232,07 m de profondeur, avec de nombreuses variations lithologiques et/ou structurales, détaillées dans le log selon 413 passes, qui comportent globalement les 13 membres précités plus des filons de microgranite et des veines de quartz, stérile ou minéralisé en fluorine et barytine. La Figure 60 montre des carottes de deux de ces membres.

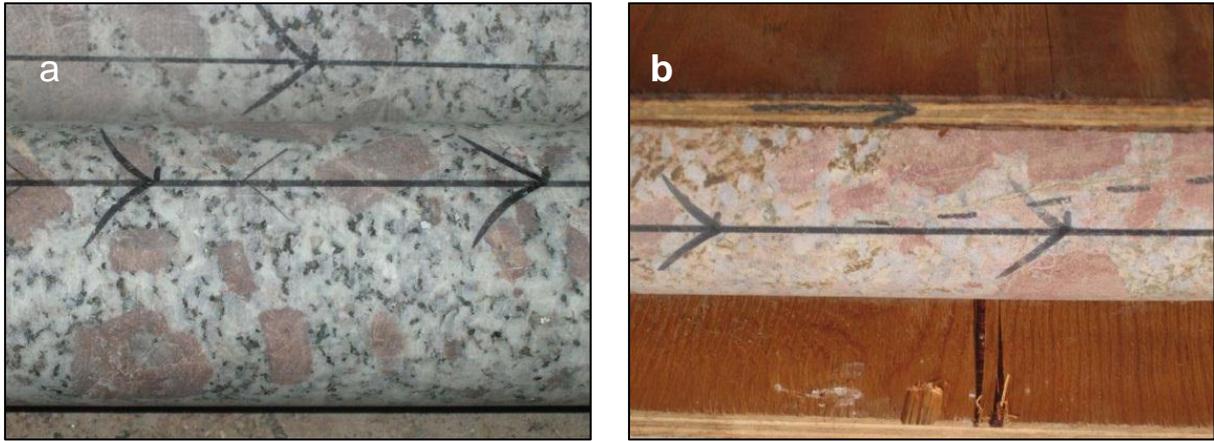


Figure 60 : Carottes (avec génératrice tracée dessus) de monzogranite porphyroïde du forage EPS1.
a - faciès standard, b - faciès cataclasé et hydrothermalisé.

Pour autre exemple citons le forage GPK2. La partie renseignée de ce forage est déclinée en 285 passes, correspondant uniquement à des cuttings très fins (cf. Figure 61 relative à GPK3) en dehors d'une carotte de 1,35 m de longueur prélevée vers 5 063 m de profondeur. Elle démarre à 25 m de profondeur dans la « Formation des Couches de Pechelbronn supérieures-Faciès normal » et se termine pour la couverture sédimentaire à 1 412 m dans le Buntsandstein indifférencié : grès, grès feldspathiques, arkoses, conglomérats. Pour le massif monzogranitique, recoupé de 1412 à 5093 m de profondeur, le log est détaillé selon 273 passes, celles de monzogranite leucocrate étant fréquentes dans la partie la plus profonde, entre 4685 et 5093 m. Le prélèvement d'une carotte de 1,35 m de longueur a permis de faire une analyse chimique de ce monzogranite leucocrate et de le dater à 327 ± 7 Ma par la méthode U-Pb sur zircon (Cocherie *et al.*, 2004).



Figure 61 : Cuttings du forage GPK3, fin de passe à 5 074 m.

5.3.3. Résultats

Près de 3 300 forages ont été validés aux normes RGF, avec le support du projet « Loglso » (Figure 62). Nous disposons ainsi d'un grand nombre de sondages codés selon un langage unique conformément au lexique « ULS » RGF, tout en conservant l'intégralité des descriptions géologiques d'origine (Figure 56).

Un certain nombre de ces forages ont également été utilisé dans le cadre d'une étude spécifique à la stratigraphie séquentielle (cf. chap. 7, résumé du rapport BRGM/RP-62896-FR, L. Becaletto *et al.* 2013) qui ont donc bénéficié de corrélations de surfaces isochrones pour les sédiments tertiaires du fossé rhénan. Ces interprétations ont pu être ajoutées aux nombreuses autres données de forages.

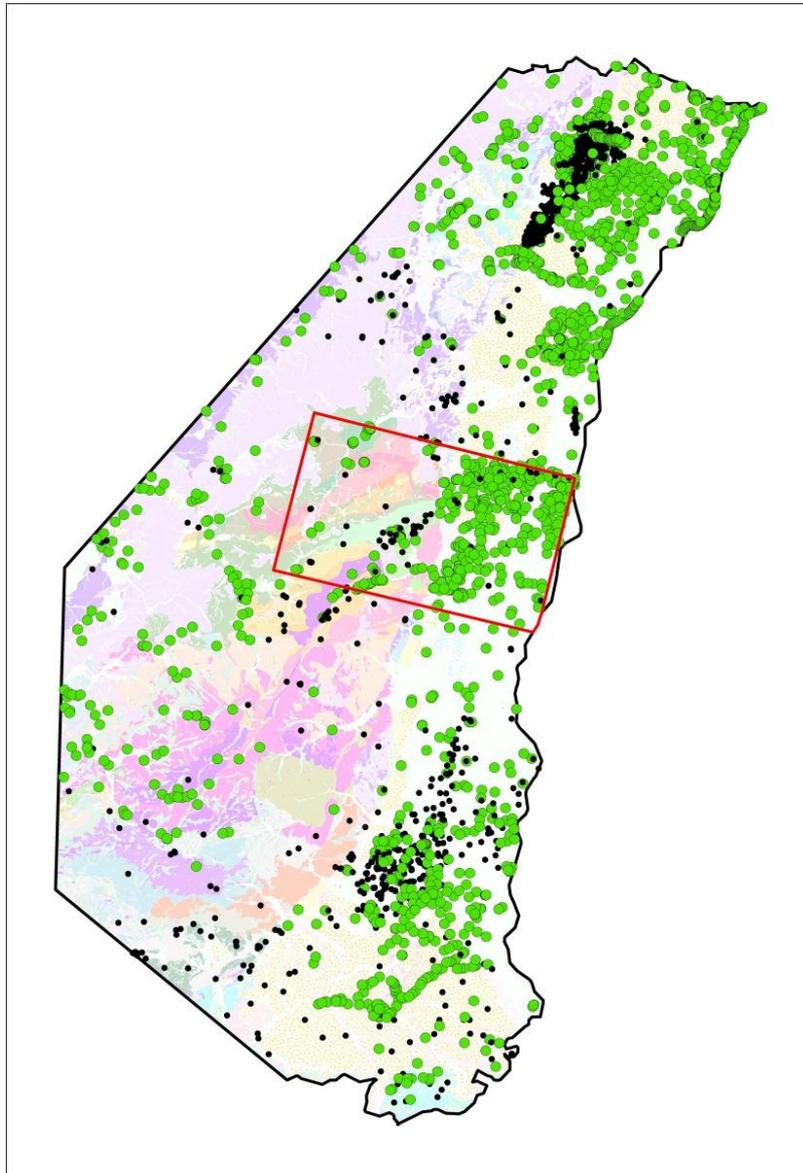


Figure 62 : Carte de repartition des forages validés RGF.

En vert les forages traités dans le cadre de ce projet, en noir les forages qui restent à faire. L'encadré rouge correspond à l'emprise où une majorité de forages ont été traités spécifiquement pour la thématique du risque sismique (emprise locale)

Les données de forages associées (cf. § 5.3.1) ont été structurées selon le schéma relationnel illustré en Figure 63.

Cette structuration de type « relationnelle » donne la capacité de restitution selon des regroupements de passes variés ainsi que de filtrage et sélection selon des critères d'intérêts spécifiques (illustrés par les fonctionnalités de l'application SIG du démonstrateur (cf. § 2.2.4). Celle-ci facilite et optimise l'utilisation de l'information géologique dans le cadre des études appliquées (pour exemple : risque sismique [cf. § 7.5]), ou encore pour l'exploitation des forages dans le cadre de la modélisation 3D (cf. chap. 6).

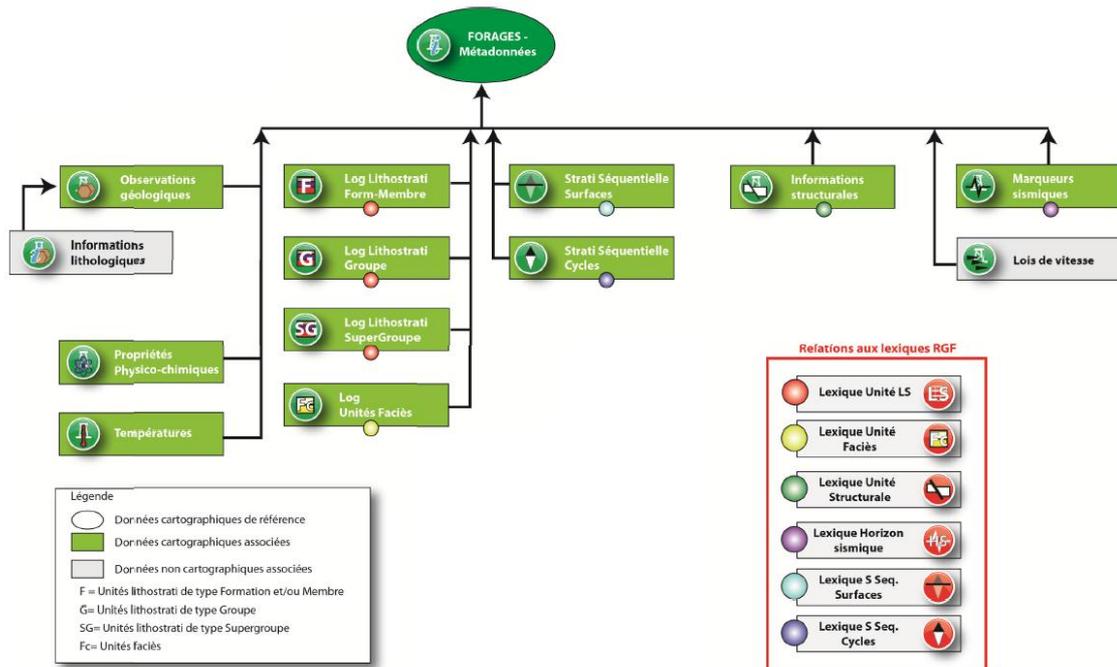


Figure 63 : Schéma relationnel des données associées aux forages.

En attendant le développement du système d'information SI - RGF et pour les besoins court terme du démonstrateur RGF, ces données ont été structurées sous forme de couches SIG (Classes d'entités et Tables) dans une géodatabase fichier ESRI, de type v10.0. La liste des couches SIG est disponible au paragraphe 2.3.2.a.

5.4. INTERPRÉTATIONS SISMIQUES

Le chantier Démonstrateur RGF Vosges - Fossé rhénan s'appuie pour la partie « Rhin » sur les travaux réalisés lors du projet européen GeORG, qui s'est déroulé sur plus de quatre années. L'apport du projet GeORG au RGF a été de mettre à disposition toutes les données de bases homogénéisées et harmonisées, ainsi que le modèle géologique 3D du Fossé rhénan pour contribuer à la réalisation du modèle régional Vosges - Fossé rhénan (cf. § 6.3).

5.4.1. Présentation du projet GeORG

Dans le cadre du projet européen « Potentiel géologique profond du Fossé rhénan supérieur », acronyme GeORG, cofinancé par le programme INTERREG IV Rhin Supérieur, d'Octobre 2008 à Décembre 2012, les partenaires, allemands, suisses et français, ont réalisé un modèle géologique 3D du Fossé rhénan, et évaluer les potentiels géologiques associés à l'échelle du

fossé (équipe du projet GeORG ; 2013 ; BRGM/RP-61945-FR). Ce travail s'appuie sur la coordination transfrontalière et l'homogénéisation des nomenclatures géologiques, des techniques de traitement des données, des systèmes de coordonnées des interprétations sismiques et l'harmonisation des bases de données. De nombreuses bases de données ont été établies à partir de l'exploitation de plus de 1 800 puits et de plus de 5 300 km de données sismiques, dont 350 puits et 1 600 km de sismique en sur la partie française du Fossé rhéna.

Les données sismiques ont été retraitées afin d'obtenir une image du sous-sol. Ceci a nécessité d'une part d'obtenir les données sismiques dites brutes auprès des différents opérateurs ayant acquis ces données et d'autre part de retraiter ces données sismiques brutes afin d'obtenir une image interprétable du sous-sol. Ayant un jeu de données sismiques homogène et cohérent sur l'ensemble du fossé rhéna, le travail sur les puits a permis d'obtenir les côtes des différents horizons ou niveaux repères, correspondant au découpage stratigraphique et lithostratigraphique du Fossé rhéna.

À l'aide des côtes des horizons ou niveaux repères, l'interprétation des lignes sismiques a permis d'une part la construction du schéma structural et d'autre part un maillage régulier des côtes des différents niveaux repères qui ont été sélectionnés et interprétés dans le projet GeORG sur l'ensemble du Fossé rhéna. Dix-sept horizons ou niveaux repères ont été interprétés dans le projet GeORG. Ces informations ont été les données de base à la construction du modèle géologique 3D du Fossé rhéna.

De plus toutes les données de température, porosité, perméabilité, salinité et de débit disponibles dans les données de puits ont été recueillies et mises sous forme de bases de données, qui ont permis d'évaluer les potentiels géologiques du Fossé rhéna et d'alimenter le démonstrateur.

Ayant recueilli toutes ces informations et données lors du projet GeORG, il a fallu dans le cadre du démonstrateur RGF Vosges-Rhin, les mettre en forme au format RGF.

Ces données sont constituées (cf. § 3.2.5) :

- des côtes, en mètre, des différents niveaux repères, issues des puits (Figure 27) ;
- des côtes, en millisecondes temps double (Figure 27), des différents horizons sismiques, pointés le long des lignes sismiques, correspondant aux différents niveaux repères, issus des puits (Figure 26) ;
- des positions des failles le long des lignes sismiques (Figure 28) ;
- les grilles 3D (horizons et réseau de failles) issues du modèle réalisé sous le logiciel GoCAD et référencé en unité métrique pour la profondeur.

5.4.2. Mise en forme des données

À partir de ces fichiers de bases de données (marqueurs sismiques et côtes aux puits et des pointés des failles) du projet GeORG, le travail dans le projet RGF démonstrateur a été la mise en forme de ces données au format RGF et l'association de ces données au lexique des unités lithostratigraphiques.

a) *Mise en correspondance des niveaux repère GeORG avec le lexique ULS RGF*

Dix niveaux repères ont été répertoriés dans le projet GeORG, ainsi que les dômes de sel, auxquels il a fallu associer le code RGF approprié (Figure 64).

nom dans fichier seivision	code GeROG	nom dans fichier forages	code RGF + commentaires
B_Plio-Pleistocène	blg	Base Plio-Pléistocène [blg]	Base des alluvions anciennes rhénanes (base p1Sa)
B_Mnes-Foraminifères	bff	Toit Sannoisien - base marnes à foram. [bff]	Base du Rupélien = Base marnes à foraminifères passe latéralement aux conglomérats de Rott - Top couche de Pechelbronn/Top zone salifère supérieure (g1PsE/g1PsBR)
B_Tertiaire	bt	Base Tertiaire [bt]	Base du groupe de transition éocène de Bouxwiller-Daubrée / Base du Lutétien (e5BC)
B-Rauracien	bjo	Base Rauracien [bjo]	Sommet Oxfordien marneux moyens (j5b)/Base Oxfordien Supérieur/Sommet des formations marnuses / base du Rauracien (j5c)
T_Gde-Oolithe	thr	Top Gde Oolithe [thr]	Toit de la Grande Oolithe (toit du j2b) (Surface taraudée au dessus de la grande Oolithe)
B-Dogger	bjm	Base Dogger [bjm]	Toit de la formation de Schillerdorf = Toit l4b-c / Base de l'Aalénien
B_Lias	bju	Toit Rhétien - Base Lias [bju]	Calcaires à marnes de Hochfelden = base des marnes à calcaires gryphées inférieurs 11-2 (HET)
B_Keuper	bku	toit Musch. - Base Keuper [bku]	Base de la dolomie inférieure t6a1 (LEI)
B_Muschelkalk	bmu	Toit Bunt. - Base Musch. [bmu]	Toit de l'Argile-limite t2AL
T_Socle	tkr	Toit Socle [tkr]	bas de la série h5 (Phanérozoïque Paléozoïque Carbonifère Carbonifère supérieur Stéphanién)
SaltDiapir	sd	salt dome	bassin potassique g1PsN et e7-g1Pm

Figure 64 : Tableau de correspondance des niveaux repères dans le projet GeORG et dans le projet RGF démonstrateur.

À partir du fichier de côtes (en m) des différents niveaux repères, issues des puits du projet GeORG (Figure 26) et du tableau de correspondance ci-dessus, une série de fichiers a été fourni en vue de leur intégration dans la B2D - RGFcomprenant :

- les métadonnées des puits (BOREHOLE_METADATA) ;
- le lexique des projets ayant servi à la constitution de la base de données des puits (LEX_INIT_PROJECT) ;
- le lexique des références des côtes altimétriques (LEX_Z_REF) ;
- le lexique des opérateurs (LEX_OPERATEUR) ;
- le lexique des niveaux repères en fonction des puits (BOREHOLE_MARK) ;
- le lexique des métadonnées des niveaux repères en fonction des puits (BOREHOLE_MARK_METADATA) ;
- le lexique des lois temps/profondeur (LEX_BOREHOLE_T=F(P)) ;
- les lois de vitesses (LOIS_DE_VIESSSES) ;
- le lexique des horizons sismiques (LEX_H_SISMIQUES) ;
- Le tableau des côtes des niveaux repères (BOREHOLE_MARK_ress).

Remarque : les sondages à partir desquels ont été extraient les niveaux repère pour le projet GeORG sont à l'origine issus des bases de données BEPH et BSS. Elles ont également été validées aux normes RGF dans le cadre de ce démonstrateur (cf. § 5.2.2).

b) Les horizons sismiques

À partir du pointé des horizons sismiques dans le projet GeORG et de l'extraction de ceux-ci en format ascii (Figure 27) les données ont été mises au format RGF en vue de leur intégration dans la B2D - RGF comprenant :

- le lexique des horizons sismiques (HORIZON_SISM) ;
- les métadonnées des lignes sismiques (LINE_SISMQUES) ;
- le lexique des campagnes d'acquisition sismique (LEX_GPH_CAMPAIGN) ;
- le lexique des donneurs d'ordre des acquisitions sismiques (LEX_PROVIDER) ;
- le lexique des compagnies d'acquisition sismique (LEX_OPERATEUR) ;
- le lexique des lignes sismiques régionales (LEX_LINE_REGIO) ;
- le lexique de toutes les lignes sismiques retraitées (LEX_LINE_TRAITEES) ;
- le lexique des lignes sismiques (MAPPING_SEISVISION_LINE_SISM) ;
- ainsi que les côtes de tous les niveaux repères pointés sur les lignes sismiques sur l'ensemble des lignes sismiques françaises du projet GeORG.

c) Les failles

À partir du pointé des failles réalisé lors du projet GeORG, il a fallu ligne sismique par ligne sismique réassigner chaque faille à la ligne sismique à laquelle elle appartenait. Ceci a permis d'obtenir un fichier par ligne sismique, contenant toutes les failles pointées par ligne (Figure 65).

X_L2E	YL2E	TIME	couleur dans seisvision	indice début milieu fin	Nom	Auteurs	domaine du Z	Etude	unité des coordonnées	unité du Z
969742.86	2328402.72	0.5617	29	1	Fault-77UG2	LB-LC-DCM	TIME	Alsace	meters	sec
969742.86	2328402.72	0.7383	29	2	Fault-77UG2	LB-LC-DCM	TIME	Alsace	meters	sec
969734.34	2328355.68	0.8833	29	2	Fault-77UG2	LB-LC-DCM	TIME	Alsace	meters	sec
969694.98	2328136.24	0.985	29	2	Fault-77UG2	LB-LC-DCM	TIME	Alsace	meters	sec
969670.5	2327950	1.207	29	2	Fault-77UG2	LB-LC-DCM	TIME	Alsace	meters	sec
969624.18	2327342.92	1.363	29	2	Fault-77UG2	LB-LC-DCM	TIME	Alsace	meters	sec
969597.444	2326470.07	1.543	29	3	Fault-77UG2	LB-LC-DCM	TIME	Alsace	meters	sec
969892	2329425.6	1.175	29	1	Fault-77UG2	LB-LC-DCM	TIME	Alsace	meters	sec
969850.675	2329074.99	1.363	29	2	Fault-77UG2	LB-LC-DCM	TIME	Alsace	meters	sec
969814.6	2328820.2	1.425	29	2	Fault-77UG2	LB-LC-DCM	TIME	Alsace	meters	sec
969661.83	2327884.04	1.547	29	3	Fault-77UG2	LB-LC-DCM	TIME	Alsace	meters	sec

Figure 65 : Exemple de tableau contenant toutes les failles pour une seule ligne sismique.

d) Le modèle géologique 3D du projet GeORG

Le modèle géologique 3D du Fossé rhéna est un modèle surfacique basé sur les horizons pointés de la sismique 2D et les sondages disponibles sur l'intégralité du Fossé. Ce modèle a été initialement réalisé en référentiel « temps » (profondeur exprimé en temps-double). L'intégralité du modèle a ensuite été convertie en profondeur (équipe du projet GeORG ; 2013 ; BRGM/RP-61945-FR).

Le projet pilote du RGF a bénéficié du résultat de ce modèle pour la partie française sous la forme de grilles 3D avec 13 interfaces sédimentaires et plus de 300 failles (fichiers de points 3D – XYZ, en unité métrique). Ces grilles ont été réutilisées dans le cadre de la modélisation 3D (cf. § 6.3) pour pallier au manque d'interprétation de la sismique exprimé en profondeur métrique (cf. § 3.2.5).

En termes de mise en cohérence, les grilles 3D utilisées pour les modèles ont été identifiées dans le lexique RGF à une base ou un toit d'unité lithostratigraphique (cf. Figure 64), puis intégré dans les modèles régional et local du RGF (cf. § 6).

5.4.3. Résultats

Les données interprétées dans le cadre du projet GeORG ont été « convertis » aux nomenclatures et structurations des fichiers compatibles à une intégration dans la B2D - RGF. Chaque horizon sismique interprété et répertorié dans un lexique des horizons sismiques (L_HORIZON_SISM) a été associé à une codification du lexique ULS RGF. Les failles reconnues sur ces profils pourront être associées à un lexique commun de structure géologique RGF Vosges - Fossé rhéna, à l'avenir.

En plus des interprétations sismiques mises à disposition par le projet GeORG, un certain nombre de données sismiques ont été traitées et interprétées dans le cadre de ce projet pour une étude spécifique concernant la géométrie des dépôts syn-rift du fossé rhéna (Beccalotto *et al.*, 2013 ; BRGM/RP-62896-FR). Toutes ces données ont été structurées selon le schéma relationnel commun illustré en Figure 66.

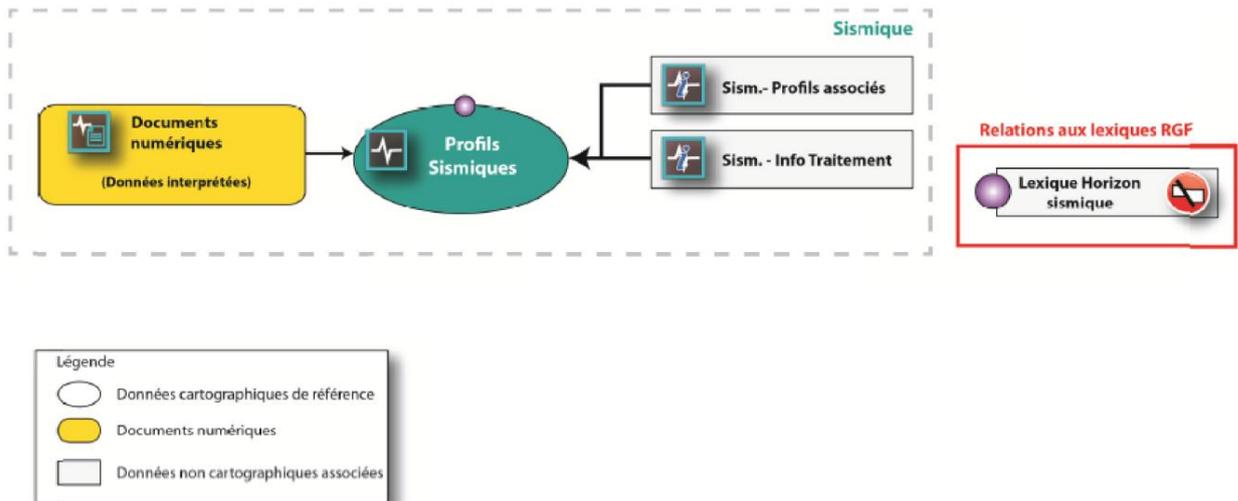


Figure 66 : Schéma relationnel des données sismiques (brutes et interprétées).

Cette structuration de type « relationnelle » donne la capacité de filtrage et sélection selon des critères d'intérêts spécifiques (illustrés par les fonctionnalités de l'application SIG du démonstrateur, cf. § 2.2.4). Celle-ci facilite et optimise l'utilisation de l'information géologique dans le cadre des études appliquées, ou encore pour l'exploitation des interprétations dans le cadre de la modélisation 3D (cf. chapitre 6).

En attendant le développement du système d'information SI - RGF et pour les besoins court terme du démonstrateur RGF, ces données ont été structurées sous forme de couches SIG (Classes d'entités et Tables) dans une géodatabase fichier ESRI, de type v10.0. La liste des couches SIG disponibles est détaillée au § 2.3.2.a.

5.5. DONNÉES D'OBSERVATION DE TERRAIN

Les données d'observations de terrain diverses citées au § 3.2.2, proviennent essentiellement de données récoltées des géologues ayant des méthodes d'acquisition, d'annotation et de référencement individuelles. Aussi lorsque les données ponctuelles sont récupérées, elles sont organisées d'autant de manières qu'il existe d'auteurs et de sources d'informations variées.

En vue d'une future intégration en base de données ces informations doivent être homogénéisées du point de vue de leur contenu (type d'informations nécessaires pour chaque type de données), de leur forme (organisation du contenu des fichiers) et des codes utilisés (utilisation de lexique commun).

Le travail réalisé ici a consisté à :

- trier et d'organiser l'information récoltée dans le cadre des thèses E.Skrzypek (2011) et A.-S. Tabaud (2012) pour aboutir à une mise en forme cohérente et commune des fichiers pour chaque type de données ;
- rattacher l'information géologique ponctuelle aux lexiques « ULS » RGF et événementiel (expl. : associé un code ULS a un affleurement, échantillon prélevé, lame mince, résultat d'analyse, photographie prise sur le terrain, ou encore attribuer un code « évènement » aux données structurales observées).

Ces données décrites au § 3.2.2 ont donc été structurées selon le schéma relationnel illustré en Figure 67 et Figure 68.

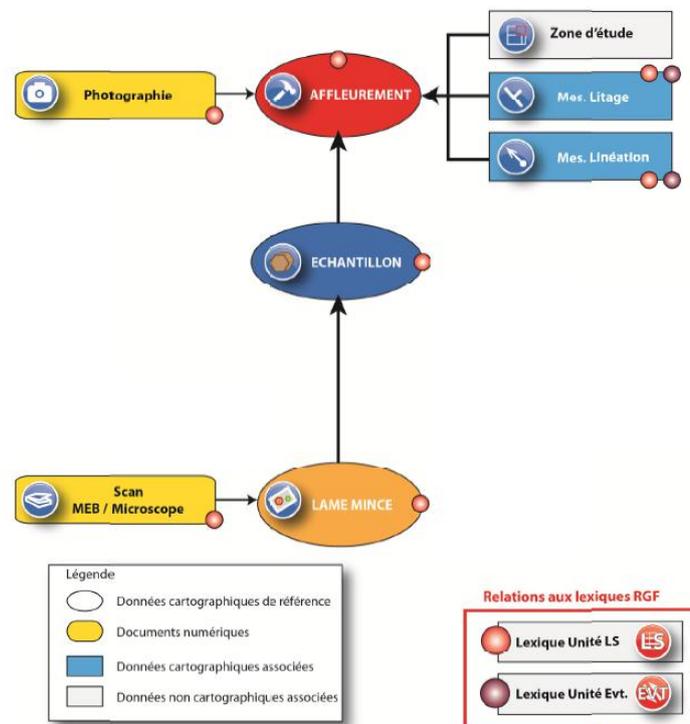


Figure 67 : Schéma relationnel des couches SIG du regroupement thématique - Observations géologiques et analyses - volet 1.

Cette structuration de type « relationnelle » donne la capacité de filtrage et sélection selon des critères d'intérêts spécifiques (illustrés par les fonctionnalités de l'application SIG du

démonstrateur (cf. § 2.2.4). Celle-ci facilite et optimise l'utilisation de l'information géologique dans le cadre des études appliquées ou encore pour l'exploitation des données de terrain dans le cadre de la modélisation 3D (cf. chapitre 6).

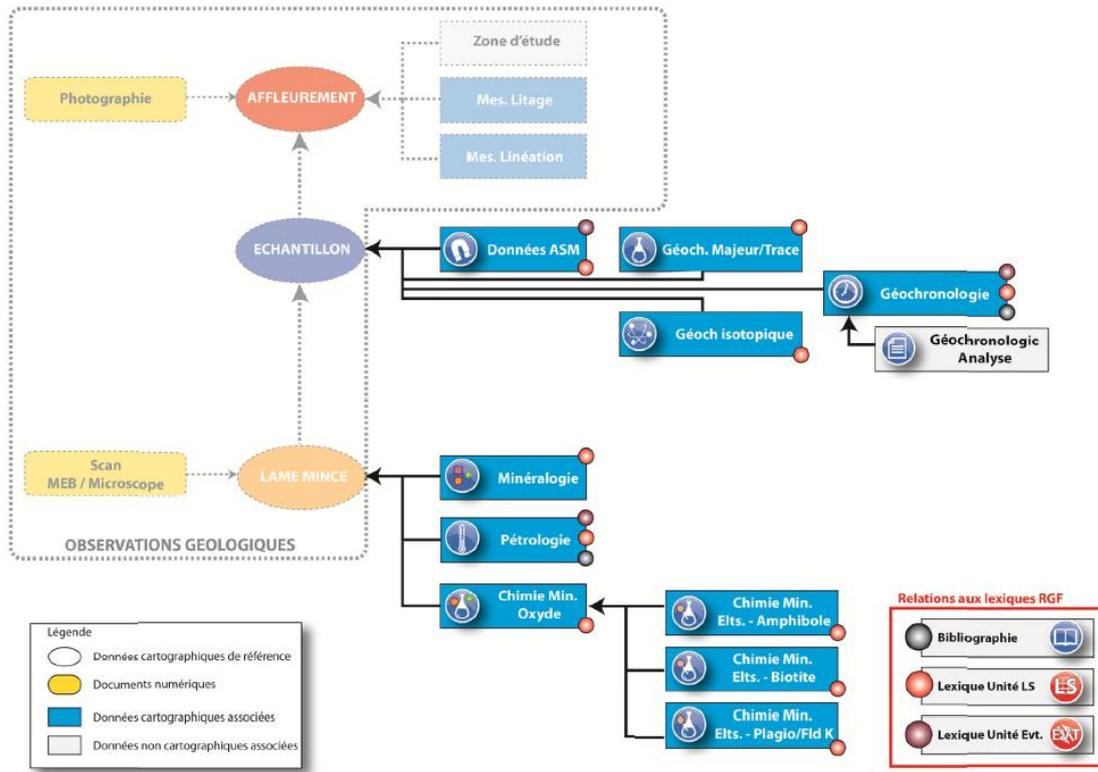


Figure 68 : Schéma relationnel des couches SIG du regroupement thématique - Observations géologiques et analyses - volet 2.

Id Champ	Nom du champ	Alias du champ	Type du champ	Longueur du champ	Valeur Null autorisée
0	OBJECTID	Id. SIG	Identifiant Objet	4	False
1	CODE_AFF	Code affleurement	Chaîne de caractères	255	True
2	STRIKE	Strike	Double	8	True
3	DIP	Dip	Double	8	True
4	STRATI_NAME	Nom	Chaîne de caractères	255	True
5	STRATI_TYPE	Type	Chaîne de caractères	255	True
6	EVT_ID_RGF	Unité Evt RGF ID	Double	8	True
7	AUTHOR	Auteur	Chaîne de caractères	255	True
8	DATE_	Date	Chaîne de caractères	255	True
9	ORGANISME	Organisme	Chaîne de caractères	255	True
10	X_L93	X (L93)	Double	8	True
11	Y_L93	Y (L93)	Double	8	True
12	Shape	Shape	Géométrie	0	False
13	guid_	Unité LS RGF ID	Entier long	4	True
14	gudescr	Unité LS RGF Description	Chaîne de caractères	255	True

Figure 69 : Structure de la couche SIG « Affleurement - Mes. Litage ».

En attendant le développement du système d'information SI - RGF et pour les besoins court terme du démonstrateur RGF, ces données ont été structurées sous forme de couches SIG

(Classes d'entités et Tables) dans une géodatabase fichier ESRI, de type v10.0. La liste des couches SIG disponibles est détaillée au § 2.3.2.b.

Pour exemple, vous trouverez ci-dessous la structure de couche et les champs renseignés pour les mesures structurales de litage (Figure 69).

5.6. PLUS VALUES DE LA MISE EN COHÉRENCE

Les données sélectionnées pour le démonstrateur sont désormais exprimées dans un langage unique, définie préalablement lors de la constitution des lexiques RGF (lexique « ULS-RGF » et « évènementiel »). Cela s'applique :

- aux travaux de cartographie avec la constitution d'une carte continue, d'un point de vue géométrique (tout en conservant les contours au 1/50 000ème) et homogène d'un point de vue lexical ;
- au traitement des forages avec ce même langage qui assure une cohérence entre eux (tout en conservant leur description d'origine) et en les reliant lexicalement aux formations exprimées sur la carte ;
- aux horizons définis en profondeur par l'interprétation de profils sismiques identifiés et calés sur les sondages par l'intermédiaire un tableau de correspondance reliant les horizons pointés au toit ou mur des unités lithostratigraphiques correspondantes ;
- aux données ponctuelles (données structurales, analyses, photos... de terrain, de forages) rattachées aux unités lithostratigraphiques qu'ils décrivent ou affectent. .

De cette manière, la cohérence des données est assurée non seulement en deux dimensions (de carte à carte, de forage à forage, de forage à pointé sismique) mais aussi en trois dimensions, reliant ces différents types de données à un seul et unique langage commun.

Une fois les données mises en cohérence et structurées selon un schéma de base de données « relationnelle » (cf. § 2.1.3), il en résulte une carte géologique numérique aux 1/50 000 interactive et reliée physiquement à une base de données de surface et profondes.

Ce nouveau modèle de carte géologique (accessible avec le support du logiciel ArcGIS v.10, ESRI) permet de décliner les données pour différentes thématiques, formes, échelles et selon les besoins spécifiques de l'utilisateur :

- réaliser des cartes évènementielles (cf. lexique évènementiel) illustrant les phases de métamorphisme subit par la roche à un âge donné (Figure 70). À l'avenir, la démarche sera la même pour toute structure géologique linéaire telle qu'un accident, cisailant par exemple, dont l'histoire géologique pourra être suivie au cours des temps (pour rappel : le lexique structural n'a pas pu être ni réalisé et ni testé dans le cadre du démonstrateur) ;
- effectuer des cartes sur critère lithologique à différentes échelles (Figure 71) ;
- effectuer des regroupements lithostratigraphiques (cf. lexique hiérarchisée des ULS) exprimés de manière homogène pour tous les types de données existante à différentes échelles (Figure 72).

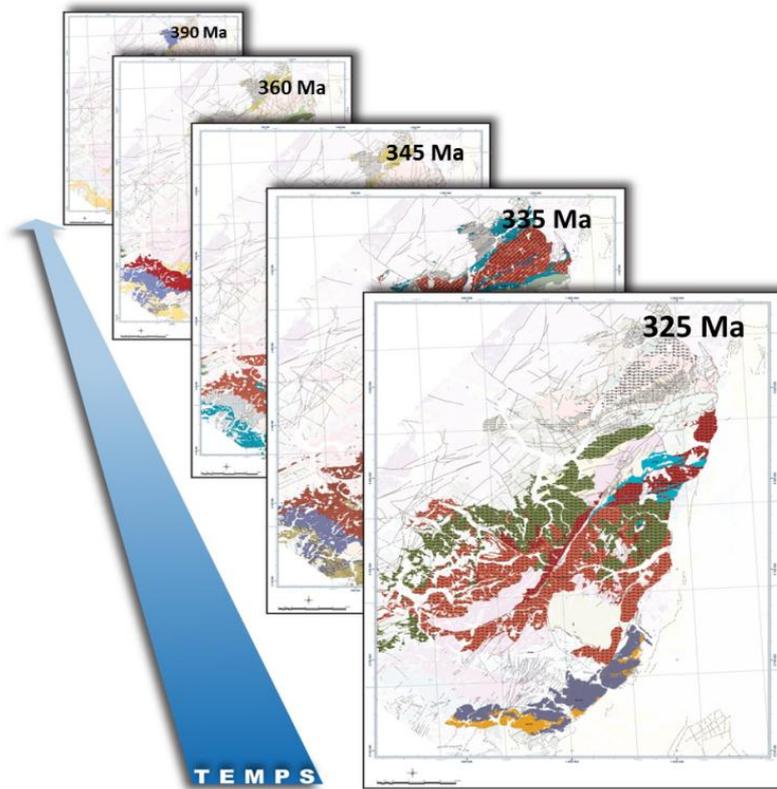


Figure 70 : Cartes « évènementielles » - le cycle hercynien du Massif des Vosges.
 Cartes réalisées d'après les thèses de E. Skrzypek (2011),
 A.S. Tabaud, (2012), intégrées dans la B2D_RGF

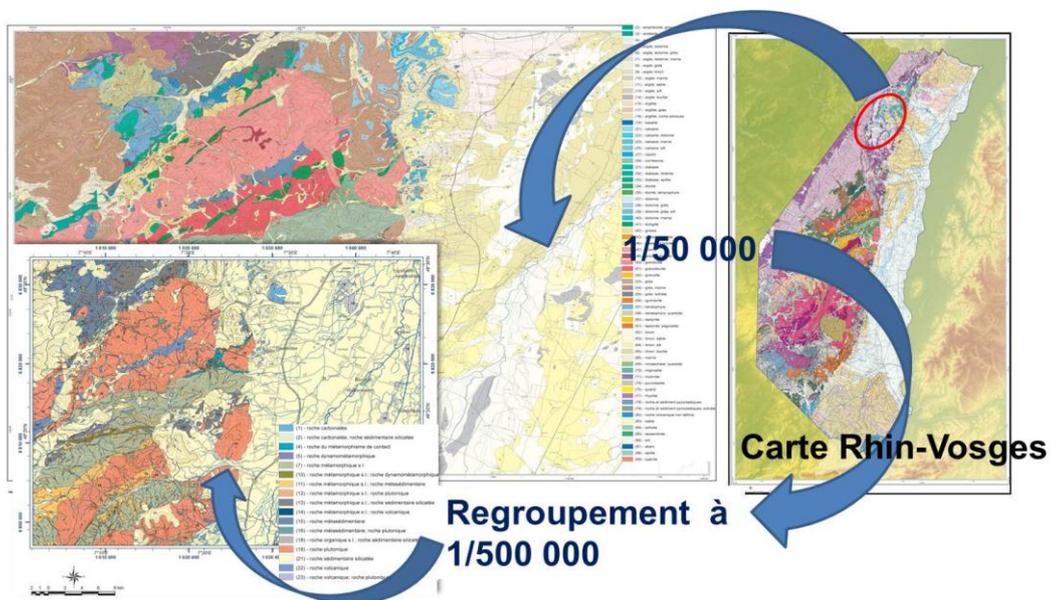


Figure 71 : Cartes lithologiques (nature des roches dominantes : granite, calcaire, etc.).

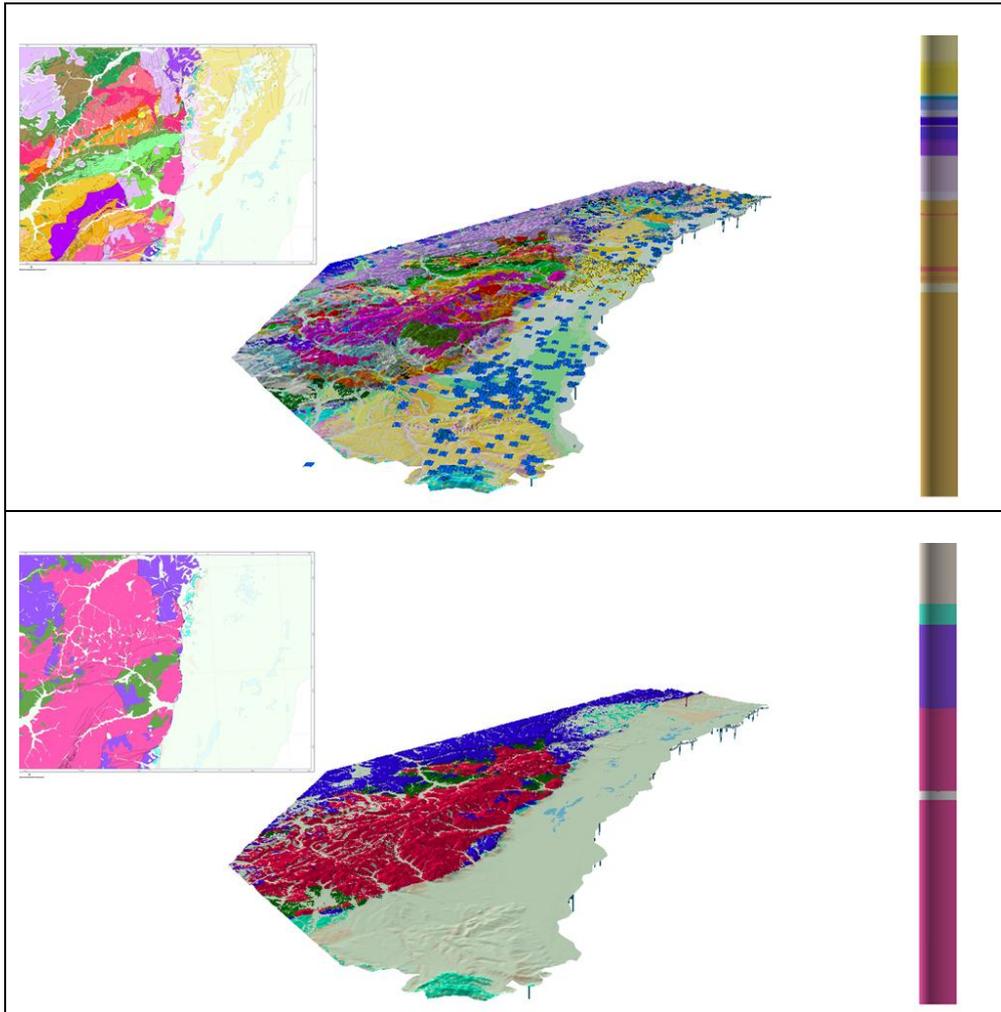


Figure 72 : Données cartographiques et de forages exprimés selon les mêmes types de regroupement (en haut : groupe, en bas : supergroupe).

Les données peuvent ainsi être extraites à un niveau de détail pertinent pour les besoins de l'utilisateur. Pour des produits ciblés en modélisation 3D, des modèles peuvent ainsi être construits dans des emprises d'intérêt spécifique pour répondre aux besoins scientifiques et techniques d'un chantier régional.

Cet « exercice » a été réalisé dans le cadre du chantier pilote pour différentes applications présentées dans les chapitres qui suivent (chapitre 6 et chapitre 7)

6. Modélisation 3D

6.1. GÉNÉRALITÉS

La modélisation géologique consiste à fournir une description/prédiction continue de la distribution de la géologie en profondeur à partir de données ponctuelles, hétérogènes et irrégulièrement réparties dans l'espace. Cette modélisation peut recouvrir des aspects multiples.

La géométrie : en premier lieu, on modélise la position des repères stratigraphiques dans l'espace. Dans les bassins sédimentaires et dans le régolite, ces horizons sont classiquement modélisés sous forme de surfaces, délimitant les unités géologiques regroupées par période de dépôt (Trias, Jurassique, Pliocène, ...). Dans les domaines de socles on modélise des surfaces délimitant de grands ensembles litho-tectoniques, (schistes, ensembles gneissiques, différentes générations d'intrusions magmatiques, ...). Ce modèle est généralement qualifié de modèle structural. Il définit l'architecture du milieu sur laquelle s'appuieront toutes les modélisations plus fines du milieu géologique.

Les propriétés pétro-physiques : cet aspect concerne l'estimation de la distribution des paramètres géologiques à l'intérieur de ces ensembles. Il s'agit d'aller plus finement dans la description du milieu où l'on pourra distinguer différents faciès à l'intérieur de ces ensembles. Typiquement des alternances argiles, grès, carbonates qu'il faudra chercher à caractériser, ou bien encore des variations de la granulométrie, de la teneur de différentes phases minérales. L'estimation de la répartition des paramètres pétro-physiques est en général très liée à celle des faciès, et dans une certaine mesure à celle du modèle structural. Ces paramètres sont le plus couramment : la porosité, la perméabilité, les vitesses sismiques, densité, susceptibilité magnétique, température, propriétés électriques, propriétés mécaniques.

