

**Modélisation géologique d'un secteur
potentiel d'implantation du Canal Seine
Nord Europe (Barleux-Marquion)**

**Rapport intermédiaire
Phase 1**

**BRGM/RP-53773- FR
mai 2005**

Phase 1

mai 2005

Modélisation géologique d'un secteur potentiel d'implantation du Canal Seine Nord Europe (Barleux-Marquion)

Rapport intermédiaire

Phase 1

BRGM/RP-53773-FR
mai 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2004 04PIRB05

C. Lembezat, R. Blanchin, Ch. Vinchon

Vérificateur :

Original signé par : Pierre THIERRY

Approbateur :

Original signé par : Hubert FABRIOL

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Modélisation géologique, Géostatistique, Incertitudes, Formations, Craies, Marnes, Formations superficielles, Canal Seine Nord Europe, Picardie, Nord - Pas-de-Calais.

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

Lembezat C., Blanchin R., Vinchon Ch. (2005) - Modélisation d'un secteur potentiel d'implantation du canal Seine Nord Europe (Barleux - Marquion). Rapport intermédiaire Phase 1. BRGM/RP-53773-FR, 83 p., 16 fig., 2 tabl., 3 ann. (dont ann. 3 en vol. séparé).

Synthèse

Dans le cadre de l'avant-projet du canal Seine-Nord Europe, Voies Navigables de France (VNF) a défini un faisceau géographique, long d'environ 100 km et large de 1 à 5 km pour la définition du tracé du Canal Seine Nord Europe qui doit relier Compiègne à Cambrai.

L'un des critères principaux pour définir ce tracé est la faisabilité géologique et géotechnique du canal et des ouvrages qui l'accompagnent.

Plus particulièrement, à l'extrémité orientale du plateau de l'Artois, le tracé traverse une barre de relief. Il en résulte un passage en déblai profond de 20 à 30 m. Pour son franchissement et pour limiter le nombre d'écluses et de biefs, VNF étudie la possibilité de réaliser un ouvrage en tunnel ou en tranchée sur un tronçon de 20 km de long, entre Feuillaucourt et Hermies.

VNF a demandé au BRGM, dans une première phase du projet, de réaliser la modélisation géologique de ce secteur à enjeu.

Afin de répondre à cette demande, le BRGM a :

- collecté l'information disponible en terme de connaissance géologique ;
- constitué une base de données ;
- analysé ces données dans le but de modéliser un certain nombre de surfaces géologiques.

Les résultats de la modélisation ainsi que la méthodologie utilisée sont présentés dans ce rapport intermédiaire. Le modèle ainsi réalisé constitue un outil d'aide à la décision en identifiant notamment les zones de fortes incertitudes où il serait nécessaire d'acquérir de l'information complémentaire pour minimiser les risques inhérents à tout projet d'aménagement.

Le demande finale de VNF concernant la phase 2 du projet consiste à :

- établir un cahier des charges précis, en s'appuyant sur les résultats présentés, pour la deuxième campagne d'acquisition de données, sur le secteur modélisé ;
- préparer les éléments afin que VNF soit en mesure d'enrichir le modèle avec les données acquises lors de cette deuxième campagne (formation au logiciel GDM) ;
- réaliser avec les données du modèle GDM l'interfaçage avec un outil de visualisation 3D sur le secteur de passage du canal ;
- rédiger le rapport final et éditer les livrables sur Cdrom (Bd-VNF, Coupes, visualisation 3D).

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. OBJECTIFS DE LA PHASE 1.....	10
1.3. DÉROULEMENT DU PROJET	11
2. Mode opératoire pour la réalisation du modèle géologique.....	15
3. Collecte et structuration des données	17
3.1. CADRE GÉOLOGIQUE	17
3.1.1. Données existantes – sélection préliminaires des sondages	18
3.1.2. Données de sondages complémentaires	19
3.2. DESCRIPTION DE LA BASE DE DONNÉES.....	19
3.2.1. Données de sondages.....	19
3.2.2. Base de données des niveaux des hautes et basses eaux connues	22
3.2.3. Données topographiques	23
3.3. DESCRIPTION DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES	23
3.3.1. Formations infraturoniennes	23
3.3.2. Marnes et alternances marnes-craies	23
3.3.3. Craie	25
3.3.4. Formations tertiaires.....	27
3.3.5. Formations superficielles.....	27
4. Modélisation des formations géologiques	31
4.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX ET APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	31
4.2. RÉALISATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE.....	32
4.2.1. Analyse statistique.....	32
4.2.2. Analyse variographique	33
5. Exploitation du modèle	37
5.1. REPRÉSENTATION CARTOGRAPHIQUE.....	37
5.1.1. Cartographie du toit des marnes	37
5.1.2. Cartographie du toit des alternances marnes et craies	38
5.1.3. Surface « composite » Marnes + alternances marnes et craies.....	38
5.1.4. Cartographie des bancs durs	39

5.1.5. Cartographie des craies	44
5.1.6. Cartographie des formations superficielles	44
5.1.7. Surfaces piézométriques.....	50
5.2. PRÉSENTATION DES COUPES.....	50
6. Conclusion et perspectives.....	57
7. Bibliographie	59

Liste des figures

Figure 1 - Tracé prévisionnel (en bleu) et zone d'étude globale associée (en rouge) du canal reliant Compiègne à Cambrai – Les étoiles rouges correspondent aux extrémités potentielles du tunnel.	10
Figure 2 - Emprise de la zone test et de la zone d'étude.....	12
Figure 3 - Répartition des sondages dans la zone test – Les 2 points rouges représentent les extrémités du tracé prévisionnel du tunnel – Fond : MNT IGN au pas de 50 m.	20
Figure 4 - Log stratigraphique schématique.....	24
Figure 5 - Variogrammes de la variable « cote du toit » pour les formations suivantes : Marnes, Alternances marnes/craies, Craies composites et bancs durs.....	35
Figure 6 - Cartographie du toit des marnes et courbes d'iso-incertitude associées.	40
Figure 7 - Cartographie du toit des alternances et courbes d'iso-incertitude associées.....	41
Figure 8 - Cartographie du toit des marnes et alternances et courbes iso-incertitudes.....	42
Figure 9 - Répartition des sondages ayant rencontré des bancs durs et mise en évidence des relations avec les différentes formations.	43
Figure 10 - Cartographie du toit des craies « composites ».....	45
Figure 11 - Cartographie du mur des formations superficielles.	46
Figure 12 - Cartographie de l'épaisseur des formations superficielles, contrainte par	48
Figure 13 - Cartographie des épaisseurs des formations superficielles sans limites.	49
Figure 14 - Cartographie des surfaces piézométriques basses eaux et hautes eaux.	51
Figure 15 - Tracé des coupes transversales et longitudinales le long et de part et d'autre de l'axe du tunnel et dans le val de Somme.	52
Figure 16 - Tracé et noms de toutes les coupes longitudinales, en ligne brisée et transversales sur fond topographique du MNT VNF.	54

Liste des tableaux

Tableau 1 - Statistiques sur les variables (« cote toit » ou « épaisseur ») des formations retenues.....	33
Tableau 2 - Paramètres d'ajustement des variogrammes théoriques.....	36
Tableau 3 - Coordonnées des points de départ, de fin et d'inflexion des coupes (en Lambert 93).	53

Liste des annexes

Annexe 1 - Compte-rendu de réunions.....	61
Annexe 2 - Géostatistique appliquée à la modélisation géologique	77
Annexe 3 - Coupes longitudinales et coupes sériées (volume séparé).	

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Dans le cadre de sa mission prospective, VNF a d'ores et déjà délimité un faisceau géographique, long d'environ 100 km et large de 1 à 5 km, à l'intérieur duquel il conviendra de définir le tracé pour le Canal Seine Nord qui doit relier Compiègne à Cambrai. L'un des critères déterminant dans le choix du tracé est la faisabilité géologique et géotechnique du canal et des ouvrages qui l'accompagnent.

Pour minimiser les risques inhérents à tout projet d'aménagement en particulier au stade d'une étude de faisabilité, la connaissance précise du contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique s'impose. Celle-ci passe par l'exploitation des données existantes. De ce point de vue, dans le cadre de sa mission de Service Public, le BRGM détient un certain nombre de données géologiques, dans sa base de données du sous-sol (BSS) dont la vocation est l'archivage des données « brutes » transmises par les organismes de forages. Un projet en cours de Référentiel Géologique, mené par le BRGM, vise à valider et rendre cohérentes ces données « brutes » dont la qualité est très variable. Ainsi, à partir de ces données, des logs de référence sont sélectionnés et validés comme représentatifs de la géologie locale et permettent de reconstituer les ensembles géologiques.

Dans ce contexte, VNF a demandé au BRGM, dans la première phase du projet, de réaliser la modélisation géologique d'une zone test. Le secteur du plateau de l'Artois a été retenu. Celle-ci correspond à un secteur à enjeu, pour lequel la connaissance géologique doit porter sur une plus grande épaisseur que sur le reste du tracé. En effet à son extrémité orientale, le tracé traverse une barre de relief. Il en résulte un passage en déblai profond de 20 à 30 m. Pour son franchissement et pour limiter le nombre d'écluses et de biefs, il est étudié la possibilité de réaliser sur une distance d'environ 20 km, un ouvrage en tunnel ou tranchée entre Hermies et Feuillaucourt.

Le modèle couvre également le val de Somme et le plateau situé au sud de la Somme afin de juger de l'intérêt d'une modélisation sur la vingtaine de mètres superficiels que les travaux du canal traverseront. La modélisation s'étend de Barleux au sud à Marquion au nord (cf. fig. 1).

C'est dans ce cadre que la convention de recherche et développement partagés a été signée le 1^{er} juin 2004 entre le BRGM et VNF.

Le cahier des charges associé prévoit la réalisation de deux phases d'études dont la seconde est conditionnée par les résultats de la première.

La connaissance du contexte géologique passe également par l'acquisition de données nouvelles. Une campagne de reconnaissance préliminaire a été confiée au CETE simultanément au démarrage de ce projet.

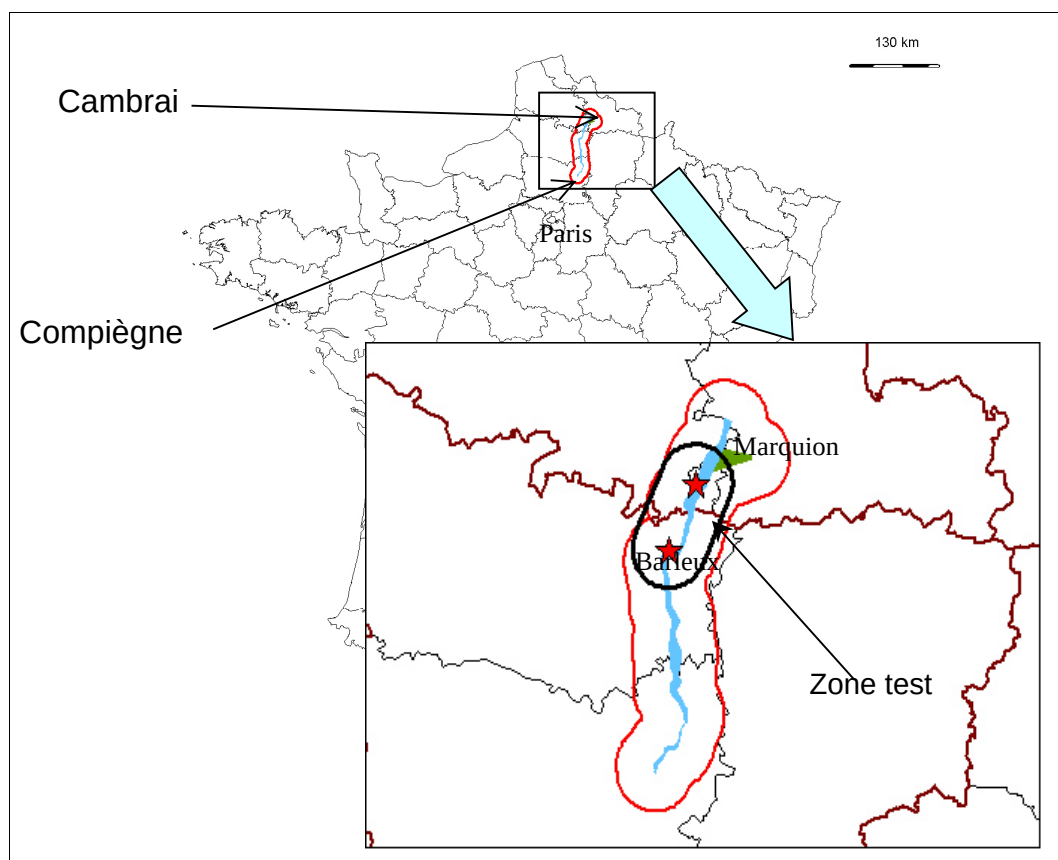


Figure 1 - Tracé prévisionnel (en bleu) et zone d'étude globale associée (en rouge) du canal reliant Compiègne à Cambrai – Les étoiles rouges correspondent aux extrémités potentielles du tunnel.

L'objet du présent rapport intermédiaire vise à synthétiser et expliciter les résultats de la phase 1.

Ces résultats seront repris dans le rapport final, accompagnés de recommandations et de propositions pour une deuxième campagne d'acquisition des données (campagne de terrain jusqu'à août 2005), et des éléments permettant à VNF de faire « vivre » le modèle en y intégrant les données nouvelles.

1.2. OBJECTIFS DE LA PHASE 1

Les objectifs de la phase 1 du projet sont :

- la réalisation, à la demande du comité de pilotage, d'une première version du modèle géologique/hydrogéologique sur le secteur situé entre Barleux et Marquion, secteur géographique sur lequel le canal passera en déblai profond ou éventuellement en souterrain ;

- l'évaluation de la validité du modèle ;
- l'identification des zones géographiques où il serait nécessaire d'acquérir des données complémentaires pour diminuer localement les incertitudes et optimiser la représentativité du modèle au regard de la réalité.

La modélisation géologique, finalité de la phase 1, se décline en trois volets principaux :

- volet 1 : collecte, évaluation, structuration des informations géologiques (sources BRGM et CETE) ;
- volet 2 : traitements des informations par une approche géostatistique, qui conduisent à l'interpolation des formations retenues et à la réalisation du modèle numérique dit multicouche ;
- volet 3 : présentation des résultats par construction de cartes iso-valeurs et de coupes verticales, sur un certain nombre de surfaces et de formations de propriétés géotechniques différentes pour lesquelles il importe d'avoir des informations lors de la réalisation du chantier..

1.3. DÉROULEMENT DU PROJET

Le déroulement du projet s'est organisé avec un certain nombre de points d'étape réunissant le comité de pilotage qui comprend le maître d'ouvrage (VNF/MSNE), l'assistant à maître d'ouvrage (CETE Nord Picardie), le BRGM et, en tant que de besoin, des experts conviés par le maître d'ouvrage.

Les traces écrites (mails) et comptes-rendus de ces différents réunions sont joints en annexe 1.

Au cours de la phase 1, ces réunions ont permis, au vu des données disponibles, de préciser la demande du maître d'ouvrage.

La représentativité et la validité de la modélisation des différentes surfaces et/ou formations ont été évaluées et discutées en comité de pilotage. L'évaluation était fondée sur les résultats acquis par les traitements géostatistiques en particulier les incertitudes associées aux surfaces interpolées. Ces réunions d'avancement ont permis de consolider les aspects suivants :

- le regroupement, pour la modélisation, des formations dites superficielles (remblais, alluvions organiques, non organiques, graves, colluvions et limons), en raison du nombre insuffisant d'informations et de leur trop grande disparité ;
- le regroupement des différentes formations crayeuses (craie franche, craie altérée) ;
- le regroupement des formations marneuses et des alternances marne-craie ;
- l'intégration, dans le modèle numérique, du MNT calculé sur les données topographiques acquises par VNF (modèle maillé 50 m x 50 m) ;

- la définition d'une zone test et d'une zone d'étude comme indiquée sur la carte présentée en figure 2.