Les répartitions des faciès et des propriétés physiques n'obéissent pas aux mêmes règles de variabilité que celles des ensembles stratigraphiques, les méthodes d'interpolation/simulation sont donc particulières à cette problématique, cependant elles doivent être conditionnées par la géométrie des repères stratigraphiques.

L'incertitude : classiquement, lorsque le contexte le permet, les méthodes géostatistiques fournissent un cadre pour l'estimation de l'incertitude. Cependant l'incertitude ne peut être rigoureusement estimée dans tous les cas. Il faudra donc réfléchir aux moyens de qualifier la validité des modèles et aux moyens de la rendre compréhensible aux utilisateurs.

Quelle échelle, quel outil utiliser ? : Cela dépend de l'objectif du modèle, de l'échelle de restitution en découlant, du style géologique et de la complexité du milieu, pour cela il est nécessaire de choisir les méthodes d'interpolation appropriées. C'est pourquoi différentes techniques et logiciels peuvent être utilisés pour différents types d'objets géologiques (expl: dépôts de formations superficielles ou intrusions granitiques).

Ces logiciels ayant des modes de représentation différents, l'enjeu est de pouvoir « unifier » toutes ces représentations au sein d'une même représentation globale.

La capacité à mettre à disposition des modèles : que ce soit sur le web ou non, pour différentes applications telles que visualisations, simulations (transferts, hydrogéologiques, mécaniques, sismiques, thermiques, analyse prédictive, ...) reste un volet important. Ceci concerne principalement la nécessité de développements sur les méthodes de discrétisation et maillages des modèles.

6.2. MODÉLISATION DANS LE RGF

La modélisation 3D est une étape incontournable pour la validation de l'information géologique. Les données traitées habituellement séparément (cartographie, forages, interprétations sismiques et géophysiques, ...) devront être confrontées à l'interpolation géométrique dans un même espace tridimensionnel.

Cela permet de vérifier, suivant un processus itératif (Figure 73), la cohérence géométrique des données, de mettre en évidence d'éventuelles questions (validation de la donnée ponctuelle, interprétation géologique) et d'anticiper des besoins d'acquisition pour compléter notre connaissance géologique.

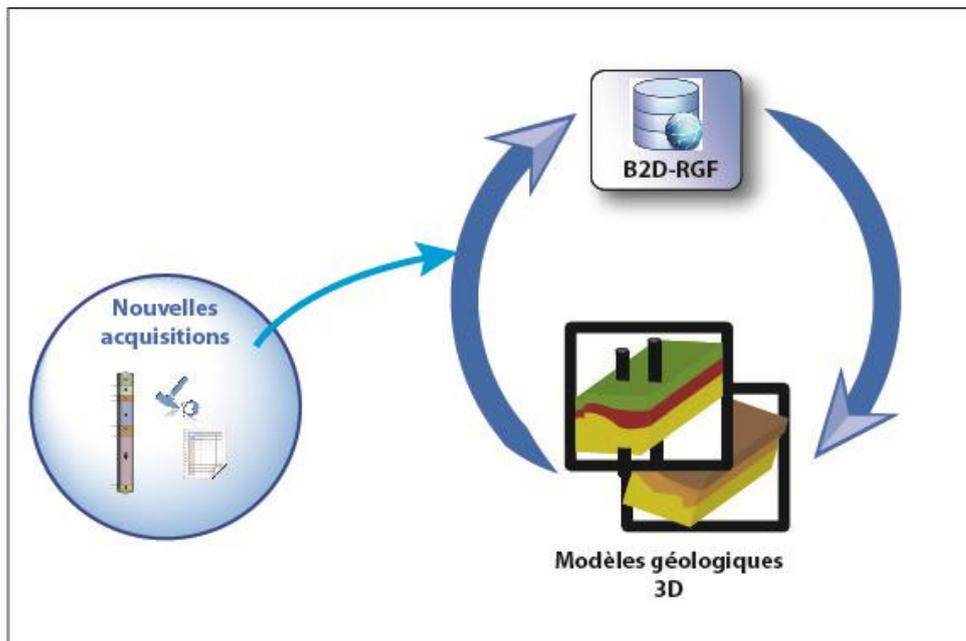


Figure 73 : Principe de validation suivant un processus itératif avec la modélisation 3D.

Ce principe pose la question des liens « physiques » entre bases de données et modèles géologiques ainsi que la façon de mettre à jour les modèles par l'apport de nouvelles connaissances.

Des travaux en modélisation ont été prévus ici sur la base des données mises en cohérence (cf. chapitre 5). La réalisation d'un modèle régional d'échelle crustale sur la totalité de l'emprise et de modèles sur les zones « locales » (Sélestat, Mulhouse, Pechelbronn) permet de confronter ce même jeu de données mises en cohérence à différentes échelles (Figure 74).

Ce changement d'échelle, passe lui obligatoirement par l'exploitation de la B2D_RGF. Les données sont extraites à un niveau de détail pertinent pour les besoins de l'utilisateur. Des modèles peuvent ainsi être construits dans des emprises d'intérêt spécifique pour répondre aux besoins scientifiques et techniques d'un chantier régional. L'« exercice » a été réalisé ici, sur les zones dites « locales » pour participer à la démonstration de l'intérêt du RGF pour différentes thématiques des géosciences.

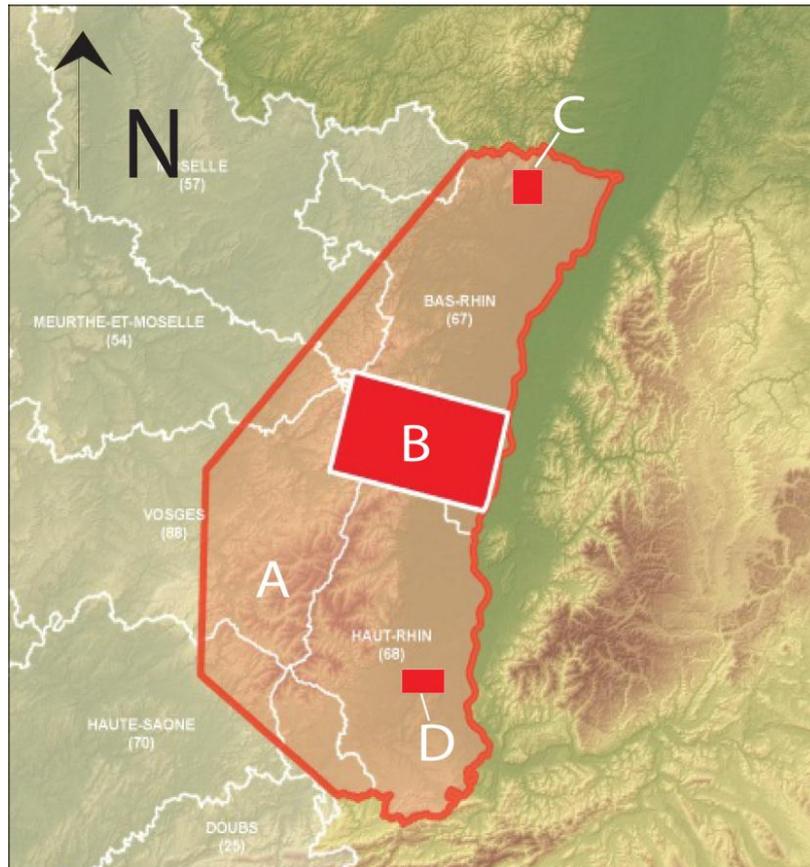


Figure 74 : Emprises des modèles réalisés dans le cadre du projet de démonstration : (A) modèle régional, (B) modèle de Sélestat, (C) modèle de Pechelbronn, (D) modèle de Mulhouse.

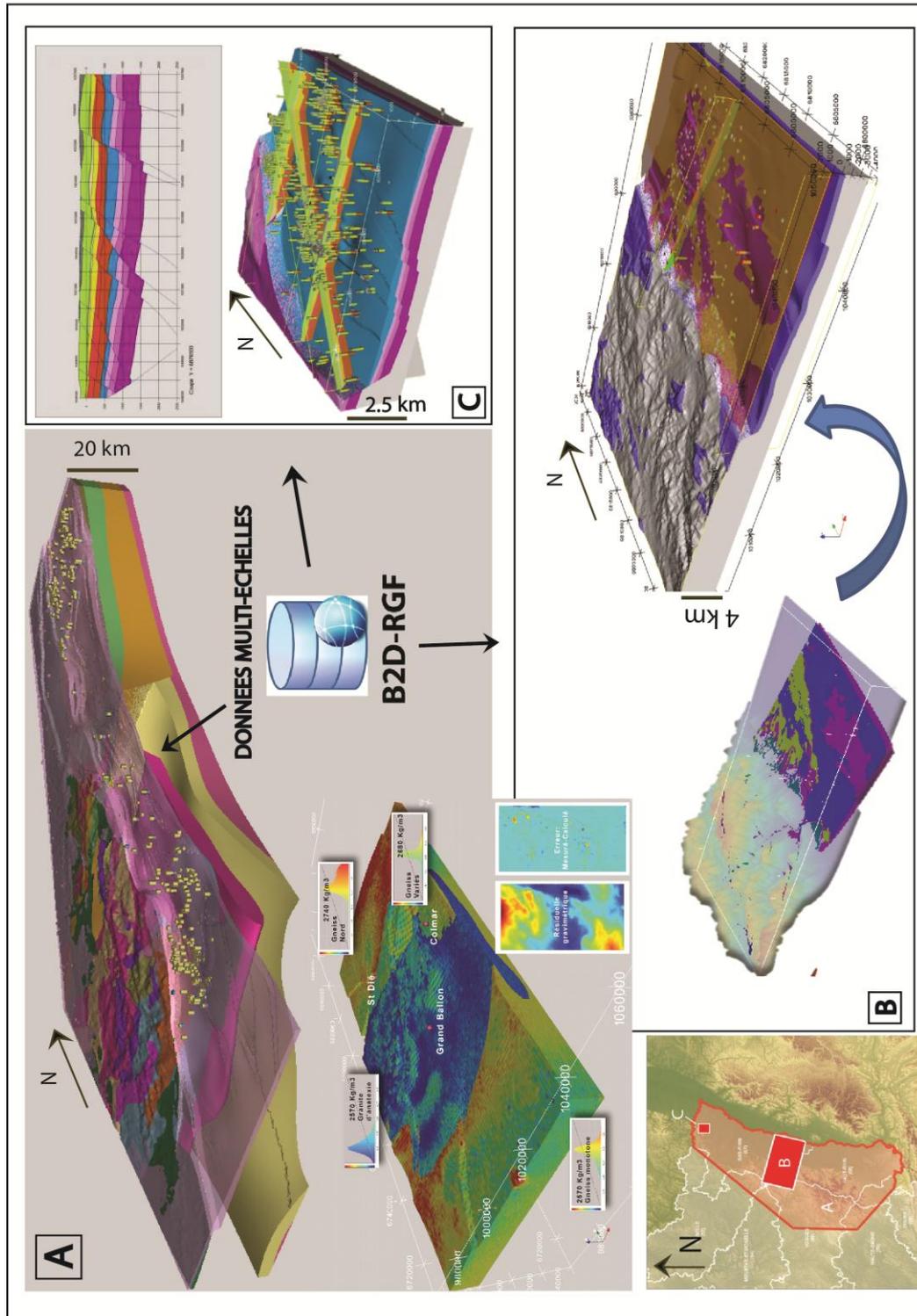


Figure 75 : Modèles 3D du chantier de démonstration RGF « Vosges - Fossé rhénan ».

A : Modèle géologique régional (en haut), Modèle de densités (en bas), réalisés avec le GeoModeller3D (© BRGM – Intrepid Geophysics) par C. Allanic, G. Courrioux, A. Guillen (BRGM) avec la collaboration de E. Skrzypek et K. Schulmann (Univ. de Strasbourg). **B** : Modèle des alluvions de la plaine rhénane dans le secteur de Sélestat (à gauche) avec GDM (© BRGM), réalisé par A. Leynet, puis intégré dans le GeoModeller 3D par C. Loiselet et G. Courrioux (BRGM). **C** : Modèle de la zone de Pechelbronn réalisé avec GeoModeller3D par C. Loiselet et G. Courrioux.

6.3. MODÈLE RÉGIONAL

6.3.1. Objectif

Il s'agit de construire un modèle régional du massif des Vosges et Fossé rhéan. Ce modèle d'échelle crustale a pour objectifs :

- de valider la cohérence des données fournies ;
- d'illustrer l'architecture de la chaîne dans ce secteur (assemblage des principales unités litho-tectoniques, ainsi que les relations socles, base du Trias et du Tertiaire).

L'effet gravimétrique de ce modèle doit être de plus confronté à l'effet gravimétrique mesuré dans cette région afin d'en évaluer la validité. Il fournit un cadre pour calculer la distribution des propriétés physiques et permet éventuellement de falsifier (invalider) le modèle.

6.3.2. Données

Ce modèle recouvre l'emprise suivante (notée « A » sur la Figure 74) : XMIN = 961286 ; XMAX = 1082686 ; YMIN = 6710846 ; YMAX = 6895546 ; ZMIN = -40000.0 ; ZMAX = 3000.0 (RGF 93 Lambert 93 France - Borne Europe - unité : m). Il intègre :

- un MNT échantillonné à 100 m ;
- 672 sondages validés aux normes RGF dont la répartition est montrée sur la Figure 76. Ceux-ci sont principalement répartis sur le Fossé-Rhéan et intéressent en majorité les formations du Tertiaire. Seuls quelques forages profonds rencontrent les formations mésozoïques et le socle. Dans le massif Vosgiens les sondages sont assez peu profonds et permettent localement de contraindre la base du Trias et du Permien. Ils ne donnent aucun renseignement quant à la structure profonde du massif, visée dans ce modèle ;

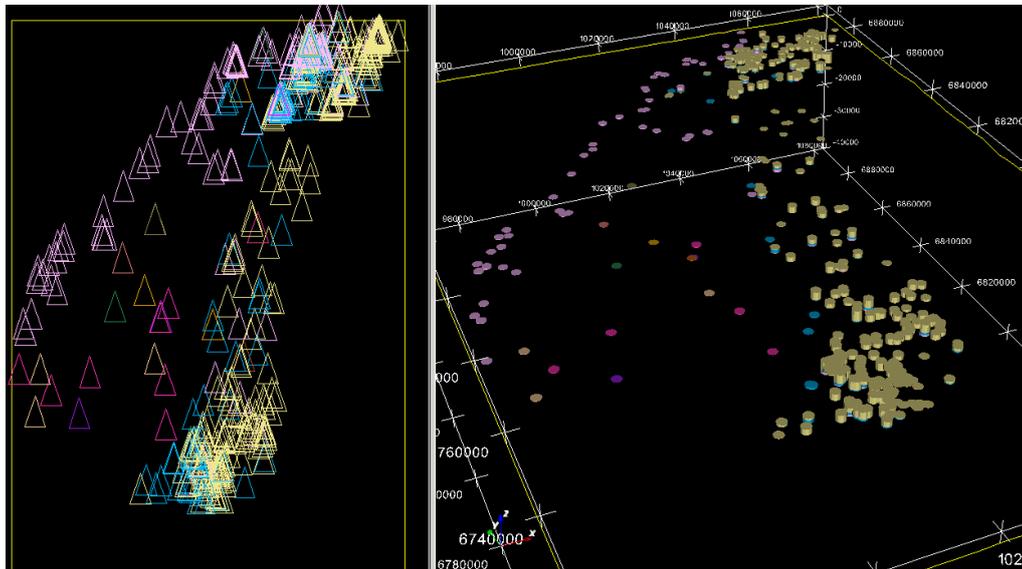


Figure 76 : Localisation des sondages sur l'emprise du modèle régional.

- la carte géologique du RGF : Pour ce modèle il a été fait le choix d'utiliser la carte à l'échelle des « Groupes » (Figure 54) . C'est la référence essentielle sur laquelle s'appuyer pour construire le modèle (Figure 77). Elle présente un niveau de description compatible avec une représentation au 1/50 000. À l'échelle du modèle, les failles et interfaces majeurs

représentatifs doivent être échantillonnés en fonction des structures que l'on souhaite représenter. Une connaissance critique de la géologie régionale est indispensable à cette étape pour extraire et simplifier les éléments de façon pertinente. La Figure 78 illustre un exemple d'interprétation et simplification des structures majeures. Ceci pose crucialement le problème de la généralisation sur les données géologiques. La difficulté vient du fait qu'un simple/ou même sophistiqué échantillonnage des contours n'est généralement pas la solution au problème. En effet, à titre d'exemple les interactions complexes entre failles et horizons qu'il faut simplifier de façon simultanée et cohérente, ou encore maintenir la cohérence entre la généralisation et les effets d'intersection avec la topographie choisie pour la modélisation. Ou encore les failles représentées sur la carte qui ne sont pas hiérarchisées et ne représentent pas nécessairement les structures majeures ;

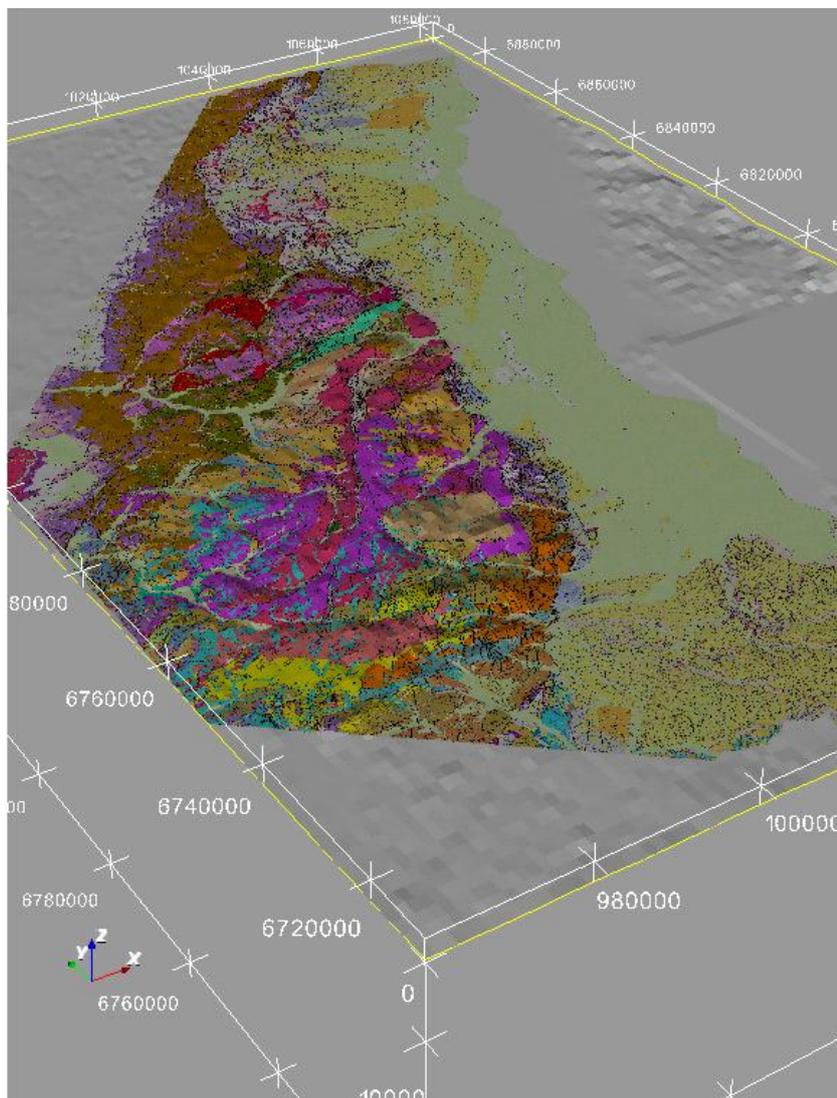


Figure 77 : Extrait de la carte géologique harmonisée RGF géoréférencée dans l'environnement de modélisation.

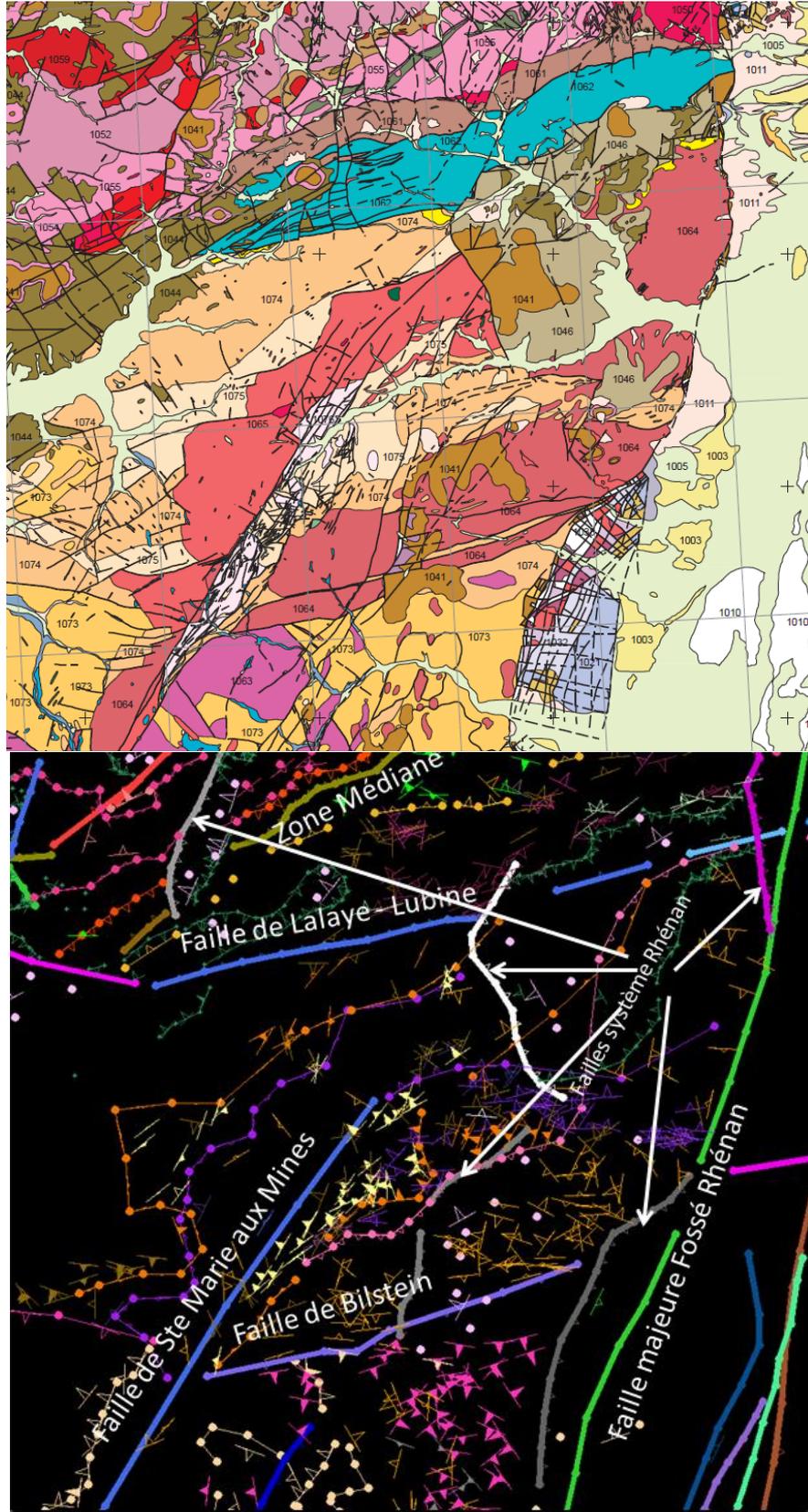


Figure 78 : Identification des structures majeures à l'échelle du modèle régional sur un extrait de la carte géologique.

- pour le Fossé rhénan et en substitution des interprétations sismiques existante uniquement profondeur temps double, ce modèle a bénéficié des horizons et des failles modélisés dans le cadre du projet GeOrg (cf. Figure 79 et § 5.4). Les fichiers sont fournis au format Tsurf : liste de points indexés (vertex), suivie d'une liste d'index indiquant la connectivité (triangles). Les horizons sont bordés à l'ouest par la faille majeure bordière, constituée d'un seul tronçon s'étendant du Nord au Sud et à l'Est par la frontière franco-allemande. Les horizons disponibles sont restitué avec une correspondance au lexique RGF comme ci-dessous :

code GeORG	code RGF + commentaires
Blg	Base Plio-Pléistocène - Base des alluvions anciennes rhénanes (p1Sa)
Bff	Base du Rupélien = Base marnes à foraminifères passe latéralement aux conglomérats de Rott – Top couche de Pechelbronn/Top zone salifère supérieure (g1PsE/g1PsBR)
Bt	Base Tertiaire Base du groupe de transition éocène de Bouxwiller-Daubrée Base du Lutétien (e5BC)
Bjo	Sommet Oxfordien marneux moyens (j5b) Base Oxfordien Supérieur/Sommet des formations marneuses Base du Rauracien (j5c)
Thr	Toit de la Grande Oolithe (toit du j2b)
Bjm	Base Dogger Toit de la formation de Schillerdorf = Toit l4b-c Base de l'Aalénien
Bju	Base Lias Calcaires à marnes de Hochfelden Base des marnes à calcaires gryphées inférieurs l1-2 (HET)
Bku	Base Keuper Base de la dolomie inférieure t6a1 (LEI)
Bmu	Base Muschelkalk Toit de l'Argile-limite t2AL
Btr	Base du Trias
Tkr	Toit du socle bas de la série h5 (Phanérozoïque Paléozoïque Carbonifère Carbonifère supérieur Stéphanién)
Sd	Dôme de sel - bassin potassique g1PsN et e7-g1Pm

Tableau 10 : Correspondance des codes GeORG et des codes RGF.

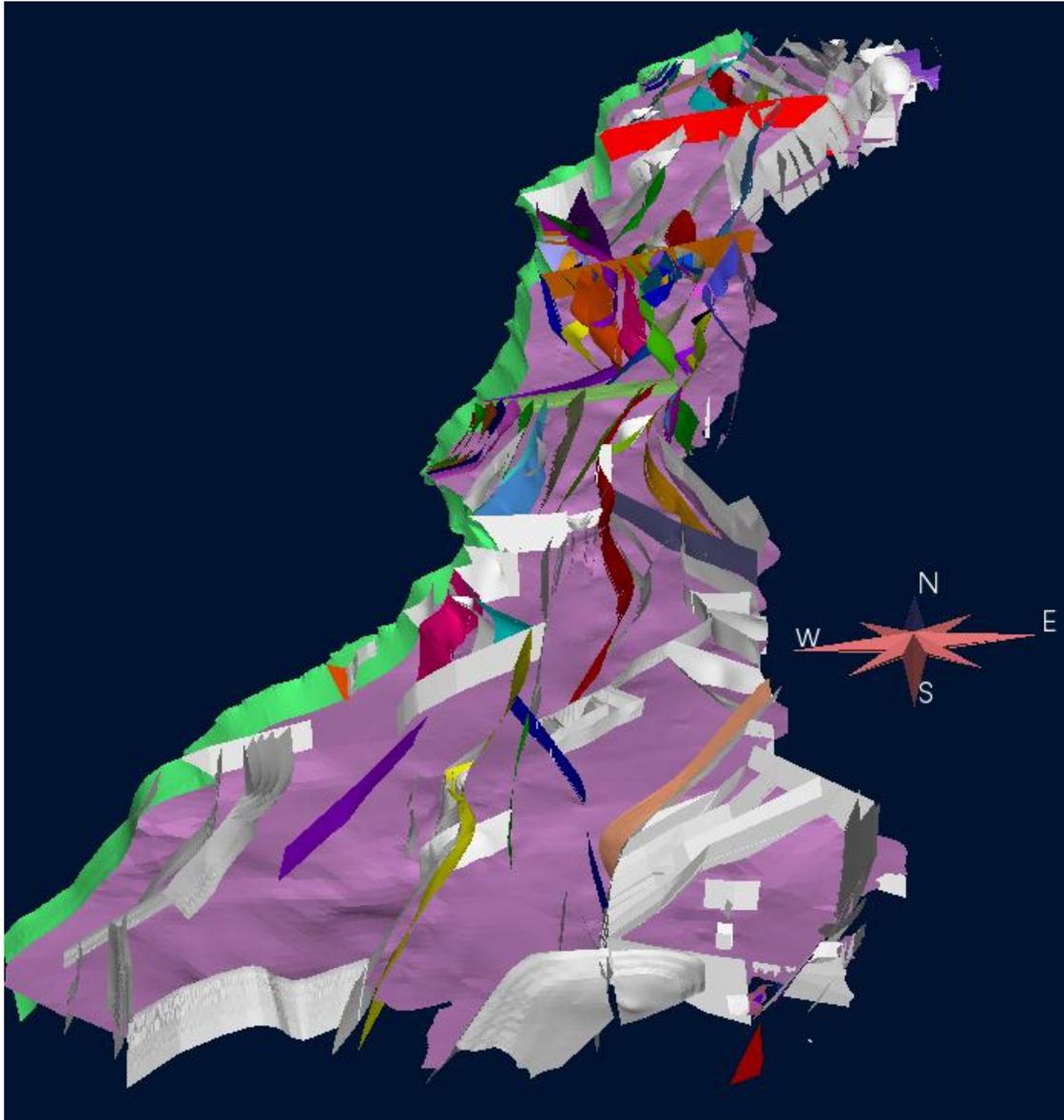


Figure 79 : Réseau de failles et horizons du Fossé-Rhénan issu du projet GeORG au format Gocad (seule la base du Trias est représentée).

- des coupes interprétées issues des thèses d'Étienne Skrzypek (2011) et d'Anne-Sophie Tabaud (2012).

On s'inspirera de quelques coupes conceptuelles pour construire une géométrie géologiquement réaliste des différentes unités (Figure 80, Figure 81, Figure 82). On s'appuie sur ces coupes pour respecter les relations, la structuration et l'organisation des différentes unités.

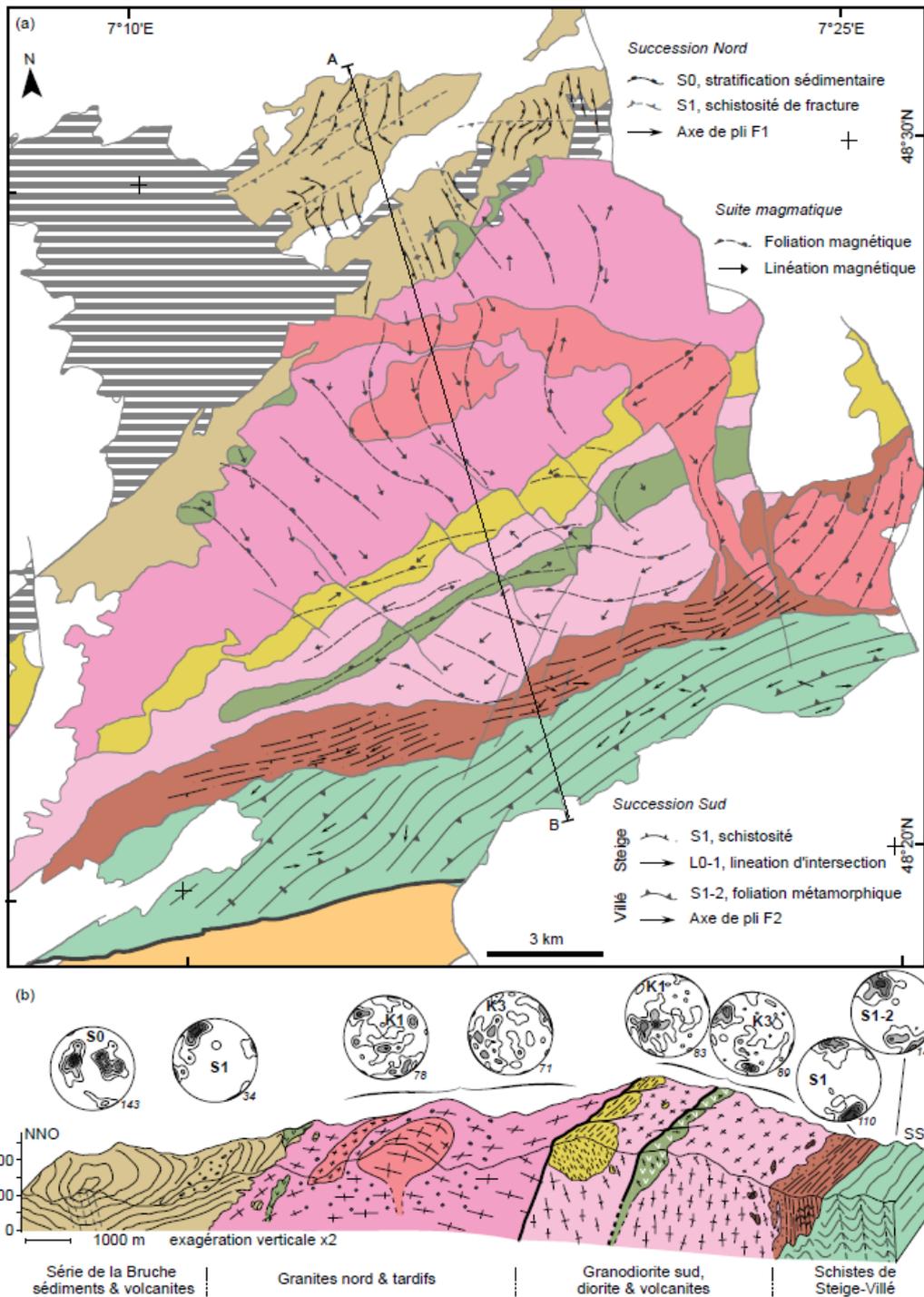


Figure 80 : Coupe NNW-SSE dans les Vosges du Nord, tirée de la thèse É. Skrzypek (2011).

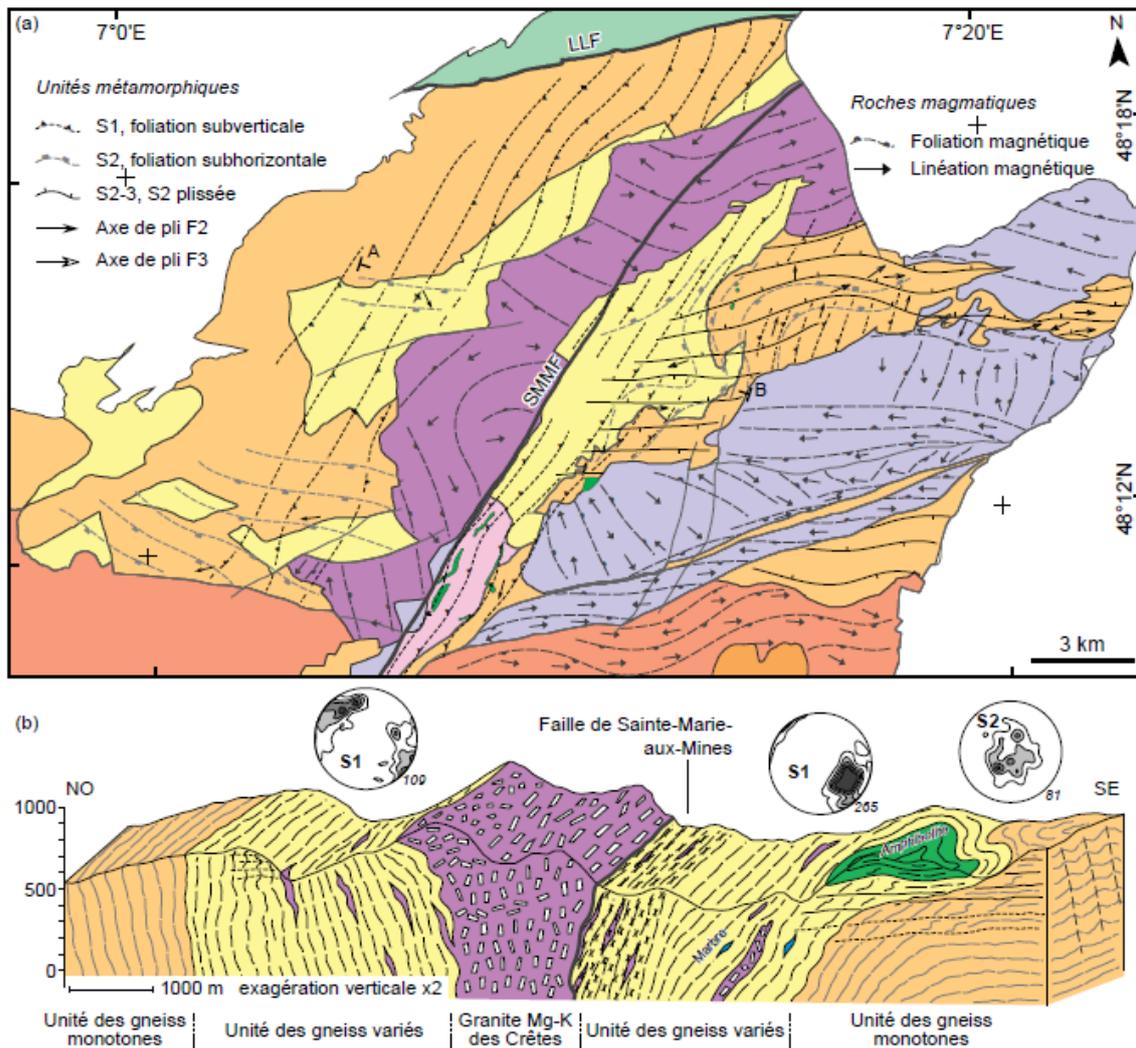


Figure 8. Structure des unités métamorphiques des Vosges Centrales. (a) Carte montrant l'orientation des structures planaires et linéaires majeures (Flèche longue=plongement faible, flèche courte=plongement important). (b) Coupe schématique à travers le socle métamorphique des Vosges Centrales. Les projections stéréographiques (Schmidt, hémisphère inférieur) montrent l'orientation des structures décrites dans le texte (nombre de mesures donné en italique; K1=linéation magnétique, K3=pôle de la foliation magnétique). Lithologies identiques à celles de la Fig. 2. Les structures dans les leucogranites sont d'après Kratinová *et al.* (2007).

Figure 81 : Coupe NNW-SSE dans les Vosges du Nord, tirée de la thèse É. Skrzypek (2011).

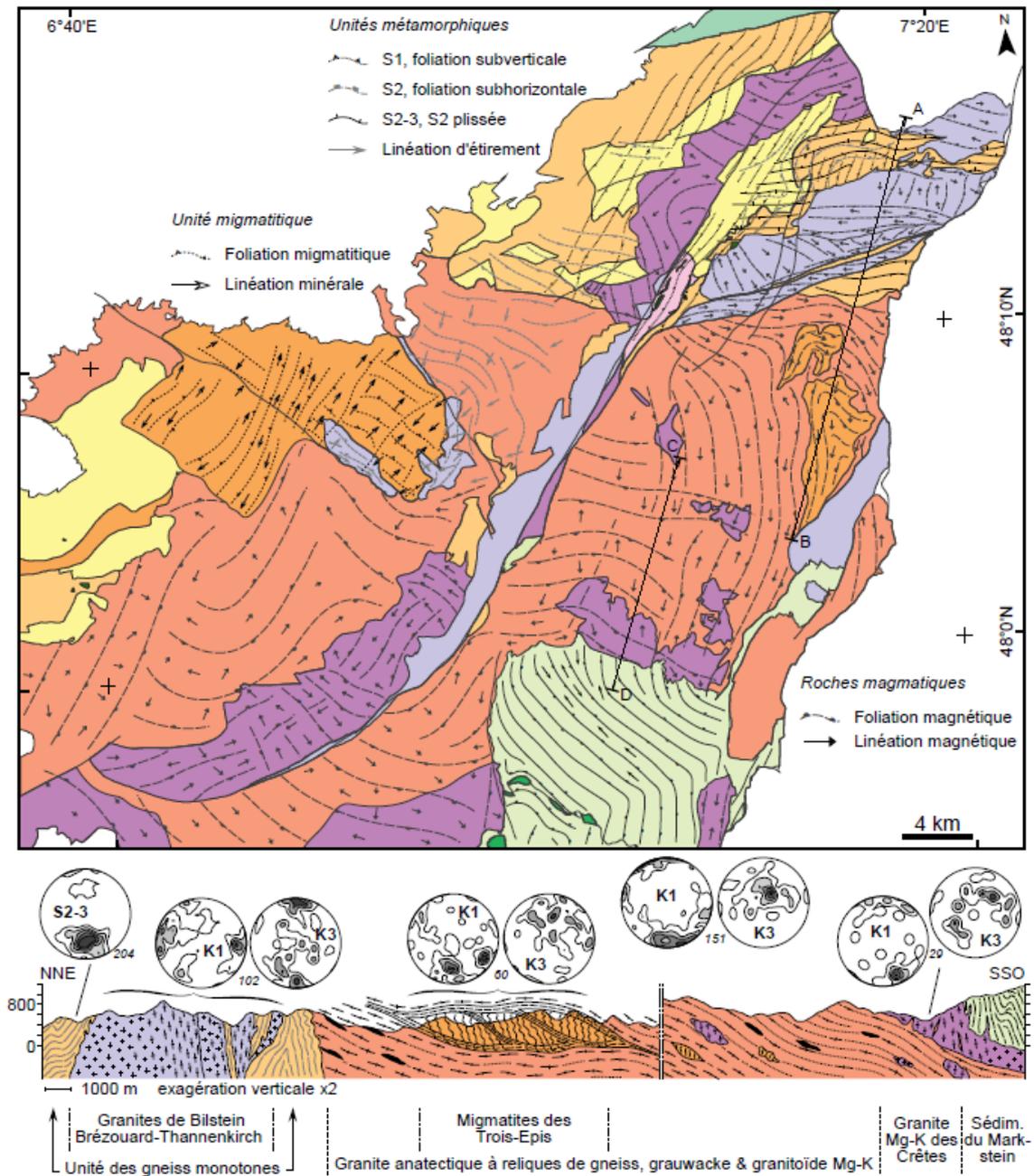


Figure 10. Structure des Vosges Centrales. (a) Carte montrant l'orientation des structures planaires et linéaires majeures (Flèche longue=plongement faible, flèche courte=plongement important). (b) Coupe schématique à travers le domaine anatectique E. Les projections stéréographiques (Schmidt, hémisphère inférieur) montrent l'orientation des structures décrites dans le texte (nombre de mesures donné en italique; K1=linéation magnétique, K3=pôle de la foliation magnétique). Lithologies identiques à celles de la Fig. 2. Les structures sont d'après Kratinová *et al.* (2007) dans les leucogranites, d'après Rey (1992) dans le domaine anatectique ouest, d'après Blumenfeld (1986) dans l'unité migmatitique ouest, d'après Kratinová *et al.* (2012) dans le granite des Vosges Centrales est, et d'après Schulmann *et al.* (2009a) dans les migmatites des Trois-Epis.

Figure 82 : Coupe N-S dans les Vosges du Centre, tirée de la thèse É. Skrzypek (2011).

- Données structurales ASM – Foliations métamorphiques – Foliations magmatiques – schistosité.

On dispose de données d'ASM sur le granite des crêtes, le granite fondamental, sur les gneiss migmatitiques (Figure 83) (Tabaud, 2012 ; Edel *et al.*, 2012).

Ces données reflètent l'anisotropie acquise lors de la mise en place et la déformation liées aux différents épisodes magmatiques et anatectiques. Ces données fournissent donc des informations sur la géométrie des corps magmatiques au moins en sub-surface, leur extrapolation en profondeur reste toujours problématique. On dispose également de données classiquement acquises sur le terrain : schistosités et foliations métamorphiques ;

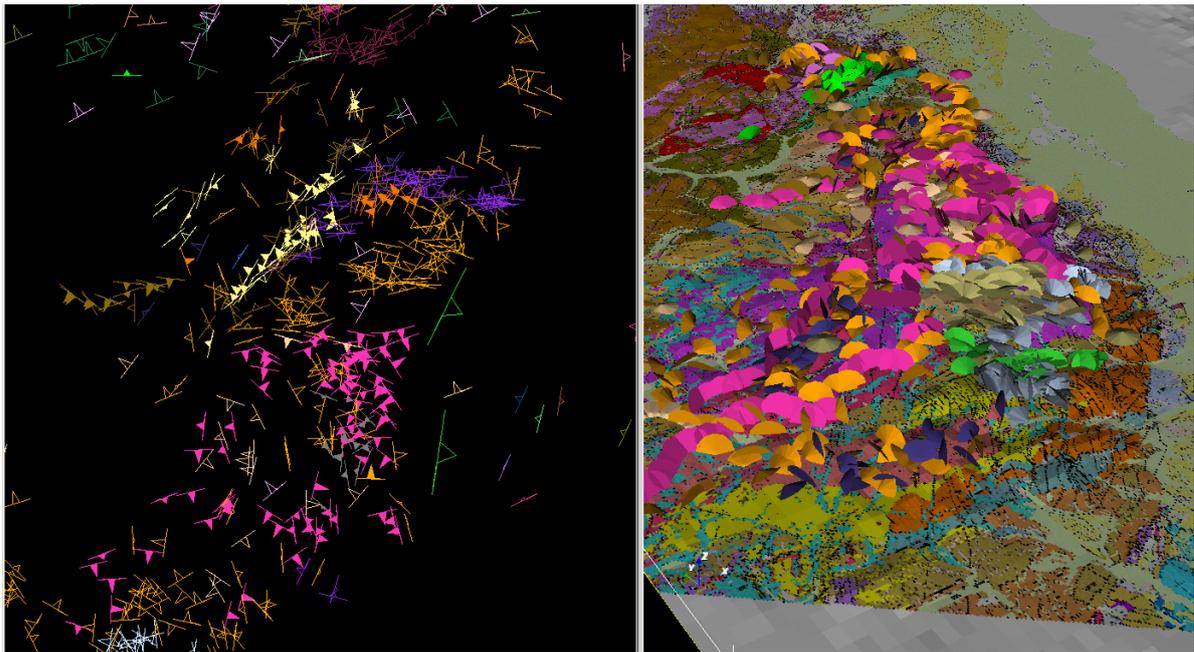


Figure 83 : Répartition des données structurales et anisotropie de susceptibilité magnétique.