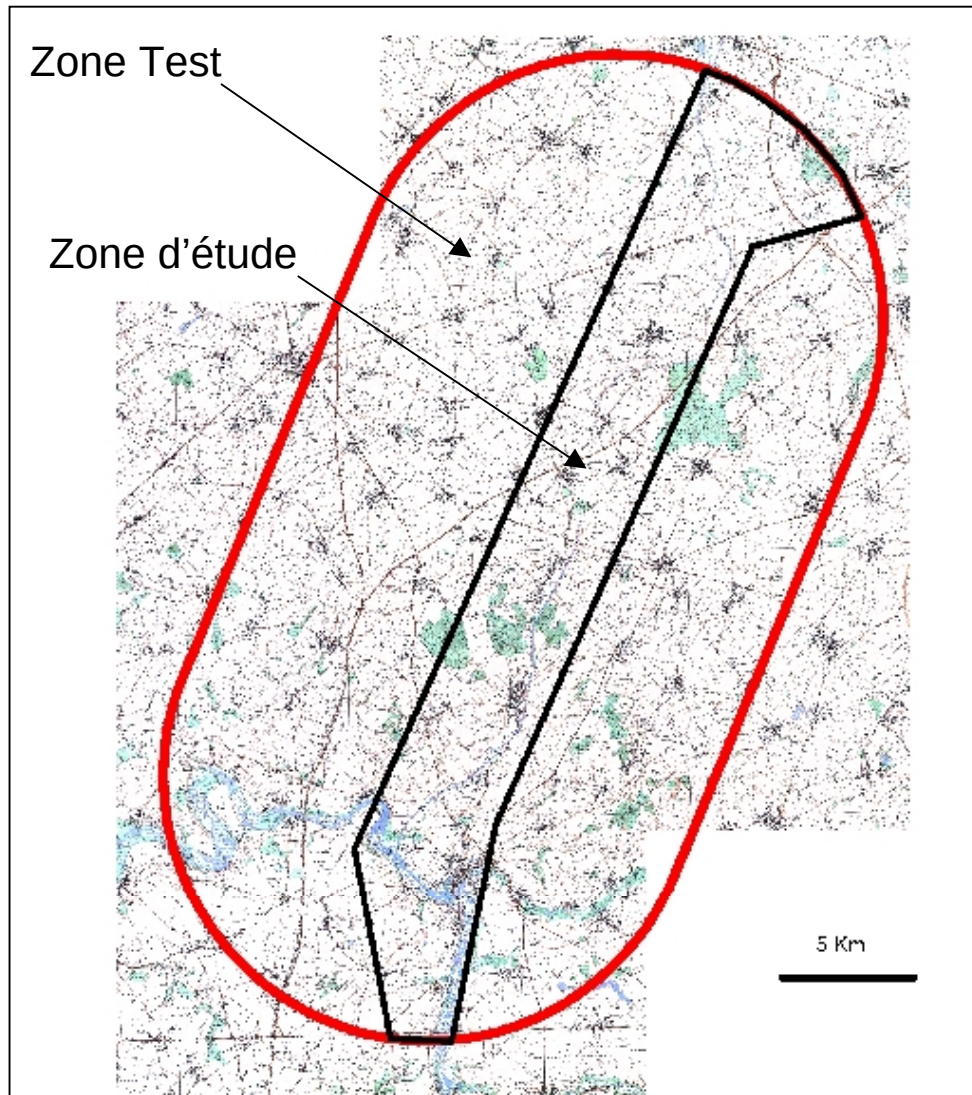


Figure 2 - Emprise de la zone test et de la zone d'étude.

On remarque que :

- la **zone test** correspond à la zone initialement retenue dans le cahier des charges. Elle inclue la zone du tunnel/tranchée potentiel accrue de 10 km de part et d'autres, le Val de Somme et le plateau sud du Val de Somme ;
- la **zone d'étude** correspond globalement à l'emprise du MNT VNF, sur laquelle la modélisation est réalisée.

Comme convenu dans la convention de recherche et développement partagés, il s'est agi à l'issue de la première phase, de définir le contenu de la phase 2, en fonction des résultats de phase 1 et en fonction également de l'avancement de l'avant-projet au sens large.

Au terme du projet, les résultats de la modélisation réalisée en phase 1, seront intégrées dans un logiciel de visualisation 3D, afin de faciliter la communication sur les résultats.

2. Mode opératoire pour la réalisation du modèle géologique

Un modèle géologique est une représentation du sous-sol dans un secteur donné, à partir de la synthèse des connaissances disponibles. Il ne s'agit que d'une modélisation, et non d'une image de la « réalité » ; en effet tout modèle numérique construit à partir de données factuelles intègre une part d'incertitude plus ou moins importante suivant la densité, la répartition et la qualité des données.

La réalisation d'un modèle géologique nécessite l'acquisition, le traitement et l'analyse d'informations qu'il convient d'identifier clairement au démarrage du projet.

Afin d'éviter toutes confusions, on rappelle la définition des termes employés dans ce projet. On parle ici de « formations » pour identifier les terrains possédant des caractères communs et constituant un ensemble que l'on juge utile de distinguer. Les interfaces entre les formations constituent des « surfaces ». La surface supérieure d'une formation est appelée « toit » tandis que la surface inférieure est appelée « mur ». Ce sont les surfaces « toit » ou les épaisseurs des formations qui sont modélisées.

La première étape de la réalisation d'un modèle géologique consiste à identifier, collecter et structurer les données existantes.

Il s'agit d'analyser le contexte géologique du secteur grâce aux cartes géologiques et leurs notices notamment, mais aussi de sélectionner les forages susceptibles de contenir de l'information, de les collecter et de les stocker dans une base de données en respectant les critères qui permettront d'exploiter au mieux toutes les données qualitatives et quantitatives qu'elles soient de nature géologique, géotechnique ou hydrogéologique. Le chapitre 3 développe les aspects d'acquisition des données, mais également de structuration et d'interprétation.

La deuxième étape concerne la construction à proprement parler, d'un modèle géologique. Elle repose sur la définition des interfaces ou surfaces géologiques y compris la surface topographique, d'où la nécessité de disposer d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

À l'issue de la première étape, une approche géostatistique est mise en œuvre pour interpoler les formations retenues et construire le modèle numérique qui permettra de produire tous les documents graphiques (cartes isohypses ou isopaques et coupes verticales).

Le résultat final est une grille multicouche qui contient pour chacun de ses nœuds de coordonnées (X, Y) la valeur Z (cote) de chacune des surfaces modélisées.

Les chapitres 4 et 5 développent les aspects traitements et restitution graphique.

3. Collecte et structuration des données

3.1. CADRE GÉOLOGIQUE

La nécessité de réaliser dans le secteur du plateau de l'Artois, un ouvrage en déblai ou en souterrain est directement liée à la géomorphologie : plateau entaillé de vallées sèches, liées au bassin versant de la Sensée au nord et de la Somme au sud.

Le sud de la zone test est constitué de la vallée de la Somme et du versant sud de celle-ci, de morphologie identique au versant nord (plateau et vallée sèche).

La zone test est couverte par les cartes à 1/50 000 de Cambrai (n° 36), Péronne (n° 48), Albert (n° 47) et Bapaume (n° 35).

D'après ces cartes, la géologie du secteur est à dominante crayeuse d'âge Turono-Coniacien. En fonction du contexte morphologique ces craies sont recouvertes : de limons en plateau, d'alluvions quaternaires dans la vallée de la Somme, et d'alluvions et colluvions dans les vallées sèches. Les formations tertiaires sableuses et argileuses du Thanétien (dit Landénien) se présentent au nord du secteur, et en buttes témoins résiduelles (affleurantes ou sous couverture) sur le plateau.

D'un point de vue tectonique, le secteur étudié se situe à l'extrémité orientale de l'anticlinal faillé de l'Artois, au sud de la zone de cisaillement Nord Artois (cf. bibliographie : COLBEAUX J.P., 1977, Géométrie et cinématique de la fracturation dans le Nord de la France. Bull. BRGM 4, FR pp. 339-355). Au stade actuel des connaissances, aucune structure faillée n'a été cartographiée dans le secteur considéré.

L'ensemble crayeux d'âge turono-coniacien, est fréquemment altéré à son sommet, cette altération reflète une surface d'érosion du toit de la craie, avant le dépôt des formations de couverture.

Le passage du Turonien au Coniacien est cartographié grâce à la présence de « bancs durs », constitués de craie phosphatée, présents en lentilles hectométriques discontinues et pouvant être stratigraphiquement diachrones. Le mur de cet ensemble crayeux est constitué de « dièves », ensemble à dominante marneuse, en alternance avec des bancs crayeux, au sommet puis plus franchement marneux. On verra plus loin que la description logique de ces alternances est très variable dans les sondages qui les ont traversées.

Dans le cadre du chantier prévu dans le secteur test, il importera donc de préciser la configuration géométrique de ces différents ensembles et des différents faciès qui les constituent, dans la mesure où ils auront une réponse géotechnique différente à l'avancement du chantier.

Les formations identifiées initialement par le comité de pilotage du 22 octobre 2004, pour la modélisation sont les suivantes :

- remblais et matériaux anthropiques remaniés ;
- alluvions organiques, non organiques, graves ;
- colluvions ;
- limons ;
- tertiaire sables et argiles ;
- craie altérée, craie franche, zone de bancs durs ;
- alternance craie et marne ;
- marnes.

Il a également été décidé de modéliser les surfaces piézométriques.

La faisabilité de la modélisation de ces formations est discutée dans le chapitre 4.

3.1.1. Données existantes – sélection préliminaires des sondages

Les ouvrages de reconnaissance (sondages, tranchées, essais géotechniques, observations diverses, ...) déjà réalisés constituent la source d'information primordiale.

Un certain nombre de données géologiques sont détenues par le BRGM, dans sa base de données géologiques BSS, et des logs de référence ont été sélectionnés dans le projet de Référentiel Géologique, comme représentatifs de la géologie locale et permettant de reconstituer les ensembles géologiques.

Le CETE Nord Picardie dispose de données géotechniques.

La première étape consiste donc à rechercher les données BSS et du Référentiel Géologique ainsi que les données issues du CETE, comprises dans la zone test.

1 368 sondages BSS stockés dans les Services Géologiques Régionaux de Picardie et du Nord-Pas-de-Calais, ainsi que 26 sondages du Référentiel Géologique sont répartis dans la zone test. Le CETE a fourni au BRGM une sélection de 197 sondages, situés dans cette zone.

Une phase de « dépouillement » des données BSS a permis de faire une première sélection des sondages qui pourraient être utilisés pour la modélisation. Les sondages qui n'ont pas été sélectionnés sont ceux qui ne contiennent pas d'information exploitable dans le cadre de ce projet.

Les sondages contenant au moins une information géologique (coupe, stratigraphie, log...) ou géotechnique, ont été sélectionnés puis triés selon des critères tant qualitatifs que quantitatifs, et répartis en trois « lots ». Les sondages profonds ou contenant une formation repère ou pour lesquelles de nombreuses formations géologiques sont

identifiées et bien décrites sont considérés comme « bons ». Les sondages dits « médiocres » correspondent aux sondages de sub-surface, ne détaillant que la partie supérieure du Quaternaire, ou aux sondages ne contenant pas de coupe géologique, mais des données géotechniques. Entre les « bons » et « médiocres », les sondages dits « moyens » représentent la majorité des cas. Ils correspondent à tous les autres sondages qui contiennent de l'information géologique et/ou géotechnique.

Ainsi, parmi les 1 368 sondages, 644 sélectionnés sont répartis de la façon suivante :

- 164 « bons » ;
- 432 « moyens » ;
- 48 « médiocres ».

Cette classification a permis de hiérarchiser les sondages afin de définir un ordre de priorité de saisie sous format numérique, mais il ne s'agit pas d'un « pondérateur » utilisé en tant que tel pour la modélisation.

La répartition des sondages dans la zone test est présentée dans la figure 3.

3.1.2. Données de sondages complémentaires

Une campagne de reconnaissance préliminaire a été confiée au CETE et réalisée en juin 2004 pour le compte de VNF, simultanément au démarrage de ce projet. Elle privilégie les zones stratégiques liées à des ouvrages importants ou des contextes d'aménagements particuliers. Au total, 32 sondages complémentaires répartis le long du faisceau, complètent les données de sondages déjà acquises via BSS.

3.2. DESCRIPTION DE LA BASE DE DONNÉES

3.2.1. Données de sondages

L'ensemble des informations est stocké dans une base de données sous ACCESS structurée de façon à être exploitable par le logiciel GDM version 5 (logiciel de traitement et de valorisation des données géologiques- développé par le BRGM).

Chaque sondage, repéré par un identifiant unique, est géoréférencé par ses coordonnées X, Y et Z (système Lambert 93, Z : NGF). La description plus ou moins détaillée des terrains/formations traversés constitue les « passes » du forage.

On appelle « passe » chaque entité décrite dans l'essai de forage, selon des critères spécifiques ; elle correspond à un intervalle de profondeur.

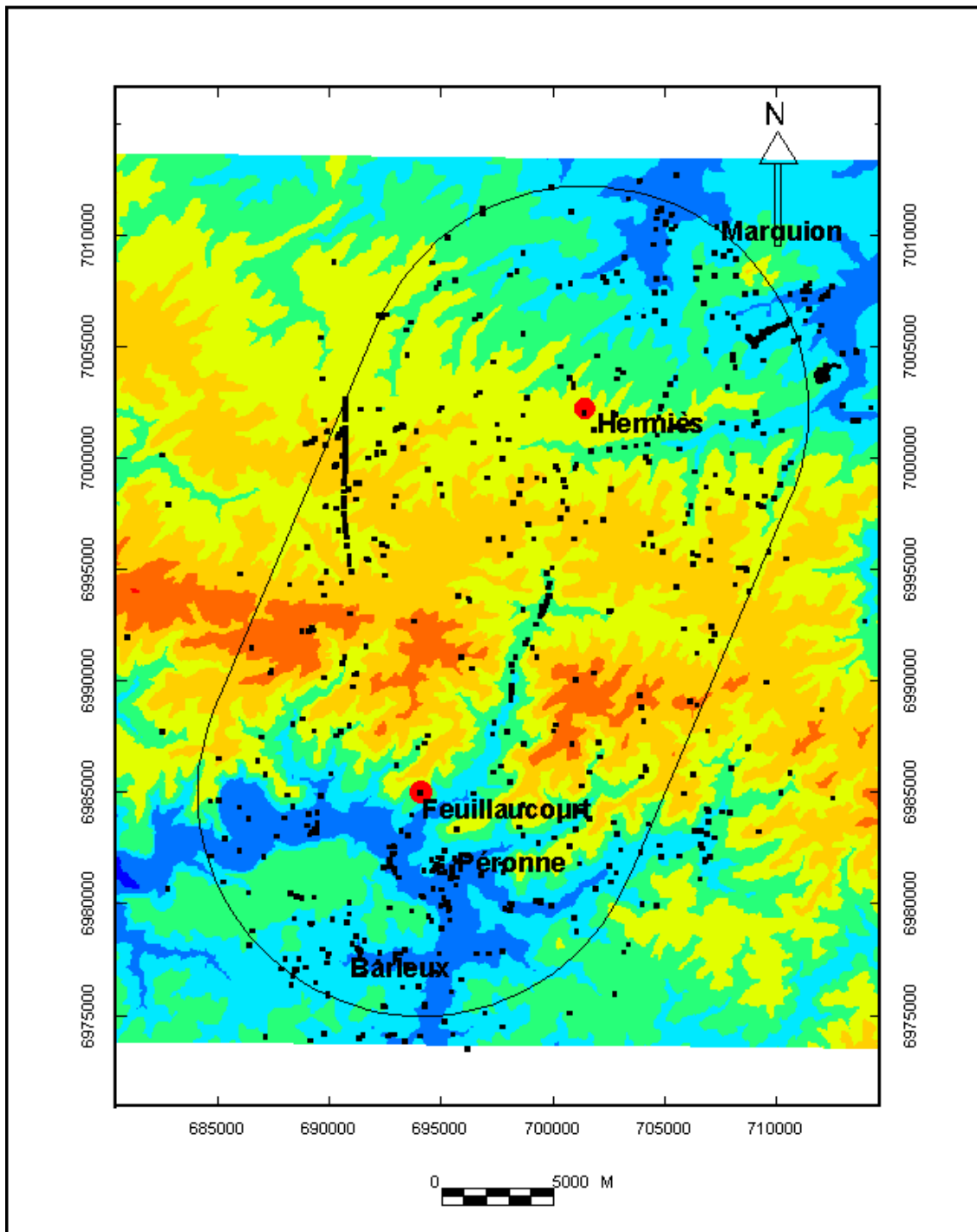


Figure 3 - Répartition des sondages dans la zone test – Les 2 points rouges représentent les extrémités du tracé prévisionnel du tunnel – Fond : MNT IGN au pas de 50 m.

Plusieurs codes sont utilisés afin de décrire au mieux chaque entité identifiée dans l'essai de forage. Ainsi :

- le « code stratigraphique » permet d'identifier l'âge de l'entité décrite, suivant une échelle de temps issue de l'échelle stratigraphique internationale. À titre d'exemple? le code TURM correspond au Turonien Moyen (étage du Crétacé supérieur) ;
- le « code formation » permet de décrire l'entité à l'aide d'un « identifiant local ». À titre d'exemple? le code 27020 correspond aux « sables et grès de Bracheux » ;
- le « code lithologique » permet de décrire plus précisément la nature de l'entité identifiée. ». À titre d'exemple? le code SFA permet de décrire un sable fin argileux.

Ces codes sont issus des lexiques mis en place et utilisés dans le cadre du Référentiel Géologique.

À chaque passe correspond un certain nombre de champs dans la base de données.

On retrouve donc pour chaque passe :

- la profondeur fin de passe ;
- une description stratigraphique associée au « code stratigraphique » ;
- une description de la formation associée au « code formation » ;
- une description de la lithologie associée au « code lithologique ».

Ainsi, afin d'homogénéiser l'information récoltée, toutes les données de sondages qu'elles soient issues de la BSS ou de la base CETE, ont été saisies dans la base de données ACCESS en respectant ces lexiques.

Un champ « CONCAT » , résultant de la concaténation des codes des trois champs énoncés ci-dessus, a été créé dans le but d'identifier chacune des passes en terme de description géologique homogène. À titre d'exemple, le code « CONCAT » THAN27390SG correspond à une entité d'âge Thanétien (THAN), localement appelée « Sables du Quesnoy » (27390) décrite comme étant des sables grossiers (SG).

La table de description des passes contient 555 codes « CONCAT » différents, décrivant les 6 196 passes contenues dans la base. Dans l'objectif d'une modélisation d'un nombre limité de surfaces, le grand nombre de codes « CONCAT » différents rend la gestion et l'analyse des données complexes. C'est pourquoi les niveaux sensiblement identiques mais décrits par des codes « CONCAT » différents ont été regroupés. Une codification complémentaire a été définie et la description de chaque passe a été complétée d'un «code_VNF ». À titre d'exemple, le code THAN27390SG décrit ci-dessus est associé, avec d'autres codes « CONCAT » tels que THAN27390SA ou THAN27390SSLT, au « code_VNF » THSA.

La table finale, décrivant les passes des sondages, contient 86 codes différents. Les correspondances entre le « code_VNF », les codes « CONCAT » et leurs significations sont fournies en annexe.

La base de données ACCESS finale contient :

- une table contenant autant d'enregistrements que de sondages. Les coordonnées X, Y, Z, ainsi que l'identifiant du sondage, y sont stockés ;
- une table de description des sondages. Elle contient autant d'enregistrements que de nombre total de passes ;
- cinq tables de lexiques : les lexiques des codes stratigraphique, formation et lithologie du Référentiel Géologique, le lexique de la codification code_VNF et le lexique de correspondance entre les « code-VNF » et « CONCAT ».

3.2.2. Base de données des niveaux des hautes et basses eaux connues

Les données relatives aux niveaux des hautes et basses eaux correspondent aux campagnes de mesures piézométriques de 1997 et 2001, sur le bassin de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie.

Les données de 2001 correspondent aux périodes de très hautes eaux, tandis que 1997 est associée à une période basses eaux.

Il est à noter que ces campagnes de mesures ont été dimensionnées dans le but de construire des cartes isopièzes à l'échelle de 1/100 000, dans un autre contexte que celui qui nous préoccupe. L'utilisation de cette donnée à l'échelle de la zone test a impliqué de repartir de la mesure initiale et d'en affiner le dessin, par dire d'expert (J.Y. Caous, BRGM/SGR/NPC).

Il faut également garder en mémoire que ces mesures font référence à une situation spécifique à la date des mesures. Elles correspondent à des situations extrêmes connues et mesurées, mais peuvent être remises en question par de nouveaux épisodes à venir de très basses eaux ou de très hautes eaux.

Les données relatives aux niveaux d'eau sont stockées dans un fichier Excel et sont structurées de la façon suivante :

- nom de la commune ;
- indice du forage ;
- coordonnées (X, Y, Z) du forage ;
- date de la mesure ;
- cote de la nappe.

À terme, ces informations seront stockées sous forme de table dans la base ACCESS décrite ci-avant.

3.2.3. Données topographiques

Les données topographiques dont nous disposons sont fournies par les cartes IGN. Ce sont généralement sur ces cartes que sont calées les coordonnées des sondages collectés.

L'exploitation optimale du modèle géologique nécessite d'avoir un modèle numérique de terrain (MNT) en adéquation avec la finalité du projet, ce qui justifie le levé topographique détaillé réalisé par VNF.

Un MNT à pas de 25 m avec une précision altimétrique de 30 cm a été réalisé sous maîtrise d'ouvrage de VNF sur le faisceau actuellement retenu.

Un semis de points correspondant à un levé topographique nous a été transmis par VNF. Ce semis de points couvre partiellement la zone d'étude (cf. fig. 2). Ces données ont permis la construction d'un MNT à maille carrée de 50 m, dénommé « MNT VNF ». Nous avons constaté localement des différences (pouvant atteindre 25 m) entre le MNT IGN (pas de 50 m) et le MNT VNF. À la demande de VNF, leur MNT a été retenu pour la suite de l'étude.

3.3. DESCRIPTION DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES

3.3.1. Formations infraturoniennes

Cette formation n'ayant pas été désignée pour faire l'objet d'une modélisation particulière, nous n'avons pas analysé les données de sondages correspondantes suivant des méthodes géostatistiques. Ce chapitre est présenté à titre informatif.

Les formations « infra turoniennes » correspondent au regroupement de toutes les formations antérieures au Turonien, allant du Dévonien au Cénomani. Elles sont identifiées par les codes VNF suivant : CENO, CINF, ALB, JUR, PALE, CARB, et DEVO et concernent 416 passes parmi 52 forages.

Elles correspondent de bas en haut au socle paléozoïque (dévonien-carbonifère), au sud de la faille du Midi s'enfonçant sous le bassin parisien (PALE, CARB, DEVO), sur lequel repose en discordance les formations jurassiques (JUR), liées à la transgression bathonienne, puis les formations crétacées, dont la transgression a débuté à l'Albien (ALB, CINF, CENO). Les forages les plus profonds, qui ont permis de traverser ces formations sont liés à l'exploration pétrolière, ciblée sur le Jurassique et le Crétacé. La plupart des forages s'arrêtent en atteignant le toit du Paléozoïque.

3.3.2. Marnes et alternances marnes-craies

D'après les cartes géologiques ces formations (ensemble marnes et alternances marnes-craies) sont rattachées au Turonien moyen, appelées Dièves grises en terme de mineurs. Dans la partie supérieure de cette assise lithostratigraphique on rencontre

de façon discontinue dans les marnes (décrites au Nord du secteur, sur la carte de Cambrai) des alternances de craie en bancs lenticulaires parfois plurimétriques et aquifères.

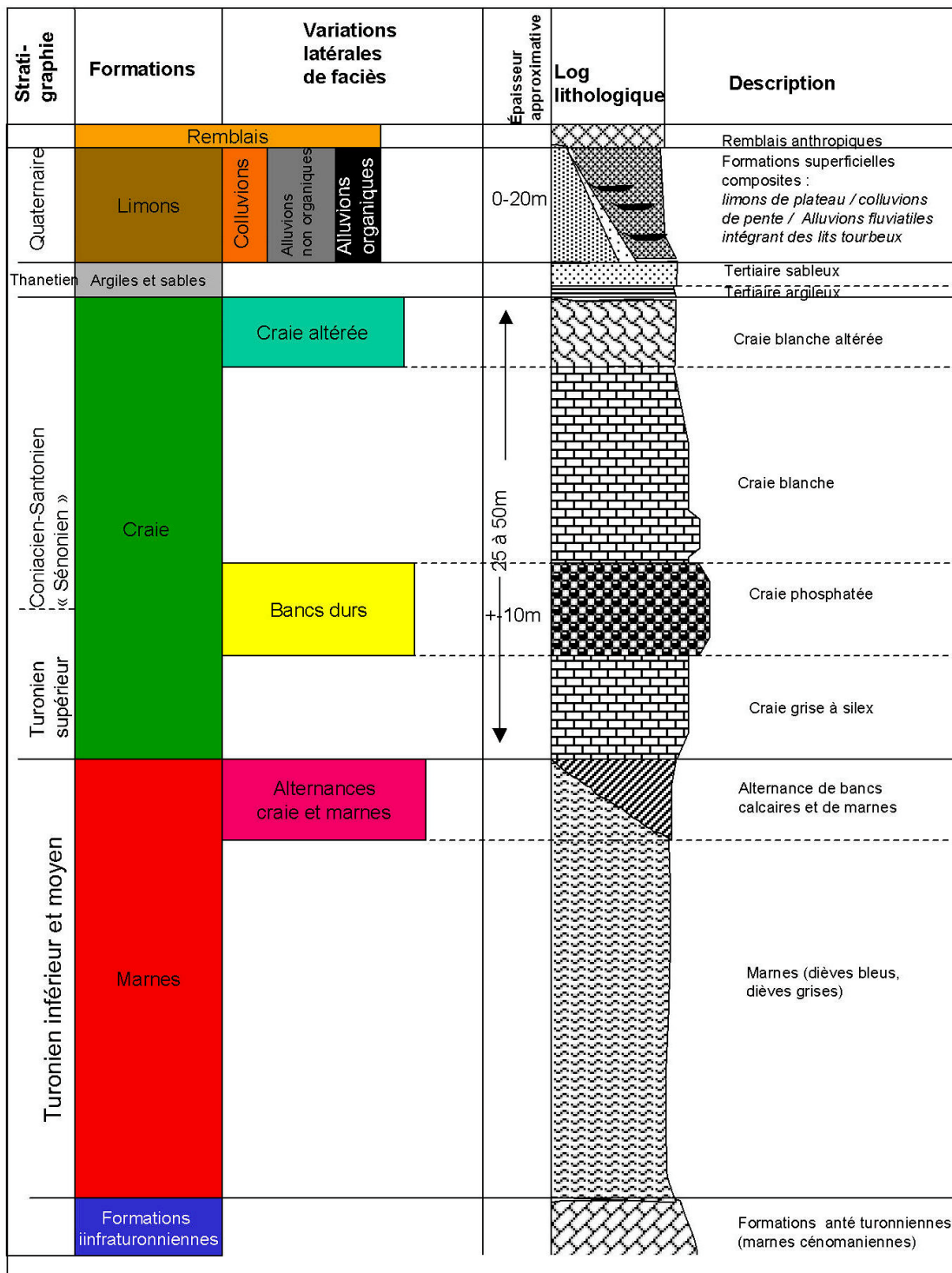


Figure 4 - Log stratigraphique schématique.

Ces formations ont été rencontrées dans les forages de recherche d'eau : de moindre potentiel aquifère que la craie sus-jacente, elles correspondent au mur de l'aquifère. À noter que ces formations correspondant à la fin du forage, leur description a pu être sommairement faite par les sondeurs.

La demande du comité de pilotage était de modéliser séparément la surface des marnes de celle des alternances marnes-craie.

a) Marnes

Les formations regroupées sous le terme « marnes » ont été identifiées comme telles pour la modélisation. Les codes VNF correspondants sont : CSD, CSM, TD, TCM, TICM, TISA, TIC, TICA.

117 forages ont rencontré des marnes, mais seuls 112 sondages sont retenus dans le cadre de la modélisation après l'analyse critique (§ 4.2.1).

b) Alternances marnes et craies

Les formations de type « alternances marnes et craies » correspondent à certains faciès du Turonien moyen. Elles sont regroupées sous les codes VNF : TMCM, TMD, TCAG.

152 forages ont rencontré des alternances marnes et craies.

3.3.3. Craie

D'après les cartes géologiques l'ensemble crayeux est attribué au Turonien supérieur puis au Coniatien-santonien voire au campanien au sud du secteur test.

Le Turonien supérieur (craie blanche et craie grise) est riche en silex et glauconieux.

Au passage Turonien-Coniacien, s'intercalent des lits inframétriques, discontinus latéralement et verticalement, appelés localement « tuns » ou « bancs durs » et constitués de craie congloméroïde, à galets phosphatés et durcis.

Les craies coniaciennes et santonniennes sont fines et micritiques, et s'enrichissent en phosphates au passage Santonnien-Campanien.

Le toit de la craie constitue une surface d'érosion, marquée par une altération forte des premiers mètres de la craie, sous la couverture. Cette altération est plus marquée dans les zones en creux, accentuées par une circulation plus intense des eaux souterraines.

Cet ensemble crayeux est aquifère de type fissuré-poreux. L'eau de la craie est utilisée en eau potable.

Par ailleurs, cette formation a été exploitée en carrières souterraines qui ont été reprises en refuges et sapes de guerre au cours de l'histoire. L'inventaire de ces cavités est en cours pour le Pas-de-Calais et pour la Somme. Dans l'état des connaissances actuelles il n'est pas exhaustif. En revanche, la partie Nord du secteur a été inventoriée de façon plus précise par le Service Départemental d'Inspection des Carrières Souterraines du Nord. Ces données ont été prises en compte dans les études environnementales connexes à la présente étude sur l'ensemble du tracé du canal.

Dans le cadre de la modélisation du secteur test, le comité de pilotage a souhaité la modélisation de la surface de la craie franche, de la zone des bancs durs, et de la craie altérée, ces différents faciès ayant une réponse géotechnique différente.

a) Craie franche

Les craies franches représentent l'ensemble plus couramment rencontré en forage. Elle est souvent décrite de manières diverses ce qui fait qu'un grand nombre de code VNF différents lui correspondent. Il s'agit de : CSCS, SCRA, SCA, SCSB, SCRS, TC, STCS, SCM, TCSA, TSCS, TSCM, TSCG et TSCA.

630 sondages ont rencontré et décrivent des craies franches.

b) Zone de bancs durs

Les bancs durs sont des éléments discontinus verticalement et latéralement disposés de façon lenticulaire, au sein de la craie, au passage du Turonien au Coniacien. De part sa nature discontinue, cette entité géologique n'a pas été systématiquement rencontrée dans les forages. Par ailleurs, d'autres faciès phosphatés, appartenant à d'autres entités stratigraphiques (enrichissement en phosphate notamment plus haut, au passage Santonien Campanien) peuvent avoir été confondus en forage avec ces faciès.

Les codes VNF correspondant à cette entité sont les suivants : SCP, SCT, ST, STT, TT et TSC. Sur toute la zone test, 61 forages décrivent des bancs durs mais seulement une quinzaine sont localisés sur la zone d'étude. L'hétérogénéité des épaisseurs, ainsi que le nombre réduit de forages décrivant ces faciès rend leur interpolation difficile.

c) Craies altérées

Les craies altérées se situent au sommet des craies franches, et appartiennent à l'ensemble crayeux turonosénien. Elles sont donc attendues entre les formations superficielles et/ou tertiaires et les craies franches. Les notices des cartes géologiques les décrivent essentiellement dans les vallées humides ou sèches. Les codes VNF correspondant à cette formation sont CSCA, SCRA et SGR.

Il est vraisemblable que ce terme, de même composition lithologique que la craie franche, bien que plus altérée, n'ait pas été systématiquement décrit par le foreur.

3.3.4. Formations tertiaires

D'après les cartes géologiques, dans le secteur test, le Tertiaire est résiduel, à l'état de buttes témoins, dont les plus développées sont au nord-ouest. Elles sont constituées, au nord de l'axe anticlinal de l'Artois de faciès de tuffeau et d'argile puis de sables. Ces formations sont d'âge thanétien, très localement yprésien (butte de Bourlon au nord-est du secteur d'étude).

Au sud de l'axe anticlinal, les faciès argileux ne sont pas observés, et le Tertiaire est essentiellement sableux, sur un lit de cailloutis de silex.

La distribution de ces faciès reflète un milieu de dépôt littoral à marin au nord, plus lagunaire au sud. Les formations sableuses constituent des aquifères perchés, peu productifs.

Leur configuration actuelle est celle de buttes témoins résiduelles.

Très peu de forages ont traversé ces formations et ne permettent pas leur modélisation.

Les données recueillies cependant sur ces formations sont décrites ci-après.

a) Tertiaire argileux

Ce sont les argiles de la base du Tertiaire, dites de Clary, qui sont identifiées. Elles sont décrites de manières variées dans les différents sondages et il y a 5 codes VNF qui permettent de les décrire (CZA, THAS, THM, THAP, THA). Aucun forage n'a traversé cette formation argileuse dans la zone d'étude.

b) Tertiaire sableux

Les formations dites « Tertiaire sableux » sont décrites dans les forages comme sables et grès de Bracheux, au Sud, sables d'Ostricourt et sables du Quesnoy au Nord, d'âge Thanétien. Les codes VNF THS, THSA, THL décrivent ces formations. L'essentiel des sondages décrivant cette formation se situent dans le nord de la zone test. Dans la zone d'étude un sondage au sud, deux sondages au centre et environ cinq sondages au nord décrivent cette formation. La quantité de sondages décrivant cette formation n'est pas suffisant pour envisager une modélisation.

3.3.5. Formations superficielles

La demande initiale du comité de pilotage était de modéliser séparément les différents types de formations superficielles ainsi que les remblais anthropiques; cependant la nature même de ces formations, dont la répartition est étroitement liée à la paléotopographie lors de leur dépôt, rend leur modélisation complexe.

Sur les plateaux et sur les larges pentes les faciès rencontrés à l'affleurement sont les limons de plateaux, composés de silts loessiques argilo siliceux et souvent décalcifiés dans la partie supérieure. Ces limons reposent localement sur des altérites « formations résiduelles à silex », souvent mal ou non différenciées dans les descriptions des forages, du faciès des limons de plateaux.

Dans les vallées, les alluvions anciennes forment des terrasses perchées, recouvertes en contrebas par les alluvions récentes. Elles sont constituées de graviers de silex.

Les alluvions récentes sont constituées de limons argilo-sableux, sur un lit de graviers et galet de silex, elles peuvent être chargées en matière organique et renferment des lits tourbeux.

Enfin les colluvions de vallées sèches et de bas de pentes résultent du remaniement des limons de plateaux et des formations sous-jacentes (Tertiaire et craie).

On notera toutefois que malgré leur mode dépôt relativement différents, alluvions, colluvions et limons des plateaux ont des faciès argilo-sableux très similaires et peuvent avoir été confondus dans les descriptions de forage.

a) Remblais

Les remblais et matériaux anthropiques remaniés ont été rencontrés par plus de 600 sondages sur l'ensemble de la zone de sélection. Ils sont décrits par trois codes VNF : HORB, HOTV et HORM.

b) Alluvions

On a distingué trois types d'alluvions à examiner, les alluvions organiques, non organiques et les graves. De par leur nature même de sédiments de cours d'eau, les alluvions sont localisées dans les vallées.