- des données géophysique : des données gravimétrique ont été exploitée pour comparer l'effet gravimétrique du modèle géologique retenu à l'anomalie gravimétrique observée. Une partie de ces données ont été acquises dans le cadre de ce projet pour palier a un manque d'information dans le sud du massif des Vosges. Ces levés gravimétriques ont ensuite été traités en anomalie de Bouguer et réinterprétée en coupes gravimétrique 2D. Ce travail est développé dans le § 7.2 de ce rapport des coupes issues de l'interprétation gravimétrique 2D. Le résultat de l'inversion gravimétrique est quant a lui décrit plus loin.

6.3.3. Méthodologie

La méthode de modélisation implémentée dans 3D Geomodeller construit chaque horizon à l'aide d'une fonction d'interpolation, cokrigage d'un champ de potentiel et de ses dérivées (Lajaunie *et al.*, 1997) qui prend en compte simultanément :

- les points de passage connus de l'horizon ;
- les données d'orientation générale des structures (gradients) ;
- la présence de discontinuités (failles).

Un modèle géologique est constitué par assemblage des différents horizons en fonction de leur chronologie et relations géologiques. Les données de cette chronologie et des relations entre les différents horizons, érosion, dépôt, intrusion (Calcagno *et al.*, 2008) permettent de construire un modèle 3D de la distribution des formations géologiques, c'est-à-dire une fonction qui à tout point de l'espace associe une formation. C'est l'exploitation de cette fonction qui permet différentes représentations visuelles du modèle : extractions de cartes, coupes prévisionnelles, visualisations 3D, isobathes..., simulations. Ce modèle est utilisé comme modèle à priori pour effectuer des inversions gravimétriques (Guillen *et al.*, 2008).

La modélisation comprend différentes phases :

- définition du cadre géologique conceptuel et des objets à modéliser ;
- définition de l'architecture du modèle (pile géologique) ;
- compilation des données disponibles pour la construction du modèle ;
- codage des données dans un format approprié à leur traitement ;
- construction du modèle structural : réseau de failles, hiérarchisation ;
- construction des horizons/ ou unités litho-tectoniques basée sur le réseau de failles ;
- la construction des horizons se fait selon un ordre logique par rapport à la définition de la pile : les horizons érosifs ou intrusifs du plus récent au plus ancien, puis les horizons « Onlap » des plus anciens au plus récents ;
- apport de l'inversion gravimétrique au processus de validation ;
- la restitution du modèle – contrôles et validation par le /les géologues experts de la géologie régionale.

6.3.4. Le modèle

Le modèle est constitué par l'assemblage de 22 unités différentes listées dans la pile géologique (Figure 84). On modélise les unités érodantes/intrusives dans un ordre chronologique inverse (les plus jeunes en premier) de telle sorte que leur acceptation /validation ne puisse être remise en cause par la modélisation des autres unités.

a) Le Socle Vosgien

Les discontinuités principales qui architecturent la chaîne sont :

- la Faille de Lalaye-Lubine (LLF) qui sépare le secteur des Vosges du Nord (zone des racines de la chaîne – Schulmann *et al.*, 2009b) et des Vosges centrales, juxtaposant deux blocs aux histoires tectono-métamorphiques bien différentes ;
- la Zone Médiane, zone ductile de transfert entre les granites nord et les granodiorites originellement plus profondes, au Sud de cette zone. Dans le modèle, la Zone médiane est schématisée par une seule faille au sud des pyroclastites ;
- la Faille de Bilstein, séparant les gneiss monotones et leucogranites au Nord et l'ensemble granite anatectique + migmatites au sud. Cette faille n'est pas indiquée sur tous les documents (par exemple coupe Figure 82) ;
- la Faille de Sainte-Marie-aux-Mines, la plus visible et spectaculaire cartographiquement mais n'ayant pas un rôle si majeur dans la structuration de la chaîne ;
- le système de failles bordières du fossé Rhénan qui forment des héli-graben, faisant affleurer le Sédiments Permien et Triasiques.

Les ensembles géologiques modélisés sont les suivants :

- le Permien et le Trias sont modélisés sur la base des contours géologiques et quelques sondages. Si l'on prend strictement les contours, on se heurte à des problèmes de compatibilité d'échelle avec la topographie choisie pour la modélisation (effets topographique, buttes témoins, ...). La démarche va donc consister à choisir quelques points de contact et azimuth/pendage dont on contrôle la cohérence avec les effets topographiques, et à utiliser uniquement ces points pour générer le modèle. Le modèle est ensuite raffiné par l'insertion de nouveaux points et pendages jusqu'à ce que le contour cartographique dessiné par le modèle soit considéré comme acceptable par rapport au contour de la carte géologique ;
- dans le socle vosgien, les ensembles géologiques ont été distingués sur la base des travaux de Skrzypek (2011) et Tabaud (2012) particulièrement en ce qui concerne les granites ;
- les sédiments Nord dévoniens affleurent au nord de la zone médiane. Ils sont peu déformés et s'enfoncent doucement vers le nord. Aucune base de cette unité n'est visible sur la carte géologique car toujours en contact par faille avec la zone axiale, ou recoupée par les granites. Une profondeur de 1 000 à 1 500 m a été supposée pour leur modélisation ;
- les schistes de Steige-Villé. Aucune base cette unité n'apparaît non plus sur la carte, car affleurant selon une bande limitée au nord par les granodiorites et en contact par faille au sud avec la faille de Lalaye-Lubine. Une profondeur de 3 000 à 4 000 m leur est attribuée avec un approfondissement régulier vers le nord ;
- les sédiments Sud-Viséens. Ils montrent une architecture synclinale au Sud du Massif. L'unité allochtone (sédiments du Markstein) et la partie autochtone ont été modélisées séparément, sur la base des éléments cartographiques ;
- les granites tardifs sont modélisés sur la base des contours géologiques avec une extrapolation en rapport avec leur taille cartographique ;
- les granites nord et les granodiorites sont modélisés sur la base des contours cartographiques et de coupes conceptuelles, s'articulant autour de la zone médiane. (Skrzypek, 2011) ;
- les leucogranites sont modélisés comme des lames subverticales, se rattachant à la faille de Bilstein et de Sainte-Marie-aux-Mines ;
- les granites des Crêtes (Mg-K granites) sont modélisés comme des lames subverticales le long de la faille de Sainte-Marie-aux-Mines, moins pentées ailleurs. Leur extension en profondeur est difficilement estimable car, intrudés par le granite d'anatexie, on les considère comme des méga-enclaves remobilisées à l'intérieur de celui-ci. Le Granite des Ballons qui appartient à cette famille est quant à lui modélisé séparément car il constitue un massif bien individualisé dans le Sud des Vosges ;
- le granite d'Anatexie (appelé granite fondamental dans les anciens temps) est modélisé comme une dalle d'environ 5 km d'épaisseur plongeant vers le sud. La base de cette dalle est inconnue (au sens et doit être « interprétée » si on souhaite la représenter. C'est pourquoi des points de contraintes ont été ajoutés dans différentes coupes, en se basant sur les coupes gravimétriques 2d. Les données ASM sont également utilisées pour contraindre sa géométrie. La Figure 85 illustre la géométrie en forme de dalle plongeante vers le sud d'une énorme masse de granite d'anatexie ;



Figure 84 : Pile géologique du modèle régional.

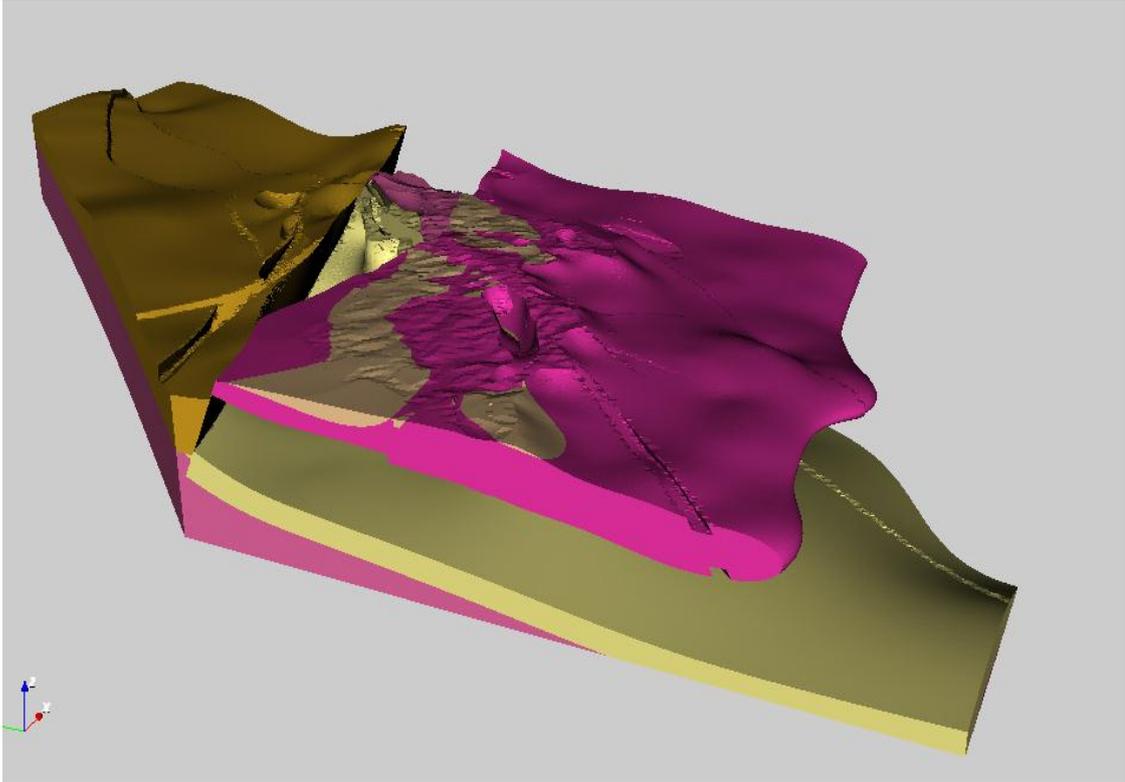


Figure 85 : Dalle de granite d'anatexie (violet) plongeant vers le sud.
Les migmatites (beige) apparaissent au toit de cette dalle.

- la limite entre gneiss monotones et gneiss variés (infrastructure) sur la (Figure 86) illustre la structure de la croûte moyenne telle qu'imaginée par Schulmann *et al.* (2008) et Skrzypek (2011). Cette limite est modélisée en utilisant les données de foliation appartenant aux gneiss variés (gneiss granulitiques) affleurant entre la faille de Bilstein et la faille de Lalaye-Lubine. La base des gneiss monotones est déduite de la limite naturelle gneiss variés/gneiss monotones sur la carte, celle-ci est également contrainte par des coupes interprétées la contraignant à s'aplatir en profondeur avec un léger pendage vers le sud d'une dizaine de degrés. La forme du dôme gneissique modélisée (Figure 87) est donc la résultante d'une partie interprétée en profondeur et des données de foliations de surface. La base des gneiss variés est « inaccessible » depuis la carte géologique. Elle a donc été modélisée comme subparallèle à la base des gneiss variés (incorporée dans la même série).

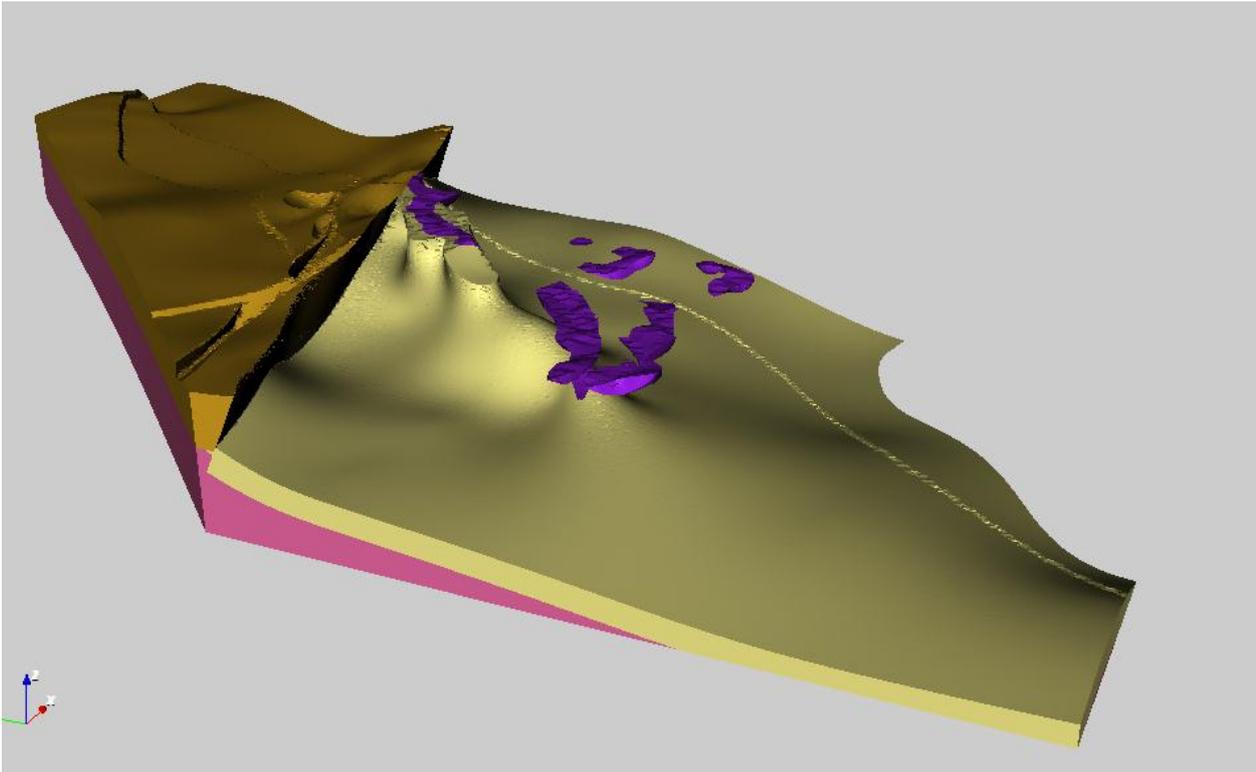


Figure 86 : Illustration de la géométrie en dôme gneissique des gneiss variés (infrastructure).

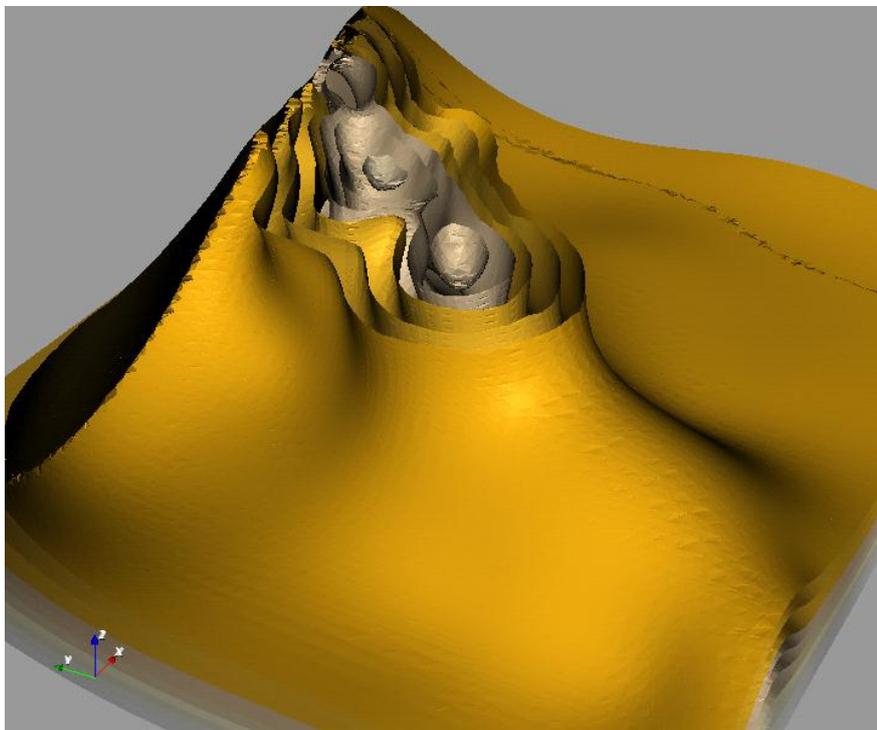


Figure 87 : Modélisation des trajectoires de foliation dans les gneiss variés.
En profondeur, la base des gneiss variés est supposée plongeante vers le sud d'une dizaine de degrés.

Ce sont ces deux derniers aspects qui font l'objet d'attention particulière sur l'inversion gravimétrique.

b) Les unités mésozoïques et tertiaires du Fossé rhénan

À l'échelle du modèle régional, ont été modélisées : la base du Trias et la base du Tertiaire.

Les données sont extraites du modèle structural GeorG, sous formes de surfaces triangulées au format Gocad. Il s'agit de les intégrer au modèle déjà existant afin d'obtenir une représentation uniforme. La démarche consiste à échantillonner les ensembles de points issus des surfaces structurales. Et à reconstruire le modèle à l'intérieur du logiciel 3DGeomodeller. Il faut également gérer les possibles conflits sur la bordure du Fossé, entre les éléments cartographiques et la faille bordière issue de GeorG ainsi que les « raccords » avec la couverture présente sur les Vosges. Les surfaces sont donc importées en tant qu'ensembles de points et ré-échantillonnées le long d'une vingtaine de coupes sériées (afin d'avoir une version « allégée » des points de contraintes tout en respectant le modèle structural initial). Ils sont intégrés aux points de la carte géologique dans la partie Vosgienne (Figure 88) pour aboutir à une représentation continue du Tertiaire et Mésozoïque sur toute la zone (Figure 89). Cette démarche pose cependant un problème non résolu : Comment continuer à faire vivre et mettre à jour le modèle avec de nouvelles données si on n'a pas les données de base initiale, ni hypothèses et choix qui ont guidé l'interprétation du réseau de failles.

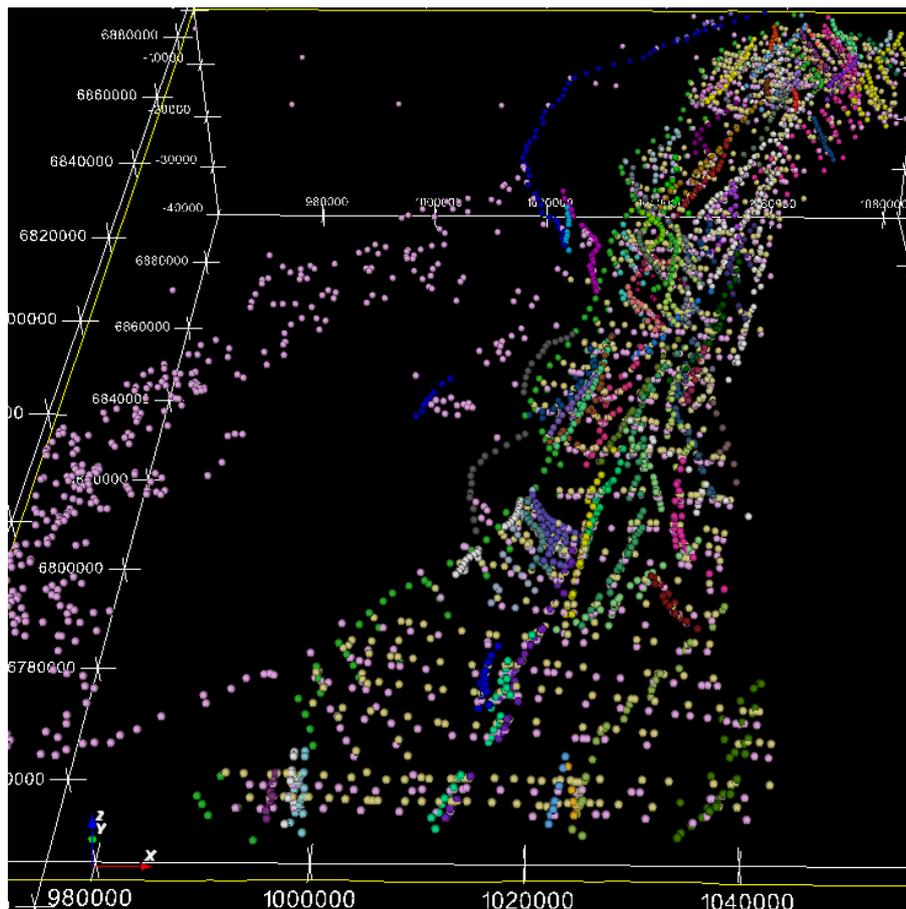


Figure 88 : Ensemble des points de données utilisés pour le modèle structural du Trias et Tertiaire du modèle régional.

Rose : Trias ; Beige : Tertiaire ; Autres couleurs : failles.

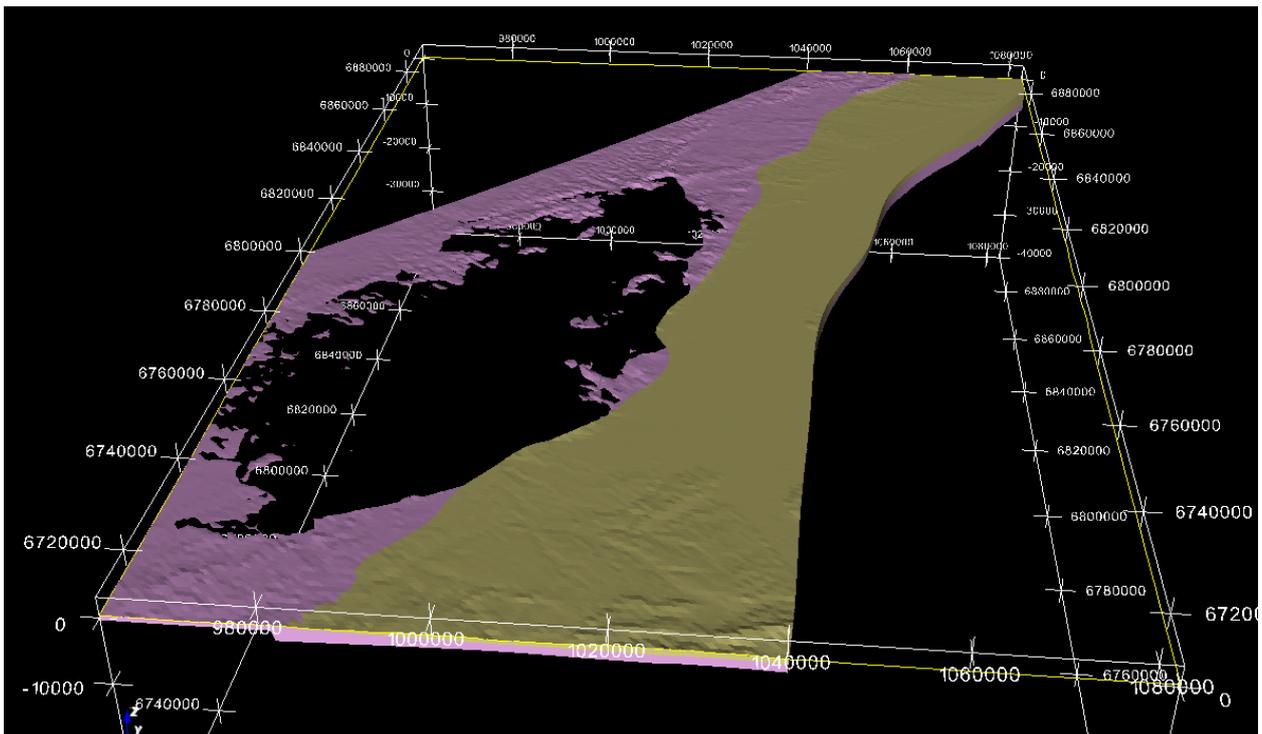
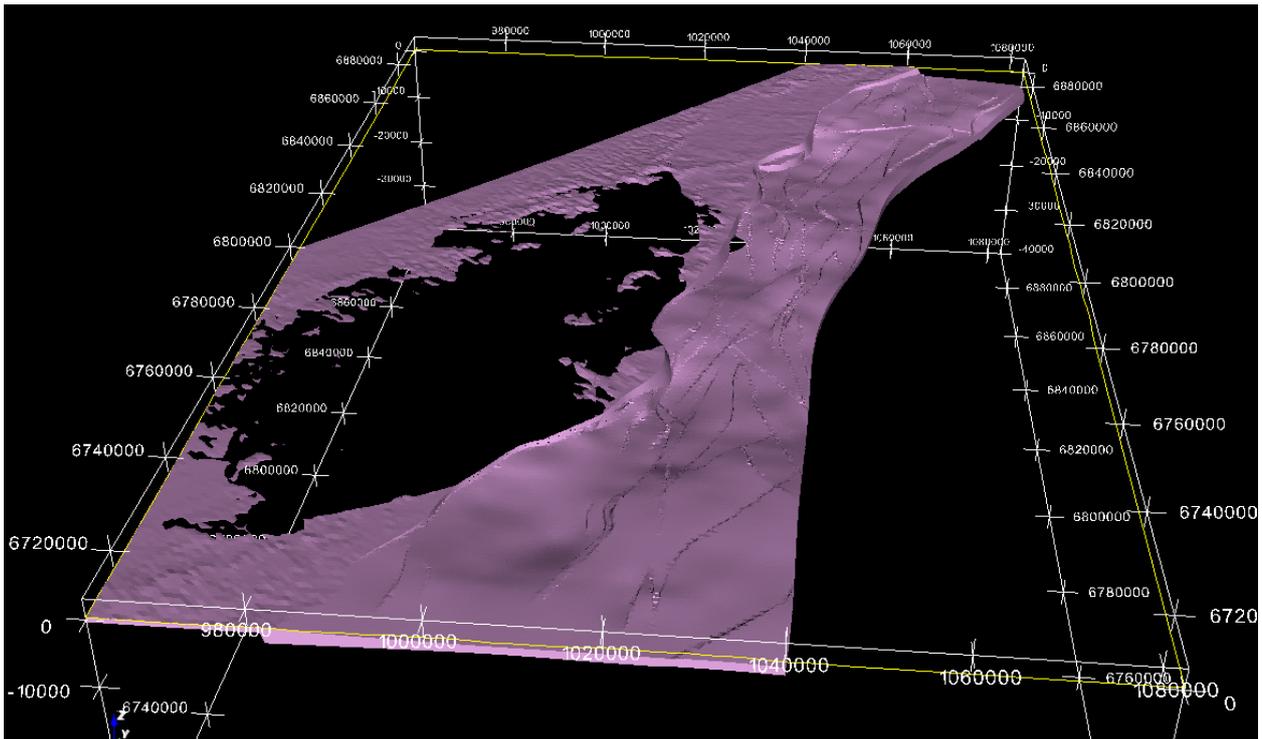


Figure 89 : Modèle régional Mésozoïque (a) et Tertiaire (b).

6.3.5. L'inversion gravimétrique du modèle : une falsification nécessaire !

a) Introduction

Le modèle précédemment obtenu découle directement du modèle conceptuel définie au départ de la modélisation. Mais il existe une infinité de modèle que l'on peut construire à partir des données de surfaces même associées aux quelques données ponctuelles en profondeur, des forages et des coupes sismiques.

Dans l'exercice de la modélisation, l'interprétation que l'utilisateur fait de la zone d'étude est primordiale. Une fois qu'une cohérence géologique et géométrique est atteinte pour le modèle 3D, l'enjeu est de vérifier si ce modèle construit est un modèle que l'on peut invalider en le confrontant à d'autres informations *a priori* qui n'ont pas été utilisées dans la modélisation 3D. Si cette confrontation falsifie le modèle il faudra le reprendre, si la confrontation n'invalide pas le modèle on pourra le considéré comme valide jusqu'à ce que de nouvelles informations le falsifie.

Ces informations *a priori* non utilisées par le processus de modélisation 3D de la géologie sont en général des données de géophysique. Ici nous avons accès aux données de sismique et de gravimétrie. Comme les coupes sismiques ont été utilisées dans le processus de modélisation elles ne peuvent plus être utilisées pour invalider le modèle car par définition l'information *a priori* qu'elles contiennent sont déjà dans le modèle. Il nous reste les données de gravimétrie qui n'ont pas étaient utilisées dans la modélisation (si ce n'est de façon ponctuelle pour l'ajout de points de contrainte sur les Granites d'anatexie).

Nous allons donc comparer la réponse gravimétrique du modèle géologique au champ gravimétrique mesuré. Pour cela, nous avons besoin de la répartition spatiale des unités géologiques, des lois statistiques de la masse volumique de chacune de ces unités et du champ gravimétrique que nous estimons être en relation avec le modèle, que nous appellerons la résiduelle du champ gravimétrique :

- le modèle fournit la répartition des unités géologiques ;
- un échantillonnage des densités différentes unités géologiques permet de fournir des hypothèses sur les lois de distributions des densités ;
- le traitement du champ gravimétrique doit nous fournir une résiduelle pour l'étape d'invalidation/validation (falsification).

b) Construction du modèle gravimétrique

Les valeurs ci-dessous sont les moyennes de densité et écarts types retenues pour l'inversion, ces valeurs proviennent de la littérature (cf. Tableau 14, § 7.2), et de valeurs de densité utilisées en Bohême, en effet nous n'avons pas eu pour ce projet la possibilité d'acquérir les densités sur le terrain. Le détail des valeurs se trouve sur la Figure 90 ci-dessous. Pour l'inversion, nous choisirons comme loi statistique des densités pour chaque unité une loi Gaussienne avec pour moyenne la valeur de la figure et pour écart-type la valeur de 0,035.

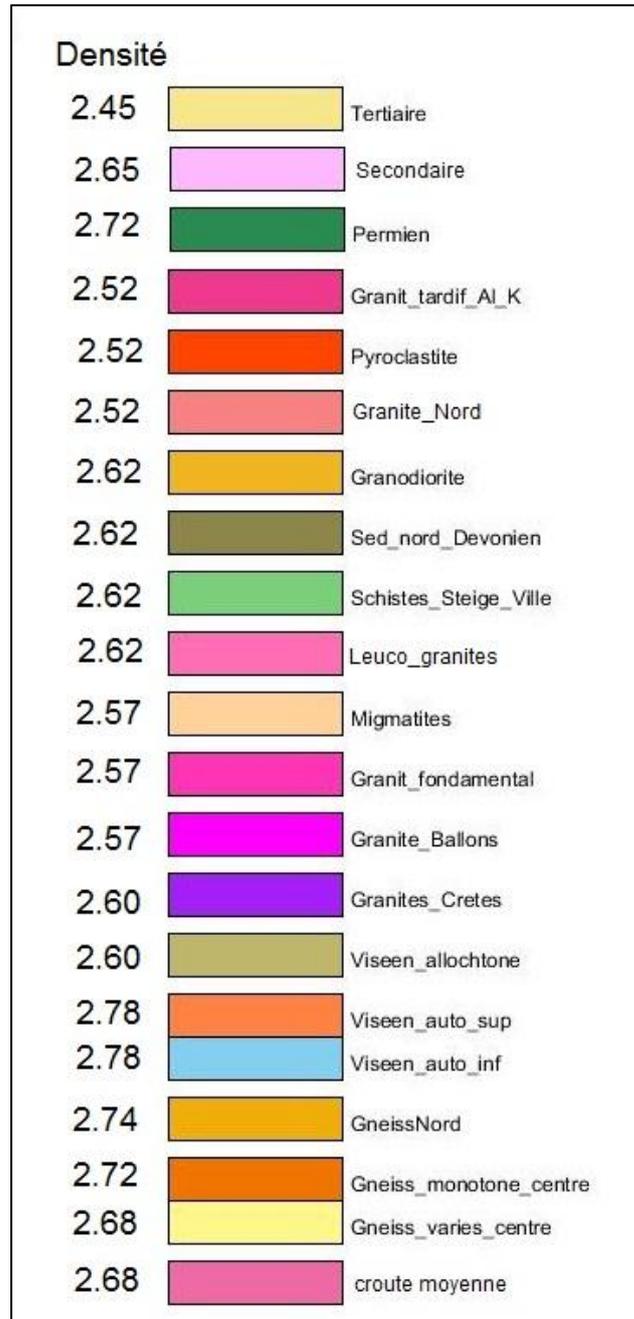


Figure 90 : Pile géologique du modèle régional avec les densités associées.

c) Les données gravimétriques

Les données gravimétriques proviennent du BGI (Banque de données Gravimétrique Internationale) (Figure 91).

Pour pouvoir réaliser les traitements de calcul direct et le problème inverse facilement nous avons besoin d'une grille régulière du champ gravimétrique et de ces dérivés (carte résiduelle, ...). Les méthodes géostatistiques (krigeage) nous permettent d'avoir une telle grille.

L'anomalie de Bouguer ainsi obtenue est représentée sur la Figure 91 à gauche. Pour tenir compte des objets géologiques qui ne sont pas modélisés (en effet, le modèle géologique a

priori va jusqu'à 20 kms), nous retiendrons comme anomalie gravimétrique régionale l'effet du Moho (Rousset *et al.*, 1993). Cette anomalie de 30 mGal est orientée SO-NE. La résiduelle (Figure 91 à droite) obtenue après soustraction de l'effet du Moho (Figure 91 au centre) sera supposée représenter les variations de densité à l'intérieur de notre modèle.

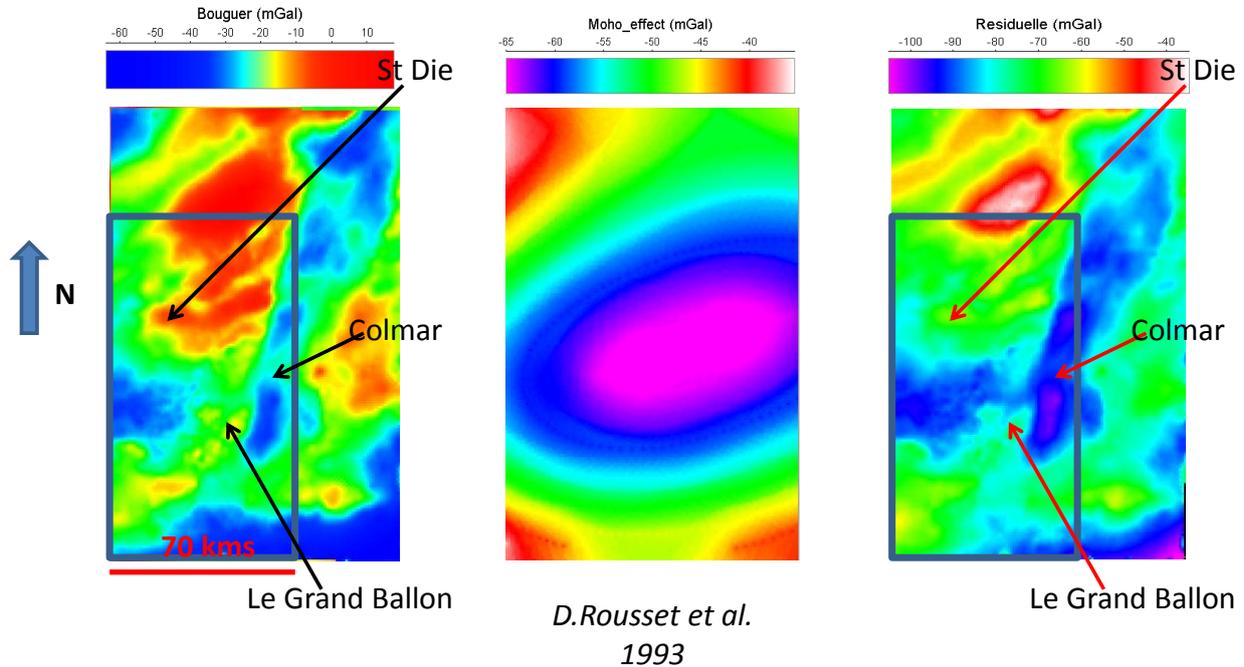


Figure 91 : Anomalie gravimétrique de Bouguer ; Effet du Moho ; Résiduelle = Bouguer – Moho.

d) Calcul de la gravimétrie du modèle 3D

Avant de faire l'inversion gravimétrique, il est utile de passer par une étape intermédiaire qui est le calcul de la réponse gravimétrique du modèle grâce à aux données de densité par formation. Ce calcul a pour but d'obtenir une carte qui donne les valeurs de gravimétrie en surface du modèle et permet d'être comparée au champ gravimétrique de l'anomalie résiduelle. Pour cette étape, il nous faut les densités des formations modélisées sans prendre en compte l'écart type des valeurs de densité par formation.

Lors du calcul de la réponse gravimétrique du modèle, le bloc 3D est maillé donc divisé en voxels ou cellules. Le maillage hexaédrique est composé de $nX * nY * nZ$ cellules avec $nX = 80$, $nY = 140$, $nZ = 100$, c'est-à-dire : $dX = 900$ m, $dY = 980$ m, $dZ = 130$ m.

À chaque voxel est attribuée une formation avec la valeur de densité précédemment rentrée dans les propriétés physiques.

Le résultat du calcul gravimétrique du modèle construit est montré sur la Figure 92 avec de gauche à droite : la carte résiduelle, la carte gravimétrique du modèle calculée.

Ce calcul permet de vérifier au premier ordre - à une constante près - si le modèle 3D géologique est un modèle potentiellement plausible et dans ce cas de passer à l'étape d'inversion. Le résultat montre que les tendances générales sont respectées, et donc que l'on peut partir de ce modèle pour réaliser l'inversion.

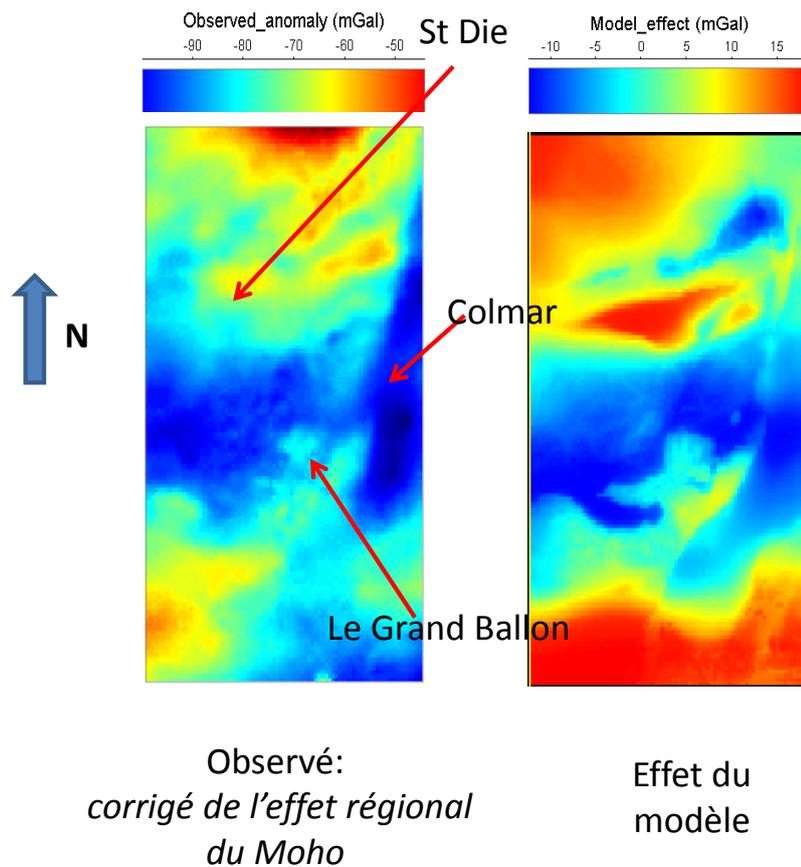


Figure 92 : Anomalie de Bouguer résiduelle (corrigée du Moho) ; Anomalie calculée à partir du modèle.

e) Inversion de la gravimétrie à partir du modèle 3D

L'inversion gravimétrique permet de vérifier si le modèle 3D construit peut entièrement expliquer la gravimétrie enregistrée sur la zone d'étude, avec les valeurs de densités choisies a priori.

Pour cette étape, nous considérerons que la géométrie du modèle 3D construit est proche de la réalité, et que seuls les paramètres pétrophysiques pourront varier durant le calcul de l'inversion. La différence avec l'étape précédente, est la prise en compte de l'écart type sur les valeurs de densités pour chaque formation.

Lors du calcul d'inversion, le bloc 3D est à nouveau maillé, avec la même résolution de maillage que précédemment. À chaque formation, est associée une valeur de densité moyenne et un écart type liés à la variabilité de densité de cette formation. Cette variabilité est fonction des différentes densités des étages contenus dans chaque formation, du changement de faciès au sein des différents étages de la formation, de ses propriétés pétrophysiques ainsi qu'aux erreurs sur la mesure de densité. Ce qui veut dire que chaque formation va posséder une loi statistique de densité, nous avons ici choisi une loi Gaussienne.

f) Résultat de l'inversion de la gravimétrie à partir du modèle 3D

Lors du calcul d'inversion, la géométrie du modèle ne change pas, seules les valeurs de densité s'ajustent pour chaque formation selon leur loi statistique.

Ici, le nombre d'itérations est de 50 000.000, c'est-à-dire que chaque cellule va être visitée en moyenne plus de 44 fois. Au cours de l'inversion sont conservées les solutions qui fournissent un écart aux données acceptables, ici cet écart acceptable est de 0,5 mGal (Figure 93).

Le résultat du processus d'inversion est donc donné sous forme de probabilités statistiques de ses solutions. La fiabilité des statistiques augmente avec le nombre d'itérations.

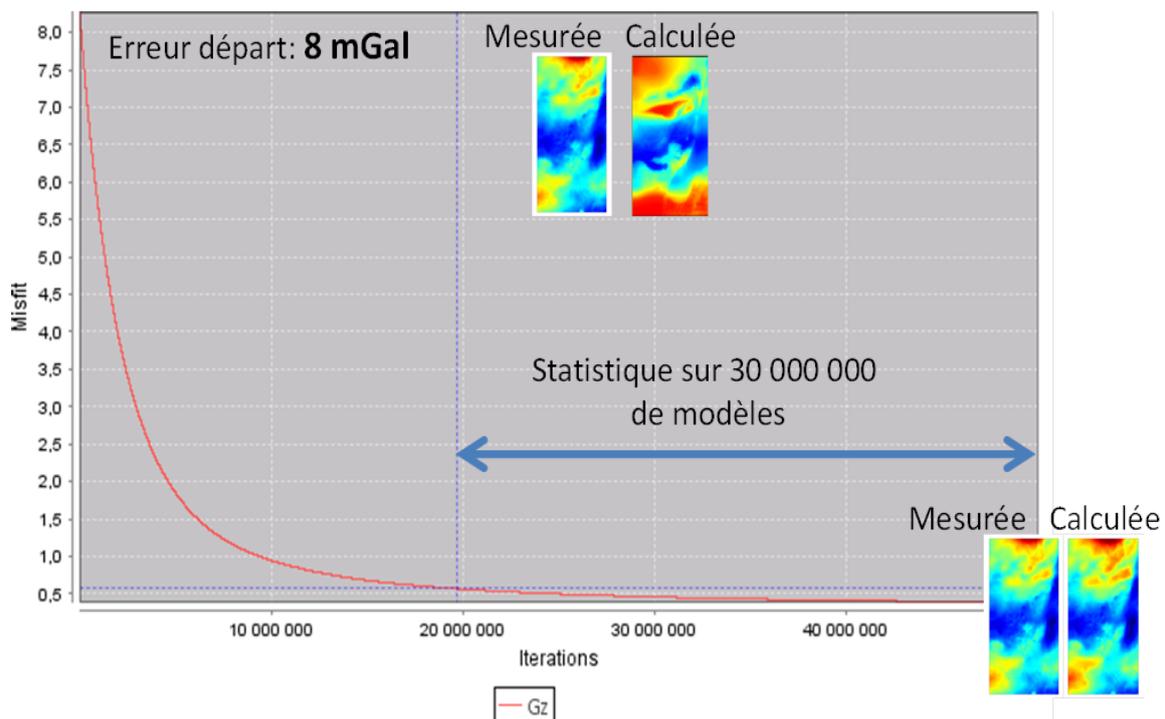


Figure 93 : Illustration de la convergence de l'inversion gravimétrique.
En ordonnée : écart à l'anomalie observée, en abscisse nombre d'itérations.

On voit clairement sur les cartes d'anomalie mesurée et calculée en fin d'inversion (en bas à droite de la Figure 93 ci-dessus) que le modèle renseigné avec les informations *a priori* sur les densités est un modèle possible. En effet, il explique l'ensemble des anomalies gravimétriques. Ce qui prouve que le modèle géométrique construit est réaliste. Il n'est pas le seul modèle possible, mais il est un des modèles 3D possibles, car il explique **avec les densités sélectionnées sur les unités géologiques** le champ gravimétrique.

g) Discussion sur les résultats de densité (moyenne et écart type)

Pour aller plus loin, on peut analyser les histogrammes de densité par formation du modèle, donné par le calcul de l'inversion. Les histogrammes qui suivent donnent la probabilité du contraste de densité en fonction du contraste. C'est à dire la probabilité d'avoir telle ou telle valeur de contraste de densité. En vert et rouge ont été rajoutés sur chaque histogramme, la valeur moyenne du contraste de densité choisi pour la formation, ainsi que l'écart type associé.