Les alluvions organiques sont décrites par les codes VNF : TOUR, ALTO et VASE.

Les alluvions non organiques quant à elles, sont décrites par les codes suivants : ALIM, ALSA et ALAS. Enfin les graves sont rarement rencontrées ou décrites et c'est le code ALGR qui est utilisé pour décrire cette formation. On constate qu'un nombre extrêmement réduit de sondages (seulement trois dans toute la zone test) a rencontré des graves. L'analyse géostatistique est donc inutile pour justifier l'absence de modélisation de cette surface.

c) Colluvions

À la différence des alluvions, ces éléments ont subi un faible transport depuis les plateaux. Il s'agit de dépôts de bas de pente, que l'on retrouve en général dans les vallées sèches et en bord de vallées principales. Le code VNF QCOL décrit cette formation.

d) Limons

Comme l'indiquent les notices des cartes géologiques, le manteau de limon recouvre presque toute la zone. Les codes QLIM et QLAS décrivent cette formation dans la codification VNF.

Il est cependant à noter que des confusions entre limons et alluvions notamment, sont souvent commises dans l'interprétation des sondages.

4. Modélisation des formations géologiques

4.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX ET APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

L'objectif de cette phase de l'étude consiste à modéliser la géométrie des formations retenues et à présenter les résultats acquis sous forme de documents graphiques facilement interprétables (cartes isohypses et coupes verticales). Concrètement, les paramètres ou variables qui définissent la géométrie d'une formation sont la cote « toit », la cote « mur » et l'épaisseur.

Une approche géostatistique, détaillée dans l'annexe 2, a été retenue pour réaliser l'interpolation des variables définissant la géométrie des formations retenues. La spécificité des outils géostatistiques est d'utiliser la structure spatiale intrinsèque et pas seulement la configuration géométrique des données. En effet, selon que l'on traite d'une variable homogène ou hétérogène, la carte attendue sera différente, même si l'implantation des données est identique.

Comparés aux méthodes classiques d'interpolation, les outils géostatistiques mis en œuvre (variogramme et krigeage), présentent des avantages incontestables qui sont :

- de caractériser la variabilité spatiale du phénomène étudié par le biais de l'outil mathématique appelé **variogramme** ;
- d'interpoler les données de manière optimale en utilisant l'interpolateur appelé **krigeage** (*i.e.* sans introduire de biais) ;
- de quantifier sous la forme d'un écart-type de krigeage la précision associée à toute valeur interpolée.

L'interpolation se fait aux nœuds d'une grille régulière, limitée par un contour polygonal qui fixe le domaine à cartographier. Dans le cadre de l'étude, deux modèles sont construits :

- un modèle à maille 100 m qui regroupe les formations caractérisées par une continuité spatiale de plusieurs kilomètres et donc une variabilité spatiale marquée par de grandes longueurs d'ondes ; c'est le cas des marnes, des alternances craies/marnes et des craies franches, des formations dites « composites » que constituent le regroupement des marnes et alternance marnes et craies et des craies franches et craies altérées, ainsi que des surfaces piézométriques ;
- un modèle à maille 50 m qui regroupe la topographie et l'ensemble des formations superficielles ; ces surfaces sont caractérisées par des variations d'altitudes pouvant être importantes localement ; un maillage plus fin respecte les variabilités locales et évite un lissage trop important.

4.2. RÉALISATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE

La réalisation du modèle numérique passe par les étapes suivantes :

- l'analyse critique des informations factuelles ; elle est fondée sur l'utilisation des outils statistiques ;
- l'étude de la variabilité spatiale des surfaces à interpoler ; elle est fondée sur le calcul et l'ajustement des variogrammes ;
- l'interpolation par krigeage des paramètres géométriques (épaisseur ou « cote toit » de la formation) ;
- la validation et la mise en cohérence du modèle numérique calculé.

Les analyses statistiques et variographiques qui conduisent à la construction du modèle ont été effectuées sur la variable « cote toit », à l'exception des formations superficielles où l'épaisseur est la variable de travail.

4.2.1. Analyse statistique

Les paramètres définissant la géométrie des formations sont acquis sur la base des observations et des interprétations effectuées sur des forages.

Il est important de préciser que la fiabilité et la qualité des résultats acquis lors des différents traitements mathématiques sont directement liés à la fiabilité des informations factuelles. Une analyse critique préliminaire à tout traitement est réalisée ; elle doit permettre de détecter et de corriger les erreurs les plus importantes. Cette analyse repose essentiellement sur le calcul des histogrammes et une cartographie préliminaire des variables retenues ; les données jugées aberrantes, anormales ou suspectes sont mises en évidence de manière quasi immédiate.

La première analyse a consisté à vérifier la cohérence chronologique de la description de la succession des passes de chacun des sondages.

Sans détailler ni classer toutes les anomalies ou erreurs rencontrées, on peut lister les principales :

- des erreurs de saisie informatique (coordonnées x, y, z, cote toit, épaisseur, description géologique, etc...) ;
- une interprétation « erronée » des faciès ou formations traversés par les forages ;
- une codification « erronée » lors de la saisie des forages dans le référentiel géologique.

Les anomalies identifiées ont fait l'objet d'une vérification, conduisant soit à une correction soit à la suppression de la donnée. Il faut noter que seules les anomalies majeures ont été détectées ; en conséquence des anomalies mineures non détectées et donc résiduelles peuvent conduire à des résultats qui rendent localement le modèle incohérent en particulier dans les zones où les données sont peu nombreuses.

Les données disponibles rendent la modélisation d'autant plus difficile et délicate que la géométrie des formations retenues ne peut être étudiée que par la variable cote toit. En effet certains forages peuvent rencontrer une formation mais sans la traverser complètement, l'épaisseur réelle n'est donc pas connue au droit de ces forages. Or la variable épaisseur est utilisée classiquement dans la démarche méthodologique d'une modélisation géologique pour caler par différence deux formations contiguës.

La figure 5 ci-après, qui présente la localisation des sondages et la cartographie du toit des marnes, permet d'illustrer clairement la problématique. On identifie sur la carte deux populations de forages :

- les sondages qui auraient traversé la formation (carrés rouges) sont caractérisés par des paramètres géométriques (toit, mur et épaisseur) correctement définis ;
- les sondages qui s'arrêteraient dans la formation (triangle noirs) sont caractérisés par un toit correctement repéré, en revanche l'épaisseur réelle ainsi que le mur sont inconnus.

À l'issue de cette analyse critique, les paramètres statistiques des variables retenues pour la modélisation sont regroupées dans le tableau 1 ci-dessous.

Formations	Effectif	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Écart-réduit
Marnes (toit)	112	-32,9	116,8	45,8	29,3	0,6
Alternance marnes-craies (toit)	152	-58	99	45	24,5	0,5
Surface composite marnes/alternance	223	-58	116,8	48,7	24,4	0,5
Bancs durs (toit)	61	7,3	136,8	67,9	24,4	0,4
Bancs durs (épaisseur)	61	0,4	44	11	10,7	1,0
Craies « composites » (toit)	766	-1,1	143	82,1	27,1	0,3
Formations superficielles (épaisseur)	686	0,17	18	5,1	3,37	0,7

Tableau 1 - Statistiques sur les variables (« cote toit » ou « épaisseur ») des formations retenues.

4.2.2. Analyse variographique

Le but de cette analyse est d'appréhender et de caractériser le comportement spatial des variables retenues. Cette étape passe obligatoirement par le calcul des variogrammes directionnels et l'ajustement à un modèle théorique (pour plus de détails cf. ann. 1).

Les variogrammes directionnels sont calculés dans les deux directions principales pour détecter des anisotropies éventuelles.

Pour les différentes formations, à l'exception des bancs durs, les variogrammes expérimentaux ainsi que les modèles ajustés sont présentés dans la figure 3. Les paramètres d'ajustements sont regroupés dans le tableau 2.

L'analyse variographique attire les remarques suivantes :

- les variogrammes calculés sur les variables « cote toit » mettent en évidence deux structures emboîtées qui traduisent deux échelles de variabilité :
 - la première structure traduit des variations locales qui affectent la géométrie des formations sur des distances d'environ 2 600 m pour les craies mais limitées à 1 800 m pour les marnes et les alternances,
 - la seconde structure représente des variations de plus grandes amplitudes couvrant des distances supérieures à 10 km.

Ces deux structures reflètent vraisemblablement la structure anticlinale majeure de l'Artois, marquée par des ondulations de plus faible amplitude :

- les variogrammes calculés sur le toit des alternances sont particulièrement démonstratifs : on note une bonne corrélation entre les données dans la direction EW, en revanche dans la direction NS on observe une destructuration pour des distances inférieures à 1 500 m. Cette destructuration n'a aucune réalité physique, elle s'explique en partie par des erreurs d'interprétation (difficultés pour différencier des faciès de transition) ;
- les variogrammes directionnels calculés sur l'épaisseur des formations superficielles mettent en évidence deux échelles de corrélation, ainsi qu'une anisotropie géométrique donnant une meilleure continuité dans la direction N115° (à noter que cette direction correspond à une direction structurale régionale, reflétant notamment l'axe anticlinal de l'Artois. Cependant cette continuité n'a pas été retrouvée pour les variogrammes des autres formations considérées) ;
- les variogrammes associés aux bancs durs ne sont pas représentatifs car ils sont calculés sur un nombre de données insuffisant ; néanmoins ils attirent les remarques suivantes :
 - le variogramme de l'épaisseur met en évidence une absence de corrélation spatiale, les données sont indépendantes,
 - le variogramme calculé sur la « cote toit » indique une corrélation ne dépassant pas 2 km, mais ce dernier manque de robustesse car il est calculé avec trop peu de données.

Sur la base de ces constats, les bancs durs ne feront pas l'objet d'une interpolation et ne seront donc pas intégrés dans le modèle numérique.

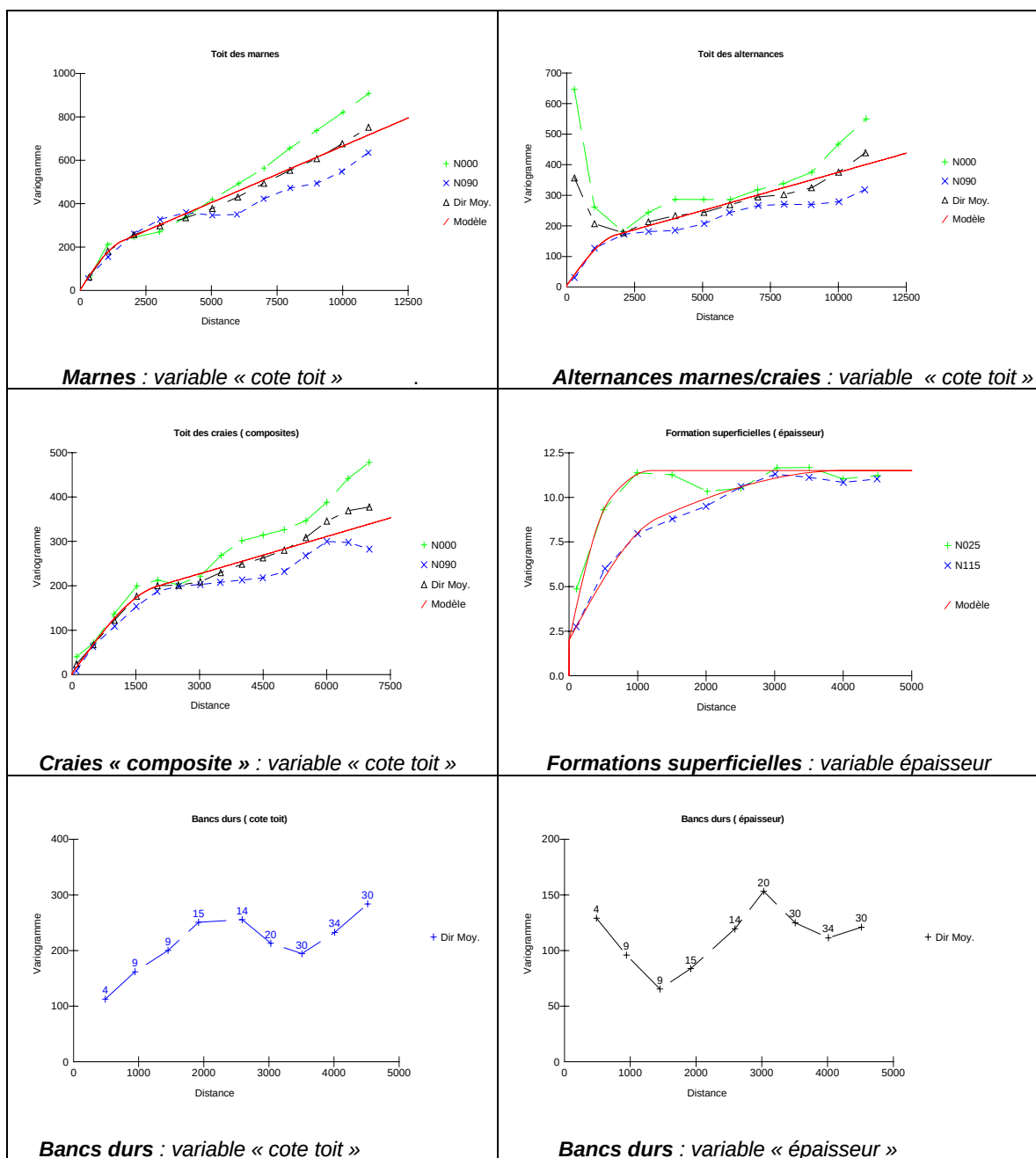


Figure 5 - Variogrammes de la variable « cote du toit » pour les formations suivantes : Marnes, Alternances marnes/craies, Craies composites et bancs durs.

	Effet de pépite	Structure 1			Structure 2		
Formations		Schéma	Palier	Portée (m)	Schéma	Pente/ Palier	Portée (m)
Marnes	5	sphérique isotrope	140	1 800	linéaire	0,025	
Alternances	5	sphérique isotrope	120	1 800	linéaire	0,025	
Craies « composite »	3	sphérique isotrope	105	2 000	linéaire	0,028	
Formations superficielles	2	sphérique anisotrope	5	600 / 1 300	sphérique	5	1 200 / 4 000

Tableau 2 - Paramètres d'ajustement des variogrammes théoriques.

5. Exploitation du modèle

5.1. REPRÉSENTATION CARTOGRAPHIQUE

Sur les cartes présentées ci-après les sondages sont représentés avec différents figurés :

- les sondages ayant entièrement traversé la formation décrite sont symbolisés par un carré rouge ;
- les sondages s'arrêtant dans la formation décrite sont symbolisés par un triangle noir ;
- les sondages n'ayant pas traversé la formation décrite sont symbolisés par un cercle blanc.

Dans les chapitres qui suivent, les cartes représentent soit des cotes soit des épaisseurs selon le type de formations.

5.1.1. Cartographie du toit des marnes

La cartographie du toit des marnes (fig. 6) est présentée sous forme de pixels montrant l'évolution de la surface sur la zone d'étude. La carte permet de visualiser trois types d'informations :

- l'implantation des forages ayant rencontré le toit des marnes (la cote du toit est reportée à gauche du symbole) ;
- l'altitude estimée évolue dans l'intervalle -15 m à 78 m ;
- l'interpolation par krigeage calcule l'incertitude associée à chaque pixel interpolé sous la forme d'un écart-type de krigeage ; les incertitudes sont représentées sur la carte par des courbes iso-incertitudes et attirent les remarques suivantes :
 - l'écart-type de krigeage prend des valeurs minimales qui sont de l'ordre de 2 m au voisinage immédiat des forages,
 - l'écart-type de krigeage augmente progressivement quand on s'éloigne des forages pour atteindre des maximas dans les zones sous informées ; au delà d'une distance de 1,5 km des données, les erreurs sont supérieures à 10 m en valeur absolue. Il est évident que dans les zones qui n'ont pas été échantillonnées, la qualité des estimations demeure très médiocre et demande la plus grande vigilance sur l'interprétation que l'on peut en faire.

La modélisation de la surface des marnes confirme la géométrie anticlinale de cette formation, à l'extrémité orientale de l'anticlinal de l'Artois, *a priori* sans structure faillée générant des rejets importants.

Cependant l'absence de données dans la partie centrale de la zone d'étude, qui correspond à la charnière anticlinale implique la nécessité de préciser l'information par des forages qui devront pénétrer dans les marnes (dièves) et, éventuellement, par des profils géophysiques qui permettront de confirmer ou d'infirmer la présence de structures faillées.

La répartition des sondages décrivant cette formation est globalement homogène sur les trois quart nord de la zone test. La partie sud est exempte de forages ayant rencontré cette formation. La répartition des informations recoupe l'information donnée dans les notices des cartes géologiques qui ne décrivent cet ensemble que dans le nord de la zone test. Cependant, l'existence de ce faciès d'alternance dans le sud de la zone d'étude devra être vérifiée par l'acquisition de données de forage pénétrant dans la formation marneuse (dièves).