- **Pour le granite fondamental**

La densité moyenne du granite fondamental a été estimée à 2,57 soit un contraste de -0,1, car nous avons choisi une densité de référence de 2,67. L'écart type était a priori de 0,035 et a posteriori nous avons une valeur de 0,027 (Figure 94) Ceci montre qu'a posteriori le granite fondamental peut-être plus homogène que prévu. On a gagné en information grâce à l'inversion de la modélisation.

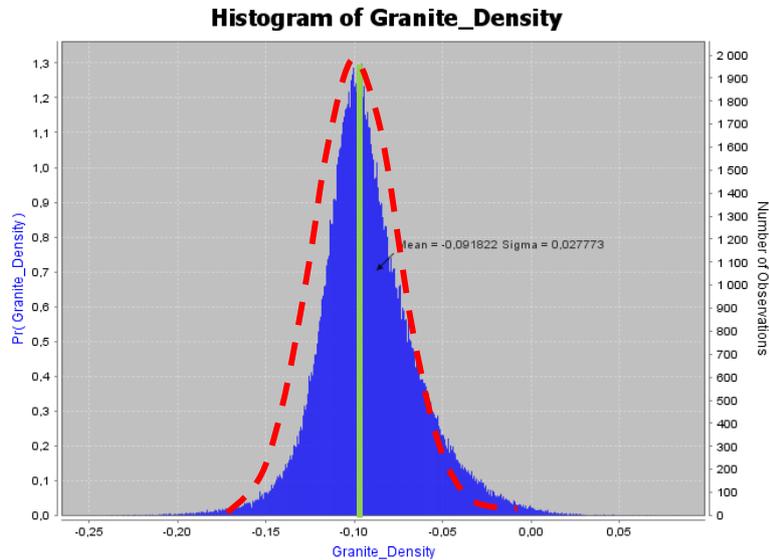


Figure 94 : Histogramme de distribution des densités du granite d'anatexie.
En rouge : loi initiale ; en bleu distribution finale (a posteriori)

- **Pour les gneiss variés**

La densité moyenne des gneiss variés a été estimée à 2,68 soit un contraste de 0,01, car nous avons choisi une densité de référence de 2,67. L'écart type était a priori de 0,035 et a posteriori nous avons une valeur de 0,027 (Figure 95). Ceci montre qu'a posteriori les gneiss variés peuvent être plus homogènes que prévu. On a gagné en information grâce à l'inversion de la modélisation.

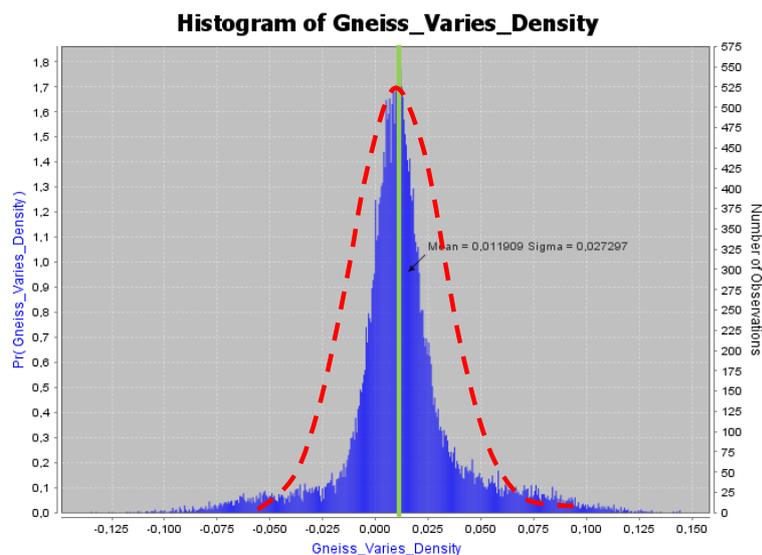


Figure 95 : Histogramme de distribution des densités des gneiss variés.
En rouge : loi initiale ; en bleu distribution finale (a posteriori)

- **Pour les gneiss monotones**

La densité moyenne des gneiss monotones a été estimée à 2,72 soit un contraste de 0,05, car nous avons choisi une densité de référence de 2,67. L'écart type était *a priori* de 0,035 et *a posteriori* nous avons une valeur de 0,03. On voit sur la partie gauche de l'histogramme (Figure 96) que ces gneiss pourraient-être individualisés en deux familles.

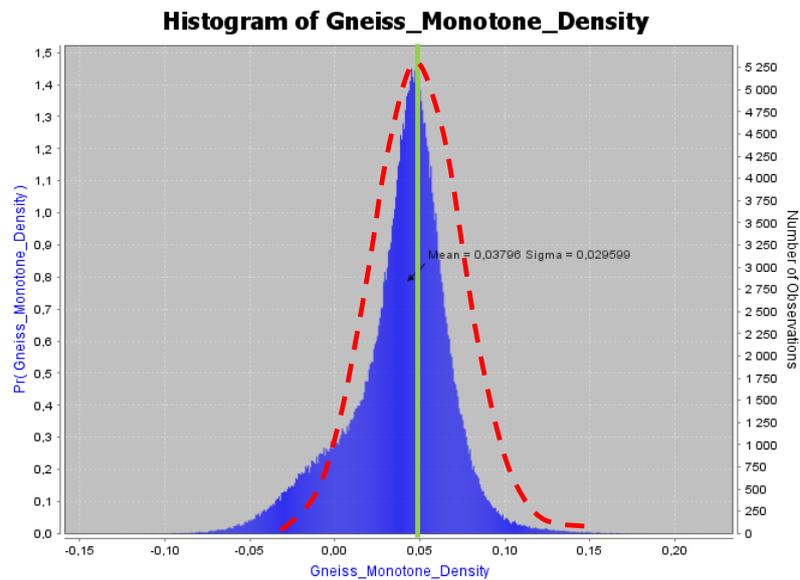


Figure 96 : Histogramme de distribution des densités des gneiss monotones.
En rouge : loi initiale ; en bleu distribution finale (*a posteriori*)

- **Pour les gneiss du Nord**

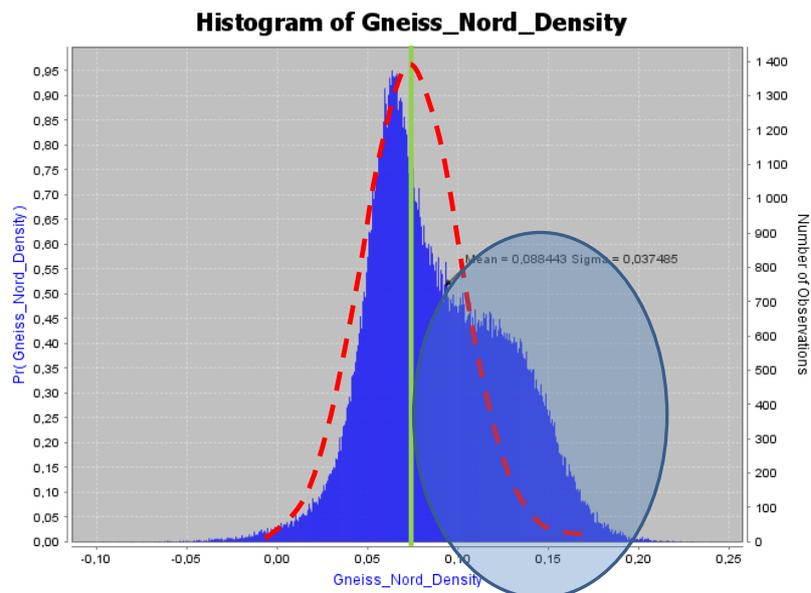


Figure 97 : Histogramme de distribution des densités des gneiss Nord.
En rouge : loi initiale ; en bleu distribution finale (*a posteriori*)

La densité moyenne des gneiss du Nord a été estimée à 2,74 soit un contraste de 0,07, car nous avons choisi une densité de référence de 2,67. *A posteriori*, la densité moyenne est de 2,76. L'écart type était *a priori* de 0,035 et *a posteriori* nous avons une valeur de 0,037. Le fait que l'histogramme *a posteriori* est clairement bimodal montre que ces gneiss devraient être individualisés en deux familles (Figure 97)

Les figures ci-dessous (Figure 98, Figure 99) montrent des vues de la valeur de la densité moyenne après inversion pour les différentes unités de gneiss. La Figure 100 montre la répartition de densité du granite fondamental.

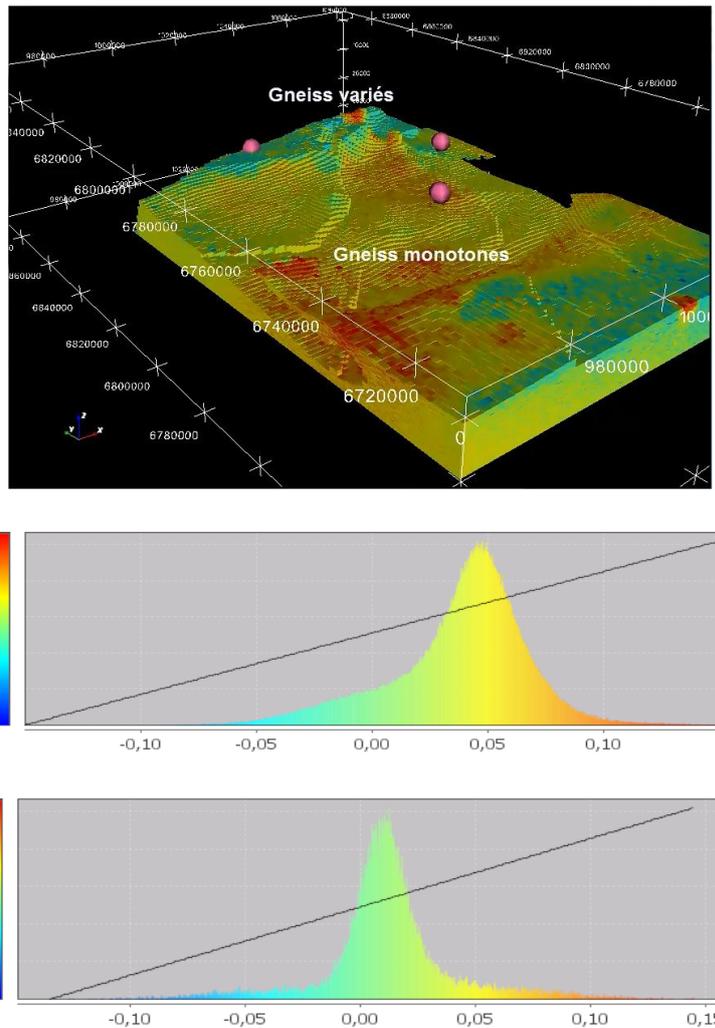


Figure 98 : Modèle de densité gneiss monotones (en haut) + gneiss variés (en bas).

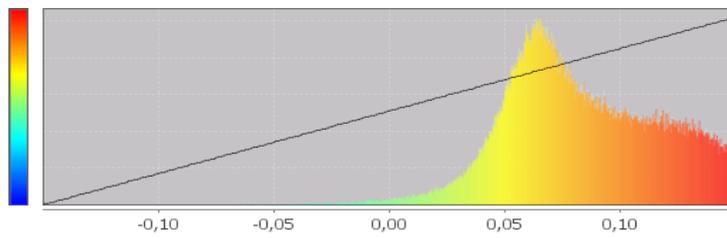
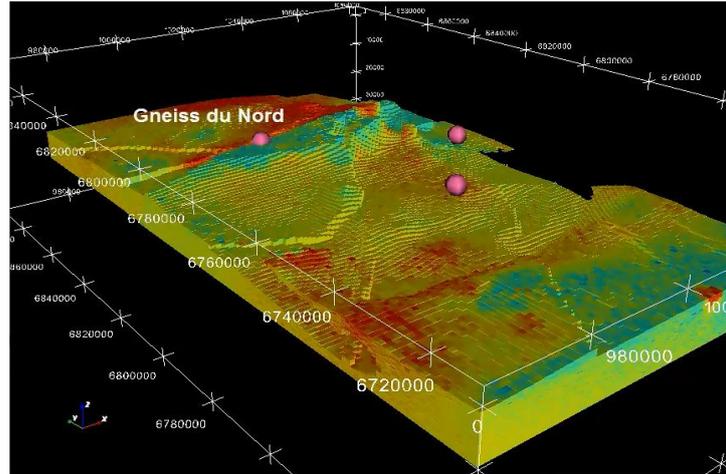


Figure 99 : Modèle de densité gneiss Nord.

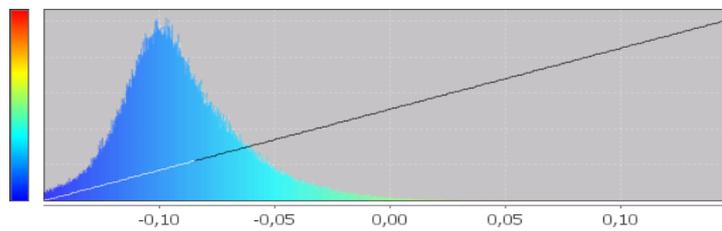
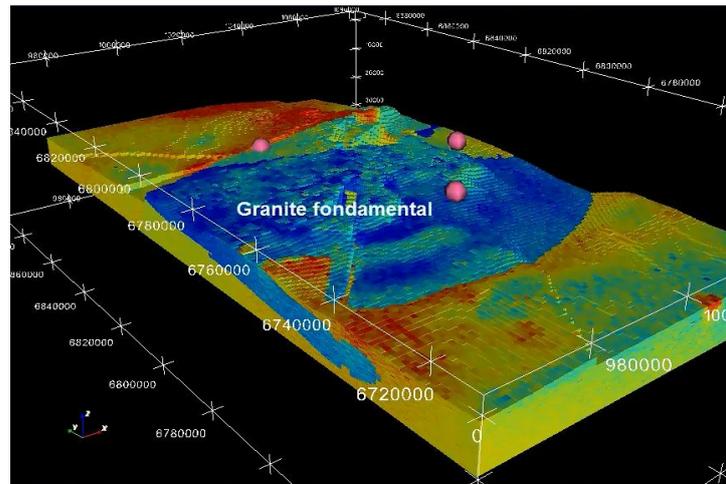


Figure 100 : Modèle de densité granite d'anatexie (ou fondamental).

6.3.6. Conclusion

Le modèle géologique 3D est un modèle possible :

- il prend en compte les observations terrains ;
- il explique le champ gravimétrique mesuré ;
- les densités (granite, gneiss...) sont réalistes ;
- les granites et les gneiss sont statistiquement plus homogènes que supposé *a priori* ;
- les gneiss au nord sont plus denses ;
- les gneiss dans la partie centrale sont plus légers ;
- granites des crêtes plus épais (gneiss plus profond) ;
- les gneiss au sud sont plutôt homogènes, mais sont moins denses dans la partie sud.

Plus généralement, on montre que du point de vue de la distribution des masses telle qu'accessible avec les observations disponibles aujourd'hui le modèle d'architecture de la chaîne proposé est un modèle possible. Ainsi, la possibilité de confronter différentes hypothèses aux données géophysiques fait de la démarche modélisation inversion un outil unique en termes de plus-value scientifique.

6.4. MODÈLE DE SÉLESTAT

Il s'agit de construire un modèle dit « local » du massif des Vosges et Fossé rhénan dans une emprise restreinte par rapport au modèle régional développé ci-dessus.

Ce modèle tend à représenter le plus fidèlement possible l'état de connaissance de ce secteur choisie à l'échelle des données cartographique RGF (1/50 000). Il a pour objectif de fournir un modèle de la géologie 3D d'un secteur dans les premiers kilomètres, afin de pouvoir être utilisé pour des problèmes d'aménagement, risque, hydrogéologie, environnement. Ce type de modèle est l'équivalent 3D des cartes géologiques au 1/ 50 000 et inclue donc la différenciation des dépôts superficiels allochtones.

Il couvre l'emprise suivante (notée « B » sur la Figure 74) : X = 998 600–1 050 400 m, Y = 6 796 000–6 834 200 m, en Lambert-93. Le modèle est bâti sur la même grille de 200 m que le MNT, limité à l'extension de la carte géologique, en Lambert-93.

Ce modèle a été réalisé en deux temps : la modélisation des dépôts superficiels (alluvions, loess et colluvions) avec le logiciel GDM d'une part et la modélisation des formations sous-jacentes avec le logiciel Geomodeller3D d'autre part. À ce dernier, on intègre le modèle des dépôts superficiels pour aboutir au modèle global de la zone. Ces deux étapes sont traitées séparément ci-dessous.

Dans le contexte du démonstrateur, ce modèle sert à la simulation de la propagation des ondes sismiques en provoquant un séisme (virtuellement bien sûr) qui aurait sa source le long de la Faille Rhénane Majeure (cf. § 7.5).

6.4.1. Modélisation des dépôts superficiels allochtones (GDM)

a) Constitution de la base de données et de la pile

Les données géologiques utilisées pour l'élaboration du modèle proviennent des forages validés RGF, des contacts géologiques des formations modélisées extraits des cartes géologiques vectorisées à 1/50 000 (discrétisés en 1 051 points de contact), de la grille MNT au pas de 200 m fournie. Les éventuelles failles n'ont pas été prises en compte. La connaissance locale fait état d'un réseau de failles, au moins dans le Tertiaire, mais nous n'avons pas disposé de fichier de failles syn-quaternaires.

Les forages utilisés sont au nombre de 389, totalisant 1791 passes reconnues. En outre, trente autres forages ont dû être rejetés durant le traitement, car incohérents ou mal localisés (altitude de la tête de puits incohérente avec le MNT).

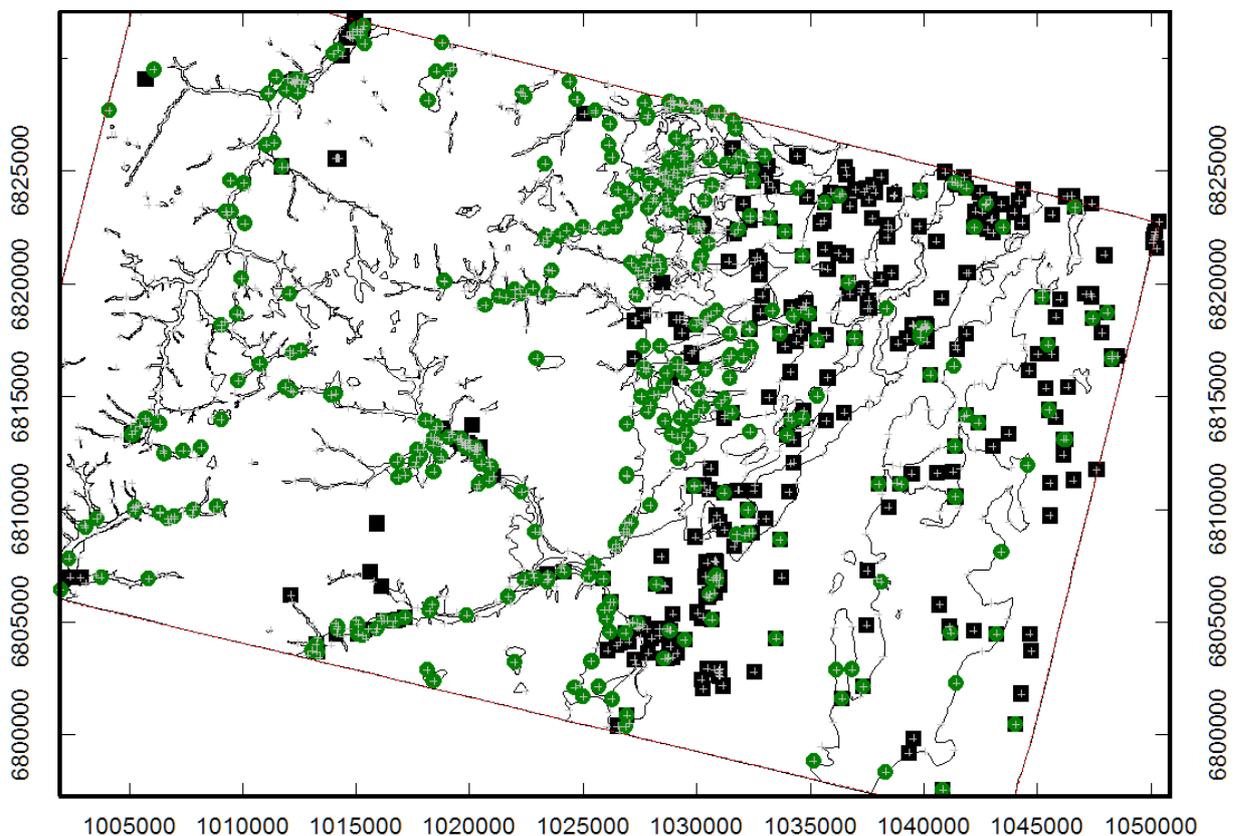


Figure 101 : Emprise et données du modèle local d'alluvions.

en gris les têtes de forages connues, en noir les forages ayant des informations, en vert les points de contrainte ajoutés par l'opérateur, en traits gris les limites de la carte géologique ; en traits rouges la limite de son extension.

Selon son code stratigraphique, à chaque passe est attribuée une formation, parmi celles de la pile exposée dans le tableau 11.

Le tableau 11 présente également les relations d'érosions, qui permettent de lever les indéterminations entre les horizons. En effet, le modèle sera construit en calculant les horizons indépendamment ; il est donc possible que, localement, un horizon passe sous un horizon inférieur (ou plusieurs). Dans ce cas, l'attribution de l'espace entre les deux se fait au bénéfice de la couche supérieure dans le cas d'une relation « érodant », de la couche supérieure dans le cas d'une relation « se déposant ».

Code de la formation	Description	Relations d'érosion
COLL	Colluvions	« érodant »
FMOD	Alluvions modernes (F_{y-z})	« érodant »
LOES	Loëss	« se déposant »
FANC	Alluvions modernes (F_x)	« érodant »
SOCL	Soubassement (tertiaire & infra)	« érodant »

Tableau 11 : Pile du modèle de formations superficielles alloctones.

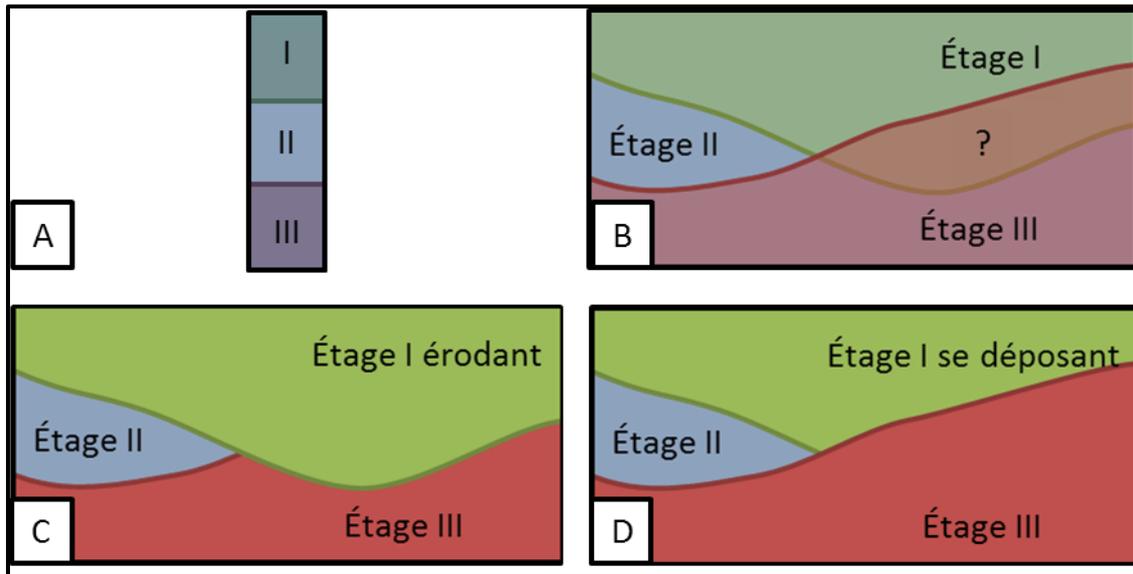


Figure 102 : Schéma illustratif des relations d'érosion.

A) Soit une pile de trois formations successives. B) Les horizons limitant I/II et II/III se croisent localement. C) Attribution si l'on suppose I érodant. D) Attribution si l'on suppose I se déposant.

b) Construction du modèle

Le modèle a été élaboré à l'aide du logiciel GDM, développé par le BRGM, et de son composant de modélisation géologique multicouche Multilayer (Bourgine, 2007). Ce logiciel permet d'interpoler des surfaces et de les combiner tout en assurant un contrôle de cohérence (ou contrôle des inégalités générées) lors des interpolations (non-respect des données de forages ou des contacts géologiques à l'affleurement, croisement des surfaces, ...). Il permet de construire un modèle 3D cohérent respectant les différentes données physiques fournies en entrée.

Les horizons sont construits successivement, en commençant par les horizons sous formations «érodant» de haut en bas, puis les horizons sous les formations «se déposant» de bas en haut. L'ordre est donc ici :

- mur des colluvions ;
- mur des alluvions modernes ;
- mur des alluvions modernes ;
- mur du soubassement ;
- toit des alluvions modernes.

Nous ne décrivons pas ici les bases de la variographie et de la géostatistique (krigeage).

On utilise les données exactes (horizon connu) pour une variographie (choix d'un ordre de dérive géographique et d'un variogramme). Ensuite, les inégalités sont corrigées itérativement par ajout de points de contrainte. En effet, la première et la dernière passe de chaque forage sont incomplètes : il est seulement su que le mur théorique du dernier horizon se situe en-dessous de la dernière cote du forage (respectivement, le toit théorique se situe au-dessus de la première cote). Il n'existe pas à notre connaissance de méthode simple et efficace pour assurer le respect de ces inégalités. Des points de passage des horizons sont ajoutés manuellement par l'opérateur dans ce but. Finalement, le modèle tient compte de 395 points de contrainte ajoutés par l'opérateur.

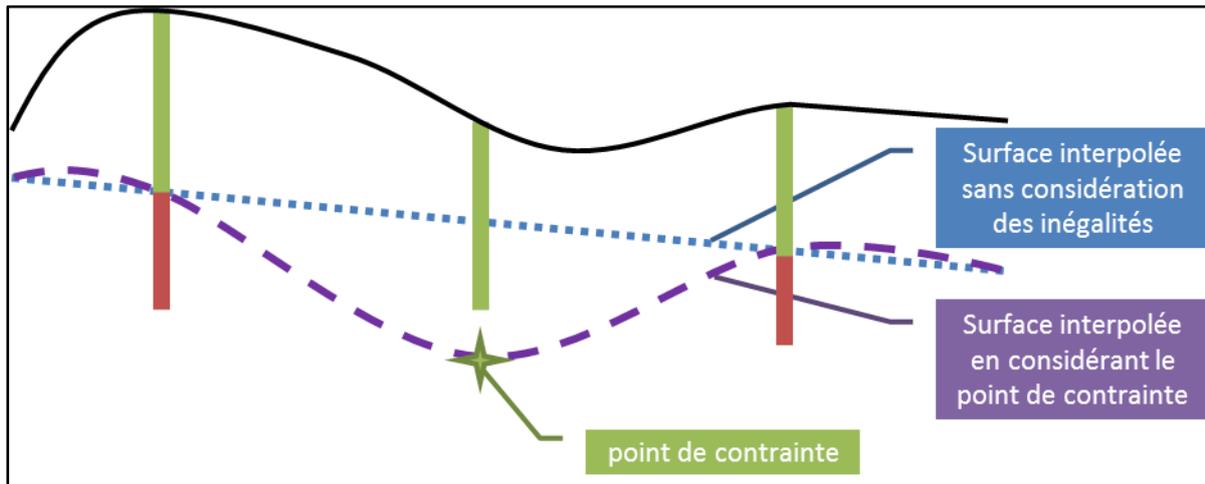


Figure 103 : Schéma illustrant les inégalités et points de contrainte.

Si l'on considère seulement les deux données exactes (forages de droite et de gauche), l'horizon vert/rouge n'est pas cohérent avec la donnée du forage central. L'ajout manuel d'un point de contrainte permet de résoudre cela.

Enfin, notons que GDM tient compte de la carte géologique en étendant la géologie de surface au premier mètre de sous-sol.

c) *Résultat*

La figure 104 montre l'épaisseur cumulée des alluvions (FMOD + LOES + FANC). La figure 105 illustre les possibilités de coupe dans le modèle. La Figure 106 représente le modèle en trois dimensions.

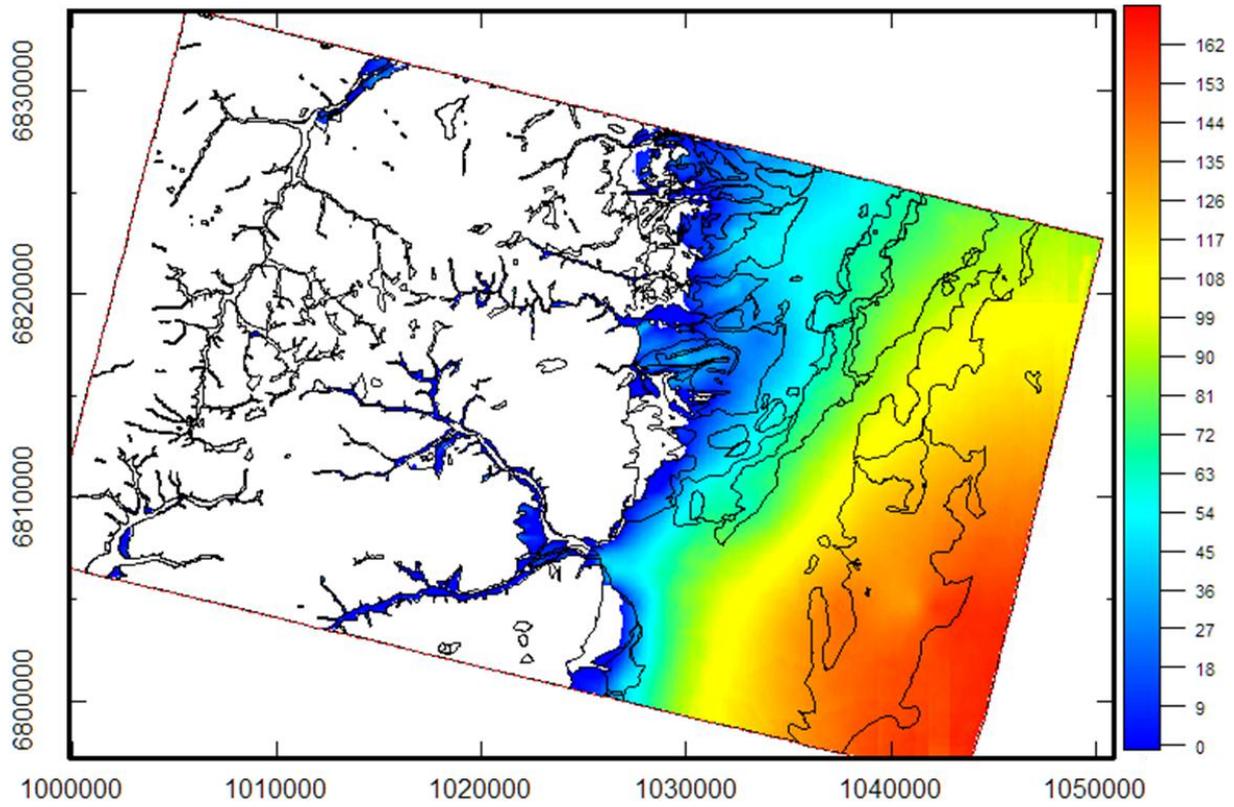


Figure 104 : Épaisseur cumulée des alluvions d'après le modèle de Sélestat.

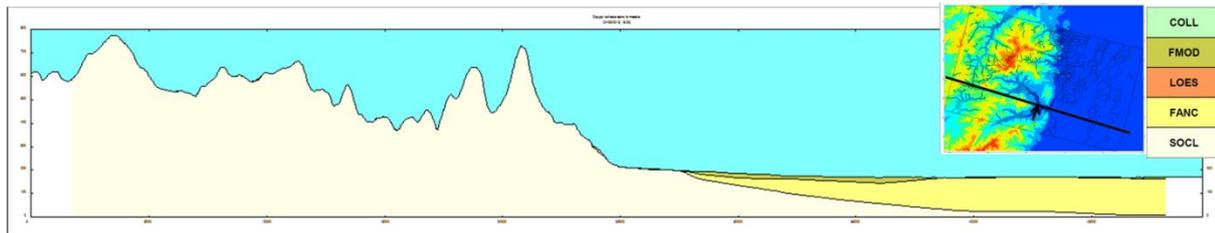


Figure 105 : Coupe dans le modèle (exagération en Z de 10x).

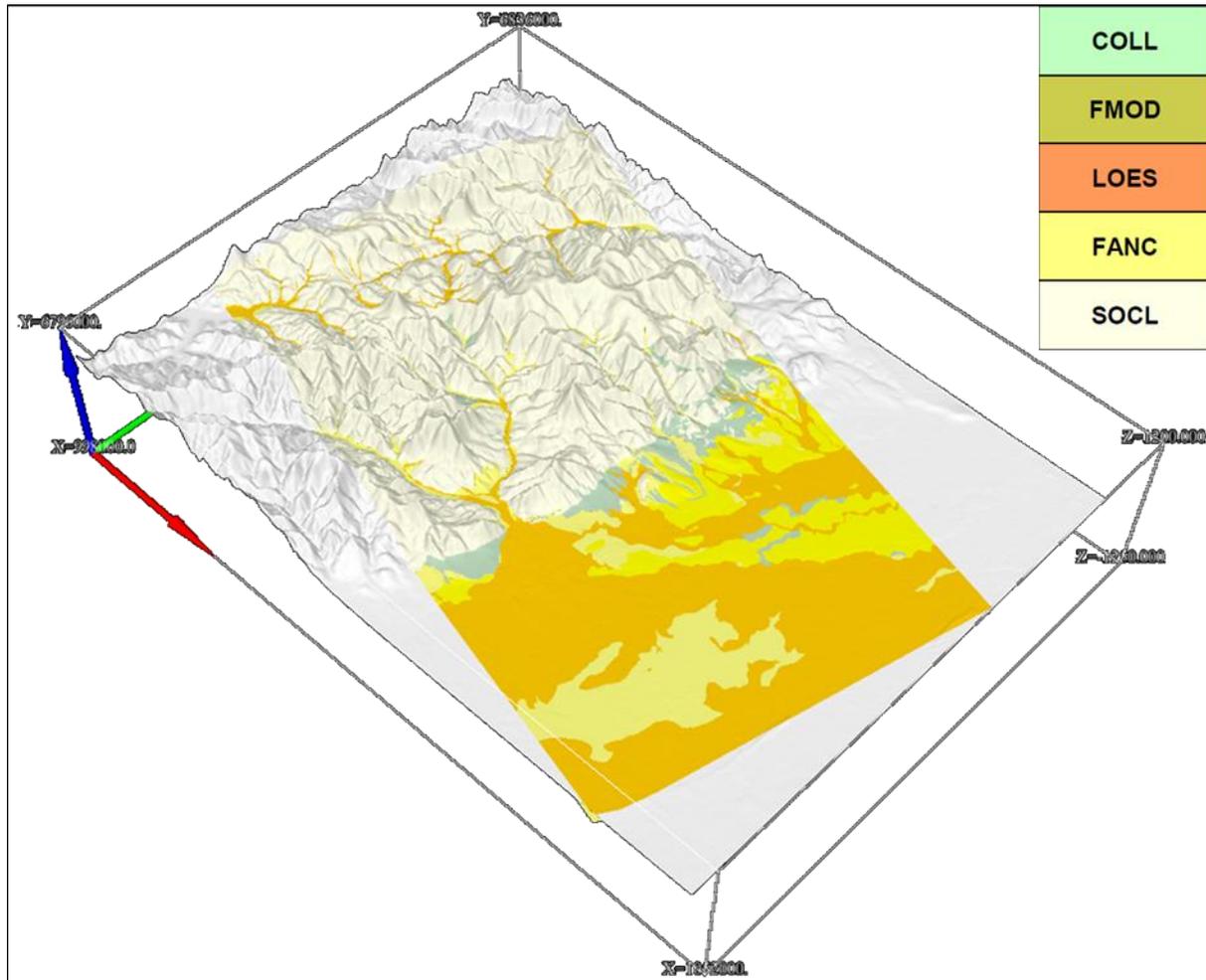


Figure 106 : Visualisation en trois dimensions du modèle (exagération en Z de 5x).

d) *Limitations*

Le modèle créé doit s'entendre comme illustratif de notre état des connaissances et tributaires des données et des hypothèses de réalisation. Notamment :

- les modèles sont tributaires des données :
 - par sa quantité. Heureusement, un nombre relativement important de forages est disponible, en particulier dans les vallées, qui sont la cible de la modélisation,
 - par sa qualité. Même si le mode opératoire a permis de rejeter un certain nombre de forages douteux (incohérents avec le reste de la donnée), il est toujours très possible que des erreurs n'aient pas été détectées. Outre les éventuelles erreurs de mise en base, notons que certains forages sont décrits de manière succincte, voire erronée, ce qui empêche de leur associer correctement un code stratigraphique ;
- les modèles sont tributaires des hypothèses posées :
 - stationnarité et isotropie du phénomène. On ne peut ainsi pas formellement exclure que, localement, le modèle s'écarte radicalement de la réalité. Cet aspect est malheureusement difficilement évaluable. En particulier, il serait logique que le phénomène soit somme de deux contributions, d'origine rhénane (sud) et vosgienne (ouest),
 - choix des variogrammes. Il nous semble cependant que ce choix est acceptable et influence relativement peu sur la restitution ;

- les points de contraintes sont utiles pour assurer la résolution des inégalités fournies par les forages ; néanmoins, leur signification n'est pas testée.

Ces limitations étant décrites, nous pouvons estimer que le modèle des dépôts superficiels est relativement bien contraint dans sa partie orientale, en plaine ; à l'inverse sa partie occidentale, de petites vallées, est mal maîtrisée.

6.4.2. Modèle global

a) Données

- Un MNT échantillonné à 50 m ;
- sondages validés RGF ;
- carte Géologique harmonisée du RGF ;
- intégration du modèle GeorG dans Geomodeller ;
- intégration du modèle d'alluvions (GDM Multilayer- auteurs : A. Leynet, C .Prognon).

b) Méthodologie

La méthodologie est la même que pour le modèle régional, se reporter au paragraphe « méthodologie » de la partie 6.3.

c) Le modèle

Les horizons modélisés sont (Figure 107) : la base du Trias, la base du Jurassique, la base du Tertiaire, la base de l'Oligocène (OLG), la base du Pliocène, la base des Alluvions anciennes, la base des Lœss, la base des Alluvions modernes, la base des Colluvions.

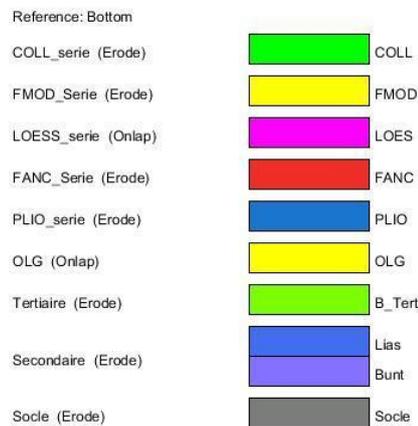


Figure 107 : Pile du modèle local.

Pour ce modèle, nous avons importé les surfaces triangulées des formations mésozoïques et tertiaires du modèle Gocad de GeorG (Buntsandstein à Pliocène) et les grilles du modèle d'alluvion fournies par le modèle GDM Multilayer (A. Leynet, C. Prognon). La méthodologie est la même que pour le modèle régional.

Les modèles sont échantillonnés afin de fournir un ensemble de données à partir duquel on calcule un modèle avec la méthode d'interpolation du logiciel hôte (3D Geomodeller). On aboutit in fine à un modèle volumique qui représente l'ensemble des formations modélisées (Figure 108). Durant cet exercice, est apparue clairement la nécessité d'améliorer la facilité de

3DGeomodeller à intégrer des modèles issus de grilles 2D externes. La difficulté ne se situe pas au niveau de l'import des valeurs elles-mêmes, mais de recréer un modèle équivalent tout en gardant la résolution initiale de la répartition des différentes alluvions.

La remarque vaut également pour l'import de modèles structuraux issus de surfaces triangulées. **Des efforts de développement sont à mettre sur ce sujet.** Le modèle est ensuite exporté au nœud d'un maillage adapté à la simulation de la propagation des ondes sismiques.

Avertissement : ce modèle n'a pu être mené à son terme en ce qui concerne les unités du socle (faute de temps), ce qui n'était pas crucial par rapport au scénario de simulation. Il serait cependant souhaitable de le compléter pour la partie socle.

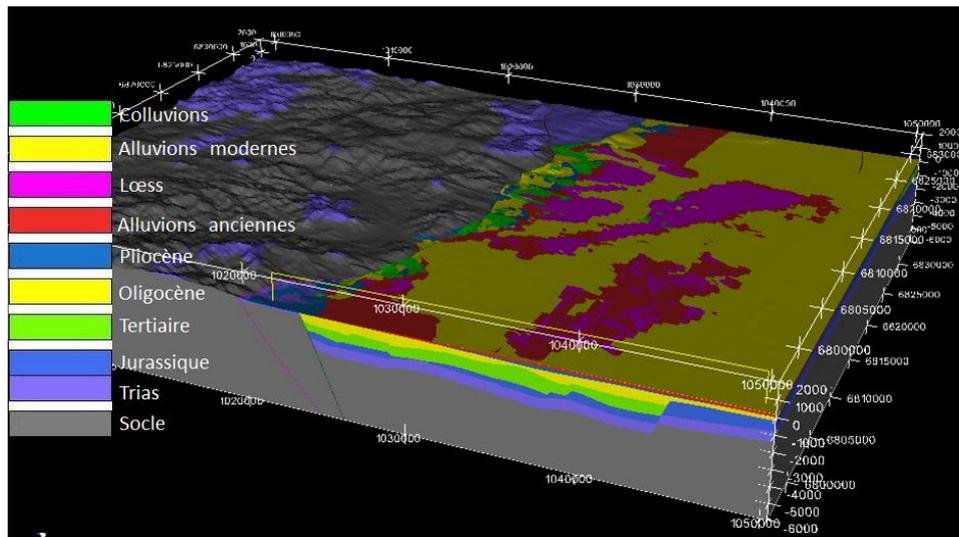


Figure 108 : Modèle global sur l'emprise dite « locale » de Sélestat.

6.5. MODÈLE DE PECHELBRONN

Les données validées sondages RGF, ont été utilisées dans le cadre d'une modélisation détaillée à l'échelle du Bassin de Pechelbronn (sur l'emprise notée « C », Figure 74) et financée par GEODERIS. L'objectif était d'avoir une représentation aussi fine que possible des différents horizons mésozoïques et surtout tertiaires dans le but d'aider à la compréhension des problèmes de transferts hydrogéologiques dans ce secteur.

Cette étude a permis de démontrer l'intérêt de disposer de bases de données cohérentes aux lexiques harmonisés pour réaliser de tels modèles dans le cadre de contrats institutionnels. La nécessité de maintenir un travail d'acquisition et de stockage en Bases des données pétrophysiques liées à des paramètres réservoir est apparue primordiale pour répondre à ce type de demande.

Cette étude a participé à la démonstration du RGF avec l'aimable autorisation de D. Rabu (BRGM) et M. Kimmel (GEODERIS) et a fait l'objet de la rédaction d'un rapport confidentiel spécifique à l'étude (C. Loiselet *et al.*, RC-62424-FR).

6.6. MODÈLE DE MULHOUSE

6.6.1. Objectif

Ce modèle a été réalisé en préalable à la modélisation et à la cartographie de l'aléa et/ou du risque sismique. Cette dernière se focalise sur les effets de site lithologiques, c'est-à-dire sur les modifications du mouvement du sol liées à la géologie superficielle. Le modèle réalisé servira à établir un **scénario de dommages** consistant à simuler l'impact et les conséquences d'un séisme de référence sur le milieu, en particulier sur les personnes et les biens

6.6.2. Réalisation

Le modèle est réalisé selon la même procédure que le modèle de dépôts alluvionnaires sur la zone de Sélestat (cf. § 6.4.1). Nous développerons ici uniquement les points particuliers.

L'extension du modèle représente $X_{min} = 1020251 - X_{max} : 1033\ 001$ m et $Y_{min} = 6744571 - Y_{max} : 6751196$, en Lambert-93.

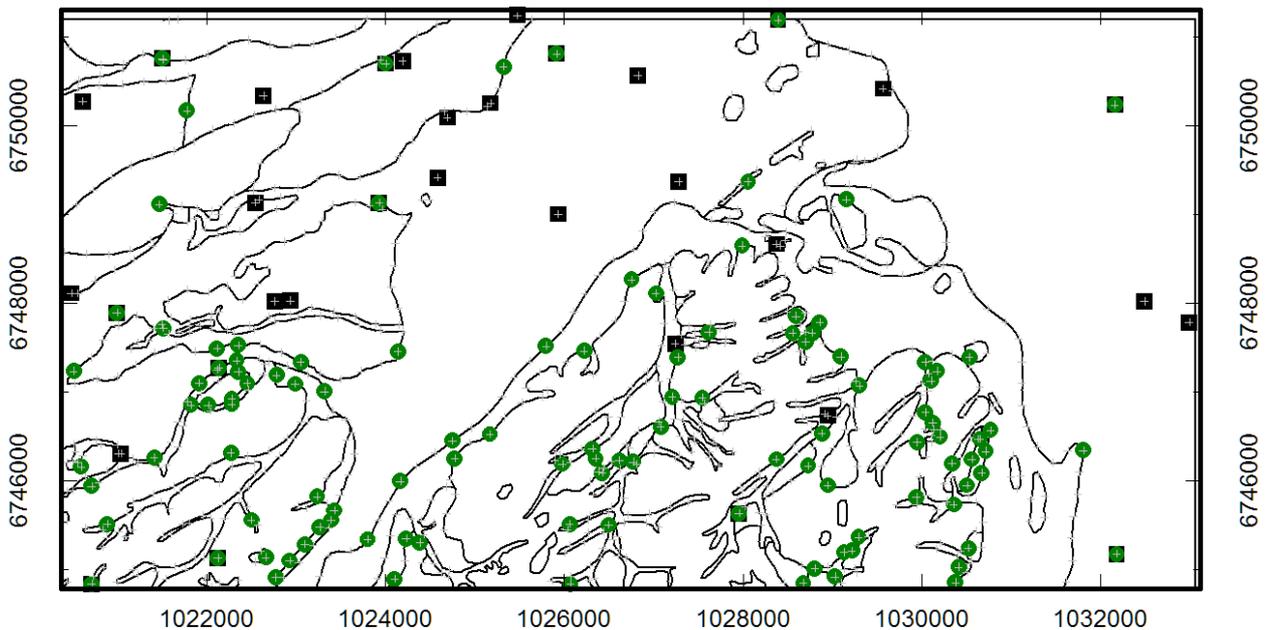


Figure 109 : Emprise et données du modèle de Mulhouse.

En gris les têtes de forages connus, en noir les forages ayant des informations, en vert les points de contrainte ajoutés par l'opérateur, en traits gris les limites de la carte géologique ; en traits rouges la limite de son extension.

Les données sont constituées de 33 forages validés RGF, 316 points de contact géologique issus de la carte géologique harmonisée RGF, et une grille de MNT à pas de 25 m, auxquels il faut ajouter 157 points de contrainte.

La pile stratigraphique est présentée au tableau 12.

Code de la formation	Description	Relations d'érosion
COLL	Colluvions	« érodant »
FMOD	Alluvions modernes (\mathcal{F}_z)	« érodant »
LOES	Loëss	« se déposant »
FY	Alluvions intermédiaires (\mathcal{F}_y)	« érodant »
FANC	Alluvions anciennes (\mathcal{F}_x)	« érodant »
TERT	Tertiaire	« érodant »
SOCL	Infra-tertiaire	« érodant »

Tableau 12 : Pile du modèle des dépôts superficiels allochtone de Mulhouse.

Les limitations du modèle sont fondamentalement les mêmes, aux deux différences suivantes près. Le modèle dispose de trop peu de données pour une modélisation du mur du Tertiaire ; d'une manière générale, le faible nombre de données ne permet pas une interpolation précise et fiable. Plus encore que dans le cas précédent, ce modèle ne doit pas être utilisé sans précaution. La figure 110 montre l'altitude du toit du Tertiaire d'après le modèle.

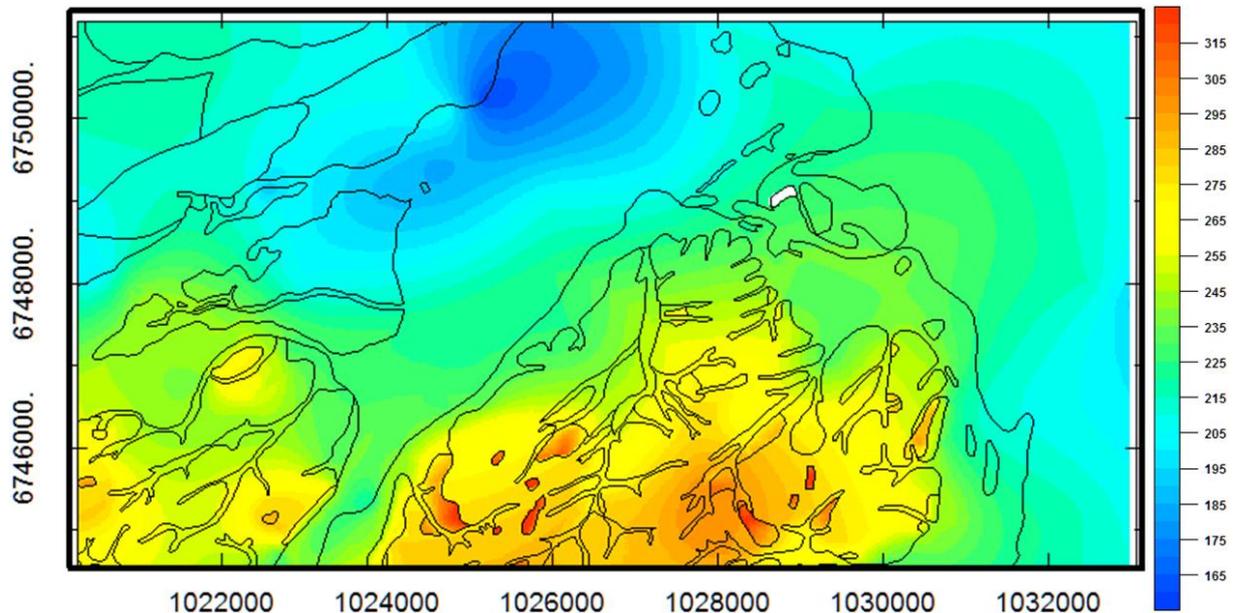


Figure 110 : Altitude du toit du Tertiaire dans le modèle de Mulhouse.
En liserés, la carte géologique.

6.6.3. Application

Ce modèle a été appliqué à l'illustration d'une démarche d'évaluation du risque/aléa sismique.

Une bonne connaissance de la géométrie et des caractéristiques mécaniques des couches géologiques superficielles susceptibles d'amplifier localement le mouvement sismique lors d'un séisme (on parle alors d'effets de site lithologiques) est nécessaire. Le modèle est utilisé en source pour deux approches :

- un scénario de dommages aux bâtiments nécessitant des informations sommaires sur la nature et l'épaisseur des formations quaternaires (cf. § 7.5).

Cette étude utilise les épaisseurs des formations quaternaires, combinées aux données géophysiques disponibles pour établir un scénario de dommages sous sollicitation sismique. Les résultats sont très positifs, et une nette amélioration des caractérisations des sols donne des intensités macrosismiques beaucoup plus réalistes que celles obtenues en 2010. Ces résultats sont à prendre néanmoins avec précaution, car le modèle géologique ne peut être validé en l'état des connaissances ;

- un micro-zonage sismique basé sur des simulations numériques 1D nécessitant une connaissance très fine de la variabilité des natures et épaisseurs de couches superficielles et incluant des propriétés mécaniques non-linéaires (cf. § 7.5).

Des piles (extraction 1D au droit d'un point XY) sont tirées et habillées en propriétés mécaniques via des données géophysiques et géotechniques, avant simulation numérique 1D de la quantification de la réponse des sols sous séisme. Dans le cadre du démonstrateur, seule la première étape du travail consistant à définir des colonnes de sol 1D type a été amorcée.

6.7. RETOUR D'EXPÉRIENCE ET RECOMMANDATIONS

6.7.1. Validation des données

Un des intérêts de la modélisation réside dans la possibilité de mettre toutes les données dans le même espace et de les confronter mutuellement. Durant la création du modèle, il est nécessaire qu'un géologue « référent » connaissant le contexte géologique soit mobilisé en interaction avec le géomodélisateur. Cela permettra des « allers-retours » entre les données et le modèle, mettant en évidence de possibles incohérences dans les données.

Il faut fournir au géologue référent des moyens ergonomiques de contrôle du modèle par rapport aux données (coupes sériées, cartes isopaques, ...). Néanmoins, la confrontation graphique est insuffisante pour détecter erreurs ou incohérences.

Les données doivent en 3D contribuer chacune à la réalisation d'un modèle accepté par un géologue « référent » comme étant un modèle géologiquement raisonnable, qui permettra de conclure à la validité des données et des hypothèses. Bien sûr, l'origine de ces données doit être sourcée et traçable.

C'est sur la base de ce processus itératif et l'interaction géologue - modélisateur que pourront être assurés la cohérence tridimensionnelle des données et interprétations.

Faute de temps dans le cadre du démonstrateur, l'aller - retour « données – modèles » n'a pas pu se faire sur la totalité des données traitées (expl. sondages - interprétation sismique), ce processus de validation devra se poursuivre à l'avenir.

6.7.2. Incertitudes

La modélisation permet également de caractériser les zones peu contraintes (manquant de données). Les méthodes géostatistiques fournissent un cadre pour l'estimation de l'incertitude interne au modèle, c'est-à-dire en supposant le variogramme parfaitement connu et les données parfaitement exactes. Les cartes d'incertitude interne (quantifiées ou qualifiées) devraient pouvoir être fournies, malheureusement, la variété des contextes géologiques et types de données associées ne permet pas toujours de fournir facilement cet élément. Cette incertitude interne n'épuise pas la question, car le modèle est aussi dépendant pour une grande part d'interprétations et d'hypothèses conceptuelles.

Ceci pose également le problème du « contrôle qualité du modèle ». Il n'y a pas de démarche standard aujourd'hui. Ceci implique la nécessité d'établir quelques règles simples.

Il faudra donc développer des moyens de spatialiser la validité des modèles et aux moyens de la rendre compréhensible aux utilisateurs

6.7.3. Identification des structures à différentes échelles

À l'échelle où est effectué le modèle régional, l'identification des structures majeures à partir des données de base relève plus de l'analyse experte de documents que de la requête dans une base de données.

Ceci pose le problème de la généralisation des données géologiques. La difficulté vient du fait qu'un échantillonnage simple, ou même sophistiqué, des contours n'est généralement pas la solution au problème. Par exemple, les interactions complexes entre failles et horizons qu'il faut simplifier de façon simultanée et cohérente, ou la cohérence à maintenir entre la généralisation et les effets d'intersection avec la topographie choisie pour la modélisation, ou encore les failles représentées sur la carte qui ne sont pas hiérarchisées et ne représentent pas nécessairement les structures majeures. La faille Lalaye-Lubine qui est une discontinuité crustale majeure mais qui n'apparaît pas en tant que telle sur les documents de base en est un exemple frappant.

Une recherche devrait porter sur les moyens d'intégrer ces échelles d'interprétations à la base de données, en décrivant les liens entre ces objets à différentes échelles. Une autre classe de solutions au problème de la généralisation des cartes géologiques, changement d'échelle est de considérer le problème non plus sous un angle « graphique » mais sous un l'angle de la modélisation. Supposons par exemple qu'un même jeu de données puisse être utilisé pour générer différents modèles 3D à différentes échelle (L'organisation de ce jeu de données restant le problème majeur à résoudre). La carte géologique n'est plus vue comme une donnée de base mais déduite de l'intersection du modèle et de la topographie à l'échelle considérée. Ce qui au passage résout les problèmes de consistence entre topographie et contours géologique. Dans cette optique, la carte n'est plus utilisée comme donnée, ce qui oblige à repartir des observations ponctuelles.

6.7.4. Utilisation des levés géophysiques

Les levés géophysiques sont un moyen incontournable pour accéder (de façon indirecte) à la nature du sous-sol. Pour pouvoir interpréter efficacement ces levés en termes de modélisation d'entités géologiques, il faut une connaissance statistique approfondie des données pétro-physiques relatives à ces entités. Les modèles réalisés en s'appuyant sur les levés gravimétriques et magnétiques ont montré que l'on manquait cruellement de données pétro-physiques pour contraindre les inversions. L'intérêt d'utiliser ces données dans le cadre de la réalisation du modèle à l'échelle régionale est démontré dans le processus d'inversion. C'est un moyen d'ajuster ou d'invalider le modèle.

Toute campagne d'acquisition géologique ou géophysique doit s'accompagner de mesures systématiques sur quelques propriétés physiques fondamentales utilisées dans les Géosciences, mises en base.

6.7.5. Les outils

Les outils actuellement disponibles incluent :

- GDM et son module MULTILAYER pour la géomodélisation 2D-multicouche ;
- GÉOMODELEUR pour la géomodélisation 3D ;
- ISATIS pour la géostatistique et géoprobabilité (simulation de faciès) ;
- R, langage de programmation en statistique, et les bibliothèques GEOR, GSTAT et RGEOS ;

Notons que **nous ne disposons pas d'approche formalisée de géomodélisation assise sur la géomorphologie** (MNT et variables régionalisées dérivées), même si un savoir-faire est disponible de manière informelle au sein du BRGM. Une telle approche pourrait s'avérer pertinente pour la modélisation des couches supérieures (Quaternaire, régolithe).

Nous recommandons également d'**encourager l'interopérabilité** des outils existants, par des possibilités d'importation et exportation plus larges ; ceci afin de favoriser l'utilisation chaînée des outils dans leurs points forts respectifs.

Plusieurs axes d'améliorations sont proposés, à moduler selon le logiciel :

- **calcul des incertitudes** (sur les données, sur les hypothèses, sur le krigeage) ;
- **points de contrainte** : bien qu'utiles au respect des inégalités par le modèle, ils relèvent d'un choix arbitraire, peuvent dégrader la qualité du modèle, et gênent sa mise à jour ;
- **échelle** : il serait intéressant de pouvoir dégrader un modèle à une échelle supérieure ; l'inverse également, mais cela semble plus irréaliste ;
- **analyse de cohérence** : des algorithmes pourraient permettre de juger de la cohérence de chaque donnée avec le modèle ; une telle approche est mise en place au BRGM, ils pourront être généralisés aux failles, points de contrainte...

Enfin notons que la performance de nos ordinateurs a été un réel handicap par rapport à la résolution des modèles exigée. Ceci a entraîné une perte de temps significative. **Des efforts d'investissement sont attendus aussi bien en développement que matériel.**

6.7.6. Sondages

Si la gestion des sondages non verticaux est bien évidemment prévue dans les futures bases de données du RGF, le projet démonstrateur n'a pas pu en bénéficier de manière automatique, comme cela devra être le cas à l'avenir.

6.7.7. Fusion – Mise à jour des modèles

a) *Fusion de modèles*

L'incorporation d'un modèle déjà existant dans un autre modèle est une tâche délicate. Il n'existe pas de démarche standard sur ce sujet. La difficulté tient à la nécessité d'harmoniser des interprétations éventuellement différentes entre des modèles, qu'ils aient été réalisés ou non sur des logiciels différents. Comment faire évoluer un modèle si on n'a plus trace des données et hypothèse qui ont servi à le construire ? La fusion de deux modèles couvre les problèmes suivants :

- différence d'approche ou de finalité ;
- intersection ou voisinage des emprises ;
- différences sur les piles ;
- différences sur les données ;
- différences sur le résultat uniquement ;
- différences sur les méthodes, algorithmes de modélisation d'un logiciel à l'autre.

À ce jour, nous n'avons d'autre option qu'une approche au cas par cas, partant des données, ce qui revient souvent en pratique à la création d'un nouveau, troisième, modèle (*remise à zéro*). C'est pourtant une situation qui surgira souvent à l'intérieur d'un chantier RGF, ou à l'interface entre deux chantiers.

Ceci pose le problème général de l'interopérabilité entre les modèles.

b) *Mise à jour*

Nous pouvons supposer que, dans le cas de quelques données cohérentes avec le modèle, leur **contrôle** et leur **ajout peuvent être automatisés**. Sans négliger les questions annexes (mode de contrôle de cohérence, fréquence de mise à jour, ...), cette approche, si elle est préparée en amont, reste simple ; il pourrait en être de même pour l'ajout ou la mise à jour de données auxiliaires, comme des mesures géophysiques. Par contre, l'ajout de données visiblement incohérentes et le changement de paradigmes (de concept géologique sous-jacent), nécessiteront l'intervention d'un expert.

6.7.8. Stockage des modèles et métadonnées

La question des modalités de stockage et mise à disposition des modèles dépasse le cadre de ce rapport, même si cela devra être abordé.

Au sein du BRGM, le modèle devra être stocké dans un emplacement unique, les métadonnées devront permettre de le retrouver aisément, et son environnement (hypothèses et logiciel) sera conservé de façon à ce qu'il puisse être recalculé. Dans cette optique, il sera intéressant que nos outils puissent créer une archive qui contiendra tout l'environnement de travail. Plus simplement, la possibilité de créer un fichier campant cet environnement (données, hypothèses, version du logiciel, ...) sera un plus pour la rédaction du rapport ; cette fonctionnalité existe déjà sous GDM.

Composant	Définition	Exemple
1. Exports	extraction du modèle	cartes, coupes, blocs-3D, ...
2. Modèle	grandeurs régionalisées	grille de lithologie, stratigraphie multi-couche, ...
3. Description	rapport, métadonnées	titre, date, finalité, limitations, ...
4. Objets	intrants du modèle	forages, failles, pendages, ...
5. Hypothèses	choix de modélisation	dérives, variogrammes, ...
6. Logiciel	programme utilisé	version du logiciel, ...
7. Mesures	Données d'origine	lien vers une base de forages, source bibliographique, ...
8. Méthode	motivation des choix	explication du rejet de certaines données, ...

Tableau 13 : Les composants d'un environnement de modélisation.

6.7.9. Dans quel but ?

La finalité du modèle doit être évoquée le plus tôt possible. Le modèle peut être exploité selon deux approches.

- il peut être utilisé dans un cadre académique, ce qui inclut des logiques de représentation de l'information géologique, de validation d'hypothèses géologiques, de prédiction géologique. Dans ce cas, il est souhaitable que le modèle soit le plus généraliste et détaillé possible, pour favoriser de futures applications. Ce modèle est alors un *distributeur d'information* ;
- il peut être également orienté vers une application, hydrogéologie, géotechnique, simulation numérique, cartographie d'aléa...

6.7.10. Diffusion du modèle

Le prototype de viewer 3D développé dans le cadre de ce projet a démontré les limites à la fois des choix technologies mais aussi du manque de gestion des données 3D au BRGM. Les relations entre les données « brutes » et les modèles 3D doivent être renforcées afin de garantir la traçabilité de ces éléments. Afin d'améliorer cet axe, une ou plusieurs actions doivent être menées afin d'organiser le stockage des modèles géologiques (cf. ci-dessus) et conserver de manière pérenne, dans ce modèle, les relations avec les données « brutes ».

Comment diffuser le modèle (et les données associées) pour le rendre utilisable par les différents utilisateurs ? Malgré nos premières réflexions cette question n'a pas été résolue durant le chantier. C'est un des enjeux majeurs du RGF. La multitude de formats de géomodèles et d'utilisations possibles rend cette question complexe. Veut-on tout résoudre ? Ceci pose plus généralement le problème du système d'information RGF.

La résolution de ce problème ne peut pas passer par une simple commande à un fournisseur informatique. Elle exige interaction entre développeurs (base de données, système d'information, modélisation), géomodélisateurs et géologues.

7. Exemple de plus-value scientifique et socio-économique du RGF

Il s'agit ici de montrer sur des exemples concrets en quoi le programme RGF et les actions précédemment citées peuvent apporter une plus-value scientifique ? En quoi des données cohérentes et organisées selon un système de base de données permettent d'optimiser la réalisation de produits thématiques du risque sismique, de l'hydrogéologie, de la géothermie, des ressources minérales et des matériaux ?

7.1. GÉOMÉTRIE ET CONTRÔLE STRUCTURAL DES DÉPÔTS SYN-RIFTS DU FOSSÉ RHÉNA (BRGM/RP-62896-FR)

7.1.1. Actions menées dans le cadre du chantier pilote

Ce travail a été initié dans le cadre du projet de démonstrateur RGF Vosges/Fossé rhéna (2012-2013). Il traite de l'identification et de la compréhension des géométries du remplissage syn-rift du Fossé rhéna entre Colmar et Strasbourg (Bartonien-Rupélien) en relation avec les structures tectoniques présentes, dont la faille bordière actuelle.

7.1.2. Résultats et retour d'expérience

Deux approches complémentaires ont été menées :

- (1) l'analyse séquentielle à partir des données de forage a conduit à identifier sur trois transects si séquences de 3^{ème} ordre et dix surfaces remarquables. Les faciès sédimentaires ont parallèlement été déterminés sur deux transects. Les séquences montrent généralement une prédominance des demi-cycles transgressifs, et s'inscrivent dans un grand cycle transgressif de 2^{ème} ordre qui se termine par l'ennoiement de toute la région étudiée (dépôt des Marnes à Foraminifères, qui scellent la phase de rifting). La subsidence syn-rift est tout d'abord contrôlée par l'activité de failles localisées, avant de prendre une signature plus régionale ;
- (2) les modalités de la subsidence syn-rift et le rôle de la faille bordière actuelle pendant le rifting ont ensuite été étudiés via l'interprétation de neuf profils sismiques favorablement situés. Deux profils supplémentaires (79OB6 et 87COL2) ont été retraités puis interprétés dans le cadre de ce projet. Ce travail montre que la faille bordière actuelle n'est pas la faille syn-rift tout le long de son tracé, et qu'elle est le plus souvent postérieure au rifting. Il apparaît de plus qu'une partie de la subsidence syn-rift est contrôlée par la flexuration du substratum pré-rift; dans ce cas les failles bordières apparaissent soit comme des failles syn-rifts tardives soit comme témoins d'une activité tectonique postérieure au rifting.

Afin de préciser ces premiers résultats, l'interprétation de transects de forages ou de profils sismiques supplémentaires apporterait une plus-value indéniable.

Ce rapport s'organise autour de trois chapitres.

Le chapitre 1 rappelle le contexte, les objectifs et la problématique scientifique de l'étude.

Le chapitre 2 présente l'analyse séquentielle des dépôts syn-rifts du fossé rhéna à partir des données de forages.

Le chapitre 3 présente l'apport de l'interprétation des profils sismiques pour la compréhension des modes de subsidence à l'œuvre pendant le rifting.

Le rapport dédié à cette étude spécifique est disponible sur le DVD joint à ce rapport ou à la documentation du BRGM (Rapport final. BRGM/RP-62896-FR, 54 p., 31 fig., 4 tabl., 1 CD).

7.2. GÉOPHYSIQUE RÉGIONALE (GRAVIMÉTRIE, MAGNÉTISME)

Les connaissances géophysiques régionales ont donné lieu à :

- un inventaire préliminaire des données et des études et résultats disponibles dans la littérature ;
- une mise à jour des jeux de données sous forme numérique et un complément d'acquisition gravimétrique ;
- une réinterprétation des données, notamment par une série de coupes régionales modélisées en gravimétrie, utilisant l'ensemble des résultats déjà publiés et des informations auxiliaires disponibles (géologie, forages, etc.).

7.2.1. Inventaire des données, des études et résultats de la littérature

a) Principales études publiées utilisant ces données géophysiques

En plus des études dédiées au profil sismique ECORS, les études publiées utilisant les données régionales mentionnées au-dessus se divisent principalement en deux grandes catégories : (i) les études apportant une information de nature cartographique et (ii) celles apportant une information sur les géométries du bâti en profondeur (en coupes ou en 3D). Il s'agit principalement d'études gravimétriques et/ou magnétiques, qui portent sur (Figure 31) :

- la **structuration du bâti géologique** (en surface et sous les bassins) ; il s'agit d'études locales à régionales ;
- la **cartographie du toit du socle sous les bassins** (géométrie + nature), en relation avec ce qui est connu (terrain, sismique, forages, etc.) – à différentes échelles.

Il s'agit principalement d'études gravimétriques et/ou magnétiques, qui fournissent une imagerie locale à régionale de la surface jusqu'à plusieurs km en profondeur (Figure 32) :

- sous forme de cartes isobathes ;
- Sous forme de coupes modélisées en 2D présentant des géométries géologiques.

Ces études s'appuient sur les autres informations géologiques et géophysiques disponibles (terrain, sismique, forages, etc.).

Pour la thématique risque sismiques des données spécifique à cette discipline comme des vitesses de propagation d'ondes ont été utilisées pour notamment caractériser les propriétés de roches superficielles (cf. § 7.5.)

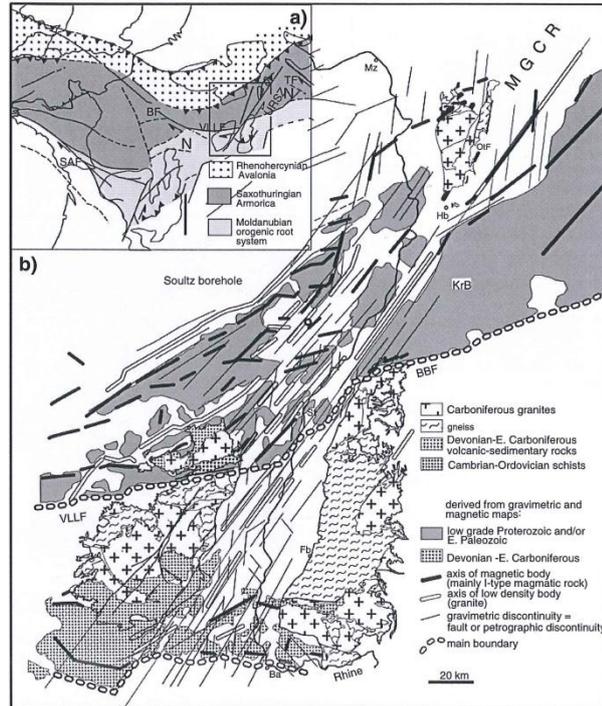
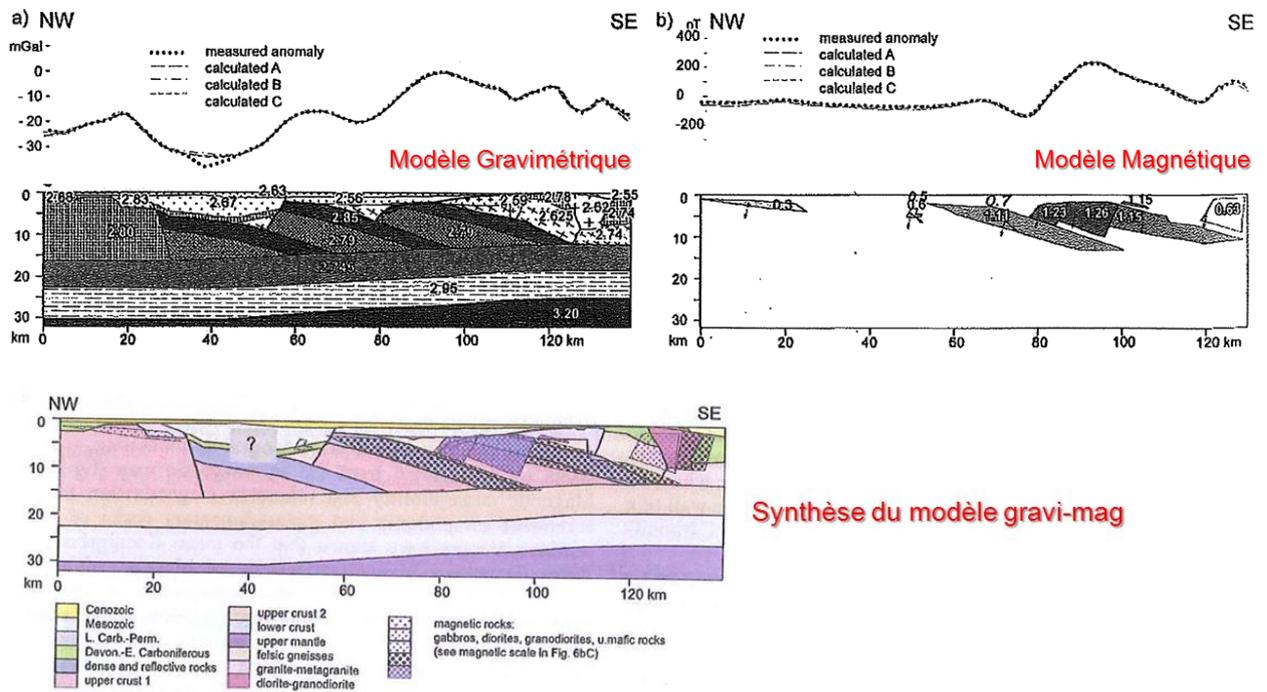
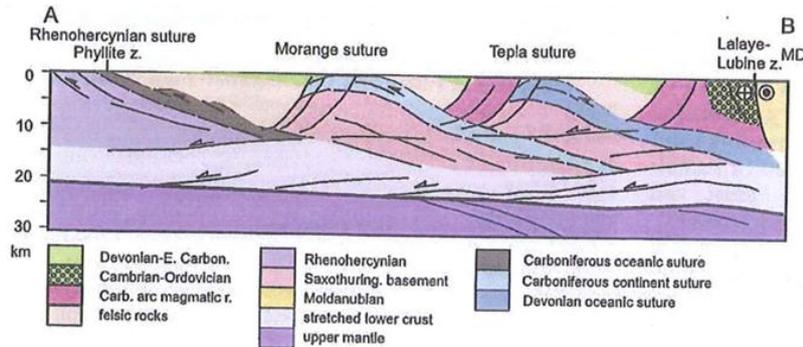


Figure 111 : Exemple d'interprétation structurale régionale, basée sur l'analyse des données gravimétriques et magnétiques permettant de proposer une cartographie structurale de la zone Vosges - Fossé rhénan (Edel et al., 2007).





Interprétation géologique du modèle gravi-mag

Figure 112 : Phases de la modélisation géologique par méthodes gravimétrique et magnétique depuis le modèle de paramètres géophysiques (en haut), sa synthèse (au milieu) et son interprétation géologique (en bas).

Exemple le long d'un profil crustal orienté NW-SE depuis le fossé Lorrain jusqu'au fossé rhénan (Edel *et al.*, 2009).

b) Profil sismique réflexion crustal ECORS-DEKORP-S

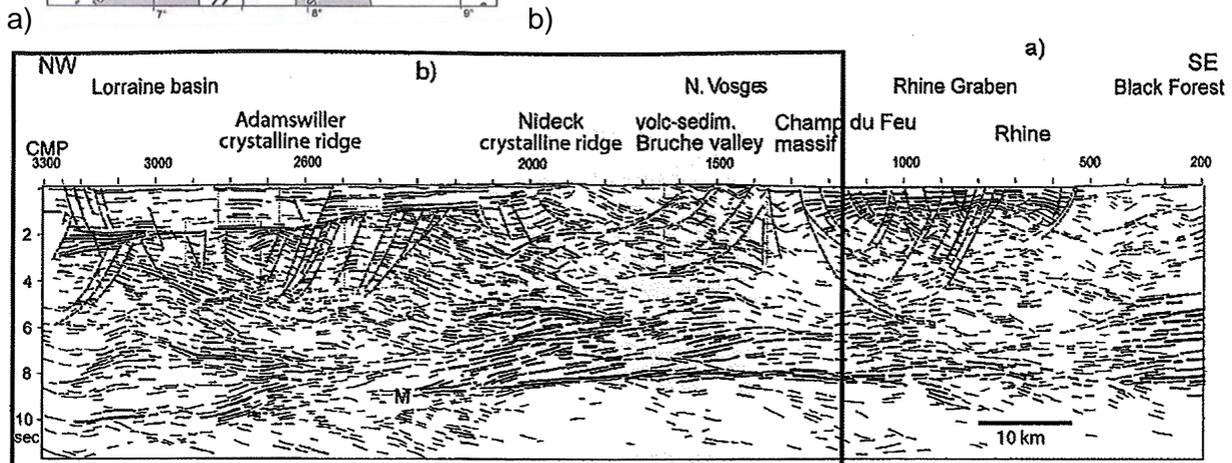
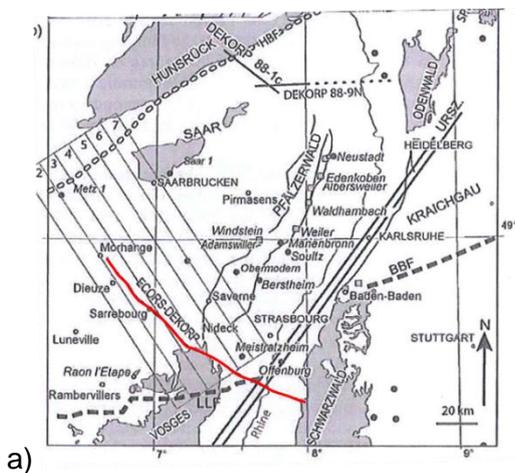


Figure 113 : Profil sismique réflexion crustal ECORS-DEKORP - a) Localisation du profil (ligne rouge), b) Line-drawing interprétatif (Edel et Schulmann, 2009).

Le profil sismique réflexion ECORS-DEKORP-Sud (Figure 113), d'échelle crustale n'a pu être récupéré sous forme numérique (SEG-Y). Son utilisation a été basée sur les images brutes et interprétées publiées dans la littérature ; par exemple, dans Wenzel *et al.* (1991), Brun *et al.* (1992), Rousset *et al.* (1993).

7.2.2. Mise à jour des jeux de données sous forme numérique et complément d'acquisition gravimétrique

a) Complément d'acquisition gravimétrique

Comme mentionné plus haut, la couverture des données gravimétriques disponibles dans la Banque Gravimétrique de la France, sur l'emprise du projet, était insuffisante par endroit.

Une collaboration menée avec l'Université de Strasbourg a permis de :

- densifier les données existantes : plus de 12 000 données gravimétriques anciennes dont disposait l'Université ont été intégrées au projet (détails au paragraphe suivant) ;
- dans les zones qui restaient mal couvertes, acquérir de nouvelles stations gravimétriques pour amener la densité de répartition des données à environ 1 pt./km².

L'acquisition gravimétrique s'est déroulée dans le cadre d'un stage de trois étudiants de l'Université de Strasbourg (A. Broussole, sous la direction de K. Schulmann) et de l'EOPGS (G. Pagnot et T. Paolo, sous la direction de F. Masson). Les acquisitions et traitements ont eu lieu en juillet et août 2012.

Un peu plus de 400 nouvelles stations ont été implantées, principalement dans le centre et le sud des Vosges (Figure 114). Elles ont été mesurées à l'aide d'un gravimètre Scintrex CG5 (de l'EOPGS) et positionnées à l'aide d'un GPS Ashtech Z12 (du parc INSU), par post-traitement différentiel avec les stations GPS permanentes du RBF. Le post-traitement a été réalisé à l'aide du logiciel en accès libre RTKLIB v2.4.1. Les traitements ont été réalisés pour l'essentiel fin août 2012, avec la participation de G. Martelet.

Le post-traitement GPS a révélé de nombreuses insuffisances, notamment liées à une couverture trop faible de satellites (probablement écrantés par les reliefs et la forêt). Il en a découlé des déterminations de positions imprécises (erreurs de plusieurs mètres), voire des déterminations impossibles. Ces positions erronées ou manquantes ont été remplacées par un positionnement aussi précis que possible sur carte topo IGN25. Les traitements standard (réduction d'air libre, de plateau et corrections de terrain – jusqu'à 167 km) ont été réalisés, jusqu'à l'obtention de l'anomalie de Bouguer complète (qui restitue l'effet de tous les contrastes de densité sous la topographie).

Du fait que la précision du positionnement (en particulier en altitude) est le facteur le plus déterminant sur la précision des données gravimétriques, le jeu de données obtenu est de qualité médiocre. Un positionnement au mètre près aurait permis d'obtenir une erreur sur l'anomalie de Bouguer de quelques dixièmes de milligals (en incluant toutes les sources d'erreurs) ; compte-tenu des imprécisions de positionnement, certaines stations apportent des erreurs de plusieurs milligals. Un travail important a été mené pour identifier ces données erronées et si possible les corriger ou les retirer à défaut, mais l'identification claire des stations erronées n'est pas triviale et pour cette raison, le jeu de données dans son ensemble, quoiqu'utilisable régionalement, reste de qualité inégale, médiocre dans son ensemble.

Compte-tenu de son caractère douteux ce jeu de données ne sera pas inclus dans la Banque Gravimétrique Nationale ; il a cependant été pris en compte dans l'étude régionale du projet Vosges - Fossé rhénan.

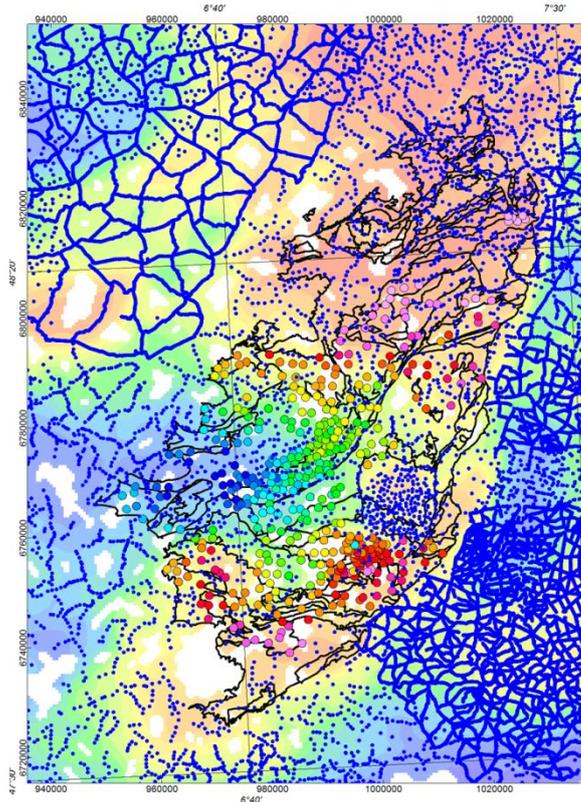


Figure 114 : Plan de position des stations gravimétriques anciennes (points bleus) et des stations acquises dans le projet (cercles colorés), sur fond de carte d'anomalies de Bouguer.

b) Mise à jour des jeux de données gravimétriques et magnétiques

Les données gravimétriques et aéromagnétiques précédemment exposées (anciennes et nouvellement acquises) ont fait l'objet d'une mise à jour : sous forme numérique, incluant un contrôle qualité et une harmonisation régionale, lorsque nécessaire.

- **Mise à jour des données gravimétriques**

Une compilation harmonisée des données gravimétriques disponibles sur la zone d'étude a été réalisée, comprenant sur la zone d'étude :

- les données anciennes disponibles dans la BGF (plus de 47 000 données) ;
- les données acquises à l'occasion du projet (environ 380 données) ;
- un jeu de données anciennes transmis par l'Université de Strasbourg (environ 4 000 données).

L'intégration de ces différents jeux de données a été réalisée pour une densité de référence de 2.6 et dans le système gravimétrique international IGSN71. L'intégration des données transmises par l'Université de Strasbourg a nécessité des ajustements pour assurer leur compatibilité avec les données de la BGF.

Au final, la carte d'anomalies de Bouguer résultante (Figure 115) constitue la carte gravimétrique la plus complète jamais réalisée sur la zone. Son analyse est détaillée dans la suite.

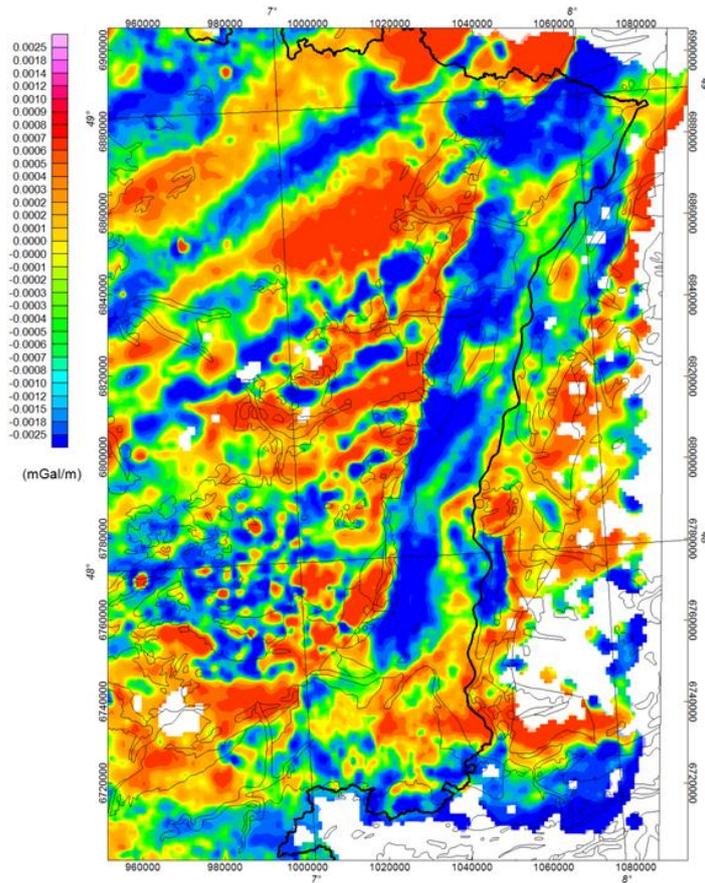


Figure 115 : Carte du gradient vertical de l'anomalie de Bouguer (densité 2,6) obtenue par compilation des données anciennes de la BGF, d'autres données anciennes transmises par l'Université de Strasbourg, des données acquises en 2012.

- **Mise à jour des données aéromagnétiques**

Le levé aéromagnétique Bassin d'Alsace-Lorraine (1956), de résolution moyenne (compatible avec des objectifs d'échelle régionale) a pu être récupéré, sous forme de carte papier. Cette carte a été géoréférencée ; les isanomales magnétiques ont été numérisées (Figure 116) et finalement réinterpolées sur une grille régulière, au pas de 500 m.

Les données initialement acquises sur deux blocs à altitude constante, de 600 m en plaine et 1 200 m sur les Vosges, ont été prolongées vers le bas « drapées » à 200 m au-dessus des reliefs – de manière à en faire ressortir le maximum d'informations aux courtes longueurs d'ondes. Puis assemblées en une grille unique (Figure 117).

Sur cette grille, des traitements classiques ont été appliqués pour en extraire une information pertinente pour la connaissance géologique régionale :

- réduction au pôle – pour rétablir les anomalies à l'aplomb de leurs sources géologiques ;
- gradients, pour optimiser l'analyse des structures du bâti ;
- signal analytique, pour localiser les sources géologiques faiblement/fortement magnétiques, indépendamment de leur type d'aimantation (induite ou rémanente).

Une large moitié sud de la zone du projet n'est pas couverte en magnétisme.

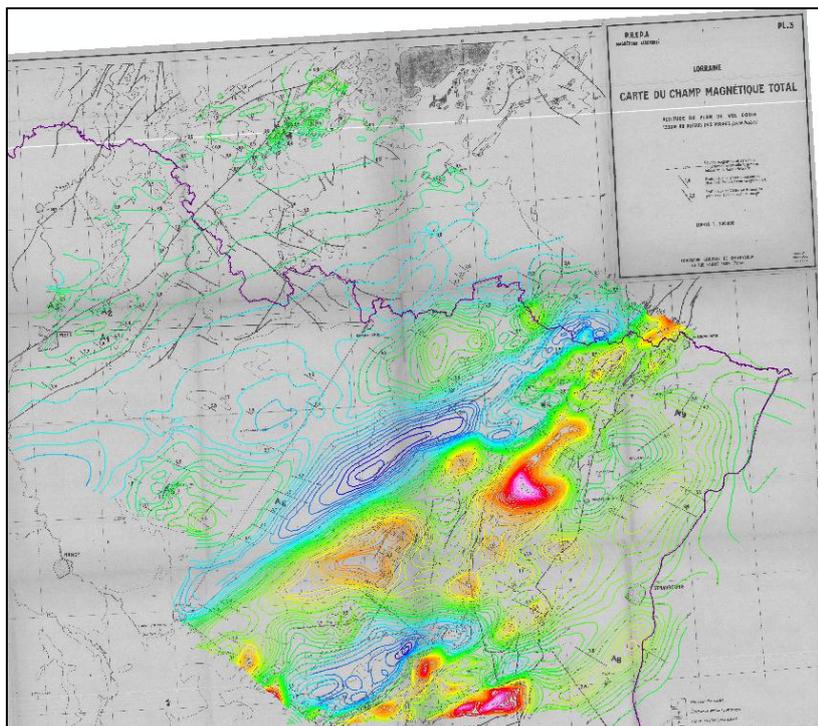


Figure 116 : Carte d'is anomalies magnétiques, scannée, géoréférencée et anomalies – lever Bassin d'Alsace-Lorraine, 1956.

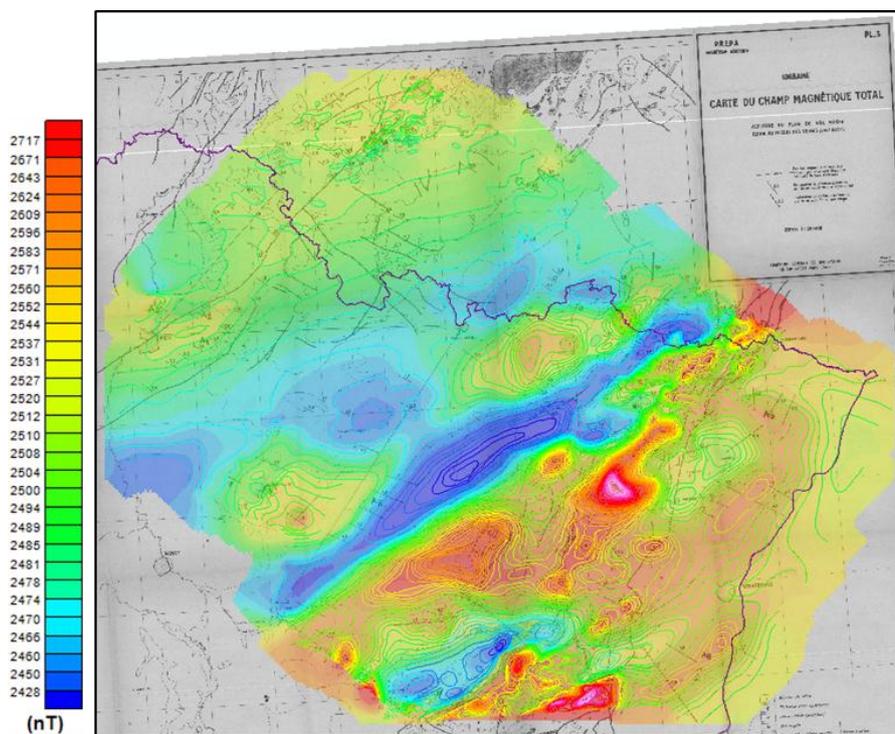


Figure 117 : Carte d'anomalies magnétiques du lever Bassin d'Alsace-Lorraine 1956, après numérisation, interpolation au pas de 500 m et prolongement vers le bas à élévation constante de 200 m au dessus du relief.