5.1.2. Cartographie du toit des alternances marnes et craies

Le toit des alternances marnes et craies est estimé et cartographié de manière similaire au toit des marnes. La carte correspondante (fig. 6) montre de façon identique :

- la position des forages avec un symbole permettant de distinguer s'ils ont rencontré ou non la formation ;
- la surface du toit sous forme de pixels ;
- les courbes iso-incertitudes.

La carte attire les remarques suivantes :

- dans la partie centrale de la carte, le toit des alternances présente des variations significatives d'altitude qui conduisent à une surface localement « chahutée », vraisemblablement due à des erreurs d'interprétation sur les faciès rencontrés ;
- les incertitudes sont du même ordre de grandeur que celles des marnes (incertitudes supérieures à 10 m pour des pixels situés à plus de 2 km des données).

5.1.3. Surface « composite » Marnes + alternances marnes et craies

Afin de considérer un plus grand nombre de données dans la zone qui nous intéresse et d'améliorer l'interpolation, en essayant de s'affranchir au mieux des erreurs d'interprétation des sondages, il a été décidé de modéliser une surface « composite » qui regroupe le toit des marnes et le toit des alternances marnes et craies.

La cartographie du toit de la surface composite (fig. 6) attire les remarques suivantes :

- les variations d'altitudes observées sur la carte précédente ont disparu. La formation composite a permis de « lisser » les effets locaux visibles sur la carte du toit des alternances marnes et craies ;

- les incertitudes sont réduites par rapport à celles des marnes ou des alternances (incertitudes supérieures à 7 m et non 10 pour des pixels situés à plus de 1,5 km des forages).

La représentation de cette surface composite correspond au toit du Turonien moyen, abstraction faite des différences de faciès, et au mur de la craie. Elle permet un rendu plus précis que celui de la carte précédente puisque les données sont plus nombreuses. La structuration en dôme de cette formation reste visible, bien qu'atténuée. Pas plus que la carte du toit des marnes, cette surface composite ne montre pas de décalages d'altitude qui pourraient être interprétés comme traduisant la présence de structures faillées. Cela nécessiterait toutefois d'être validé par des profils géophysiques.

5.1.4. Cartographie des bancs durs

Dans la zone d'emprise du MNT VNF, c'est-à-dire dans la zone d'étude et son proche voisinage, seulement 15 sondages sont décrits comme ayant rencontré ou traversé des bancs durs.

L'analyse variographique a démontré l'absence de corrélation spatiale pour la variable épaisseur et une corrélation ne dépassant pas 2 km pour la variable « cote toit ». Ce constat ne permet pas l'interpolation de cette entité.

De plus l'analyse des données est rendue complexe par la présence de deux sondages qui décrivent cet ensemble sur des épaisseurs particulièrement importantes (44 m et 18 m) ; des erreurs d'interprétation sont peut-être à suspecter.

Pour une modélisation satisfaisante de cet ensemble, l'acquisition de données complémentaires s'impose.

À défaut de pouvoir modéliser les bancs durs, la carte ci-après (fig. 9) montre la répartition des forages ayant rencontré la formation ainsi que les relations avec les différents faciès rencontrés. Ainsi :

- les forages ayant rencontré des bancs durs sont symbolisés par un carré rouge ;
- les forages ayant atteint les marnes et/ou les formations secondaires sans avoir rencontré les bancs durs sont représentés par un cercle ou un triangle bleu ;
- les forages qui n'ont pas atteint les marnes et pour lesquels la présence de bancs durs n'a pas été décrite mais n'est pas exclue, sont symbolisés par des triangles et cercles verts.

La carte de localisation montre clairement que la répartition des quelques données est hétérogène et que toute interpolation serait irréalisable.

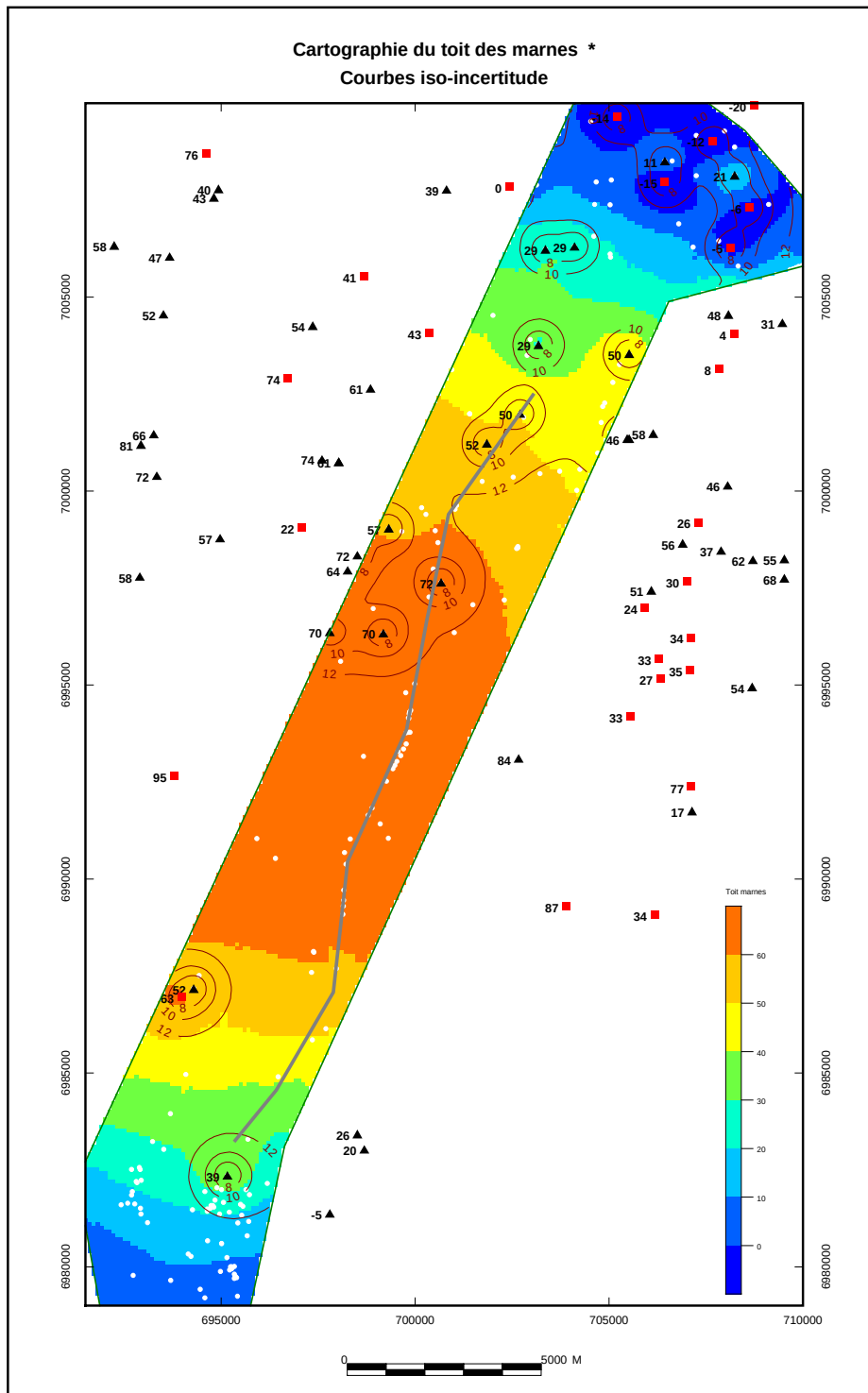


Figure 6 - Cartographie du toit des marnes et courbes d'iso-incertitude associées.

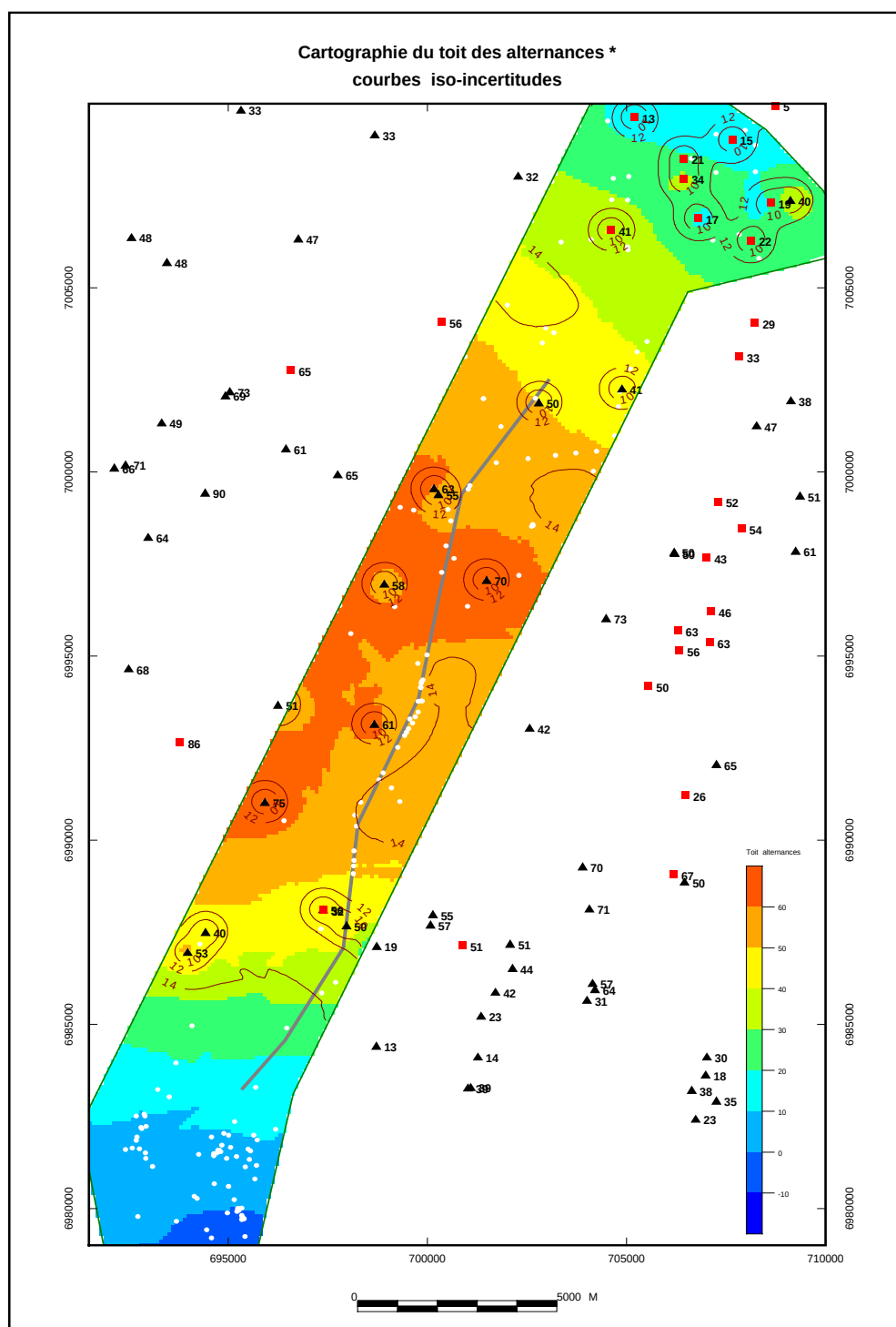


Figure 7 - Cartographie du toit des alternances et courbes d'iso-incertitude associées.

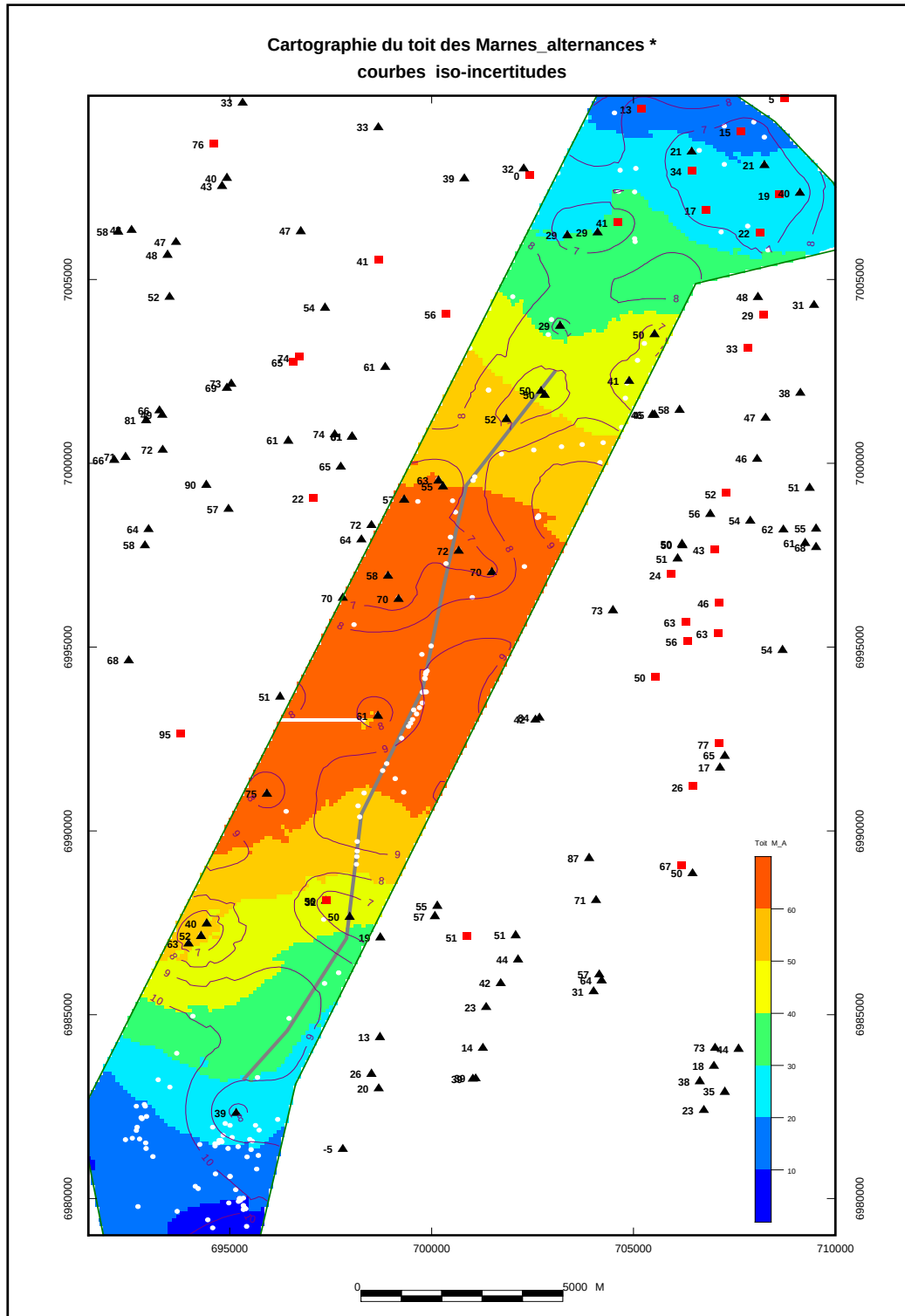


Figure 8 - Cartographie du toit des marnes et alternances et courbes iso-incertitudes.

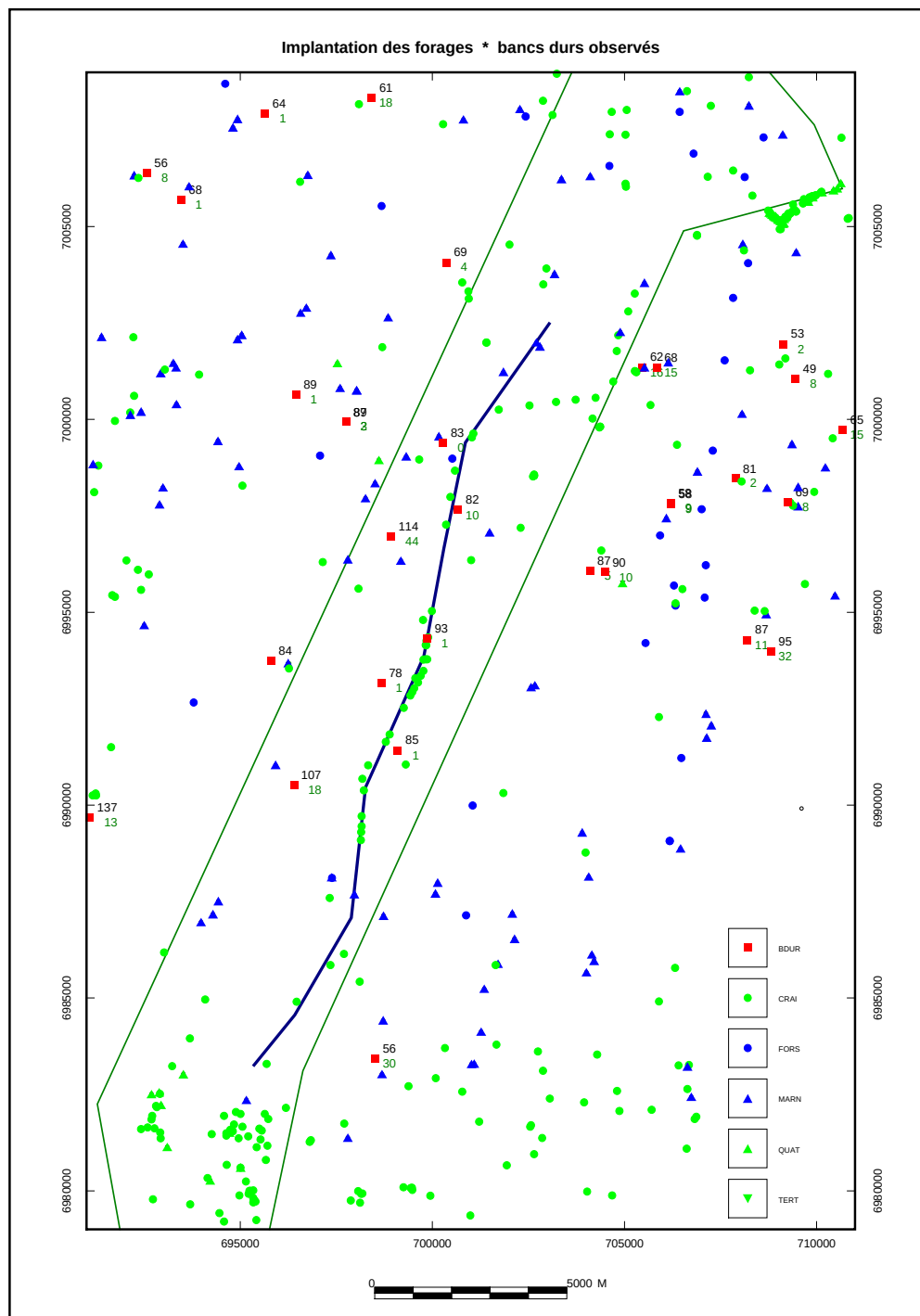


Figure 9 - Répartition des sondages ayant rencontré des bancs durs et mise en évidence des relations avec les différentes formations.