7.2.3. Réinterprétation des données gravimétriques et magnétiques

Des compléments d'analyses de l'information géologique contenue dans les données gravimétriques et magnétiques ont été réalisés, sur la base des interprétations déjà publiées, et en complément de celles-ci :

- sous forme cartographique, principalement d'un point de vue structural ;
- sous forme de coupes gravimétriques modélisées en 2D présentant des géométries géologiques.

a) Réactualisation des interprétations structurales en gravi / mag

En cohérence avec les études publiées, une analyse des structures géophysiques (gravimétriques et magnétiques) a été réalisée :

- concernant les limites de grands blocs tectono-métamorphiques crustaux issus de l'orogène Hercynien (Figure 118a et Figure 119a) ;
- concernant la structuration tectonique polyphasée régionale de la zone (Figure 118b, Figure 119b)

On constate de prime abord des signatures très nettes à l'échelle régionale, en magnétisme et *a fortiori* en gravimétrie. En particulier, les blocs Moldanubien (au sud de la faille de Lahaye-Lubine) et Saxothuringien, au nord, sont très clairement dissociés. Dans le bloc Saxothuringien, une série de structures SW-NE est également très nettement visible, correspondant à une série d'écaillés de croûte supérieure, initialement interprétées dans le profil ECORS. Un commentaire plus détaillé de ces cartes mériterait une analyse recoupant les informations structurales de terrain ; ce qui était au-delà des objectifs du projet.

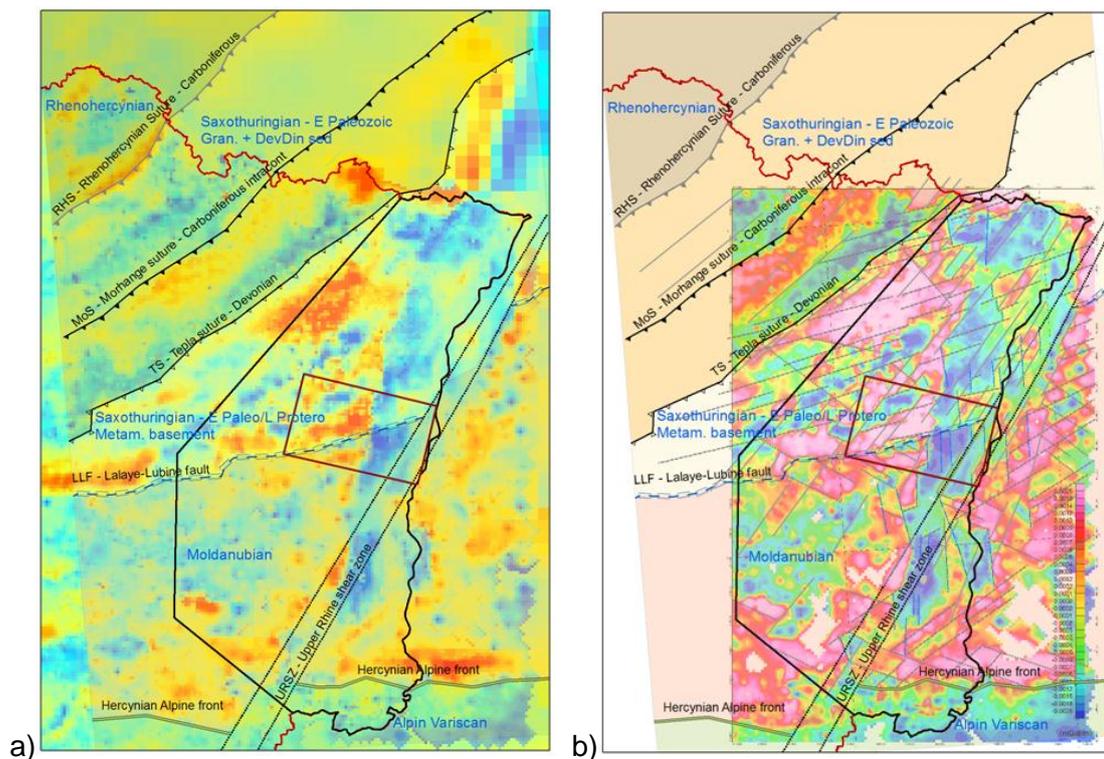


Figure 118 : a) Carte d'anomalies de Bouguer et interprétation des grands blocs tectonométamorphiques de la zone (modifié d'après Edel et Schulmann, 2009). b) Linéaments structuraux issus de l'analyse de la carte de gradient vertical des anomalies de Bouguer.

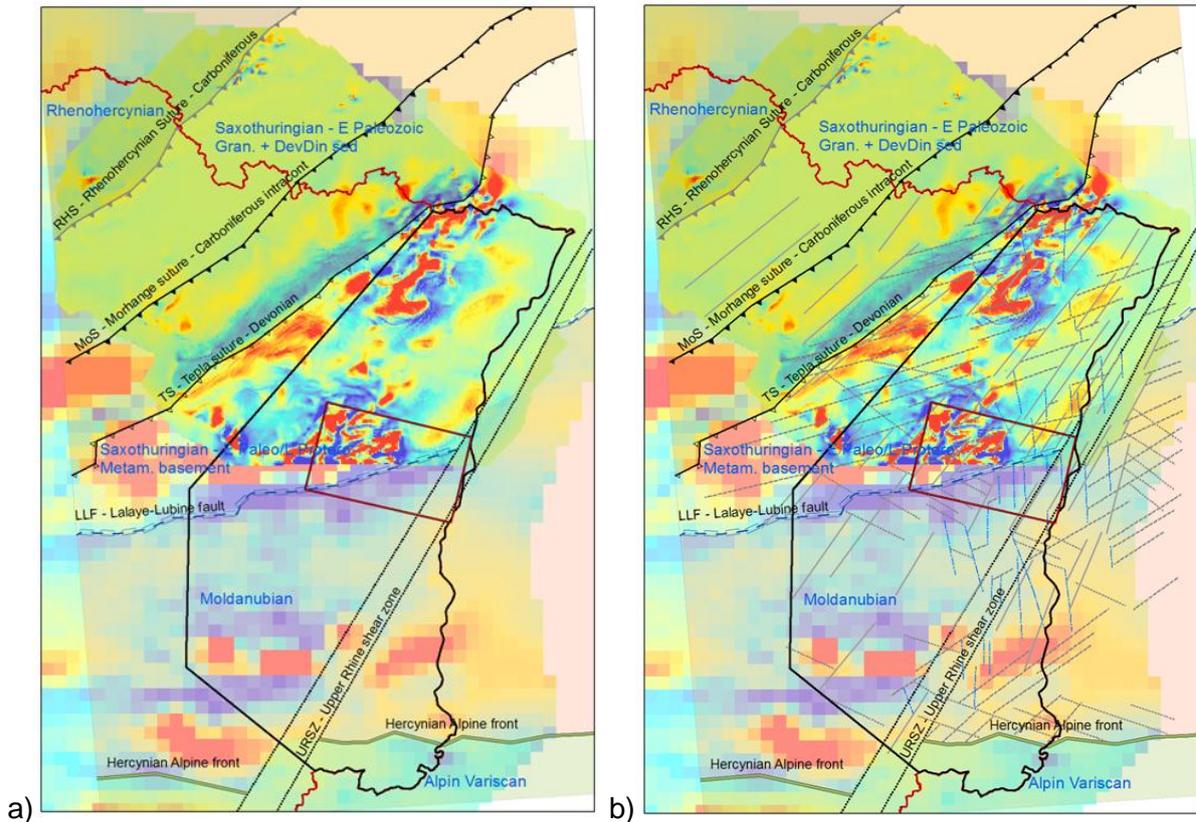


Figure 119 : a) Carte d'anomalies de Bouguer et interprétation des grands blocs tectonométamorphiques de la zone (modifié d'après Edel et Schulmann, 2009). b) Linéaments structuraux issus de l'analyse de la carte de gradient vertical des anomalies de Bouguer.

b) Modélisation de coupes gravimétriques régionales

Sur la base de modèles déjà publiés dans la littérature et en intégrant le maximum de données disponibles pour contraindre la modélisation, 6 coupes gravimétriques régionales ont été réalisées (localisation Figure 120). Les informations prises en compte pour la modélisation ont été pour l'essentiel :

- les cartes géologiques (à l'échelle du Million, cartes et coupes de la thèse Skrzypek [2011]) ;
- des coupes gravimétriques régionales publiées ;
- le profil sismique ECORS et son interprétation, notamment (Brun *et al.*, 1992 ; Rousset *et al.*, 1993) ;
- le modèle 3D GeORG du remplissage sédimentaire du Fossé rhénan ;
- une base de données de forages profonds du bassin de Paris et du Fossé rhénan ;
- les valeurs de densités des principales unités géologiques régionales, trouvées dans la littérature ;
- une carte du Moho intégrant toutes les informations sismiques disponibles sur la France.

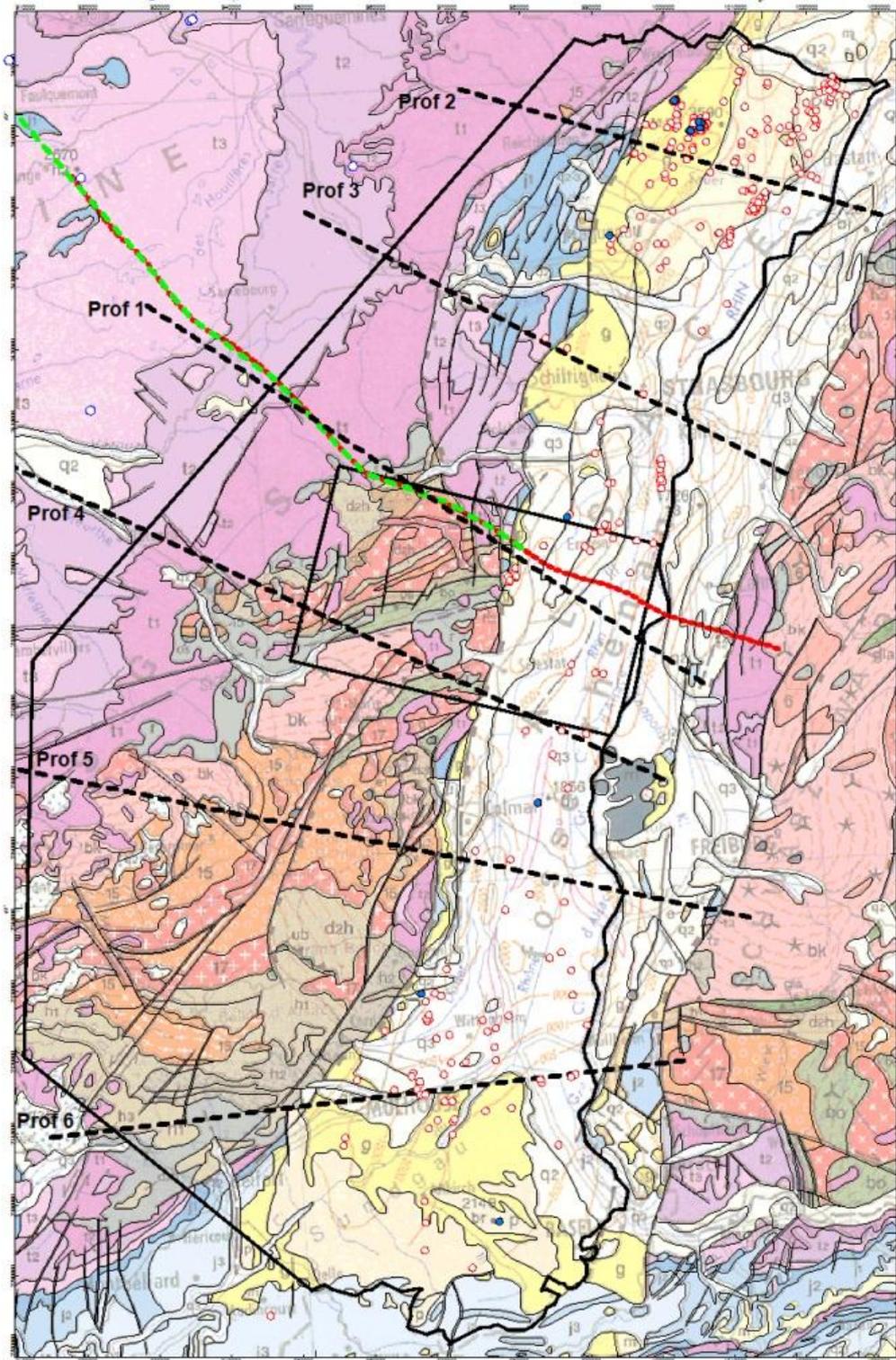


Figure 120 : Emprise de la zone du chantier Vosges - Fossé rhénan (lignes noires : emprises « régionale » et « locale ») et localisation des coupes gravimétriques régionales modélisées (pointillés noirs).

Sont également figurés les principales autres informations disponibles : les cartes géologiques (ici le Million de la France), le profil ECORS (pointillé rouge), une coupe gravimétrique régionale d'Edel et Schulmann (2009) et les forges profondes (cercles rouges dans le fossé rhénan, bleus dans le bassin de Paris).

Unité géologique / roche	Densité	Publication
Manteau	3.2	Edel et Schulmann, 2009
Croute inf. (layered)	2.95 2.85 – 2.9	Edel et Schulmann, 2009 Rousset <i>et al.</i> , 1993
Croute moy.	2.8	Edel et Schulmann, 2009
Croute sup. (average)	2.79 2.75	Edel et Schulmann, 2009 Rousset <i>et al.</i> , 1993
Croute sup. (« more reflective upper part of the heavy upper crust »)	2.85 2.82	Edel et Schulmann, 2009 Rousset <i>et al.</i> , 1993
Granites	2.58 – 2.62	Edel et Schulmann, 2009
Orthogneiss	2.62 – 2.65	Edel et Schulmann, 2009
Devonian-Early Carboniferous volcano-sediments	2.70 – 2.76	Edel et Schulmann, 2009
Diorites et tonalites	2.76	Edel et Schulmann, 2009
Morhange & Saverne structures (+)	2.87	Rousset <i>et al.</i> , 1993
Light variscan structures (-)	2.65	Rousset <i>et al.</i> , 1993
Recouvrement, bassin de Lorraine		
Trias	2.63 2.60	Edel et Schulmann, 2009 Rousset <i>et al.</i> , 1993
Permo-Carbo Permien	2.67 2.70	Edel et Schulmann, 2009 Rousset <i>et al.</i> , 1993
Carbonifère	2.65	Rousset <i>et al.</i> , 1993
Recouvrement, graben du Rhin		
Quaternaire à Tertiaire	2.45	Rousset <i>et al.</i> , 1993
Plio-Quat	2.25	Rotstein <i>et al.</i> , 2006
Late Oligocène	2.4	Rotstein <i>et al.</i> , 2006
Early Oligocène	2.47	Rotstein <i>et al.</i> , 2006
Mesozoic (Tertiaire)	2.58 – 2.62	Rotstein <i>et al.</i> , 2006
Jurassique à Permien	2.65	Rousset <i>et al.</i> , 1993
Permien	2.72	Rotstein <i>et al.</i> , 2006

Tableau 14 : Tableau récapitulatif des valeurs de densités des roches de la zone d'étude Vosges – Fossé rhénan, relevées dans la littérature.

L'approche de modélisation gravimétrique directe le long de coupes, a consisté à (Figure 121) :

- inventoirer des coupes gravimétriques régionales, notamment Rotstein *et al.*, 2006 et Edel et Schulmann, 2009 ; les géoréférencer et les digitaliser dans un logiciel de modélisation gravimétrique ;
- affecter aux unités géologiques des densités (selon la littérature) ;
- une fois la première coupe modélisée (le long du profil ECORS), en calculer l'effet gravimétrique ; le comparer aux données ;
- modifier cette coupe pour refléter la compréhension géologique contenue dans les travaux récents (notamment thèse Skrzypek [2011]).

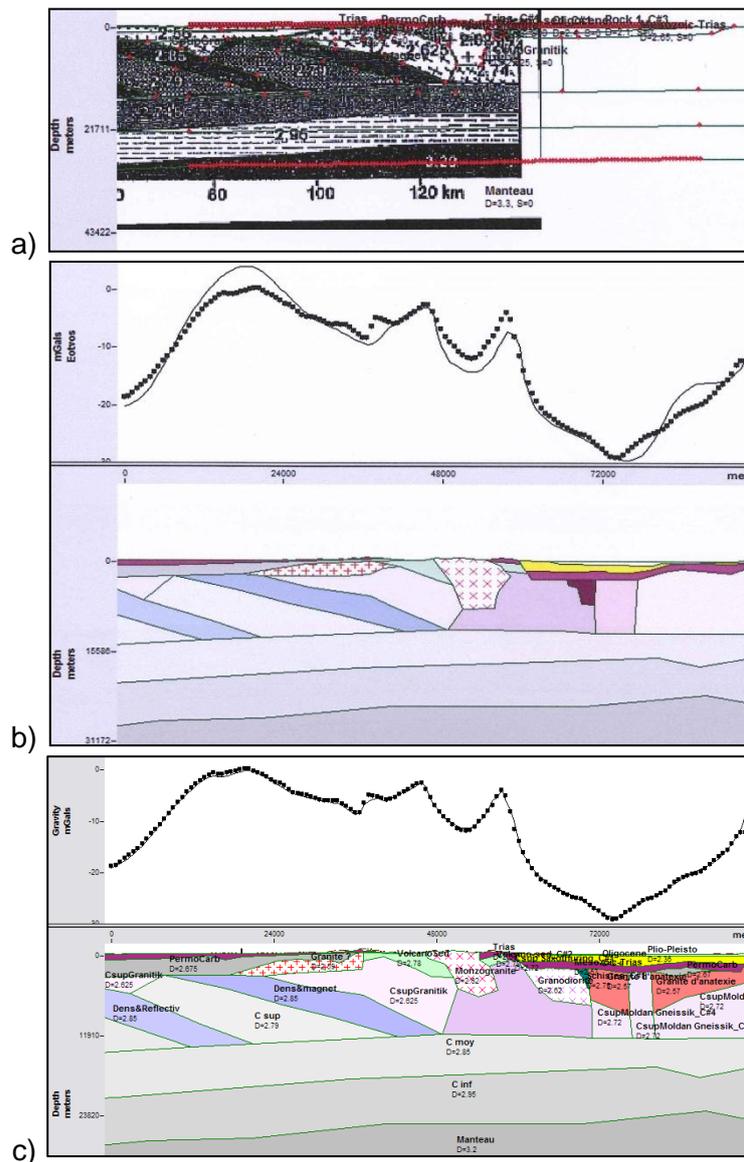


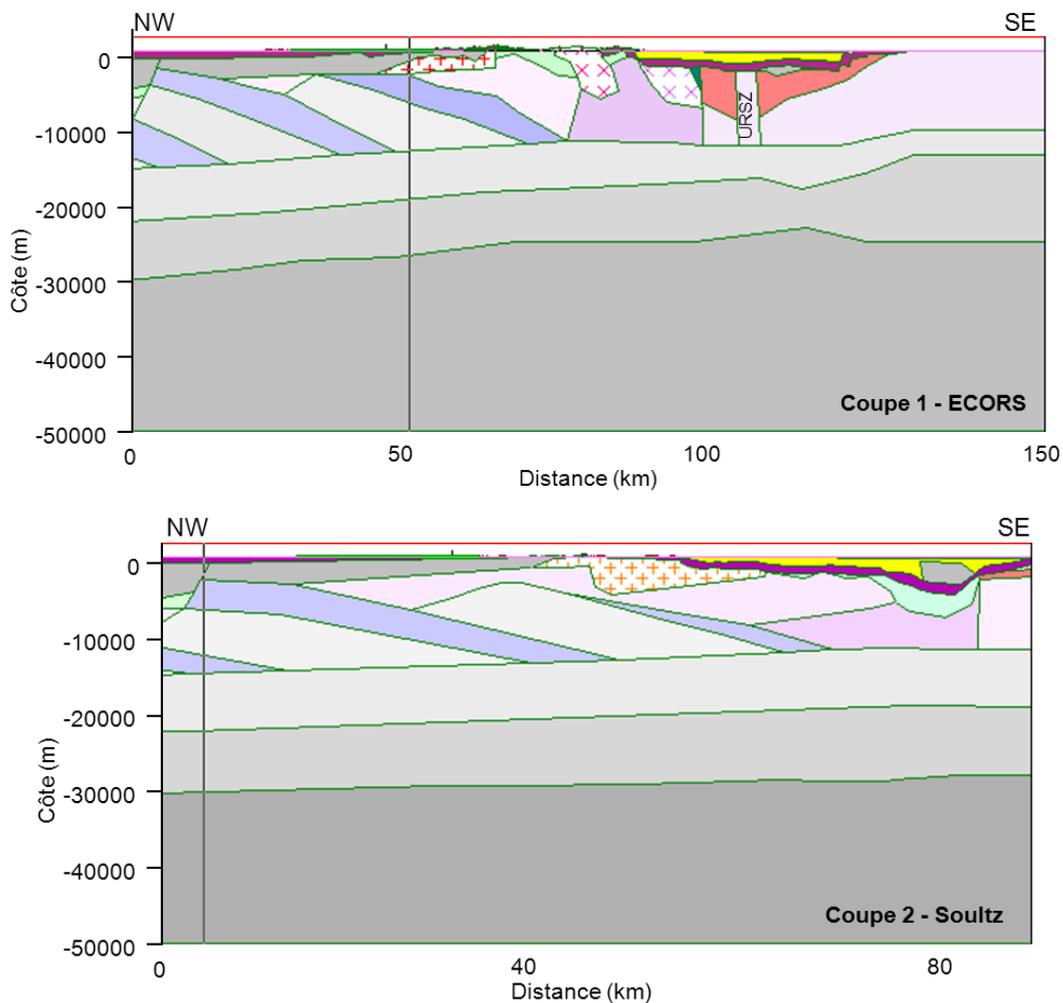
Figure 121 : Illustration de la procédure suivie pour intégrer les informations de la littérature dans les nouvelles coupes gravimétriques modélisées.

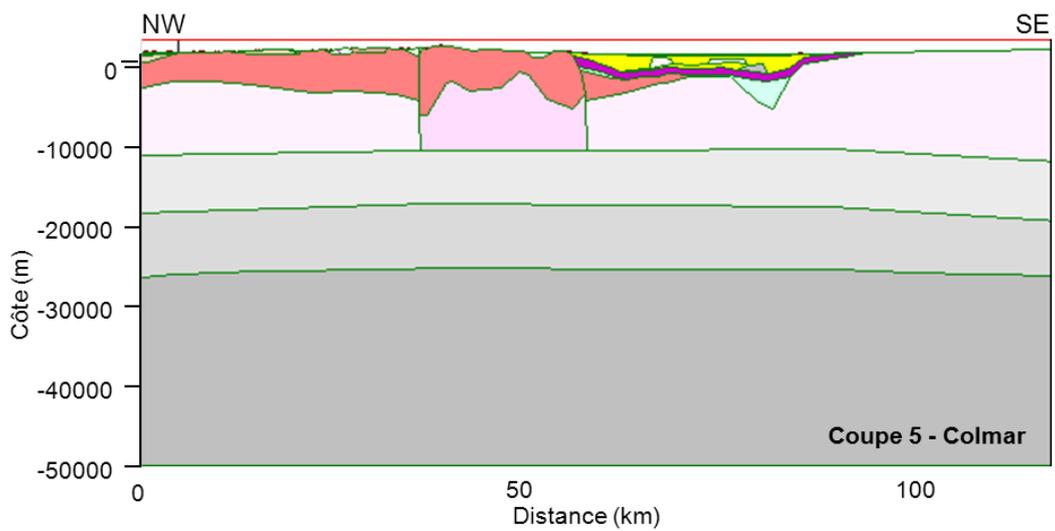
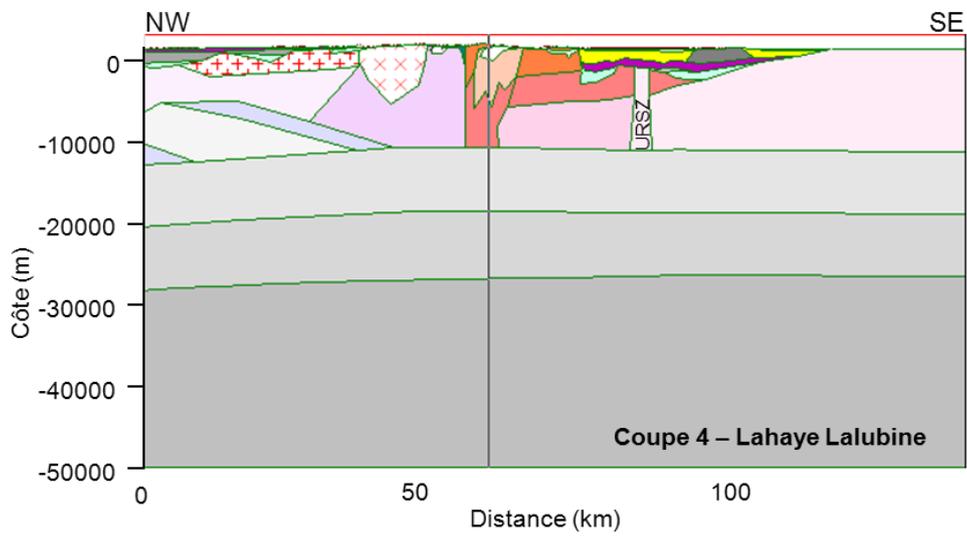
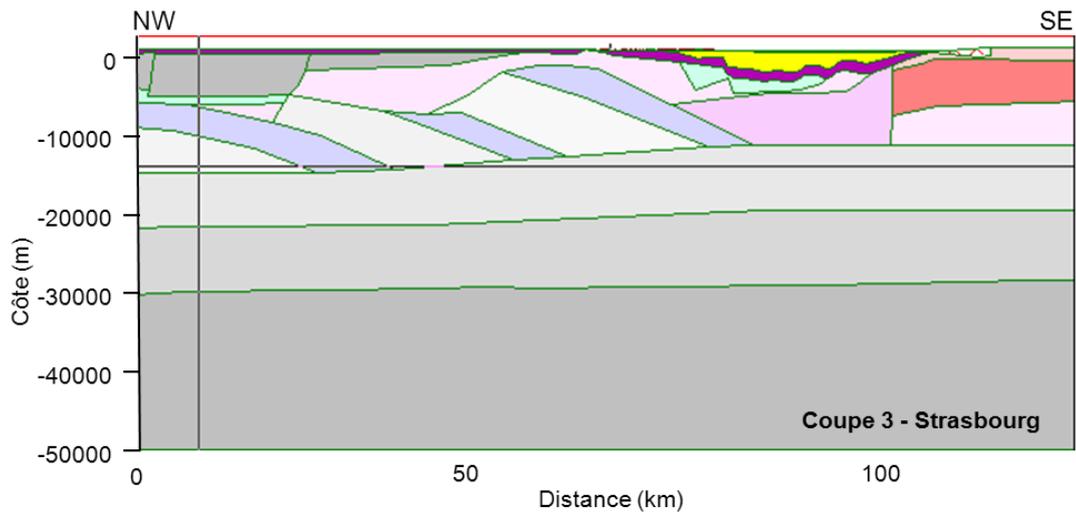
- a) géoréférencement et digitalisation de tout ou partie de coupe(s) gravimétrique(s) de la littérature, b) le premier calcul de l'effet gravimétrique du modèle « de la littérature » (trait plein) est comparé aux données (pointillés), c) ce modèle initial est modifié à la lumière des données disponibles, de manière à ce que son effet ajuste les données.

À partir de cette première coupe le long du profil ECORS, cinq autres coupes crustales ont été extrapolées, de manière à respecter :

- la carte géologique, et les géométries et plongements de surface ;
- une continuité latérale des grandes unités et domaines crustaux, tels que vus précédemment aux travers des cartes gravimétriques et magnétiques ;
- les forages profonds et le modèles GeORG de remplissage sédimentaire du Fossé rhénan ;
- les anomalies gravimétriques.

Ces coupes dépassaient de plusieurs dizaines de kilomètres les limites de la zone d'étude de manière à s'affranchir des effets de bord ; elles sont présentées en (Figure 122) découpées sur l'emprise rectangulaire du projet.





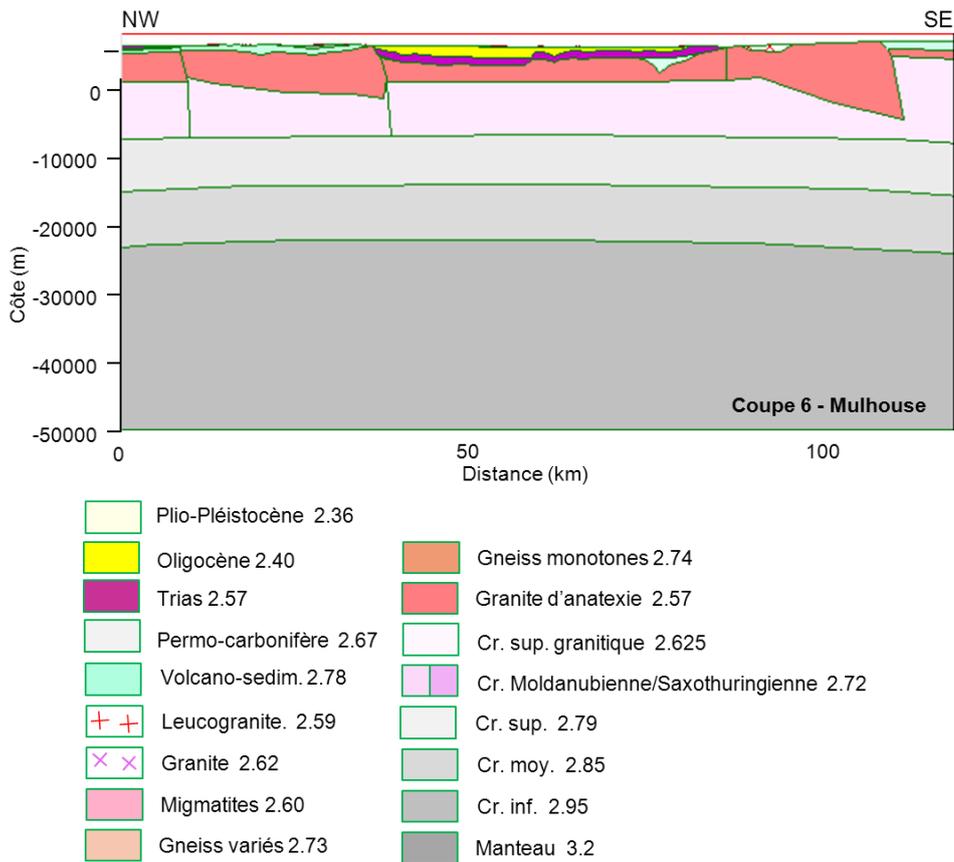


Figure 122 : Coupes gravimétriques modélisées le long des six profils localisés en Figure 120.

L'exercice de reprise de coupes gravimétriques publiées et leur mise à jour et extrapolation à l'ensemble de la zone du projet, en s'appuyant sur un jeu de données auxiliaires (géologie réactualisée, forages, sismique, etc.) a permis d'investiguer la structuration crustale très complexe de la zone de façon cohérente à l'échelle régionale. En particulier, les grandes structures qui affectent la zone ont été intégrées avec une attention particulière dans les modèles – la faille de Lahaye Lubine constitue une limite majeure entre les blocs Moldanubien au sud et Saxothuringien au nord ; elle est elle-même clairement décalée en sénestre le long du cisaillement crustal de l'URSZ (Upper Rhine Shear Zone) qui prend le graben du Rhin en écharpe. La faille le long de laquelle se met en place le Granite des Crêtes constitue également un accident important, qui affecte toute la croûte supérieure. Et nouveauté par rapport aux modèles antérieurs, on a pu proposer pour les granites d'anatexie, qui affleurent dans la moitié sud des Vosges, une position structurale cohérente à l'échelle de la zone d'étude. La prise en compte de cette unité, majeure dans la géologie des Vosges, réactualise très sensiblement la compréhension qu'on avait des grandes unités du massif.

7.2.4. Conclusions

Les modèles ne sont pas commentés plus en détail ici ; cela mériterait une publication en soi. Enfin, l'ensemble des travaux d'interprétation issus de l'analyse des données gravimétriques et magnétiques déjà publiés ou réalisés dans le cadre du projet, présentés ci-avant, ont été intégrés dans deux modèles géologiques géométriques 3D ; l'un d'échelle régionale, l'autre d'échelle locale (localisations en Figure 120).

7.3. RESSOURCES MINÉRALES

7.3.1. Actions menées dans le cadre du chantier-pilote

À l'heure d'une tension toujours plus accrue sur les ressources minérales, l'approche multi-échelles du RGF doit permettre de répondre de façon cohérente aux diverses questions des acteurs publics et privés : Où trouver les ressources ? Pour quoi faire ? Où ont-elles été, sont-elles exploitées ? Quels sont les risques potentiels du passif minier sur l'environnement (après-mine) ? Quel est le potentiel de la région étudiée ?

Le démonstrateur RGF Vosges - Fossé rhénan a été l'occasion d'établir une démarche de travail permettant de fournir des livrables répondant à ces questions. Ainsi, il a été décidé, dans le cadre de ce chantier-pilote, d'établir à l'échelle du massif des Vosges et du Fossé rhénan, différentes cartes et bases de données illustrant la répartition géographique :

- des concentrations primaires (gîtes et indices), à savoir les substances métalliques-non métalliques (cuivre, plomb, zinc, argent, fluorine, etc.) et énergétiques (charbon, pétrole, gaz, tourbe) ;
- des concentrations anthropiques, à savoir les anciens sites de traitement et les anciennes haldes ;
- des formations géologiques susceptibles de renfermer de nouveaux indices minéralisés en se basant sur une étude géostatistique de prédictivité sur des substances tels que la fluorine (CaF_2), le molybdène (Mo) et le tungstène (W).

Le travail a consisté à collecter et synthétiser les nombreuses données disponibles sur la région, notamment celles issues de la base de données européenne « ProMine » (<http://promine.gtk.fi/>), elle-même issue pour partie de l'Inventaire minier de la France. Une revue approfondie de la bibliographie régionale a également été menée via les nombreux rapports miniers, articles scientifiques, synthèses régionales et cartes disponibles. La Banque de données du Sous-Sol (BSS) a été consultée afin de compléter ce travail de synthèse.

7.3.2. Résultats et retour d'expérience

Le travail effectué dans le cadre du démonstrateur RGF pour la thématique « Ressources Minérales » a permis d'obtenir deux bases de données répertoriant de façon exhaustive toutes les concentrations primaires majeures de la région Vosges - Fossé rhénan, ainsi que les concentrations anthropiques (Figure 123a). Au total, 301 points pour la base « Concentrations primaires » et 51 points pour la base « Concentrations anthropiques » ont été renseignés en indiquant le maximum d'informations relatives à chaque gîte et indice minéralisé (substance, morphologie, puissance, teneur, tonnage, typologie). Il a été pris grand soin de mettre en cohérence les gîtes et la géologie afin d'éviter certaines erreurs comme des gîtes filoniens localisés loin des filons cartographiés. Un effort important a été porté sur la vérification de la localisation exacte des gîtes et indices amenant à une large reprise des coordonnées géographiques existantes. Cette action s'est faite par le biais d'un retour aux documents originaux (cartes, documents de forages BSS, rapports d'étude, articles scientifiques) et à l'utilisation de photographies satellite et/ou aériennes.

Ce travail a permis de mettre en évidence certains problèmes. En effet, il est apparu que de nombreux filons normalement associés à des gîtes et indices n'étaient pas cartographiés remettant en cause de façon notable le processus de mise en cohérence gîtes/géologie. Cette remarque est particulièrement évidente sur la carte au 1/50 000 de Thann où de nombreux filons minéralisés et donc d'indices ne figurent pas sur la carte initiale. Un rajout a ainsi été fait

sur la carte géologique finale du démonstrateur. C'est donc bien un problème d'échelle qui se pose pour la représentation des gîtes et indices minéralisés, alors que l'échelle de référence du RGF est le 1/50 000. Au final, en ce qui concerne les concentrations primaires, ce sont quelques 130 nouveaux points qui ont été renseignés afin de compléter le panorama des ressources métalliques, non-métalliques et énergétiques de la zone d'étude (Figure 123b). Il a également été constaté le manque d'informations disponibles concernant les propriétés intrinsèques de nombreux gîtes et indices (morphologie, puissance, tonnage, teneur, etc.). Mais l'un des points majeurs soulevés par ce travail est surtout la totale obsolescence de la typologie attribuée à certains gîtes et indices, basée sur des concepts métallogéniques de plus de 30 ans. Une revisite parfois totale serait nécessaire pour s'assurer d'une donnée fiable et de qualité.

En ce qui concerne les cartes de prédictivité élaborées dans le cadre de ce travail (fluorine, W, Mo), certaines réserves sont à exprimer (Figure 123c). Le nombre de données disponibles est souvent insuffisant afin de s'assurer de la validité du calcul géostatistique. La mise en cohérence gîtes/géologie doit être sérieusement vérifiée afin d'éviter certains biais, telle que la non-superposition de gîtes et indices minéralisés avec les filons cartographiés. Dernier problème à ne pas négliger : l'échelle de travail ou la précision cartographique des données. En effet, certains filons minéralisés peuvent ne pas être représentés et donc impliquer un biais important dans le résultat d'une étude géostatistique de prédictivité.

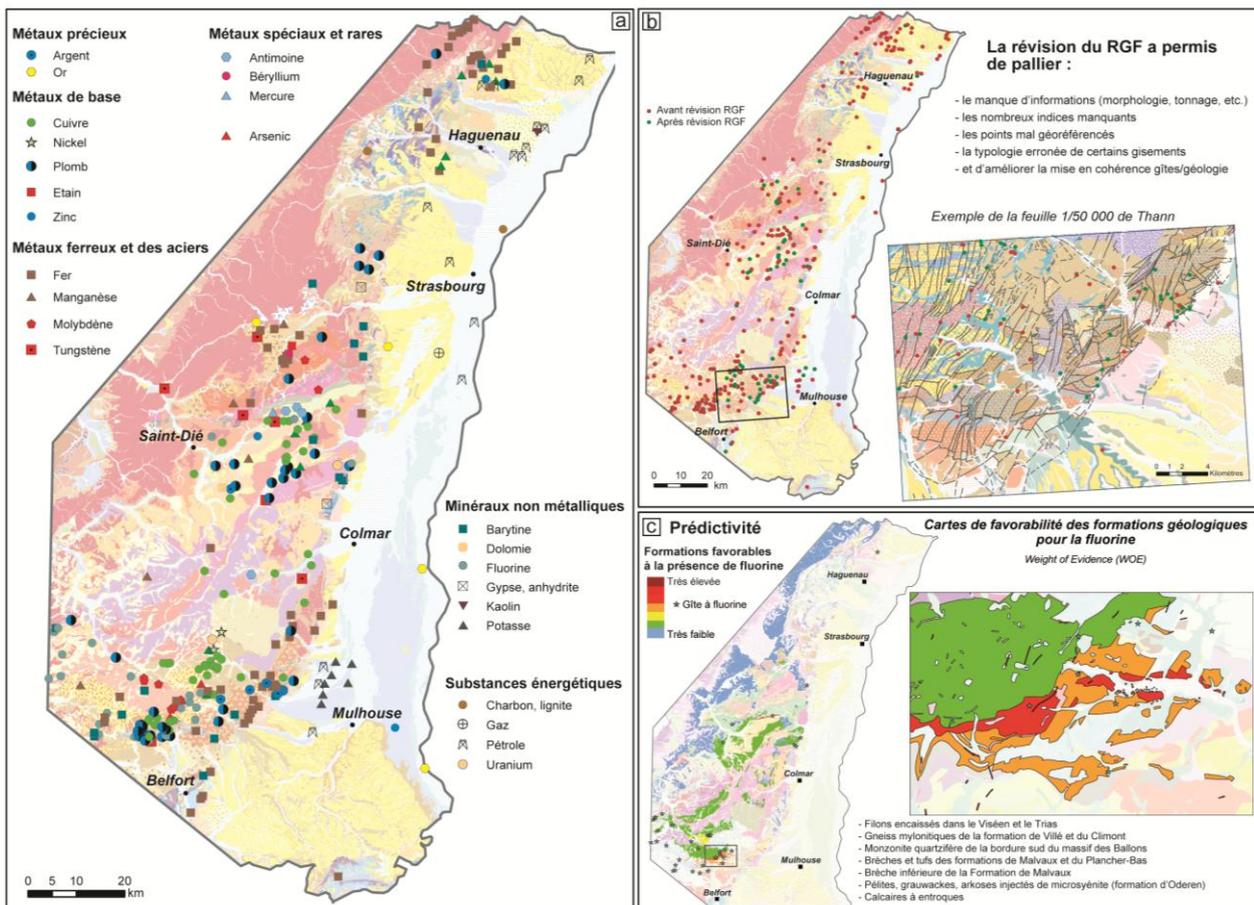


Figure 123 : Résultats de la thématique « Ressources Minérales » du démonstrateur RGF Vosges - Fossé rhénan.

(a) Carte des gîtes et indices métalliques, non-métalliques et énergétiques de la région Vosges - Fossé rhénan, (b) Évolution des connaissances avant et après la révision effectuée dans le cadre du RGF, (c) Cartes de prédictivité pour la fluorine.

7.3.3. Recommandations pour les chantiers futurs

La démarche et le travail effectués sur la thématique « Ressources Minérales » dans le cadre du démonstrateur RGF a permis de mettre en évidence de nombreux verrous qui devront être considérés avec attention pour les futurs chantiers RGF (ex. Pyrénées) :

- replacer les « Ressources Minérales » au cœur du RGF en association avec l'évolution de la connaissance géologique régionale par le biais de sujets de thèse transverses (ex. métallogénie, géodynamique et sédimentologie), de projets de Recherche ou de projets commerciaux pour les secteurs privé et/ou public ;
- revoir la typologie de certains gîtes et indices en France qui est actuellement associée à des concepts de plus de 30 ans impliquant une revisite parfois complète ;
- être force de proposition quant à la définition du potentiel minier d'une région donnée : prédictivité, intégration multi-échelles et multi-méthodes (géophysique, géochimie, modélisation 3D) ;
- mieux intégrer le risque environnemental d'anciens sites miniers d'extraction et/ou de traitement, autrement dit le volet « Après-mine » ;
- s'assurer d'une échelle adaptée pour les gîtes et indices minéralisés, afin d'éviter une perte d'informations. Bien que l'échelle de référence du RGF soit le 1/50 000, il serait souhaitable pour le cas des ressources minérales d'affiner cette échelle ;
- s'assurer de la précision des coordonnées géographiques pour les différents gîtes et indices afin de maintenir la mise en cohérence gîtes/géologie ;
- créer et officialiser une symbologie des gîtes et indices par substance et typologie en réfléchissant à un référentiel de style au sein du RGF.

7.4. REFLEXION AUTOUR D'UN VOLET CARRIÈRES ET MATÉRIAUX POUR LE FUTUR RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE (BRGM/RP-62339-FR)

7.4.1. Actions menées dans le cadre du chantier pilote

Parmi les thématiques appliquées touchant au sol et au sous-sol, les ressources minérales en général et les matériaux de carrières en particulier constituent un domaine de premier intérêt, répondant à la fois à des enjeux économiques, environnementaux et d'aménagement du territoire :

- contrairement aux métaux dont l'extraction sur le territoire métropolitain a cessé depuis de nombreuses années, la France reste un important producteur de matériaux extraits de carrières avec plus de 4 700 carrières en activité recensées à fin 2012. Ces exploitations autorisées au titre des Installations Classées pour la protection de l'Environnement (ICPE) fournissent des granulats et des roches ornementales et de construction pour le secteur du Bâtiment et des Travaux Publics, ainsi que certains minéraux à forte valeur ajoutée indispensables à l'industrie nationale (minéraux industriels) ;
- durant les dernières décennies, les préoccupations environnementales se sont progressivement renforcées et les conditions d'accès à la ressource durcies. Dans le même temps, les besoins en matériaux extraits de carrières se sont accrus, générant des tensions sur l'approvisionnement notamment en granulats. Cette problématique d'approvisionnement de la France en matériaux naturels issus de l'industrie extractive à concilier avec la protection de l'environnement a été prise en compte par le législateur dès 1993 avec la mise en place des schémas départementaux des carrières, lesquels devraient sous peu être remplacés par des schémas à une échelle régionale plus à même d'apporter des éléments de réponse aux

questions de gestion intégrée des flux entre zones de production et bassins de consommation, de modes d'approvisionnements ou de modalités de transport ;

- chaque schéma comporte un volet « inventaire des ressources » dont l'objectif est de recenser et décrire les ressources géologiques potentielles en matériaux. Les résultats sont restitués sous forme essentiellement d'une carte des ressources accompagnée d'une notice. Ces documents sont à ce jour produits sans appliquer de méthodologie précise reproductible à l'ensemble du territoire français. En outre, ils ne fournissent aucune donnée sur les caractéristiques géomécaniques et peu de précisions sur les usages des niveaux exploitables inventoriés.

Dans ce contexte, les actions menées ont visé à décrire le volet « Carrières et matériaux » qui pourrait être dévolu au futur RGF et dont le double-objectif serait de faire progresser les connaissances sur les ressources en matériaux extraits de carrières, et mettre à disposition des outils décisionnels pour les schémas (régionaux) des carrières.

7.4.2. Résultats et retour d'expérience

Les actions menées ont permis de développer les bases d'une méthodologie (reproductible) de production (semi-automatique) de cartes descriptives des ressources (cartes des carrières actives et fermées, des formations géologiques, lithologiques, des usages connus, de paramètres physico-chimiques ou mécaniques, etc.) et de cartes décisionnelles (cartes d'exploitabilité, de qualité géotechnique, d'aptitude à l'emploi, de prédictivité, etc.) s'appuyant sur une chaîne de traitements manuels ou informatiques de données d'entrée.

Ces données d'entrée sont pour partie des données existantes extraites directement de la base de données du RGF même et de la base nationale de données des carrières françaises (« B2D-Carières » également gérée par le BRGM). Elles sont normalement à compléter par certaines données existantes, issues d'une recherche bibliographique / documentaire spécifique ou collectées auprès des producteurs / détenteurs potentiels, ainsi que par des données nouvelles, issues d'investigations sur le terrain et de la caractérisation d'échantillons originaux.

La méthodologie développée comporte les six étapes successives décrites ci-dessous :

- inventaire des carrières : s'appuyant sur la « B2D-Carières » gérée par le BRGM en partenariat avec le MEDDE ;
- inventaire des ressources potentielles :
 - inventaire des formations géologiques exploitées en considérant qu'elles constituent pour la suite les seules ressources potentielles en matériaux / Exploitation d'une formation attestée par la présence avérée d'au moins une carrière en son sein,
 - croisement géographique automatique entre les points carrières (actives et fermées) extraits de la B2D-Carières et l'emprise des formations (unités lithostratigraphiques de niveau « Formation ») issues de la B2D - RGF,
 - validation / complément terrain dans le cadre du RGF, pour prise en compte des cas notamment où plusieurs niveaux superposés sont exploitables / Ce ou ces niveaux superposés exploitables sont sous couverture...,
 - production de carte géologique des ressources en matériaux de carrières ;
- détermination de la lithologie des ressources potentielles :
 - valorisation de la B2D - RGF pour la production de carte lithologique des ressources en matériaux de carrières,

- production de cartes dérivées de la lithologie / Exemple : carte « roche massive vs roche meuble » des ressources en matériaux de carrières ;
- inventaire des usages des ressources potentielles :
 - recensement des usages connus des ressources identifiées en matériaux, à partir de la B2D-Carières = information incomplète, disponible pour les seules les carrières actives ou récemment fermées,
 - croisement géographique automatique entre les points carrières (d'usage(s) connu(s) ou inconnu(s)) extraits de la B2D-Carières et l'emprise des ressources en matériaux,
 - recherche documentaire & investigations sur le terrain, pour complément d'information sur les usages, envisageable dans le cadre du RGF,
 - production de carte d'usage(s) des ressources en matériaux de carrières ;
- inventaire des données physico-chimiques & mécaniques :
 - sélection des caractéristiques intrinsèques (physiques, chimiques ou mécaniques) renseignant directement ou indirectement sur l'adéquation des formations géologiques aux principales familles d'usages rencontrées (en particulier : granulats et roches ornementales et de construction),
 - recherche bibliographique et documentaire des données disponibles (existantes et accessibles) concernant chaque paramètre sélectionné,
 - acquisition de données originales issues de la caractérisation en laboratoire de nouveaux échantillons spécifiquement collectés sur le terrain à cet effet, dans le cadre du RGF / En fonction du nombre et de la répartition des données recueillies pour chacun des paramètres ciblés / Justifiée essentiellement dans le cas des granulats,
 - bancarisation dans la B2D - RGF,
 - production de cartes de paramètres ;
- production de cartes décisionnelles (concernant les granulats en priorité, mais pas seulement) :
 - cartes d'exploitabilité à partir d'autres données de la B2D - RGF de types « épaisseurs des terrains de couverture », « Fracturation », etc.,
 - cartes prédictives de certains paramètres ciblés, en appliquant des méthodes d'interpolation déterministes et / ou géostatistiques... sous réserve de disposer des adéquates (quantité, qualité, répartition géographique, etc.).

7.4.3. Recommandations pour les chantiers futurs

Dans le temps et avec les moyens impartis, il n'a pas été possible de réaliser les tâches de collecte des données existantes ni d'acquisition de données nouvelles concernant les paramètres physico-chimiques et mécaniques sélectionnés (étape 5), ni donc au final de produire de cartes décisionnelles (telles que prévues à l'étape 6).

La méthodologie développée reste donc à compléter / finaliser en la testant dans son intégralité et en l'appliquant à de nouvelles zones-tests du prochain chantier RGF. Elle devra aussi in fine faire l'objet d'une automatisation de certains traitements. De même, la méthodologie s'est appuyée sur les données uniquement « 2D » du RGF, et une valorisation d'autres données / résultats du RGF (« 3D », etc.) est à envisager.

L'acquisition de données nouvelles issues d'investigations sur le terrain (description de carrières ciblées, échantillonnage, caractérisation d'échantillons originaux, bancarisation dans la B2D - RGF) est à prévoir et à intégrer au phasage global du prochain chantier RGF, et ce

suffisamment tôt et si possible de manière coordonnée avec d'autres thématiques (régolithe, risques géologiques, etc.) dans un objectif notamment de mutualisation de certaines données.

Enfin, la collecte des données existantes auprès de certains producteurs / détenteurs externes potentiels pose la question du partenariat et des conditions de mise à disposition des données, et constitue un point dur à expérimenter le plus en amont possible.

7.5. RISQUE SISMIQUE

7.5.1. Actions menées dans le cadre du chantier pilote

Pour avoir une bonne estimation du risque sismique dans une région, il est nécessaire de connaître à la fois l'aléa sismique, les enjeux exposés et leur vulnérabilité face au séisme. L'aléa sismique lui-même se divise en deux volets distincts : l'aléa sismique régional pour la partie concernant les failles actives et l'aléa sismique local pour la partie concernant la géologie superficielle. Dans les deux cas, une bonne connaissance de la géologie est indispensable à des études de qualité.

Pour le cas particulier de l'aléa sismique local, une bonne connaissance de la géométrie et des caractéristiques mécaniques des couches géologiques superficielles susceptibles d'amplifier localement le mouvement sismique lors d'un séisme (on parle alors d'effets de site lithologiques) est nécessaire.

Dans le cadre du démonstrateur du RGF sur la région Alsace-Vosges, nous avons pu tester l'apport des données géologiques fournies par le RGF sur trois types d'études d'aléa sismique local avec trois niveaux distincts de complexité dans les données géologiques d'entrée, à savoir :

- un scénario de dommages aux bâtiments nécessitant des informations sommaires sur la nature et l'épaisseur des formations quaternaires ;
- une simulation numérique en 3D de la propagation des ondes sismiques dans la région de Sélestat avec un modèle géologique 3D de 50 x 30 x 30 km ;
- un microzonage sismique basé sur des simulations numériques 1D nécessitant une connaissance très fine de la variabilité des natures et épaisseurs de couches superficielles et incluant des propriétés mécaniques non-linéaires.



Figure 124 : Illustration des différents niveaux de complexité de données d'entrée des trois actions « risque sismique » menées dans le cadre du démonstrateur RGF Vosges - Fossé rhénan. La flèche indique le niveau de complexité et de variété croissant des données d'entrée nécessaires aux études, la partie rouge indiquant le niveau de complexité le plus fort.

7.5.2. Résultats et retour d'expérience

a) Scénario de dommages

Un scénario de dommages est une application opérationnelle qui consiste à simuler les conséquences d'un séisme de référence sur le milieu, en particulier sur les personnes et les biens. Dans le cadre du démonstrateur RGF, un test a été réalisé sur l'agglomération mulhousienne où une étude similaire avait été menée en 2010 dans le cadre de l'exercice de crise RICHTER mené sur le Haut-Rhin et le Territoire de Belfort. Pour cette application, le logiciel utilisé est Armagedom (Sedan *et al.*, 2013²).

En pratique, le travail sur la partie géologique du scénario a consisté à définir une géologie simplifiée des formations superficielles à partir des données géologiques complexes issues du RGF et établir une grille des épaisseurs des formations quaternaires. Ensuite, ces données ont été combinées aux données géophysiques disponibles sur la zone pour établir une cartographie des classes de sol réglementaires basées sur les règles parasismiques EuroCode8 (EC8). Ces données ont été utilisées pour établir un scénario de dommages sous sollicitation sismique en suivant la même procédure que celle menée en 2010 pour l'exercice de crise RICHTER. Nous avons ainsi pu directement comparer les résultats provenant des deux études.

Les résultats sont très positifs, aussi bien en termes d'accès aux données géologiques, d'adaptation des données disponibles aux besoins exprimés par les utilisateurs, que de qualité des données puisque les résultats ont montré une nette amélioration des caractérisations des sols avec des résultats beaucoup plus réalistes que ceux obtenus en 2010 (Figure 125).

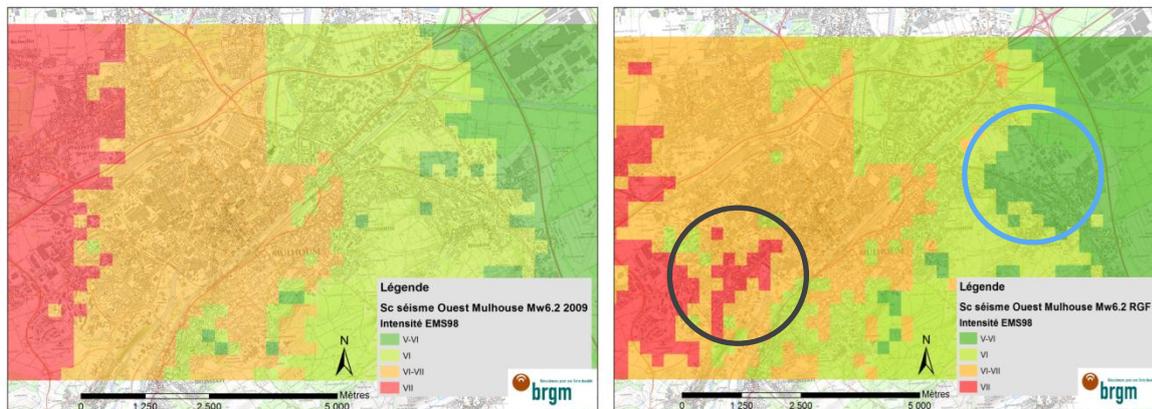


Figure 125 : Intensité macrosismique (échelle EMS98) calculée à partir des données géologiques disponibles en 2010 (gauche) et celles issues du RGF (droite) pour le même séisme de scénario. Une meilleure connaissance de l'épaisseur des couches superficielles (exemple indiqué par un cercle noir) et de la lithologie (exemple indiqué par un cercle bleu) permet d'affiner les modèles de réponses de sol sous sollicitation sismique et d'améliorer les scénarios de dommages potentiels.

b) Modélisation des propagations d'ondes sismiques en 3D

Nous avons également réalisé une modélisation 3D de la propagation des ondes sismiques dans le modèle à emprise réduite comprenant le modèle le plus fin du régo-lithe au niveau de Sélestat. Ce type d'application nécessite des temps de calcul importants et sont pour l'instant

² Sedan O., Negulescu C., Terrier M., Roullé A., Winter T. & Bertil D. (2013) - Armagedom — A Tool for Seismic Risk Assessment Illustrated with Applications, *Journal of Earthquake Engineering*, 17:2, p. 253-281.

réservée à des fins de recherche. Le calcul a été fait via le code EFISPEC3D (<http://efispec.free.fr>).

Les géologues ont fourni, via le RGF : la localisation de la faille sismogène, la nature des formations géologiques en chaque nœud du modèle maillé et une topographie fine via un MNT. Les sismologues, eux, ont fourni le maillage du modèle 3D (via le mailleur CUBIT 13.2), le modèle de source sismique ainsi que les paramètres mécaniques des différentes couches. Pour le modèle final, les hypothèses suivantes ont été suivies : couches homogènes, modèle élastique, pas de prise en compte des failles actives (sauf pour la faille sismogène). Le calcul a été réalisé sur une grappe INTEL et a nécessité 20 jours de calcul pour une fréquence maximale simulée de 3 Hz.

Là encore, les résultats sont positifs (Figure 126), avec une bonne adéquation entre les besoins et les données disponibles et une bonne communication entre les outils géologiques et l'outil de simulation 3D. Il convient néanmoins de rappeler que ces simulations nécessitent une connaissance fine des caractéristiques mécaniques des formations superficielles ce qui n'était pas le cas ici. Nous avons dû extrapoler ce type de paramètres à partir de données très disparates et non mises en forme (pas de base de données associée), ce qui pourrait compliquer considérablement ce type d'étude dans une situation « réelle ».

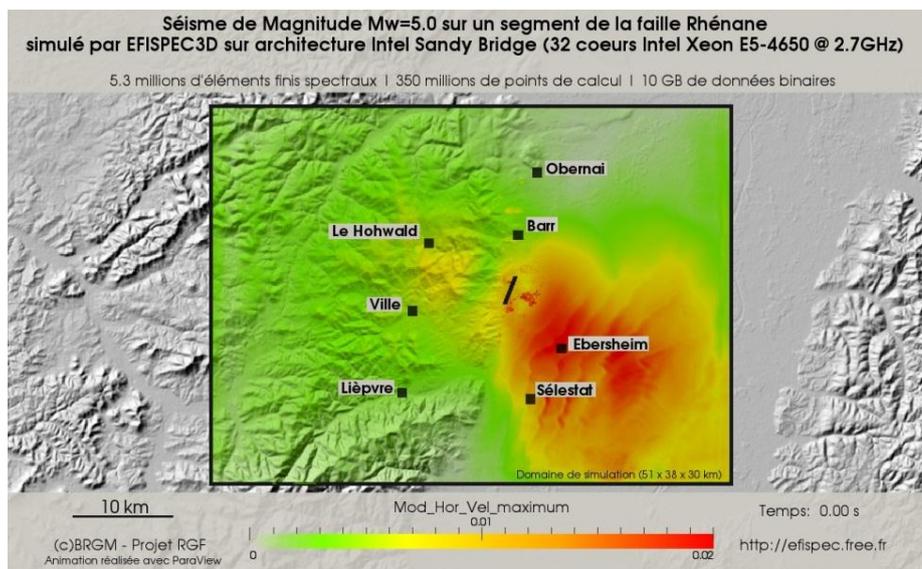


Figure 126 : Résultat de la simulation 3D de propagation d'ondes sismiques sur la zone de Sélestat suite à un séisme de magnitude $M_w = 5,0$ sur un segment de la faille Rhénane.

Le rectangle noir indique les limites du modèle géologique, la ligne noire au sud de Barr indique la localisation du segment de faille sismogène utilisée pour cette simulation. Le résultat est donné sous forme de pic maximal de vitesse horizontale (PGV).

Les résultats indiquent des mouvements sismiques maximaux (couleur rouge) au niveau du bassin à la hauteur d'Ebersheim : ces effets sont liés à la fois à la radiation de la source sismique et à l'amplification du mouvement sismique liée à la présence de sédiments en surface.

c) *Microzonage sismique*

Un microzonage sismique est une application opérationnelle qui consiste à cartographier et quantifier l'aléa sismique à l'échelle locale pour aider à l'aménagement du territoire (sensibilisation, réglementation adaptée au contexte local via les Plans de Prévention des Risques). Ce type d'étude nécessite une cartographie fine des formations géologiques superficielles, ainsi qu'une bonne connaissance de leurs propriétés mécaniques via des données géophysiques et géotechniques. La quantification de la réponse des sols sous séisme se fait via des simulations numériques 1D incluant les comportements non linéaires des sols par

le logiciel CyberQuake. Dans le cadre du démonstrateur, seule la première étape du travail consistant à définir des colonnes de sol 1D type a été amorcée.

Les tests réalisés sur la zone ont montré l'utilité des données RGF pour ce type d'étude mais les données quantitatives sur les caractéristiques mécaniques des couches n'étaient pas assez nombreuses pour aller jusqu'au bout de l'exercice. Les données disponibles dans le RGF présentent néanmoins un gros potentiel pour lever certains verrous actuels portant notamment sur la variabilité spatiale des réponses de sol via des études de sensibilité sur les différents paramètres de sol (en particulier épaisseur et Vs).

d) Retour d'expérience

Jusqu'à présent, les études d'aléa sismique local étaient basées essentiellement sur les cartes géologiques et les données de forage ponctuelles issues de la Banque de Données du Sous-Sol (BSS). Elles nécessitaient un gros travail amont d'analyse et de retraduction de l'information géologique disponible pour l'intégrer dans nos outils de simulations numériques. Dans ce contexte, le RGF présente une vraie avancée en fournissant des informations géologiques homogènes sur la zone d'étude, sous une forme adaptée à notre thématique, avec des informations jusqu'à présent incomplètes ou inexistantes sur la nature des formations superficielles, leur épaisseur et leur géométrie.

L'expérience menée sur le démonstrateur Alsace-Vosges a montré néanmoins la nécessité de compléter l'important travail réalisé sur le RGF par : 1) une valorisation des données géophysiques et géotechniques de subsurface (0-100 m) existantes ou à venir (y compris hors DGR) afin de qualifier les propriétés mécaniques des formations géologiques étudiées ; 2) compléter les informations géologiques « brutes » par une information sur la qualité des données et les incertitudes associées (par exemple sur les épaisseurs de couches) et 3) une harmonisation des formats d'entrée-sortie entre les différents outils nécessaires à nos modélisations numériques.

Il me semble également important de noter ici que le démonstrateur Vosges - Fossé rhénan ne traitait que de l'aléa sismique local : il me paraît essentiel, pour les projets futurs, de tenir également compte de l'étude des failles actives, directement liées à la géomorphologie de la zone, et qui n'ont pas été traitées ici faute de temps.

7.5.3. Recommandations pour les chantiers futurs

Les applications risque sismique réalisées dans le cadre du démonstrateur RGF Vosges - Fossé rhénan ont été très positives. Il faut néanmoins rappeler le contexte de cette étude qui s'est faite en fin de projet (sur les six derniers mois) et impliquait donc des délais en temps très courts, et par conséquent, des applications rapides à mettre en œuvre

Pour les futurs chantiers, il semble indispensable d'impliquer les futurs utilisateurs dès la structuration du chantier pour définir ensemble les thématiques prioritaires sur la zone et, par la même, pour orienter les questionnements géologiques à traiter en priorité voire même pour guider la nature et le contenu des produits thématiques à livrer en fin de chantier.

En complément, voici quelques points qui nous semblent importants en tant que futurs utilisateurs du RGF :

- pouvoir décliner les données géologiques en données plus thématiques selon les besoins locaux ;
- valoriser et exploiter toutes les données géophysiques/géotechniques de subsurface (y compris hors DGR) ;

- le corollaire de l'action précédente est de mettre en place un outil connexe au RGF permettant de sauvegarder les données géotechniques et géophysiques de subsurface pour une exploitation future ;
- réfléchir à la diffusion de l'information en particulier sur la qualité et la fiabilité de cette information (incertitudes) : ce point sera particulièrement sensible si des informations quantitatives sont diffusées ;
- insister sur les formations superficielles et sur les failles actives quand la zone d'étude s'y prête ;
- harmoniser les outils RGF et les outils utilisateurs en termes d'entrée/sortie.

7.6. HYDROGÉOLOGIE : LA BD-LISA ET LE DÉMONSTRATEUR RGF

7.6.1. Actions menées dans le cadre du chantier-pilote

La BDLISA est le référentiel hydrogéologique à l'échelle du territoire national. Appelé « BDLISA » pour Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères, ce référentiel se présente sous la forme de couches cartographiques et de tables associées à chaque entité hydrogéologique. Basé sur l'évolution des connaissances géologiques et hydrogéologiques, notamment l'harmonisation des cartes géologiques au 1/50 000, il permet de préciser la délimitation des entités hydrogéologiques et d'avoir accès à l'organisation verticale des entités hydrogéologiques qui se superposent (il n'y a pas de notion d'épaisseur ou de cote altimétrique dans la version actuelle de la BDLISA).

Le tableau multi-échelles est l'élément structurant du référentiel et l'outil de base du découpage des entités. Il récapitule tous les types d'entités existant sur un secteur donné et les organise verticalement suivant un ordre stratigraphique. Le référentiel est sous-tendu par un « modèle de gestion » développé sous ArcGis©.

Le RGF a vocation à présenter une information continue, homogène et cohérente dans les trois dimensions de l'espace géologique. Il est question ici, de proposer et tester une mise en cohérence et de partage des informations communes (Lithologie, Stratigraphie, ...) de la base de données tridimensionnelles du RGF et celle de BDLISA

Les actions entreprises en 2013 ont été :

- d'étudier la possibilité, de créer des lexiques communs entre les EH (Entités hydrogéologiques) BD-LISA (qui représentent des regroupements lithostratigraphique) et le lexique litho-strat du RGF-DEMO ;
- étudier la faisabilité d'une « BDLISA 3D » sur l'emprise global du projet démonstrateur. Cela impliquerait de coder une sélection de sondages en termes d' « aquifère ». Cela devrait être possible en utilisant une « liaison » faite entre nos deux lexiques. Cette tâche aura pour intérêt de renseigner de manière ponctuellement et sur la base de données réelles la profondeur à la base et au toit chaque aquifère concernée.

7.6.2. Résultats et retour d'expérience

La mise en place d'une relation « formelle » entre formations géologiques et entités hydrogéologiques est **la clef d'entrée d'une dimension verticale pour BdLisa**. Ce travail, réalisé en partie par les hydrogéologues dans la phase de conception de BdLisa, n'a pas fait l'objet d'une modélisation systématique. La mise en production du RGF et de ses lexiques harmonisés simplifie cette étape.

Les entités BDLisa et les entités lithostratigraphique ont été associées sur un certains nombres de forages donnant ainsi une dimension verticale ponctuelle aux entités hydrogéologiques reconnues dans l'emprise du projet (cf. figure ci-dessous).

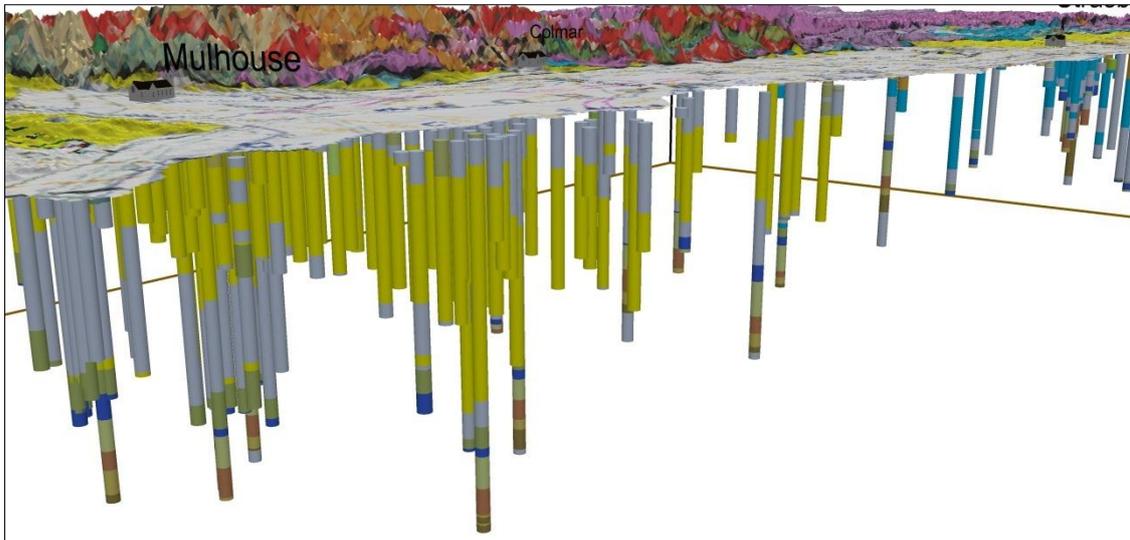


Figure 127 : Représentation des logs RGF traduit selon les entités BDLISA.

Un premier résultat a donc été de faire hériter la BdLisa de cette troisième dimension. Cette troisième dimension déduite des objets géologiques est l'une des clefs d'interprétation des limites sous couvertures de BDLISA, les limites sous couverture des premières entités affleurantes prennent un sens (cf. figure ci-dessous).

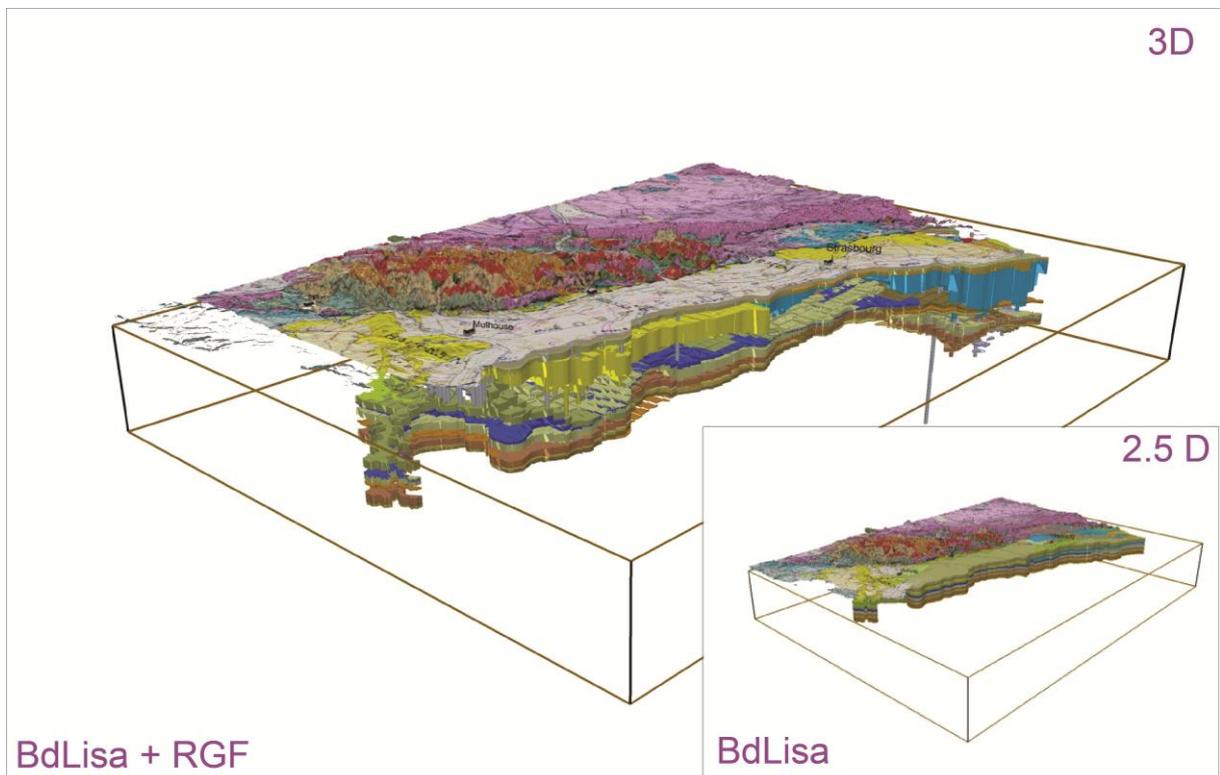


Figure 128 : Dimension de profondeur apportée aux entités hydrogéologiques par le RGF.

Néanmoins, la mise en œuvre des relations entre BdLisa et les passes des logs du RGF reste « locale », elle n'est pas systématiquement généralisable et suppose une approche régionalisée.

7.6.3. Recommandations pour les chantiers futurs

La mise en place d'un « langage commun » entre RGF et BdLisa est la condition de cette approche. La relation entre BdLisa et RGF est contextuelle, régionalisée, elle nécessite probablement une approche par grande province géologiques.

Cette relation nécessaire à la connaissance des enjeux conduira à la définition de contextes hydrologiques et géologiques régionaux.

La relation BDLisa et RGF, au-delà de la dimension verticale, c'est également la qualification de la nature du contact entre un objet hydrogéologique et ses épontes.

7.7. GÉOTHERMIE

7.7.1. Actions menées dans le cadre du chantier-pilote

L'emprise du chantier Vosges - Fossé rhéna est une zone qui a bénéficié de nombreux travaux liés à l'exploration et l'exploitation de la ressource géothermique à différentes échelles. Le projet RGF Vosges - Fossé rhéna a pu bénéficier de ces études et certaines d'entre elles ont été directement intégrées au projet :

- l'étude des circulation des fluides en relation avec l'anomalie thermique de Soultz-sous-Forêts (Dezayes *et al.*, 2009 ; Dezayes *et al.*, 2011 ; Baillieux *et al.*, 2011 ; Baillieux, 2012, Baillieux *et al.*, 2013) ;
- l'étude du potentiel géothermique du réservoir Buntsandstein entre les localités de Strasbourg et Obernai (Dezayes *et al.*, 2010 ; Dezayes *et al.*, 2008 a, b, c, d).

Une étude du potentiel géothermique à l'échelle du fossé rhéna dans le cadre du projet Georg (www.geopotenziale.eu). Ces différentes études ont permis de mutualiser des données pétrophysiques, hydrogéologiques et thermiques déjà recueillies et codifiées selon les lexiques lithostratigraphiques spécifiques à ces projets (stages C. Carré et E. Carron). Cela représente :

- plus de 250 forages et 1 800 données pétrophysiques et fluide (porosité, perméabilité, débit, salinité...);
- plus de 500 données ponctuelles de température.

Au-delà de l'apport en données déjà mises en forme, deux modèles géométriques 3D (Soultz-sous-Forêts et Strasbourg-Obernai) ont été mis à disposition.

Les actions proposées dans le cadre du démonstrateur ont été de :

- traduire les données disponibles selon le lexique lithostratigraphique du RGF-Demo ;
- mettre en forme ces données pour une future intégration en base de données RGF ;
- tester la faisabilité de l'intégration des éléments 3D au sein des travaux de modélisation géométrique réalisés dans le cadre du démonstrateur (expl : modèle régional...);
- définir les attentes de la thématique pour le futur RGF.

7.7.2. Résultats et retour d'expérience

In fine, l'apport principal sur cette thématique a été :

- la mise en correspondance du lexique réalisé dans le cadre du projet Georg (www.geopotenziale.eu) et du lexique lithostratigraphique du RGF pour les forages ;
- la correction et validation de sondages aux normes RGF ;
- la mise en relation des données pétrophysiques (citées ci-dessus) avec la description lithostratigraphique du forage ;
- la mise en forme de ces données en préparation d'une future intégration de celles-ci en base de données (selon le modèle de base de données B2D - RGF).

Concernant l'intégration du modèle 3D de Soultz-sous-Forêts dans les modèles réalisés dans le cadre du RGF Demo, l'équipe de modélisation 3D à utiliser le modèle de réseau de faille pour préciser la structuration du sous-sol de la zone de Pechelbronn (commande de Géoderis)

7.7.3. Recommandations pour les chantiers futurs

Les recommandations concernant cette thématique portent sur la base de données et l'exploitation des modèles géologiques 3D.

a) *En base de données*

Il sera important de capitaliser les données acquises dans différents projets de géothermie et de les mettre à disposition des utilisateurs pour les futurs projets. Il est également recommandé de prévoir le stockage d'autres types de données telles que : la granulométrie, la densité, le niveau d'eau, les tests hydrogéologiques, les tests de réponses thermiques, ainsi que les données thermiques sous forme de log lorsqu'ils sont disponibles.

La base de données RGF pourrait également être mise en relation avec THERMO2PRO, outil web développé pour mettre à la disposition des professionnels de la géothermie des grilles d'interpolation 3D.

b) *Modèles géologiques 3D*

Concernant la géométrie et structure des formations profondes pour la géothermie moyenne et haute température, il est impératif :

- que l'existence de réservoirs potentiels soit prise en compte en amont de la réalisation des modèles ;
- de prévoir la réalisation de modèles de circulation et de déformation, mais également des modèles d'hétérogénéités sédimentaires ;
- d'adapter l'échelle de représentation des modèles à la thématique.

En ce qui concerne la géométrie des formations superficielles (sur le 0-100 m) pour la géothermie basse et très basse température :

- la maille de représentation doit être adaptée à ces formations et à l'utilisation du modèle ;
- les modèles doivent être caractérisés en terme de lithologie et conductivité thermique pour permettre, le cas échéant, la simulation des d'écoulements.

c) Intérêt du RGF pour la géothermie

L'intérêt du RGF pour la thématique est de pérenniser la donnée à une échelle adaptée en tenant compte des objectifs des utilisateurs pour la réalisation de modèles plus avancés physiques et dynamiques.

8. Conclusion

8.1. RAPPELS

Le démonstrateur RGF sur la région Vosges - Fossé rhénan est la première étape dans la mise en œuvre du Référentiel Géologique de la France (RGF).

L'objectif a été de mettre au point et de tester les étapes de traitement de la donnée et les méthodes de travail à envisager au sein **de groupes multi-thématiques** pour à la fois :

- restituer une base de données géologique cohérente dans les 3 dimensions de l'espace (sur un jeu de données sélectionnées) et accessible à tous.
- démontrer l'importance d'une telle mise en œuvre pour la recherche scientifique et technique en vue de répondre aux enjeux socio-économiques appliqués aux géosciences.

Le défi qui nous a été confié a été accompli avec succès et dans les temps, suite à un an et demi d'investissement à **plein temps** d'une majorité des référents thématiques.

Présenté en juin 2013 à la Cité des Sciences et de l'Industrie (Paris) ainsi qu'au BRGM, (Orléans et régions), le démonstrateur RGF a permis de tester la faisabilité du RGF et de proposer les étapes de mise en œuvre depuis la collecte des données, jusqu'à leur valorisation en restituant des produits cartographiques et modèles numériques, multi-échelles, cohérents, pour une diversité de thématiques importante.

Ce projet a également montré l'intérêt du RGF pour valorisation scientifique de l'information dans le cadre de nombreux domaines des géosciences. Plusieurs cas d'application sont présentés: risque géologique, gestion de l'eau et des ressources minérales, géothermie, après-mine (cf. Chap 7).

Les programmes, les présentations, les posters et animations vidéo, les cartes construites lors de la démonstration sont disponibles sur le DVD joint à ce rapport.

8.2. SYNTHÈSE DE LA PROCÉDURE RGF VOSGES - FOSSÉ RHÉNAN

Du point de vue méthodologique, les étapes de mise en œuvre du chantier présenté dans ce rapport sont le résultat du retour d'expérience acquis dans le cadre du démonstrateur par l'équipe de projet.

La méthodologie proposée traite exclusivement de la donnée géologique et ne prétend pas répondre à tous les problèmes qui pourront se présenter dans le cadre des futurs chantiers. Néanmoins, l'expérience du démonstrateur pose les bases absolument nécessaires pour organiser le travail d'un chantier dans le cadre des traitements de l'information géologique.

8.2.1. Étape 1 : Récolte des données (cf. chapitre 3)

Elle vise à rechercher et réunir l'ensemble de l'information pour un même chantier, la référencer et la rendre accessible de manière à optimiser l'exécution de la phase de « mise en cohérence » de ces données.

Le lancement d'un projet RGF implique une importante phase de recherche bibliographique à mener aussi bien en interne via toute la documentation BRGM, qu'en externe avec la collaboration des différents organismes qui travaillent dans le domaine des géosciences (universités, entreprises).

Elle demande un travail de préparation important vérification et identification de la source des données brutes et interprétations. En effet, quelle que soit le type de donnée, il est nécessaire de l'enregistrer dans son « intégralité » et dans son contexte (thèse, étude, article, etc.) : c'est le principe de **la traçabilité** permettant de retourner à la source de l'information.

Etant donnée l'ampleur d'un chantier RGF (étendue géographique, diversité des terrains et des études réalisées), la quantité d'information récupérables sera sans aucun doute considérable, et nécessitera une gestion organisée et un espace de stockage dédié à la donnée.

Cet espace de stockage devra **être géré par un administrateur** en charge d'organiser cette espace et délivrer les droits d'accès lecture/écriture en fonction du profil d'utilisateur.

8.2.2. Étape 2 : Hiérarchisation et classification de l'information (cf. Chapitre 4)

L'objectif majeur du RGF est de mettre en cohérence l'ensemble de ces données et hiérarchiser l'information collectée de manière à fournir une connaissance géologique de référence sans cesse actualisée. Cela passe dans un premier temps par le traitement de la donnée déjà disponible en attribuant à chaque domaine géologique, chaque unité lithostratigraphique, chaque faciès pétrographique, chaque élément structural, et autres, une dénomination et une codification uniques et hiérarchisées qui serviront de référence, à l'échelle nationale et à l'ensemble des disciplines des géosciences (la géologie *s.l.*, l'hydrogéologie, la métallogénie, les risques naturels la géothermie, etc.).

C'est un « **langage scientifique commun** » qui doit être établi sur des données labellisées et cohérentes, alimentant la base de données du chantier RGF. Cette codification passe impérativement par la définition de **lexiques hiérarchisés** construit sur la base de la classification de l'information géologique. Les lexiques impératifs pour la mise en cohérence géologique seront :

- le lexique de l'unité lithostratigraphique (identification des formations géologiques et hiérarchisation)
- un lexique structural (identification des éléments structuraux et hiérarchisation)
- un lexique évènementiel : domaines des orogénèses, des bassins (dont stratigraphie séquentielle), régolithe, etc...

Cette phase de réalisation des lexiques constitue une étape majeure et incontournable dans la mesure où elle va conditionner toutes les opérations qui suivent. Cela implique :

- **du temps** pour étudier les données collectées au préalable et « **s'imprégner** » de la **géologie du secteur** ;
- **des référents thématiques** spécialisés pour chaque domaine géologique traité ;
- **un esprit de synthèse** indispensable pour comprendre et interpréter ce que, dans certains cas, les auteurs ont voulu dire ou décrire. Il faut en effet parfois savoir « lire entre les lignes » pour déterminer la formation à laquelle l'auteur fait référence ;

- **une coordination et discussion entre les intervenants** est primordiale non seulement en interne mais surtout avec les collaborateurs extérieurs. C'est un **travail d'équipe** dont la cohésion est indispensable. Le lexique « Vosges - Fossé rhéna » n'aurait pas pu voir le jour dans des délais aussi courts sans les nombreuses discussions et les échanges entre les référents thématiques.
- **une disponibilité importante des intervenants** sur de longues périodes. Cela implique **des moyens humains**. Il aurait été très difficile de réaliser ce travail sans une disponibilité presque totale et simultanée des référents géologiques et techniques impliqués pour cette tâche ;
- **les lexiques n'ont pas seulement un intérêt cartographique** mais également une utilité pour la validation des logs de forages.
- **toutes les informations sont à considérer**, les critères de granulométrie, le contenu faunistique, la composition chimico-minéralogique, qui doivent être intégrées dans la base de données et pourront servir ultérieurement à distinguer un faciès.
- quelque soit le type de lexique, **il faut bien identifier et détailler les différents éléments** (formations, failles, chevauchement, etc...)

Si de façon globale la procédure a relativement bien fonctionné, quelques problèmes scientifiques ou techniques sont à souligner et à résoudre pour les prochains chantiers :

- **au niveau de la classification** (formation, membre, groupe, super-groupe), la terminologie employée ici semble être cohérente, bien qu'elle ne soit pas précisément définie dans la bibliographie. En l'absence de référence préexistante, la hiérarchisation en terme de « groupe » et « super-groupe » a posé de nombreuses questions pour attribuer une formation (ou un membre) à un groupe plutôt qu'un autre. Ce problème n'est pas spécifique à la région Vosges - Fossé rhéna mais se posera à l'ensemble du territoire. Il sera donc utile que des discussions soient menées au sein du comité scientifique du RGF, pour que les futurs chantiers puissent bénéficier d'orientation d'attribution de la part de la communauté scientifique;
- **les appellations attribuées aux formations ou membres** sont celles les plus couramment utilisées dans la bibliographie. Il sera important de garder une trace des autres dénominations et de répertorier les équivalents latéraux ;
- **au niveau des descriptions préexistantes**, des problèmes de terminologie persistent encore depuis quelques années pour le Jurassique avec l'utilisation de termes « désuets » (tels que « Rauracien », « Séquanien » ou « Argovien »). Elles rendent parfois plus difficile l'identification de la tranche d'âge considérée. La création du lexique lithostratigraphique est donc l'occasion de replacer et renommer les unités selon les normes actuelles.
- **des incohérences d'attribution lithostratigraphique** peuvent préexister sur des documents de référence. Pour exemple, certains forages se voient attribuer l'Aalénien au toit du Lias alors qu'il se situe, dans la classification actuelle, à la base du Dogger (j1). De nouveau, la relecture de ces attributions dans le cadre du RGF est l'opportunité de corriger des erreurs préexistantes.

Les outils RGF n'étant pas encore opérationnels pendant la réalisation de ce projet pilote, nous avons utilisé des applications temporaires, développées en fonction de besoins immédiats. Des besoins pour le développement des futurs d'outils sont précisés ci-dessous :

- la procédure de constitution de lexique via des tables « Excel » a bien fonctionné, grâce à l'expérience acquise sur le projet « CHARM ». Néanmoins, la ressaisie manuelle des formations, membres, pour la constitution du lexique lithostratigraphique final a été une étape

particulièrement chronophage. Il sera important de mettre disposition un outil limitant la saisie manuelle d'information (nom, appellation, notation) ce qui est, souvent, source d'erreurs ou de répétition involontaire.

- une fois retranscrit dans ce fichier, le lexique était figé pour les intervenants, ces derniers ne pouvant plus modifier ou rajouter une formation sans passer par le référent B2D - RGF. À l'avenir, il serait utile qu'un système convivial soit développé pour permettre aux référents thématiques, eux-mêmes, d'éditer/ modifier le lexique dont ils sont responsables.

Les lexiques réalisés dans le cadre du démonstrateur devront être confrontés à la validation du comité scientifique du RGF avant toute parution pour utilisation publique.

8.2.3. Étape 3 : préparation de la cartographie RGF

Avant toute chose, pour cette phase préparatoire, il sera primordial de vérifier la qualité des documents cartographiques disponibles aussi bien au niveau du format « papier » que du format numérique.

- **Calage Géologie** – IGN : Il est important de vérifier que le chantier bénéficie d'une couverture géologique complète à 1/50 000, en principe géo-référencée et parfaitement calée sur le fond IGN.
- **La carte « papier »** : Bien qu'ayant en principe été contrôlée par le CCGF (Comité de la carte géologique de la France), quelques erreurs peuvent subsister essentiellement au niveau du codage de certains polygones de la carte.
- **La carte « numérique »** : La vérification de la qualité et la conformité des cartes numériques vis-à-vis des cartes « papier » concernées est fondamentale.
- **Répertoire des zones posant cartographiquement un problème** et pour lesquelles des campagnes de terrain pourront être programmées. De même pour la vérification de la cohérence des structures géologiques, on pourra s'appuyer sur les méthodes de modélisation géologiques 3D.

La carte RGF du chantier (Figure 54 et Figure 55).est une version intermédiaire (dite « V0 ») car elle est construite, sur la base de la cartographie existante corrigée mais n'ayant pas encore été confronté aux données du sous-sol, ni aux vérifications sur le terrain pour la justification de contours incertains.

Elle représente une base de travail cartographique cohérente et continue à l'échelle régionale et destinée à évoluer au rythme du processus de mise en cohérence des données. Les contours cartographiques existants sont néanmoins mis en cohérence et à chaque polygone de la carte est attribuée une notation de référence conforme au lexique « ULS » RGF.

Le résultat du projet démonstrateur pour cette étape est une carte dont l'échelle de référence est le 1/50 000, accompagnée d'une légende homogène dont les caissons sont en cohérence et hiérarchisés conformément au lexique « ULS » RGF. Cette carte peut ainsi être déclinée à différentes « échelles lexicales » (exemple une cartographie à l'échelle des groupes) tout en conservant l'échelle des contours géologiques à 1/50 000, (Figure 54 et Figure 55).

Tout comme les lexiques RGF, elle devra à l'avenir, être confrontée à la validation du comité scientifique du RGF avant toute parution pour une utilisation publique.

8.2.4. Étape 4 : Mise en cohérence et modélisation 3D (cf. chapitre 5 et 6)

Après les étapes successives de collecte de la donnée, définition des différents lexiques de référence et prérequis cartographiques, cette phase constitue, le stade d'intervention portant sur :

- la mise en cohérence « de carte à carte » des différents contours géologiques délimitant cartographiquement chaque unité lithostratigraphique, ainsi que des structures linéaires associées à des failles ou des accidents majeurs (Cf. § 5.2)
- la mise en cohérence « lexicale » des données de sub-surface avec la carte géologique assurant un langage commun et unique (Cf. § 5.2, § 5.3, § 5.4, § 5.5)
- la validation tridimensionnelle de cette mise en cohérence à l'aide des méthodes d'interpolation géométrique 3D (cf. chapitre 6). En effet la modélisation 3D est une étape incontournable pour la validation de l'information géologique. Les données traitées habituellement séparément (cartographie, forages, interprétations sismiques et géophysiques, ...) devront être confrontées à l'interpolation géométrique dans un même espace tridimensionnel. Cela permet de vérifier, suivant un processus itératif, la cohérence géométrique des données, de mettre en évidence d'éventuelles questions (validation de la donnée ponctuelle, interprétation géologique) et d'anticiper des besoins d'acquisition pour compléter notre connaissance géologique (cf. § 6.7).

Faute de temps dans le cadre du démonstrateur, l'aller - retour « données – modèles » n'a pas pu se faire sur la totalité des données traitées (expl. sondages - interprétation sismique), ce processus de validation devra se poursuivre à l'avenir.