5.1.5. Cartographie des craies

Pour respecter le cahier des charges, les craies franches et les craies altérées ont d'abord été modélisées séparément; cependant, les premiers traitements n'ont guère été satisfaisants, ils conduisaient à des anomalies et artéfacts liés à la description initiale des forage : en effet la notion de craie franche et de craie altérée, au sein d'un même ensemble lithologique, est définie par un état d'altération différent, induisant une réponse géotechnique différente. Cette différenciation a donc été faite correctement quand le forage avait un objectif de reconnaissance géotechnique, mais de façon plus irrégulière dans les autres cas.

On note cependant que les faciès altérés, quand ils ont été décrits, sont préférentiellement dans les vallées. Cela est par ailleurs décrit dans les notices géologiques. La notice géologique interprète cette répartition comme une circulation préférentielle de la nappe dans les creux, favorisant l'altération. Cependant l'observation ce faciès altéré peut avoir échappé à la description des sondeurs, en zone de plateau.

De façon analogue aux faciès marneux, il a été donc décidé de modéliser une surface « composite » qui regroupe l'ensemble des faciès altérés ou non de la craie (fig. 10). Cette surface correspond au toit de la craie « sénonienne », et représente la surface d'érosion créée lors de l'émersion de cet ensemble crétacé, reprise également après le dépôt des formations tertiaires, dont il ne reste plus que des buttes témoins.

Indépendamment des zones où il pourrait y avoir des formations tertiaires, le toit de la craie « sénonienne » correspond au mur de l'ensemble « formations superficielles ».

La carte de la figure 10 montre une morphologie en dôme du toit de la craie, liée à la structuration sur la terminaison anticlinale du secteur, mais accentuée et surcreusée par les différentes phases d'érosion antequaternaires.

5.1.6. Cartographie des formations superficielles

Afin de s'affranchir des erreurs d'interprétations et des difficultés de modélisation de chacune de ces surfaces, liées à leur discontinuité et à leur mode de dépôt notamment, il a été choisi de considérer les formations superficielles dans leur ensemble.

Les limites des formations superficielles données par les cartes géologiques notamment peuvent également être prises en compte. Ainsi le contour des formations superficielles a été digitalisé et peut être utilisé pour « limiter » l'interpolation des données.

Dans un premier temps, le mur des formations superficielles a été modélisé. Le modèle, calculé par krigeage, correspond à une grille carrée de 50 x 50 m², compatible avec le MNT VNF. Le résultat est donné dans la figure 11 ci-après.

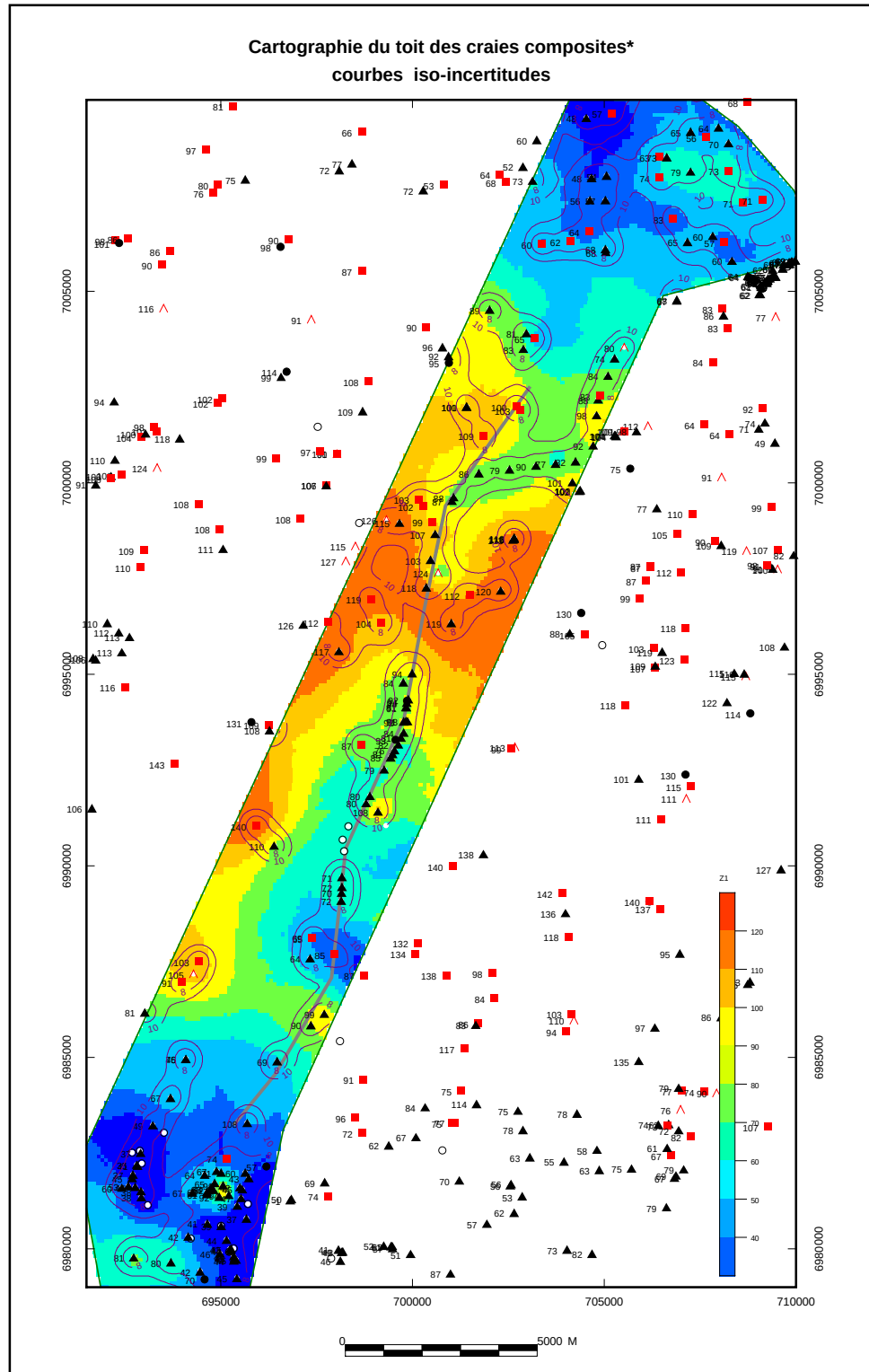


Figure 10 - Cartographie du toit des craies « composites ».

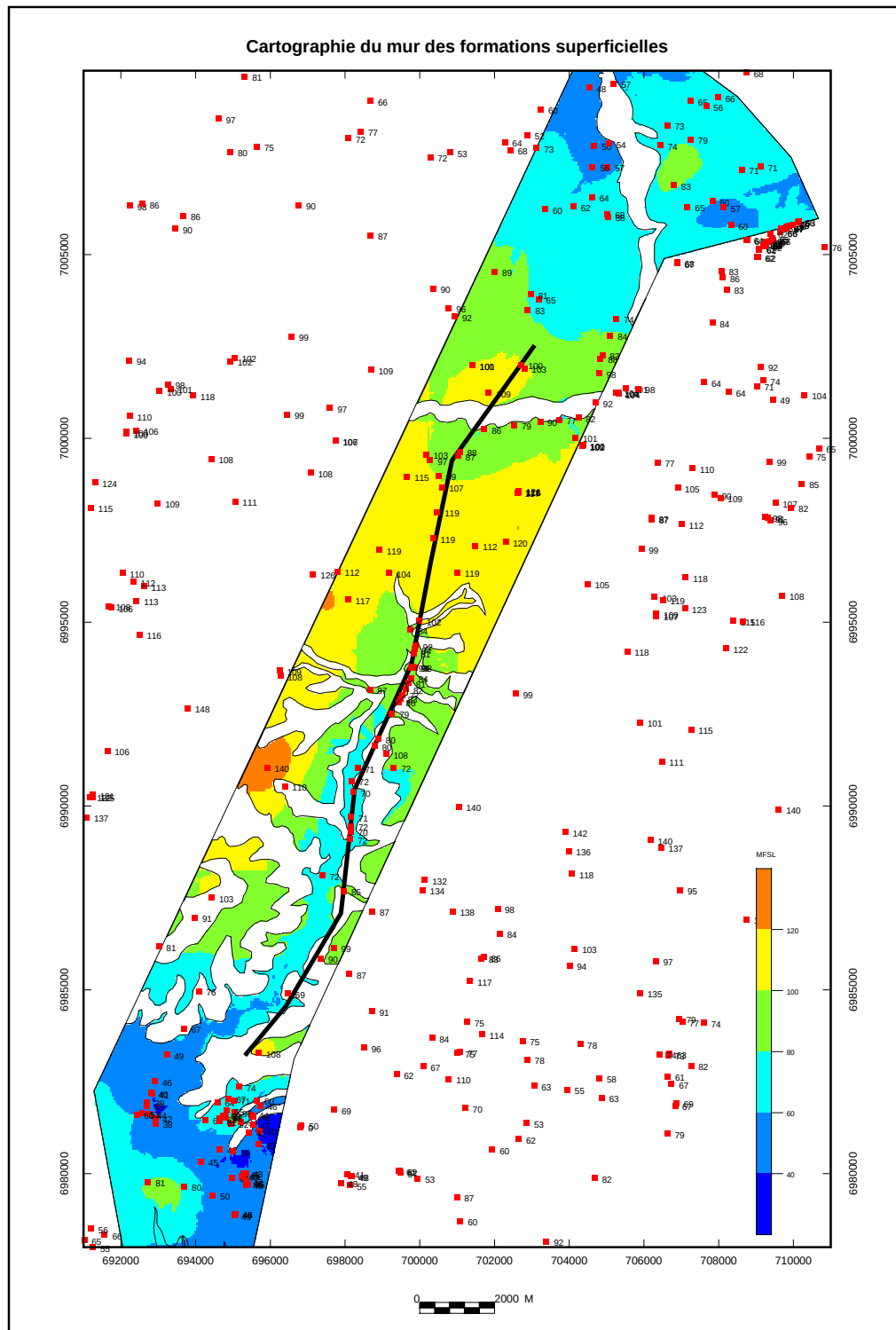


Figure 11 - Cartographie du mur des formations superficielles.

La carte représentant le mur des formations superficielles ne soulève aucune remarque importante. Il faut préciser que les limites des faciès constituant les formations superficielles ont été agrégées puis digitalisées dans les « grandes lignes ».

Malgré le nombre important de données disponibles, la modélisation de cette entité géologique a soulevé quelques difficultés dues en particulier :

- au facteur d'échelle entre le projet et les documents cartographiques disponibles pour saisir les contours des formations en surface ;
- à l'aspect interprétatif des documents cartographiques, basés sur des observations geomorphologiques, ce qui explique certaines incohérences montrant des forages décrivant des formations superficielles alors qu'elle n'ont pas été cartographiées sur le 1/50 000 ;
- aux documents cartographiques utilisés pour limiter l'emprise des formations ; ces derniers sont calés sur la topographie IGN et conduisent à des décalages inévitables (observés en particulier sur les coupes initiales et corrigés au final).

Les cartes jointes présentent la modélisation de cette formation en intégrant ou non la contrainte cartographique.

Cependant, compte tenu du mode de dépôt complexe et discontinu des formations superficielles, il semble plus judicieux de les caler sur la surface topographique et donc de travailler sur les épaisseurs et non sur les cotes.

Ainsi, une modélisation de l'épaisseur de cette formation a été réalisée avec et sans la prise en compte des contours digitalisés. Les cartes des isopaques, correspondant aux deux scénarii, sont présentées sur les figures 12 et 13 ci-après.

Sur ces cartes, les valeurs affichées correspondent aux épaisseurs (exprimée en m) et non plus à la valeur de la cote.

On remarque simplement la présence d'un « point rouge » au centre ouest de la zone d'étude. Après vérification, la « pollution » est due au sondage (003366X0220) pour lequel des formations superficielles ont été saisis sur une épaisseur de 18 m. Là encore l'erreur d'interprétation est à suspecter.

Afin de pouvoir visualiser ces résultats en coupe, les formations superficielles ont été recalées par rapport à la surface topographique données par le MNT VNF au pas de 50 m.

C'est cette surface, et non la surface modélisée du toit des craies composites, qu'il a été choisi de représenter pour la visualisation en coupe. En effet, cette surface a été modélisée par rapport à la variable « épaisseur » et non « cote » ce qui permet de mieux prendre en compte la réalité du mode de dépôt des formations superficielles.

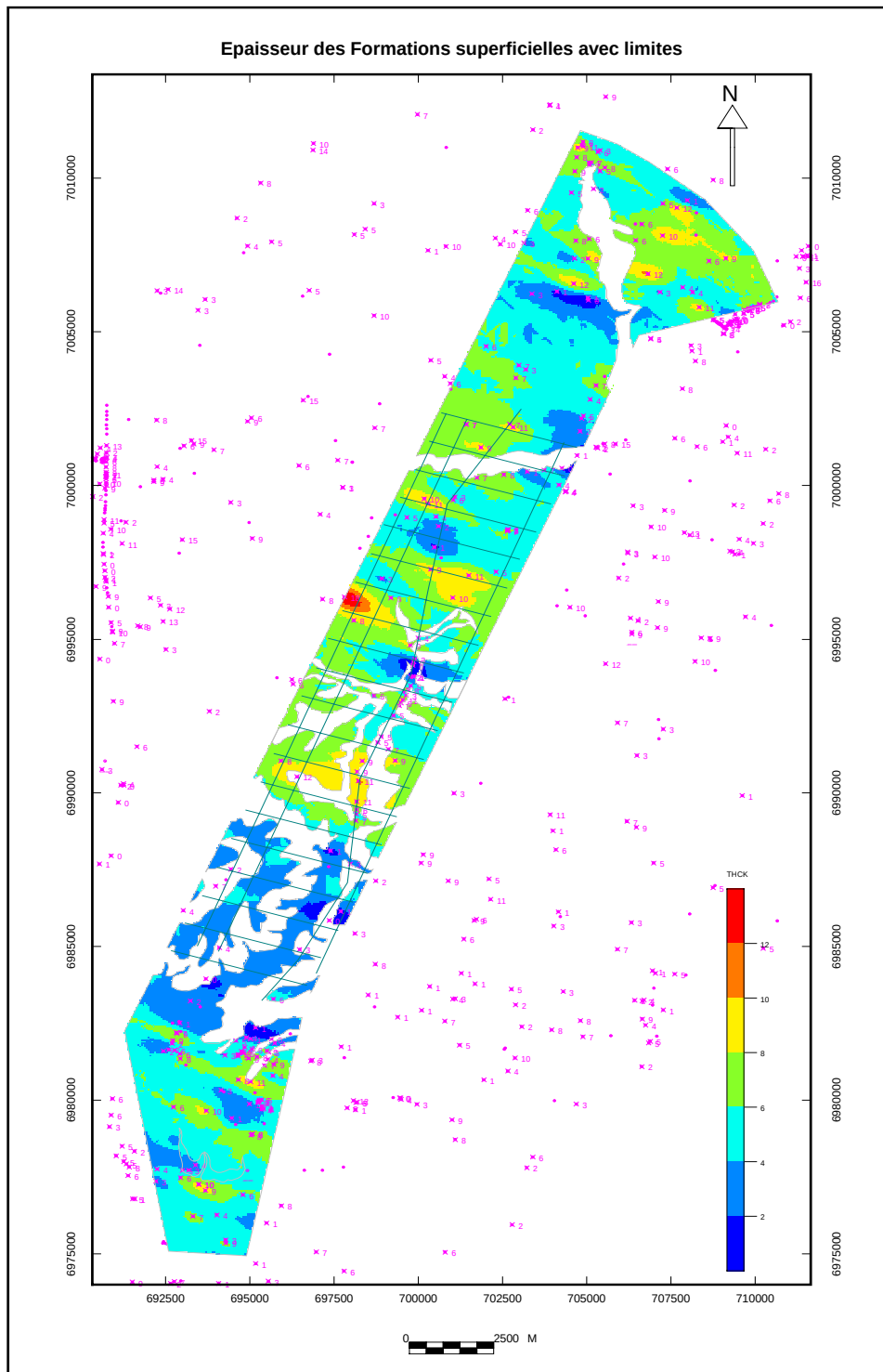


Figure 12 - Cartographie de l'épaisseur des formations superficielles, contrainte par les limites digitalisées des formations.