8.2.5. Étape 5 : Validation, diffusion

Une fois les données mise en cohérence celles – ci devront être validées par le conseil scientifique du RGF pour la diffusion grand public via le système d'information RGF (SI-RGF)

8.3. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

8.3.1. B2D - RGF et accessibilité des données RGF (cf. chapitre 2)

Le démonstrateur a été construit sur la base d'outils provisoires développés à la demande en fonction des besoins urgents en termes de saisi, consultation, sélection, stockage, de la donnée. Ce fut l'opportunité de tester « grandeur nature » le modèle de base de données B2D - RGF.

La structuration de la (les) base(s) de données du RGF reste un projet en cours à la fin de ce démonstrateur, et nécessite à court terme de disposer d'un SI - RGF adapté aux besoins de gestion de l'information. Le déroulement du démonstrateur a permis de faire avancer de manière très importante la structuration de la base de données et de répondre aux besoins nécessaires à la réalisation des livrables du démonstrateur RGF. Le projet démonstrateur a également permis de relever les forces et faiblesses du modèle et des procédures de stockage.

Ainsi, outre la mise en place du SI (Système d'Informations), afin d'assurer un stockage cohérent et centralisée des informations géologiques RGF, il serait nécessaire à court terme :

- de finaliser les concepts thématiques manquants au modèle de données RGF ;
- de finaliser la rédaction du cookbook du modèle conceptuel de données B2D - RGF;

- mettre en production la base de données afin d'entrer dans le processus de sauvegarde, archivage des environnements de production de la base actuelle ;
- d'assurer la migration des données de recette en production ;
- d'ajouter les informations relatives à la gestion du workflow dans le SI - RGF et intégrer les évolutions du modèle suite au retour du démonstrateur ;
- de différencier une approche base de données de production et une base de données de diffusion, validés par le comité RGF ;
- d'assurer la compatibilité 100 % avec INSPIRE / Thème « Modèle de données géologiques ».

Toujours en cours de développement, ce prototype de plate-forme a permis de tester un certain nombre de fonctionnalités, actuellement insuffisamment opérationnelles pour permettre la visualisation complète des données et des modèles, acquis dans le cadre du démonstrateur.

À moyen terme, une interface de consultation, de l'ensemble des outils de traitement et de valorisation des données (extraction, gestion) devrait être mis au point. En attendant ce système, l'équipe de projet a mis en place une application SIG sur la base de données de stockage SIG, afin de valoriser et donner accès à l'ensemble des données du démonstrateur et de ses livrables à tous les agents BRGM.

L'accès à cette plate-forme SIG est disponible, via un navigateur internet, à l'adresse suivante : http://srv155.brgm.fr/rqf_demo/ (usage exclusif en interne au BRGM)

Il est important de noter que suite aux colloques RGF des 18 et 19 Juin 2013, le BRGM s'est engagé à se doter d'un SI - RGF, opérationnel à l'horizon 2016, dans le cadre d'une mission prioritaire du BRGM.

8.3.2. Modélisation 3D

Comme pour beaucoup d'autres thématiques (Géosciences, base de données, système d'information etc...) le RGF est un réel défi à relever pour la modélisation 3D. Le démonstrateur a été l'occasion de repousser les limites des méthodes et outils à disposition pour répondre aux besoins du RGF. La poursuite de ce programme d'envergure nationale nécessitera donc un effort en matière de recherche et développement dans ce domaine. Le paragraphe 6.7 est entièrement consacré aux recommandations faites pour la suite du programme, quelques points sont rappelés ci-dessous.

a) Objectif du modèle ?

Tout d'abord, la finalité du modèle doit être évoquée le plus tôt possible. Le modèle peut être exploité selon deux approches.

- il peut être utilisé dans un cadre académique, ce qui inclut des logiques de représentation de l'information géologique, de validation d'hypothèses géologiques, de prédiction géologique. Dans ce cas, il est souhaitable que le modèle soit le plus généraliste et détaillé possible, pour favoriser de futures applications. Ce modèle est alors un distributeur d'information ;
- il peut être également orienté vers une application, hydrogéologie, géotechnique, simulation numérique, cartographie d'aléa.

b) Les outils

Les outils actuellement disponibles incluent :

- GDM et son module MULTILAYER pour la géomodélisation 2D-multicouche ;
- GEOMODELLER3D et PETREL pour la géomodélisation 3D ;
- ISATIS pour la géostatistique et géoprobabilité (simulation de faciès) ;
- R, langage de programmation en statistique, et les bibliothèques GEOR, GSTAT et RGEOS ;

Notons que **nous ne disposons pas d'approche formalisée de modélisation des formations du régolithe** (MNT et variables régionalisées dérivées).

Nous recommandons également d'**encourager l'interopérabilité** des outils existants, par des possibilités d'importation et exportation plus larges ; ceci afin de favoriser l'utilisation chaînée des outils dans leurs points forts respectifs.

Plusieurs axes d'améliorations sont proposés, à moduler selon le logiciel :

- **calcul des incertitudes** (sur les données, sur les hypothèses, sur le krigeage) ;
- **points de contrainte** : bien qu'utiles au respect des inégalités par le modèle, ils relèvent d'un choix arbitraire, peuvent dégrader la qualité du modèle, et gênent sa mise à jour ;
- **échelle** : il serait intéressant de pouvoir dégrader un modèle à une échelle supérieure ; l'inverse également, mais cela semble plus irréaliste ;
- **analyse de cohérence** : des algorithmes pourraient permettre de juger de la cohérence de chaque donnée avec le modèle ; une telle approche est mise en place au BRGM pour les données de forages, elles pourraient être généralisées aux failles, points de contrainte, etc.

Enfin notons que la performance de nos ordinateurs a été un réel handicap par rapport à la résolution des modèles exigée. Ceci a entraîné une perte de temps significative. **Des efforts d'investissement sont attendus aussi bien en développement qu'en matériel.**

c) Validation des données

Un des intérêts de la modélisation réside dans la possibilité de mettre toutes les données dans le même espace et de les confronter mutuellement. Durant la création du modèle, il est nécessaire qu'un géologue « référent » connaissant le contexte géologique soit mobilisé en interaction avec le géomodélisateur. Cela permettra des « allers-retours » entre les données et le modèle, mettant en évidence de possibles incohérences dans les données.

Il faut fournir au géologue référent des moyens ergonomiques de contrôle du modèle par rapport aux données (coupes sériées, cartes isopaques, ...). Néanmoins, la confrontation graphique est insuffisante pour détecter erreurs ou incohérences.

Les données doivent en 3D contribuer chacune à la réalisation d'un modèle accepté par un géologue « référent » comme étant un modèle géologiquement raisonnable, qui permettra de conclure à la validité des données et des hypothèses. Bien sûr, l'origine de ces données doit être sourcée et traçable.

C'est sur la base de ce processus itératif et l'interaction géologue - modélisateur que pourront être assurés la cohérence tridimensionnelle des données et interprétations.

Faute de temps dans le cadre du démonstrateur, l'aller - retour « données – modèles » n'a pas pu se faire sur la totalité des données traitées (expl. sondages - interprétation sismique), ce processus de validation devra se poursuivre à l'avenir.

d) Fusion de modèles

L'incorporation d'un modèle déjà existant dans un autre modèle est une tâche délicate. Il n'existe pas de démarche standard sur ce sujet. La difficulté tient à la nécessité d'harmoniser des interprétations éventuellement différentes entre des modèles, qu'ils aient été réalisés ou non sur des logiciels différents. Comment faire évoluer un modèle si on n'a plus trace des données et des hypothèses qui ont servi à le construire ?

La **fusion de deux modèles** couvre les problèmes suivants :

- différence d'approche ou de finalité ;
- intersection ou voisinage des emprises ;
- différences sur les piles ;
- différences sur les données ;
- différences sur le résultat ;
- différences sur les méthodes, algorithmes de modélisation d'un logiciel à l'autre.

À ce jour, nous n'avons d'autre option qu'une approche au cas par cas, partant des données, ce qui revient souvent en pratique à la création d'un nouveau, modèle (*remise à zéro*). C'est pourtant une situation qui surgira souvent à l'intérieur d'un chantier RGF, ou à l'interface entre deux chantiers. **Ceci pose le problème général de l'interopérabilité entre les modèles.**

e) Mise à jour

Nous pouvons supposer que, dans le cas des données cohérentes avec le modèle, leur **contrôle** et leur **ajout peuvent être automatisés**. Sans négliger les questions annexes (mode de contrôle de cohérence, fréquence de mise à jour, ...), cette approche, si elle est préparée en amont, reste simple ; il pourrait en être de même pour l'ajout ou la mise à jour de données auxiliaires, comme des mesures géophysiques. Par contre, l'ajout de données visiblement incohérentes, et, le changement de paradigmes (de concept géologique sous-jacent), nécessiteront l'intervention d'un expert.

f) Diffusion des modèles

Le prototype de viewer 3D développé dans le cadre de ce projet a démontré les limites à la fois des choix technologies mais aussi du manque de gestion des données 3D au BRGM. Les relations entre les données « brutes » et les modèles 3D doivent être renforcées afin de garantir la traçabilité de ces éléments.

Afin d'améliorer cet axe, une ou plusieurs actions doivent être menées afin d'organiser le stockage des modèles géologiques et conserver de manière pérenne, dans ce modèle, les relations avec les données « brutes ».

Comment diffuser le modèle (et les données associées) pour le rendre utilisable par les différents utilisateurs ? Malgré nos premières réflexions cette question n'a pas été résolue durant le chantier. C'est un des enjeux majeurs du RGF. La multitude de formats de

géomodèles et d'utilisations possibles rend cette question complexe. Veut-on tout résoudre ? Ceci pose plus généralement le problème du système d'information RGF.

La résolution de ce problème ne peut pas passer par une simple commande à un fournisseur informatique. Elle exige interaction entre développeurs (base de données, système d'information, modélisation), géomodélisateurs et géologues.

8.3.3. Utilisateurs du RGF

Les représentants des différentes applications des Géosciences (géothermie, risque sismique, ressources minérales, matériaux et carrières, hydrogéologie...) et collaborateurs (universités, bureaux d'études) ont contribué au traitement des données RGF et testé l'impacte de ses produits lors d'études spécifiques réalisées dans le cadre de ce projet. Si leurs expériences, de mise en application du RGF illustrent un véritable intérêt pour le futur programme (cf. Chapitre 7), il semble important d'impliquer les futurs utilisateurs dès la structuration du chantier pour définir les problématiques prioritaires sur la zone et, par la même, pour orienter les questionnements géologiques à traiter en priorité.

8.3.4. Avenir du « chantier » Vosges - Fossé Rhénan

Compte tenu du délai de un an et demi, ce projet **ne doit pas être considéré comme un véritable chantier**. Si le travail effectué a permis d'initier la démarche RGF sur l'exemple de la région Vosges - Fossé rhénan, nous recommandons que les procédures de traitement de la donnée (validation de sondages, mise en cohérence...), de productions (cartographie, modélisation 3D,...), de valorisation (projet de publications scientifiques, études appliquées, ...) se poursuivent à l'avenir pour cette région, permettant ainsi de concrétiser les travaux initiés dans le cadre de ce démonstrateur.

Il sera également nécessaire de le soumettre à validation auprès du comité scientifique du RGF avant toute diffusion/utilisation extérieure (hors communication). Avant cela l'accès au démonstrateur est réservé pour une utilisation interne au BRGM et en appui à la mise en œuvre des chantiers RGF.

9. Références bibliographiques

Andreieff P. (1997) - Notes d'orientation pour l'établissement de la carte géologique de France à 1/50 000. 3^{ème} éd. Comité de la carte géologique de la France. Document du BRGM, n° 260

Baillieux P. (2012) - Multidisciplinary approach to understand the localization of geothermal anomalies in the Upper Rhine Graben from regional to local scale. Thèse Université de Neuchâtel.

Baillieux P., Schill E., Dezayes C. (2011) - 3-D structural regional model of the EGS Soultz site (northern Upper Rhine Graben, France): insights and perspectives. 36rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 31-February 2, 2011.

Baillieux P., Schill E., Moresi L., Abdelfettah Y., Dezayes C. (2012) - Investigation of natural permeability in graben systems: Soultz EGS site (France). 37rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 30-February 1, 2012.

Beccaletto L., Lasseur E., Paquet F., Capar L. (2013) - Géométrie et contrôle structural des dépôts syn-rifts du Fossé rhénan - RGF-Démonstrateur Vosges/Fossé rhénan. Rapport final. BRGM/RP-62896-FR, 54 p., 31 Fig., 4 Tabl., 1 CD.

Becker D. (2009) - Earliest record of rhinocerotoids (Mammalia: Perissodactyla) Colloque sur l'Éocène, Paris, mai 1968. *Mémoire du BRGM* n° 58, p. 731-738.

Boenigk W., Frechen M. (2006) - The Pliocene and Quaternary fluvial archives of the Rhine system. *Quaternary Science Reviews* 25, 550–574.

Bourgine B. (2007) - Modélisation géologique 3D à l'aide du programme Multilayer. Version 3. BRGM/RP-53111-FR, 163 p., 114 ill

Brun J.-P., Gutscherm A. and Dekorp-Ecors Teams (1992) - Deep crustal structure of the Rhine Graben from DEKORP-ECORS seismic reflection data: a summary. *Tectonophysics*, 208, p. 139-147.

Brun J.P., Gutscher M.-A. and DEKORP-ECORS teams (1992) - Deep crustal structure of the Rhine Graben from DEKORP-ECORS seismic reflection data: a summary. *Tectonophysics*, 208, p. 139-147.

Calcagno A., Chilès 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.

Calcagno.P., Chamaret.A., Chauvin.N., Gabalda.S., Gabillard.S., Guillen.A., Michea.D., Pasquier.F., Poudroux.J., Vigier.Y., Bouchot.V. (2013) - Thermo2Pro. Outil d'aide à l'exploration pour la géothermie profonde des bassins sédimentaires à l'usage des professionnels. Rapport final, BRGM/RP-62907-FR, 56 p., 26 ann., 1 CD

Campos Enriquez J.-O. (1980) - Élaboration, traitement et **interprétation** de la carte magnétique du fossé rhénan (Wissembourg, Karlsruhe, Offenbourg, Saverne). Thèse de doctorat de l'Université Strasbourg n° 411, 143 p.

- Carré C.** (2011) - Cartographies thermiques du Graben du Rhin (partie française). – 51 S., MSc Arbeit an der Universität Montpellier 2 Sciences et Techniques (unver.).
- Cartannaz C., Dolliou V.** (2010) - Notice explicative de la carte des curiosités géologiques de la Lorraine. Rapp. BRGM/RP-57546-FR
- Choi S.-W., Preusser F., Radtke U.** (2007) - Dating of lower terrace sediments from the Middle Rhine area, Germany. *Quaternary Geochronology* 2, p. 137-142.
- Cocherie A., Guerrot C., Mark Fanning C., Genter A.** (2004) - Datation U-Pb des deux faciès du granite de Soultz (Fossé rhénan, France). *C.R. Geosciences* 336, p. 775-787.
- Cordier S., Frechen M., Harmand D.** (2009) - The Pleistocene Fluvial Deposits of the Moselle and Middle Rhine Valleys: new correlations and compared evolutions. *Quaternaire*, 20 (1), p. 35-47.
- Corpel J., Debeglia N.** (1994) - Synthèse région de Soultz : interprétation gravimétrique. Rapp. BRGM/RR-38027-FR, 19 p.
- Dessandier D.** (2013) - Réflexion autour d'un volet « carrières et matériaux » pour le futur Référentiel Géologique de la France. Rapport final. BRGM/RP-62339-FR, 33 p., 13 fig., 6 tab.
- Dezayes C., Beccaletto L., Oliviero G., Baillieux P., Schill E.** (2011) - 3-D visualization of a fractured geothermal field: the exemple of the EGS Soultz site (northern Upper Rhine Graben, France). 36rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 31-February 2, 2011.
- Dezayes C., Castera J., Heilbronn G., Calcagno P.** (2009) - Regional 3D model of the Soultz-sous-Forêts geothermal field (Upper Rhine Graben, France). GRC Reno, USA, 4-8 octobre 2009.
- Dezayes C., Genter A., Thion I., Courrioux G.** (2008b) - Structures géologiques et estimation du potentiel géothermique : l'exemple du Trias clastique du Fossé rhénan. 22^{ème} RST- 21-24 Avril 2008, Nancy, France.
- Dezayes C., Genter A., Thion I., Courrioux G., Tourlière B.** (2008c) - Assessment of geothermal potential of clastic reservoirs in the Upper Rhine Graben. 3rd International conference & exhibition on ecological vehicles & renewable energies (EVER), 27-30 Mars 2008, Monte-Carlo, Monaco.
- Dezayes C., Genter A., Thion I., Courrioux G., Tourlière B.** (2008d) – Geothermal potential assessment of clastic reservoirs (Upper Rhine Graben, France). 32rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 28-30, 2008.
- Dezayes C., Genter A., Tourlière B.** (2008a) - Triassic geothermal Clastic reservoirs in the Upper Rhine Graben. 22^{ème} RST- 21-24 Avril 2008, Nancy, France.
- Dezayes C., Thion I., Courrioux G., Haffen S., Bouchot V.** (2010) - Towards a better knowledge of the Lower Triassic reservoirs in the Upper Rhine Graben. WGC Bali, Indonesia, 25-29 avril 2010.

Dezayes C., with the collaboration of Chèvremont Ph., Tourlière B., Homeier G., Genter A. (2005) - Geological study of the GPK4 HFR borehole and correlation with the GPK3 borehole (Soultz-sous-Forêts, Franc. Final report, BRGM/RP-53697-FR, 94 p., 27 fig., 3 annexes.

Durand M. (2012) - Des cônes de déjection permien au grand fleuve triasique. Evolution de la sédimentation continentale dans les Vosges du Nord autour de -250 Ma. Annexe scientifique 3 : Sédimentation du Permien au Trias.

Edel J.B., Lutz H., Elsass P. (2002) - Le socle varisque et les tectoniques rhénanes dans le Fosse rhénan méridional : traitement et interprétation de la carte gravimétrique du fossé à partir du levé haute densité des MDP. *Geol. France*, 3, p. 43-59.

Edel J.B., Schulmann K., Rotstein Y. (2007) - The Variscan tectonic inheritance of the Upper Rhine Graben: evidence of reactivations in the Lias, Late Eocene–Oligocene up to the recent. *International Journal of Earth Sciences* 96 (2), p. 305-325.

Edel J.-B., Schulmann K. (2009) - Geophysical constraints and model of the “Saxothuringian and Rhenohercynian subductions – magmatic arc system” in NE France and SW Germany. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 180 (6), p. 545-558.

Edel J.B., Schulmann K., Skrzypek Cocherie A. (2012) - Coupling between oblique subduction zone dynamics and transtensional emplacement of magmatic arc exemplified by AMS and paleomagnetic study (N Vosges, E France). Submitted.

Guillen A., Calcagno P., Courrioux G., Joly A., Ledru P. (2008) - Geological modelling from field data and geological knowledge. Part II. *Phys. Earth Planet. Interiors* (2008), doi:10.1016/j.pepi.2008.06.014

Elsass P., Von Eller J.-P., avec la collaboration de STUSSI J.-M. (2008) - Géologie du massif du Champ du Feu et de ses abords. Éléments de notice pour la feuille géologique 307 Sélestat. Rapport BRGM/RP-56088-FR, 184 p., 65 ill., 3 ann. dont une carte géologique à 1/50 000 avec sa légende, un CD-ROM.

Équipe du projet GeORG (2013) - Potentiel géologique profond du Fossé rhénan supérieur. Partie 1 -Rapport final. BRGM/RP-61945-FR, 135 p.

Frechen M., Ellwanger D., Hinderer M., Lammermann-Barthel J., Neeb I., Techmer A. (2010) - Late Pleistocene fluvial dynamics in the Hochrhein Valley. *Int. J. Earth Sci.* 99, p. 1955-1974.

Genter A. et al. (2004) - Typologie des systèmes géothermiques HDR/HFR en Europe. Rapport BRGM/RP-53452-FR, 165 p.

Gignoux M., Hoffmann C. (1920) - Le Bassin pétrolifère de Pechelbronn (Alsace). *Bull. Service Carte géol. Alsace et Lorraine*, I, 1920.

Haffen S. (2012) - "Caractéristiques gothermiques du réservoir gréseux du Buntsandstein d'Alsace". Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg : 393 p.

Hedberg et Hollis (1979) - Guide stratigraphique international : Classification, terminologie et règles de procédures.

- Hinsken S., Ustaszewski K., Wetzel A.** (2007) - Graben with controlling syn-rift sedimentation: the Palaeogene southern Upper Rhine Graben as an example. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch)* (2007) 96:979–1002 1001, Springer Verlag.
- Krenker M., Cruz-Mermy D.** (2009) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Bas-Rhin. Rapport BRGM/RP-57373-FR.
- Lagneau Hérenger L.** (1961) - Géologie du bassin potassique d'Alsace. Thèse doct. Etat, Fac. Sci. Grenoble, 1961.
- 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.
- Lammermann-Barthel J., Neeb I., Hinderer M., Frechen M.** (2009) - Last Glacial to Holocene fluvial aggradation and incision in the southern Upper Rhine Graben : Climatic and Neotectonic controls. *Quaternaire*, 20(1), p. 25-34.
- Lauer T., Krbetschek M., Frechen M., Tsukamoto S., Hoselmann C., Weidenfeller M.** (2011) - Infrared Radiofluorescence (IR-RF) dating of Middle PLeistocene fluvial archives of the Heidelberg Basin (Southwest Germany). *Geochronometria* 38(1), p. 23-33.
- Lautridou J.-P., Sommé J., Heim J., Puisségur J.-J. Rousseaud D.** (1985) - La stratigraphie des loess et formations fluviatiles d'Achenheim (Alsace) : Nouvelles données bioclimatiques et corrélations avec les séquences Pléistocènes de la France du Nord-Ouest. *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire* 22(2-3), p. 125-132.
- Lavoyer Th., Yerly B., Berger J.-P.** (2009) - The borehole 01983X2854 (Preuschdorf, Upper Rhine Graben, Alsace, France) as a basis of a formal definition of the Upper Pechelbronn Beds (Rupelian). Abstract Volume, 7th Swiss Geoscience Meeting, Neuchâtel, 20th – 21st November 2009, 6. Darwin, Evolution and Palaeontology.
- Maubeuge P.** (1953) - Quelques données géologiques sur les terrains jurassiques traversés par les sondages pétroliers récents du Nord de l'Alsace . *Bull. Soc. Sc. Nancy*, Nlle Série, t. XII, n° 1.
- Maubeuge P.** (1994) - Stratigraphie. Premières découvertes de faunes triasiques dans le Keuper supérieur de la Belgique et comparaison avec la Lorraine. *Bull. des Acad. et Soc. Lorraines des Sciences*, 33, n° 4.
- Nagel J.-L.** (à paraître, 2013a) - Les travaux miniers de la vallée de la Thur, secteur d'Oderen (Haut-Rhin). Phase informative et cartographie des aléas mouvements de terrain. Rapport BRGM/RP-xx-FR, 122 p., 70 ill., 1 tabl., 2 ann.
- Nagel J.-L.** (à paraître, 2013b) - Les travaux miniers de la vallée de la Thur, secteur de Thann (Haut-Rhin). Phase informative et cartographie des aléas mouvements de terrain. Rapport BRGM/RP- xx -FR, 82 p., 126 ill., 1 tabl., 2 ann.
- Papillon E.** (1995) - Traitements et interprétations des cartes d'anomalies magnétiques et gravimétriques du Fossé rhénan supérieur. Rapp. De stage de diplôme d'ingénieur en géophysique de Strasbourg, 95 p.

Picot L., Becker D., Cavin L., Pirkenseer C., Lapaire F., Rauber G., Hochuli P. A, Spezzaferri S., Berger J.-P. (2008) - Sédimentologie et paléontologie des paléoenvironnements côtiers rupéliens de la Molasse marine rhénane dans le Jura suisse. *Swiss Journal of Geosciences* 101(2): p. 483-513.

Pirkenseer C., Spezzaferri S., Berger J.-P. (2010) - Palaeoecology and biostratigraphy of the Paleogene Foraminifera from the southern Upper Rhine Graben and the influence of reworked planktonic Foraminifera . *Palaeontographica, Abt. A: Palaeozoology-Stratigraphy* 293 (1-3).

Radtke G., Griessemer T.-W., Grimm K.-I, Hottenrott M., Janssen R., Lippmann R., Martini R., Reichenbacher B., Scholz J., Spiegler D. (2006) - Erster Meereseinbruch im Oberrheingraben – Entwicklung, Biodiversität, Paläogeographie (Pechelbronn-Gruppe, Obereozän - Unteroligozän) – Ausgewählte Fossilgruppen. Poster zum Molasse Meeting 2006 in Genf *Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Rheingaustr. 186, 65203 Wiesbaden.

Rambourg D. (2013) – Viewer RGF Démonstrateur- Application SIG, Guide technique et fonctionnel. Rapport final. BRGM/RP-63091-FR.

Rotstein Y., Edel J.-B., Gabriel G., Boulanger D., Schaming M. et Munsch M. (2006) - Insight into the structure of the Upper Rhine Graben and its basement from a new compilation of Bouguer Gravity. *Tectonophysics*, 425, p. 55-70.

Rousset D., Bayer R., Guillon D., Edel J.-B. (1993) - Structure of the southern Rhine Graben from gravity and reflection seismic data (ecors-dekorp program), *Tectonophysics*, 221, p. 135-153.

Schnaebele R., Haas J.-O, Hoffmann C.-R. (1948) - Monographie géologique du champ pétrolifère de Pechelbronn. *Mém. Serv. Carte Alsace-Lorraine*, n° 7. Imp. Als. Strasbourg.

Schulmann K., Edel J.-B., Hasalová P., Cosgrove J., Ježek J. & Lexa O. (2009a) - Influence of melt induced mechanical anisotropy on the magnetic fabrics and rheology of deforming migmatites, Central Vosges, France. *Journal of Structural Geology*, 31(10), p. 1223-1237.

Schulmann K., Lexa O., Štípská P., Racek M., Tajčmanová L., Konopásek J., Edel J.B., Peschler A. & Lehmann J. (2008) - Vertical extrusion and horizontal channel flow of orogenic lower crust: key exhumation mechanisms in large hot orogens? *Journal of Metamorphic Geology*, 26, p. 273–297.70.

Sedan O., Negulescu C., Terrier M., Roullé A., Winter T. & Bertil D. (2013) - Armagedom — A Tool for Seismic Risk Assessment Illustrated with Applications, *Journal of Earthquake Engineering*, 17:2, p. 253-281.

Sittler C. (1968) - Les limites stratigraphiques de l'Éocène du Fossé rhéan.

Sittler C. (1985) - Les hydrocarbures d'Alsace dans le contexte historique et géodynamique du Fossé rhéan. *Bull. Centres Rech. Explo.-Prod. Elf-Aquitaine*, 9, 2, p. 335-371, Pau, 1985.

Skrzypek E. (2011) - Contribution structurale, pétrologique et géochronologique à la tectonique intracontinentale de la chaîne hercynienne d'Europe (Sudètes, Vosges) Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, Strasbourg, 416 p.

Tabaud A-S. (2012) - Le magmatisme des Vosges : conséquence de subductions paléozoïques (datation, pétrologie, géochimie, ASM). Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, Strasbourg, 231 p.

Vadala P. (2008) - Évaluation préliminaire de l'aléa mouvement de terrain des districts miniers de Sainte-Marie-aux-Mines et de Sainte-Croix-aux-Mines (68). Rapport final BRGM/RP-56296-FR., 98 p., 30 fig., 2 tabl., 5 ann.

Vidal J. (2013) - Approche géologique et structurale multi-échelle de l'interface couverture-socle dans le fossé rhéna : application aux forages géothermiques de Soultz-sous-Forêts dans la partie sédimentaire. Projet de Recherche - Master 1. Spécialité "Sciences de la Terre : Géophysique, Géologie et Dynamique des Systèmes Terrestres". Université de Strasbourg – EOST

Wenzel F. and Brun J. (1991) - Crustal scale structure of the rhine graben from ECORS-DEKORP deep seismic reflection data. SEG Technical Program Expanded Abstracts 1991: p. 163-166.

Seguin J.J., Mardhel V., avec la collaboration de **Schomburgk S.** (2012) – Référentiel hydrogéologique Français BDLISA, version Beta. Présentation du référentiel, principes de construction et mise en œuvre. Rapport final. BRGM/RP-61034-FR.154 p., 57 ill., 2 ann., 1 DVD.

Quesnel F., Lacquement F., Kramers S., Greder C., Elsass P. (2002) - Banque régionale de l'aquifère rhéna 2000-2002. Cartographie thématique numérique à 1/25 000 des formations superficielles de la plaine Rhénane sur les zones Centre-Plaine et Sud-Alsace. Rapport final. BRGM/RP-52145-FR. 47 p., 8 fig., 2 ann.

Blanalt J.-G., Schumacher E., van Wervecke L., Guillaume L., Théobald N. (1967) – Notice explicative de la feuille de Bitche – Walschbronn, n°167, BRGM, Sev. Géol. nat.

Blanalt J.-G., Schumacher E., van Wervecke L., Guillaume L., Théobald N. (1967) – Carte géologique de Bitche – Walschbronn (1/50 000), n°167, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Coulombeau C., Geissert F., Konrad H.-J., Schwoerer P. (1989) - Notice explicative de la feuille de Lembach (1/50 000), n°168, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Benecke E.-W, Schumacher E., van Wervecke L., Geissert F., Leppla A., Türach H., Illies H., Rinck G., Schwoerer P. (1989) - Carte géologique de Lembach (1/50 000), n°168, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Vogt H., Boudot J.-P., Geissert F., Thévenin A., Petry F., Schwoerer P. (1979) - Notice explicative de la feuille de Bouxwiller (1/50 000), n°197, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Schumacher E., van Wervecke L., Haug H., Bücking H., Vogt H., Gros J.-J., Chirardin J., Reichelt R., Thévenin A., Petry F. (1979) - Carte géologique de Bouxwiller (1/50 000), n°197, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Théobald N., Cavalier Cl., Geissert F., Baudot J.-P., Thevenin A.-G., Dillmann F., Schwoerer P. (1970) - Notice explicative de la feuille de Haguenau 1ère édition (1/50 000), n°198, BRGM, Sev. Géol. nat.

Daum J.-R., Both J., Simler L., van Wervecke L., Dubois G. (1970) - Carte géologique de Haguenau 1ère édition (1/50 000), n°198, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F. (à paraître) - Notice explicative de la feuille de Haguenau 2ème édition (1/50 000), n°198, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F. (à paraître) - Carte géologique de Haguenau 2ème édition (1/50 000), n°198, BRGM, Sev. Géol. nat.

Geissert F., Ménillet F., Baudot J.-P., Thévenin A., Schwoerer P. (1976) - Notice explicative de la feuille de Seltz-Wissembourg (1/50 000), n°199, BRGM, Sev. Géol. nat.

Geissert F., Ménillet F., Vogt H., Thévenin A. (1976) - Carte géologique de Seltz-Wissembourg (1/50 000), n°199, BRGM, Sev. Géol. nat.

Guillaume M., Limasset J.-Cl. (1968) - Notice explicative de la feuille de Sarrebourg (1/50 000), n°232, BRGM, Sev. Géol. nat.

Guillaume M., Limasset J.-Cl. (1968) - Carte géologique de Sarrebourg (1/50 000), n°232, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Vogt H., Hoff M., Boudot J.-P., Geissert F., Schwoerer P., Lougnon J., (1979) - Notice explicative de la feuille de Saverne (1/50 000), n°233, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Sittler C., Schumacher E., Bücking H., Weigand B., Dubois G., Sund J., Fourquoire J., Humbert J., Vogt H., Lettermann M., Rinck G., (1979) - Carte géologique de Saverne (1/50 000), n°233, BRGM, Sev. Géol. nat.

Maire G., Cloots A.-R., Blanat J.-G., Sittler C., Geissert F., Hummel P., Thévenin A., Stieber A., Schwoerer P., (1972) - Notice explicative de la feuille de Brumath-Drusenheim (1/50 000), n°234, BRGM, Sev. Géol. nat.

Maire G., Maitre C., Cloots A.-R., Ostrowski V., Wilsdorf P., Blanalt J.-G., Fauler W., Vogt H., (1972) - Carte géologique de de Brumath-Drusenheim (1/50 000), n°234, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Durand M., Le Roux J., Cordier S., Hanot F., Charnet F., (2005) - Notice explicative de la feuille de Luneville 2ème édition (1/50 000), n°269, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Durand M., Le Roux J., Cordier S., (2005) - Carte géologique de Luneville 2ème édition (1/50 000), n°269, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., von Eller J.-P., Juteau T., Durand M., Hollinger J., Maïaux C., Lougnon J. (1978) - Notice explicative de la feuille de Cirzy-sur-Vezouze (1/50 000), n°270, BRGM, Sev. Géol. nat.

Durand M., Clermonté J., Ménillet F., Haguenauer B., Fauvel P.-J., Champetier Y., Juteau T., von Eller J.-P., Hollinger J., Bücking H., (1978) - Carte géologique de Cirzy-sur-Vezouze (1/50 000), n°270, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Théobald N., von Eller J.-P., de la Roche H., Juteau T., Blanalt J.-G., Lillié F., Mihara S., Saucier H., Vogt H., Thévenin A.-G., Boudot J.-P., Geissert F., Kapp E.,

Schwoerer P., Lougnon J., (1975) - Notice explicative de la feuille de Molsheim (1/50 000), n°271, BRGM, Sev. Géol. nat.

Blanat J.-G., von Eller J.-P., Lillie F., Juteau T., Mihara S., Théobald N., Schirardin J., van Wervecke L., Schumacher E., Bücking H., Steur A., Vogt H., Maire G., Rinck G., (1975) - Carte géologique de Molsheim (1/50 000), n°271, BRGM, Sev. Géol. nat.

Blanalt J.-G., Sittler C., Cloots A.-R., Maire G., Geissert F., Thévenin A., Stieber A., Schwoerer P., Valentin J., Chalumeau G., Rinck G., Ringot B., (1971) - Notice explicative de la feuille de Strasbourg (1/50 000), n°272, BRGM, Sev. Géol. nat.

Blanalt J.-G., Maire G., Cloots A.-R., Dubois G., (1971) - Carte géologique de Strasbourg (1/50 000), n°272, BRGM, Sev. Géol. nat.

Meyer R., Jurain G., Chrétien J.-C., Verbecq F., (1974) - Notice explicative de la feuille de Rambervillers (1/50 000), n°305, BRGM, Sev. Géol. nat.

Meyer R., Jurain G., Chrétien J.-C., Verbecq F., Carte géologique de Rambervillers (1/50 000), n°305, BRGM, Sev. Géol. nat.

von Eller J.-P., Ménillet F., Juteau Th., Hollinger J., Cloots A.-R., Rolland A., Tricard J., Guillaume C., Billoret R., Fluck P., Maïaux C., (1975) - Notice explicative de la feuille de Saint-Die (1/50 000), n°306, BRGM, Sev. Géol. nat.

Pfeiffer B., von Eller J.-P., Blanalt J.-G., Hameurt J., Juteau T., Fluck P., Hollinger J., Tricard J., Rolland A., Cloots A.-R., Trautmann J., Billoret B., Guillaume C., (1975) - Carte géologique de Saint-Die (1/50 000), n°306, BRGM, Sev. Géol. nat.

Blanalt J.-G., Grandarovski G., Eller J.-P., Fluck P., Geoffroy J., Jeannette D., Ruhland M., Schwoerer P., Thévenin A., Stieber A., Vogt H., (1972) - Notice explicative de la feuille de Selestat (1/50 000), n°307, BRGM, Sev. Géol. nat.

Blanalt J.-G., Ham P., von Eller J.-P., Jacquet P., Kern B., Hildwein G., Laubacher G., Hameurt J., Schirardin J., Hirlemann G., Tricart J., Vogt H., Hirth C. (1970) - Carte géologique de Selestat (1/50 000), n°307, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Leiber J., Geissert F., Boudot J.-P., Schwoerer P., (1986) - Notice explicative de la feuille de Benfeld (1/50 000), n°308, BRGM, Sev. Géol. nat.

Boudot J.-P., Geissert F., Ménillet F., Leiber J., (1986) - Carte géologique de Benfeld (1/50 000), n°308, BRGM, Sev. Géol. nat.

Vincent P.-L., Flageollet J.-C., Hameurt J., Durand M., Allemmoz M., Vogt J., Delaunay J., Guillaume C., Timbal J. (1985) - Notice explicative de la feuille de Bruyeres (1/50 000), n°340, BRGM, Sev. Géol. nat.

Vincent P.-L., Hameurt J., Durand M., Flageollet J.-C. (1985) - Carte géologique de Bruyeres (1/50 000), n°340, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Hameurt J., Fluck P., von Eller J.-P., Flageollet J.-C., Faivre P., Gury M., Hétier J.-M., Maïaux C., Lougnon J. (1978) - Notice explicative de la feuille de Gerardmer (1/50 000), n°341, BRGM, Sev. Géol. nat.

Fluck P., Ménillet F., Hameurt J., von Eller J.-P., Zinglé J.-B., Hollinger J., Théobald N., Flageollet J.-C., Darmois-Théobald M., Knierim A., Stoehr J., Vogt H. (1978) - Carte géologique de Gerardmer (1/50 000), n°341, BRGM, Sev. Géol. nat.

Blanalt J.-G., von Eller J.-P., Fluck P., Geffroy J., Hirlemann G., Jehl M., Bonnet Ch., Schreiner J., Eckerle A., Sittler C., Schwoerer P., Tricard J., Hirth C., Vogt H., Weil R., Siat A. (1972) - Notice explicative de la feuille de Colmar-Artolsheim (1/50 000), n°342, BRGM, Sev. Géol. nat.

Blanalt J.-G., Vogt J., von Eller J.-P., Wolff C., Théobald N., Dellenbach J., Hirlemann G., Ruhland M., Kessler P., Tricart J., Hirth C., Wimmenauer W., Hasemann W., Schreiner A. (1972) - Carte géologique de Colmar-Artolsheim (1/50 000), n°342, BRGM, Sev. Géol. nat.

Vincent P.-L., Flageollet J.-C., Hameurt J., Mouillac J., Hollinger J., Durand M., Ricour J., Lougnon J.-M., Vogt J., Bonvallet J. (1979) - Notice explicative de la feuille de Remiremont (1/50 000), n°342, BRGM, Sev. Géol. nat.

Vincent P.-L., Hameurt J., Hollinger J., Durand M., Flageollet J.-C. (1979) - Carte géologique de Remiremont (1/50 000), n°342, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Fluck P., Gagny Cl., Fourquin Cl., Stussi J.-M., Schumacher F., Ruhland M., Lillié F., Hollinger J., Hirlemann G., Flageollet J.-L., Vogt H., Boudot J.-P., Babot Y. (1976) - Notice explicative de la feuille de Munster (1/50 000), n°377, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Fluck P., Gagny Cl., Jung J., Huu Nghiep H., Mattauer M., Théobald N., Tricart J., Cloots A.-L., Flageollet J.-C., Zinglé J.-B., Schumacher M.-F., Ruhland M., Lillié F. (1976) - Carte géologique de Munster (1/50 000), n°377, BRGM, Sev. Géol. nat.

Théobald N., Ménillet F., Fluck P., Lougnon J., Bonnet Ch. (1977) - Notice explicative de la feuille de Neuf-Brisach Obersaasheim (1/50 000), n° 378-379, BRGM, Sev. Géol. nat.

Théobald N., Blanalt J.-G., Ménillet F., Hudeley H., Marocke R., Mettauer H., Tricart J., Usselman P. (1977) - Carte géologique de Neuf-Brisach Obersaasheim (1/50 000), n° 378-379, BRGM, Sev. Géol. nat.

Théobald N., Thiébaud J., Bernatzky M. (1974) - Notice explicative de la feuille de Giromagny (1/50 000), n° 411, BRGM, Sev. Géol. nat.

Thiébaud J., Théobald N., Hudeley H., Guintrand Y., Rossi M., Griveaux B., Zarayan S., Guérin H., Fourquin C., Benhamou J.-C., Hameurt J. (1974) - Carte géologique de Giromagny (1/50 000), n° 411, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ménillet F., Coulon M., Fourquin C., Paicheler J.-C., Lougnon J.-M., Lettermann M. (1989) - Notice explicative de la feuille de Thann (1/50 000), n° 412, BRGM, Sev. Géol. nat.

Coulon M., Fourquin C., Ménillet F., Paicheler J.-C., Point R., Guérin H., Blanchard P., Gagny C., Rubiello M.-F., Wickert F., Ruhland M., Gilet S., Schneegans D., Hirlemann G., Vogt H., Lettermann M., Rinck G., Kieffer C. (1986) - Carte géologique de Thann (1/50 000), n° 412, BRGM, Sev. Géol. nat.

Théobald N., Schweitzer M. (1976) - Notice explicative de la feuille de Mulhouse (1/50 000), n° 413, BRGM, Sev. Géol. nat.

Théobald N., Hudeley H., Schweitzer M. (1976) - Carte géologique de Mulhouse (1/50 000), n° 413, BRGM, Sev. Géol. nat.

Contini D., Boullier A., Morin D. (2000) - Notice explicative de la feuille de Lure (1/50 000), n° 443, BRGM, Sev. Géol. nat.

Contini D., Théobald N., Dressler M., Creuzot J. (2000) - Carte géologique de Lure (1/50 000), n° 443, BRGM, Sev. Géol. nat.

Théobald N., Devantoy J. (1963) - Notice explicative de la feuille de Belfort (1/50 000), n° 444, BRGM, Sev. Géol. nat.

Théobald N., Devantoy J. (1963) - Carte géologique de Belfort (1/50 000), n° 444 BRGM, Sev. Géol. nat.

Théobald N. (1958) - Notice explicative de la feuille de Altkirch-Huningue (1/50 000), n° 445, BRGM, Sev. Géol. nat.

Théobald N. (1958) - Carte géologique de Altkirch-Huningue (1/50 000), n° 445, BRGM, Sev. Géol. nat.

Chauve P., Martin J., Bailly C. (1985) - Notice explicative de la feuille de Delle (1/50 000), n° 475, BRGM, Sev. Géol. nat.

Chauve P., Martin J., Bailly C. (1985) - Carte géologique de Delle (1/50 000), n° 475, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ruhland M., Blanalt J.-G., Théobald N., Vançon J.-P., Thévenin A., Grutter H., Ewald J. (1973) - Notice explicative de la feuille de Ferrette 2ème édition, n° 476, BRGM, Sev. Géol. nat.

Ruhland M., Blanalt J.-G., Bomont M. (1973) - Carte géologique de Ferrette 2ème édition (1/50 000), n° 476, BRGM, Sev. Géol. nat.

Roger J. (2007) - Carte géologique harmonisée du département de Meurthe et Moselle. Rapport géologique. BRGM/RP-55492-FR, 105 p., 3 fig., 2 tableaux, 4 pl. hors-texte.

Cruz Mermy D., Skrzypek E., Chevremont P., Menillet F. (2007) - Carte géologique harmonisée du département du Bas-Rhin. Notice géologique. Rapport final. BRGM/RP-56028-FR, 319 p., 4 fig., 3 tab., 8 ann., 3 pl. hors texte.

Skrzypek E., Cruz Mermy D., Chevremont P., Menillet F. (2008) - Carte géologique harmonisée du département du Haut-Rhin. Notice géologique. Rapport final. BRGM/RP-56029-FR, 322 p., 4 fig., 3 tab., 8 ann., 4 pl. hors texte.

Chevremont P., Cruz Mermy D., Skrzypek E., Menillet F. (2008) - Carte géologique harmonisée du département des Vosges. Notice géologique. Rapport final. BRGM/RP-56439-FR, 232 p., 2 fig., 3 tab., 5 ann., 4 pl. hors texte.

Chèvremont P. (2004) - Carte géologique harmonisée du département de Meurthe et Moselle. Notice géologique. Rapport final. BRGM/RP-53503-FR.

Berthier H. (2008) - Carte géologique harmonisée du département du Territoire de Belfort. Notice géologique. Rapport final. BRGM/RP-56272-FR.

Vernhet Y., Donzeau M. (2004) - Carte géologique harmonisée du département de la Haute-Saône. Notice géologique. Rapport final. BRGM/RP-53505-FR.

Birtler.C. (2006) - Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan : Programme 2003 - 2006. Rapport final. BRGM/RP-54876-FR, 104 p., 46 fig. 4 ann.

Sites internet :

Site des Sciences de la vie et de la terre de l'académie de Strasbourg. Lithothèque Alsace.

<http://www.ac-strasbourg.fr/pedagogie/svt/>

Site de l'académie de Nancy-Metz. Carte géologique de la Lorraine par Chalot R., Marciniak C., Cartannaz C.

<http://www4.ac-nancy-metz.fr/>

Site de l'académie de Nancy-Metz. Article de DURAND M. - Des cônes de déjection permien au grand fleuve triasique. Évolution de la sédimentation continentale dans les Vosges du Nord autour de - 250 Ma. Présentation de la couverture détritique tardi et post-hercynienne du massif vosgien.

<http://www4.ac-nancy-metz.fr/base-geol/annexe.php?id=11>

Site de l'académie de Vienne (Autriche). Article de Rasser M.-W., Harzhauser *et al.* (2008) - Paléogène and Néogène

www.nhm-wien.ac.at/jart/.../harzhauser/.../gce2008_rasser_harzhauser.pdf

Site de la Bibliothèque numérique suisse

<http://doc.rero.ch>.

Site de la Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hessen-Allemagne)

<http://www.hlug.de/start.html>.



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