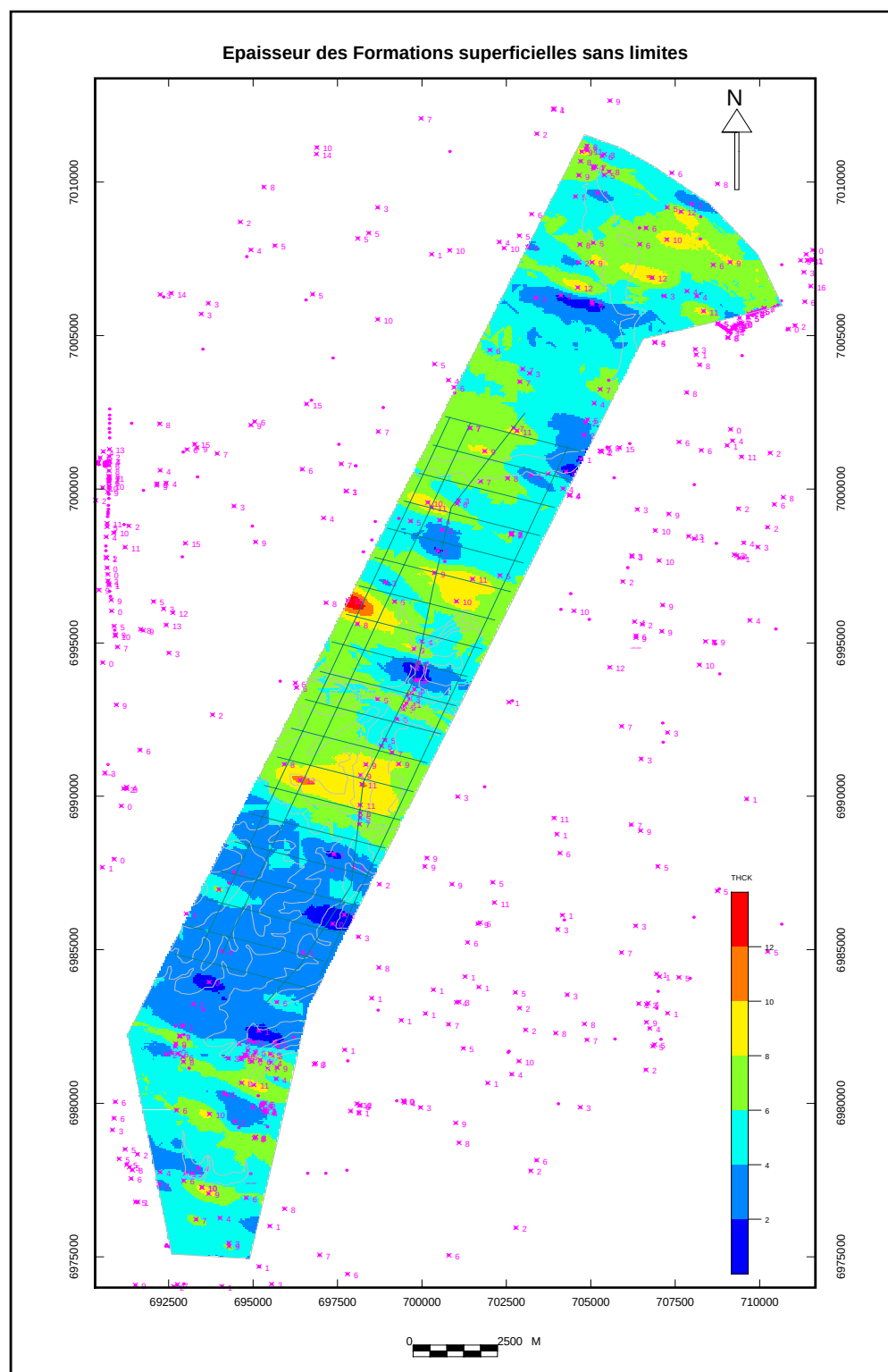


Figure 13 - Cartographie des épaisseurs des formations superficielles sans limites.

5.1.7. Surfaces piézométriques

Les surfaces piézométriques correspondant aux hautes eaux et basses eaux ont été modélisées (fig. 14) sur la base de trois types d'informations :

- des mesures piézométriques issues de forage et stockée dans la base décrite au chapitre 3.2.2. ;
- des points échantillonnés sur les courbes isopièzes (cartes tracées manuellement par les hydrogéologues à l'échelle de 1/100 000) ;
- quelques points de contrainte qui correspondent aux points par lesquels les surfaces passent « obligatoirement » comme les cours d'eau pérennes notamment. Ces points ont été obtenus par croisement entre le réseau hydrographique et le MNT.

La lecture de ces cartes montrent que la surface de la nappe épouse l'axe anticlinal de l'Artois, cet axe induisant un partage de l'écoulement des eaux souterraines vers le nord et vers le sud, avec un gradient piézométrique plus marqué en période de hautes eaux.

5.2. PRÉSENTATION DES COUPES

Les résultats des modélisations sont présentés sous forme de coupes dont les positions ont été définies lors de la réunion d'avancement du 14 décembre 2004 (fig. 15 et tabl. 3). Pour des raisons de commodité toutes les coupes listées ci-dessous sont regroupées dans l'annexe 3 (fascicule associé au rapport) :

- 20 coupes sériées, espacées de 1 km le long de l'axe du tunnel, sont numérotées CS 1 à CS20 par ordre croissant en allant du nord vers le sud ;
- 3 coupes longitudinales, le long et de part et d'autre de l'axe du tunnel, numérotées CL 1 à 3 ;
- 1 coupe en ligne brisée CLB au droit du projet de canal ;
- 3 coupes longitudinales CVS, dans la zone du val de Somme.

Cependant, la coupe longitudinale située à l'est de l'axe du tunnel sort de l'emprise du MNT VNF (cf. fig. 16). Une coupe complémentaire CL4 décalée à l'ouest est présentée en complément.

À noter que ce problème se reproduit également sur quelques coupes transversales. Ceci se traduit par une interruption de la trace du profil topographique et la trace du mur des formations superficielles (le mur étant calculé par différence entre la topographie et l'épaisseur des formations superficielles).

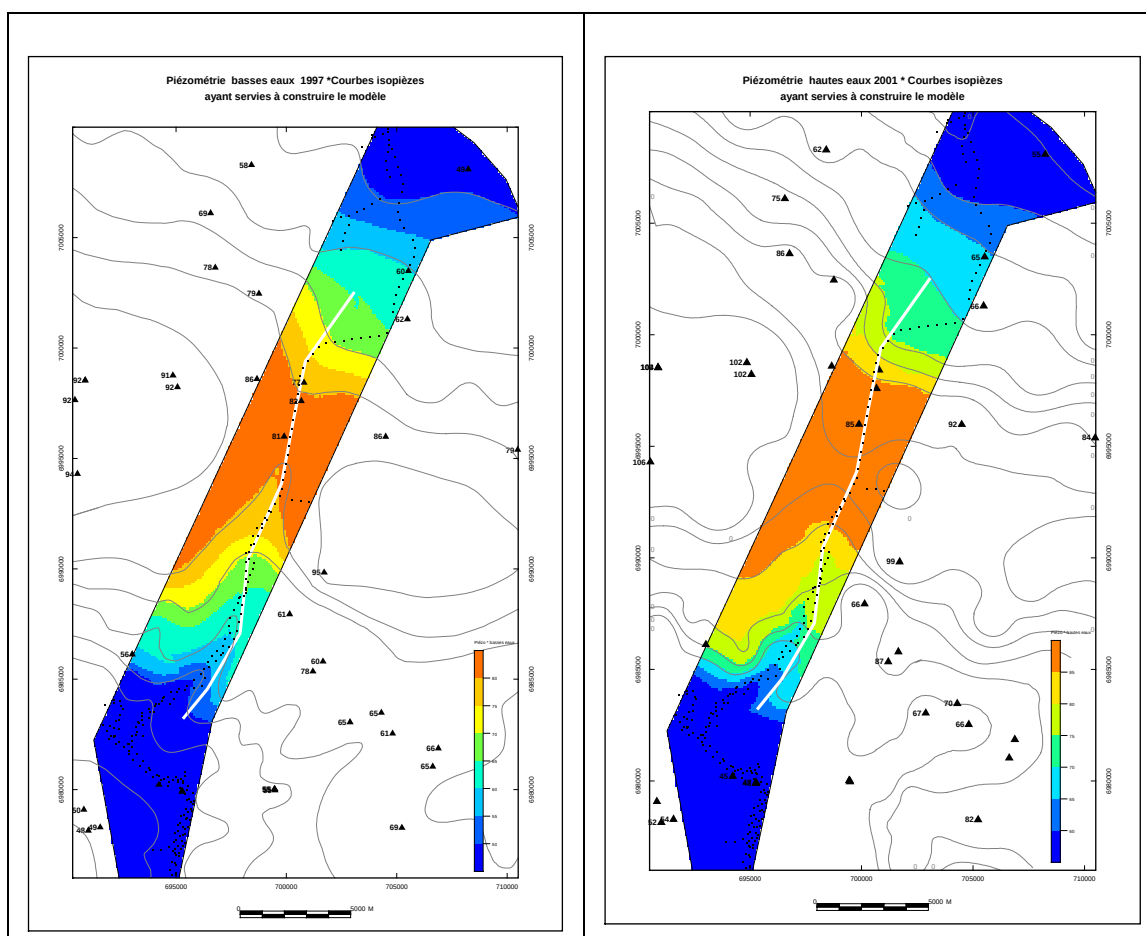


Figure 14 - Cartographie des surfaces piézométriques basses eaux et hautes eaux.

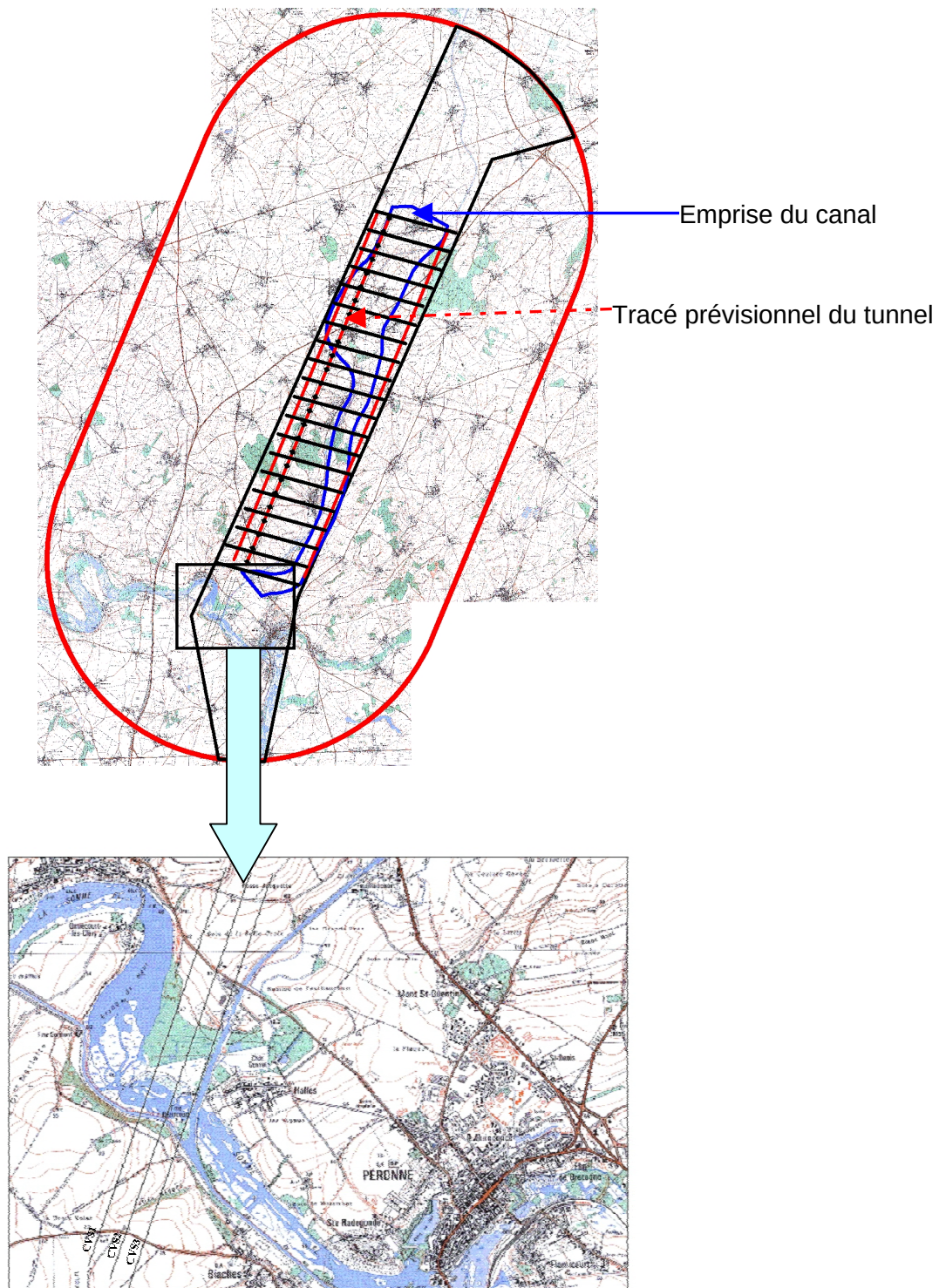


Figure 15 - Tracé des coupes transversales et longitudinales le long et de part et d'autre de l'axe du tunnel et dans le val de Somme.

Nom de la coupe	X début	Y début	X fin	Y fin
CL1	701436,76	7002161,56	694075,39	6984855,64
CL2	703236,03	7001389,91	696972,51	6984154,56
CL3	700814,65	7002339,69	693450,9	6985035,36
CL4	703236,03	7001629,31	695618,24	6984229,45
CLB	703039,86	7002479,82	695360	6983260,15
CLB_inflexion 1	700860,04	6999399,68		
CLB_inflexion 2	699780,68	6993860,16		
CLB_inflexion 3	698259,5	6990458,81		
CLB_inflexion 4	697902,89	6987085,72		
CLB_inflexion 5	696420,18	6984560,07		
CS1	700698,13	7002363,29	704699	7001244,9
CS2	700328,24	7001439,6	704332,52	7000322,01
CS3	699922,62	7000519,32	703925,99	6999399,11
CS4	699477,85	6999617,75	703481,22	6998499,25
CS5	698988,61	6998726,29	702991,29	6997608,81
CS6	698610,33	6997780,47	702613,7	6996663,67
CS7	698143,32	6996858,49	702146,8	6995740,78
CS8	697765,04	6995926,18	701768,41	6994806,88
CS9	697332,07	6995026,31	701334,65	6993906,11
CS10	696984,42	6994073,58	700991,2	6992954,28
CS11	696551,57	6993151,59	700558,34	6992032,3
CS12	696140,84	6992217,58	700146,82	6991095,67
CS13	695718,08	6991285,38	699730,08	6990161,77
CS14	695331,29	6990353,07	699340,68	6989232,98
CS15	694886,41	6989437,89	698895,79	6988316,1
CS16	694453,56	6988512,39	698462,03	6987392,29
CS17	694029,1	6987580,19	698040,18	6986459,19
CS18	693594,65	6986654,8	697607,33	6985534,59
CS19	693079,88	6985766,85	697091,76	6984644,94
CS20	692669,15	6984866,99	696680,23	6983744,17
CVS1	693115,62	6984248,28	691852,8	6980681,17
CVS2	693341,52	6984198,93	692049,2	6980576,79
CVS3	693538,72	6984188,26	692208,95	6980471,61

Tableau 3 - Coordonnées des points de départ, de fin et d'inflexion des coupes (en Lambert 93).

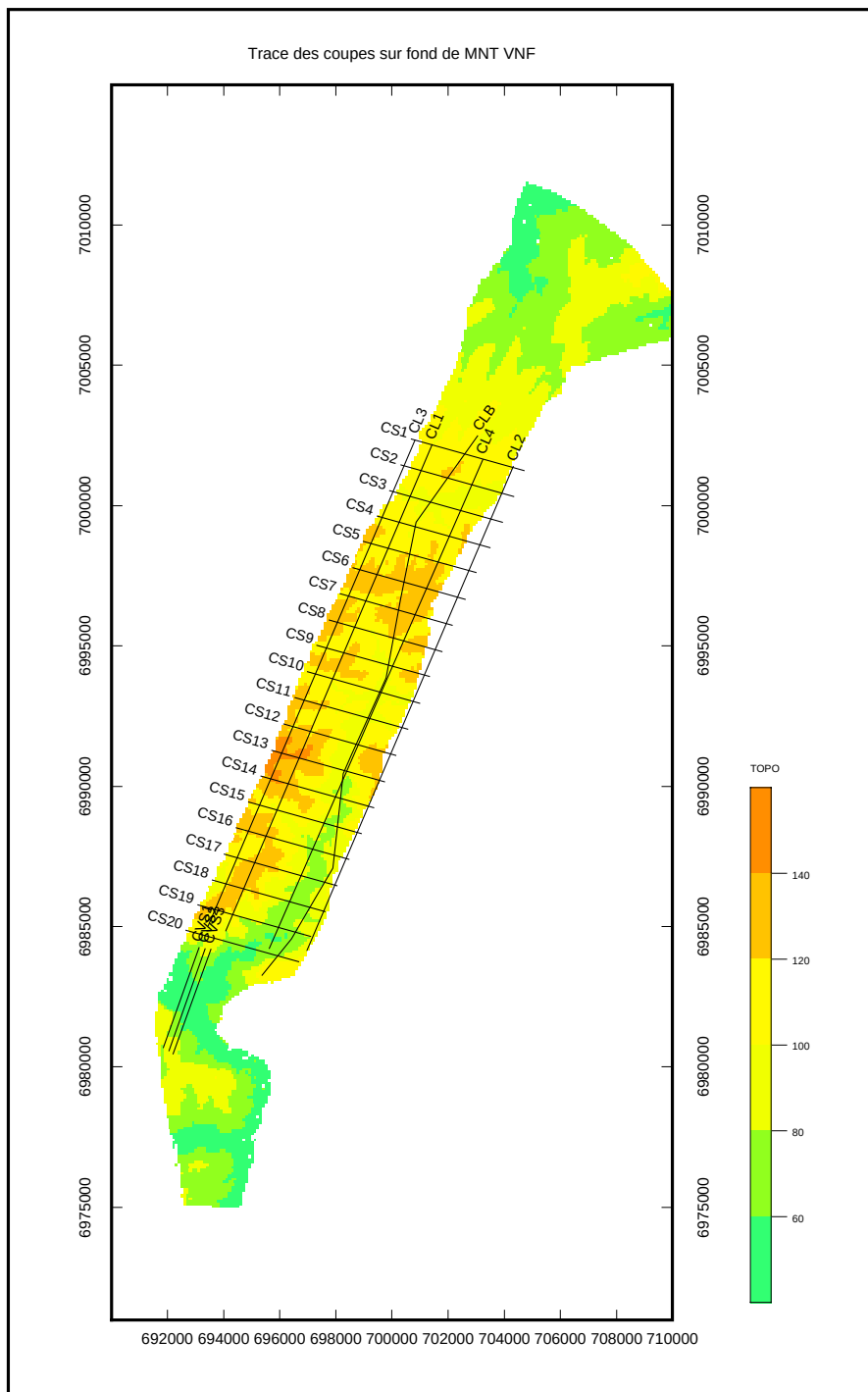


Figure 16 - Tracé et noms de toutes les coupes longitudinales, en ligne brisée et transversales sur fond topographique du MNT VNF.

Sur ces coupes, on distingue :

- la surface topographique (marron) ;
- le mur des formations superficielles (vert) ;
- le toit de la formation « composite » marnes et alternances marnes/craies (rouge) ;
- la surface des hautes eaux (bleu) ;
- la surface des basses eaux (turquoise) ;
- les tracés des altitudes $z = 70$ m et $z = 75$ m (noir) ;
- les sondages projetés le long de la coupe.

Pour information, les sondages localisés dans une emprise de 500 m de part et d'autre du tracé de la coupe sont retenus, ce qui explique le décalage de certains sondages par rapport à la surface topographique qui peuvent donc être situés au dessous ou au dessus de la surface.

Une couleur est associée à chacune des formations décrites par les sondages. Les formations « rencontrées » par les sondages sont donc facilement repérables sur les coupes.

Quelques artefacts sont observables localement sur les coupes : ils sont attribuables au fait d'utiliser dans le modèle le MNT de VNF, alors que les sondages BSS ont été pour la plupart calés sur la topographie IGN (MNT ou cartes topographiques).

Les coupes sont dessinées en respectant une distorsion d'échelle (facteur 1/5) :

- les coupes sériées CS et CVS sont dessinées selon une échelle horizontale de 1/25 000 et une échelle verticale de 1/500 ;
- les coupes longitudinales CL sont dessinées selon une échelle horizontale de 1/50 000 et une échelle verticale de 1/1 000.

L'examen de ces coupes conduit aux remarques suivantes :

- l'exagération verticale conduit localement à des profils en dent de scie qui ne reflètent pas nécessairement la réalité ;
- les coupes longitudinales mettent en évidence la géométrie anticlinale de la surface des marnes ;
- dans l'axe longitudinal les surfaces piézométriques sont globalement sub-parallèles à la surface du toit des marnes ;
- conformément à ce qui est attendu, compte tenu notamment de l'interpolation de la surface des formations superficielles à partir des épaisseurs, cette dernière surface « suit » la surface topographique ;

- la série de coupes transversales permet de constater que les surfaces de hautes et basses eaux se situent sous la cote 75 au nord (coupes CS1 à CS3) pour remonter progressivement au dessus de cette cote (coupe CS4 à CS12) avant de redescendre progressivement sous la cote 75 vers le sud (coupes CS13 à CS20). Cette structure est également mise en évidence par les coupes longitudinales.

Rappelons enfin que la prise en compte de la valeur de l'incertitude est à ne pas négliger lors de l'utilisation de ces résultats.

6. Conclusion et perspectives

La réalisation de la phase 1 du projet a permis d'acquérir un nombre relativement important de données qui ont été structurées sous forme de base de données qu'il conviendra d'alimenter, et a abouti à la construction d'un modèle géologique sur le secteur géographique situé entre Barleux et Marquion. Les résultats exploitables issus de la modélisation ont été fournis et présentés dans ce rapport sous forme de cartes et de coupes.

Le travail, réalisé tout au long de cette première phase, a permis de soulever un certain nombre de problèmes liés notamment :

- à l'interprétation des données de sondages ;
- à la quantité de données parfois insuffisante dans certains secteurs ;
- au mode de dépôt complexe et discontinu des formations superficielles ;
- à l'inadéquation entre les différentes données topographiques ou cartographiques utilisées.

Ces éléments constituent les limites du modèle. La prise en compte des valeurs d'incertitude dans l'exploitation des résultats est à ne pas négliger. C'est cependant la mise en évidence de ces problèmes associée aux résultats obtenus et aux calculs d'incertitudes, qui permet d'évaluer la validité du modèle et d'identifier les zones géographiques où il serait nécessaire d'acquérir de l'information complémentaire.

Il est de plus important de noter que le modèle géologique ainsi constitué, sera amené à évoluer en fonction des informations et connaissances supplémentaires qui seront acquises au fur et à mesure de l'avancée du projet et devront être intégrées à la base de données qui sert de base à la modélisation.

Le cahier des charges initial prévoyait dans la deuxième phase du projet d'étendre cette modélisation sur l'ensemble du fuseau proposé pour le tracé du tunnel, en se focalisant sur les formations superficielles.

Au vu des résultats de la première phase, VNF a d'abord souhaité réorienter sa demande (comité de pilotage du 19/01/05) en se focalisant sur le secteur du tracé qui traverse les formations tertiaires (entre Noyon et Compiègne), en cherchant à modéliser les différentes formations de la surface jusqu'à la craie crétacée incluse. Il a donc été proposé de reformuler le cahier des charges (et la convention qui lie VNF et le BRGM) par un avenant, afin de préciser cette nouvelle demande et de la chiffrer. Cependant du fait de l'intérêt jugé limité d'une modélisation jusqu'à la base du tertiaire, dans un secteur sans enjeux particuliers en profondeur et de l'impossibilité pour VNF d'augmenter l'enveloppe financière dédiée à ce projet, cet avenant n'a pas été validé par le comité de pilotage du 17 février 2005.

Lors de ce même comité de pilotage, il a été proposé de :

- établir un cahier des charges précis, en s'appuyant sur les résultats présentés, pour la deuxième campagne d'acquisition de données, sur le secteur modélisé ;
- préparer les éléments afin que VNF soit en mesure d'enrichir le modèle avec les données acquises lors de cette deuxième campagne (formation au logiciel GDM) ;
- réaliser avec les données du modèle GDM l'interfaçage avec un outil de visualisation 3D sur le secteur de passage du canal ;
- rédiger le rapport final et éditer les livrables sur Cdrom (Bd-VNF, Coupes, visualisation 3D).

Bibliographie

Celet P., Coulombeau C., Monciardini C., Agache R. (1978) - Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Péronne (48) Orléans BRGM, Notice explicative par P. Celet, C. Monciardini, 1978.

Colbeaux J.P. (1977) - Géométrie et cinématique de la fracturation dans le Nord de la France. Bull. BRGM 4, FR, p. 339-355.

Delattre C., Mériaux E. (1977) - Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Bapaume (35) Orléans BRGM, Notice explicative par C. Delattre, E. Mériaux, 1977.

Leriche M., Celet P., Charvet J. (1968) - Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Cambrai (36) Orléans BRGM, Notice explicative par P. Celet, 1968.

Menessier G., Dickel B., Monciardini C., Agache R. (1976) - Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Albert (47) Orléans BRGM, Notice explicative par G. Menessier, C. Monciardini, R. Agache, J. Sornay, A. Devriès, 1976.

Annexe 1

Compte-rendu de réunions

Les réunions du 06/07/2004, du 22/10/2004, du 14/12/2004 et du 19/01/2005 n'ont pas fait l'objet de comptes-rendus « formels », mais d'échanges de mails dont une partie est fournie ci-après.

Les réunions du 17/02/2005 et du 01/04/2005 ont, quant à elles, fait l'objet de compte-rendu spécifiques joints.

De: Lembezat Carole

Envoyé: lundi 25 octobre 2004 11:48

À: Benoit. Deleu (Adresse de messagerie); Celine. Mathy (Adresse de messagerie); Francis. Van-laethem (Adresse de messagerie); Yann. Deniaud (Adresse de messagerie)

Cc: Vinchon Charlotte; Minguely Bruno; Thierry Pierre

Objet: Suite de la réunion du 22/10

Importance: Haute

Bonjour,

Comme convenu lors de la réunion du 22/10 vous trouverez ci-joint une proposition de correspondance entre les "code_VNF" et les surfaces à modéliser (fichier corresp_Code_vnf-model.xls).

Pour rappel, les surfaces à modéliser énoncées par M. Van Laethem, sont les suivantes :

- remblais et matériaux anthropiques remaniés
- alluvions organiques
- alluvions non organiques
- alluvions graves
- colluvions
- limons des plateaux
- Tertiaire sable
- Tertiaire argile
- Craie altérée
- Craie franche
- zone de bancs durs
- alternance craie/marne
- marnes
- nappe d'eau

De plus, afin de palier les problèmes d'échanges entre les serveurs du CETE et du BRGM, nous avons demandé l'ouverture d'un espace FTP. Il s'agit d'un serveur d'échanges (et non de stockage des données, il est d'ailleurs conseillé de supprimer les données qui y seront stockées dès que les échanges ont été réalisés). Pour y avoir accès il suffit de se connecter à <http://ftp.brgm.fr>, le dossier qui nous concerne est canalsn et le mot de passe qui permet de s'y connecter est : tunnelvnf. L'ouverture de ce serveur devrait être effective dans la journée, je vous communiquerai de plus amples informations à ce sujet à ce moment là.

Cet espace devra ainsi nous permettre d'échanger toutes les données nécessaires au projet dans la limite de 1Go. Ainsi, vous pourrez y

mettre le MNT réalisé sur la zone d'étude sans avoir à nous l'envoyer sur CD (si sa taille ne dépasse pas 1Go).

Nous avons bien noté que ce MNT avait été réceptionné par VNF, qu'il sera en cours de validation les 26 et 27 octobre et que nous pourrions en disposer dès sa validation effective (vous pourrez donc le mettre sur le serveur ftp dès le 28/10). Comme indiqué en réunion, la précision du modèle dépend de la précision du MNT utilisé. Dans l'attente de ce mnt, c'est toujours le MNT IGN qui est utilisé.

De plus, dans le fichier joint data.zip, vous trouverez, en plus du fichier Excel annoncé plus haut, la base donnée Access remise par mail le 11/10 dernier et en réunion le 22/10, dans une version mise à jour (vous noterez qu'il n'y a plus que 86 code_vnf différent au lieu de 89). Vous y trouverez les tables `lexique_code` et `lexique_code_vnf` qui permettront de modifier ou valider la proposition de correspondance entre les "code_VNF" et les surfaces à modéliser.

Enfin, nous sollicitons auprès du CETE des informations complémentaires relatives :

aux sondages 04-670-01517 S.N.E Canal grand gabarit SCD6 et 87 50 164 TGV LOT 4 710 C 34 comme demandé dans le mail du 29/09
aux sondages 04-670-01517_S.N.E.CANALAGRANDGABARIT_SCD5, 04-670-01517_S.N.E.CANALAGRANDGABARIT_SCT1, 07709_LAINIEREDEPICARDIE-EXTENSION_PR3, 65-S-54_A21SECTION_S1, 65-S-54_A21SECTION_S3, 65-S-54_A21SECTION_S5, 8750164_TGVLLOT4_710C20, 8750164_TGVLLOT4_710C28, 8750164_TGVLLOT4_710H21, 8750164_TGVLLOT4_710H62, 8750164_TGVLLOT4_710H63, 8750164_TGVLLOT4_710T41, 8750164_TGVLLOT4_720T1, 8750164_TGVLLOT4_PR710P37, 8750164_TGVLLOT4_PR710P51, 8750164_TGVLLOT4_PR710P58, 8750164_TGVLLOT4_PR710P64, 99-50-06164_CANALDUNORDDERUYAULCOURT_SC3. En effet, ces sondages contiennent au moins une passe dont le code_VNF est "SGR" qui correspond aux codes strati : "SENO", formation "_SENO" et litho "GRAV". Il s'agirait, d'après la grille de saisie de "Grave de craie à matrice limoneuse". De plus, certaines de ces passes ont pour commentaires "marnettes". Nous serions donc d'avis de faire correspondre ce code aux argiles altérées. Qu'en pensez-vous?

Nous avons bien noté que M. Van Laethem n'était pas disponible pour valider ces propositions avant demain. Dans l'attente de cette validation, une modélisation sera établie selon la proposition ci-jointe.

Enfin, comme convenu en réunion, Charlotte Vinchon vous transmettra un mail concernant la formation GDM dès qu'elle aura obtenu les informations correspondantes.

Je reste à votre disposition jusqu'au 27/10 inclus,

Bien cordialement,

Carole Lembezat

De: Lembezat Carole
Envoyé: vendredi 24 décembre 2004 10:46
À: Benoit. Deleu (Adresse de messagerie); Celine. Mathy (Adresse de messagerie); Francis. Van-laethem (Adresse de messagerie)
Cc: Vinchon Charlotte; Blanchin Raymonde
Bonjour,

Afin de m'assurer que nous n'oublierons rien, je me permets de récapituler ce dont nous sommes convenu lors de la réunion du 14/12/04 :

Seront modélisées les surfaces suivantes :
le mur des formations Quaternaire,
le toit des marnes, en y intégrant la notion d'incertitude dans la mesure du possible, les zones de bancs durs et les alternance marnes et calcaire,
les surfaces des hautes et basses eaux

La surface topographique utilisée sera calculée à partir des points de mesure du MNT fourni par VNF au pas de 50 m.

2 modèles seront réalisés :
- 1 modèle dont la maille sera à 50 m pour les formations superficielles,
- 1 modèle dont la maille sera à 100 m pour les formations profondes (toit des marnes bancs durs et alternance).

Les résultats seront transmis sous forme de :
coupes sériées espacées de 1 km le long de l'axe du tunnel,
3 coupes en long ; une dans l'axe du tunnel, une de part et d'autre de la première à 5 km de chaque côté,
1 coupe en ligne brisée au droit du projet de canal,
cartes où seront représentée l'altimétrie des couches superposées aux iso-incertitudes correspondantes

Ces résultats seront transmis par mail le 13/01/05 et envoyés le même jour sous format papier à :

VNF
CETE
Coyne et Bellier

Enfin, une réunion se déroulera à Béthune le mercredi 19/01/05 à 14h.

Je vous souhaite d'excellentes fêtes de fin d'année et mes meilleurs vœux pour 2005,

Carole Lembezat

BRGM
3, avenue Claude Guillemin - B.P. 6009
45060 Orléans Cedex 2

De: Lembezat Carole
Envoyé: vendredi 21 janvier 2005 11:16
À: 'Francis.Van-laethem@equipement.gouv.fr'; Celine.Mathy@vnf.fr;
Benoit.Deleu@vnf.fr
Cc: Vinchon Charlotte; Blanchin Raymonde; Nail Christian
Objet: Suite à réunion du 19/01/05

Bonjour,

Simplement pour récapituler et/ou compléter ce qui a été dit mercredi, merci de bien vouloir nous indiquer si certains éléments ont été oubliés :

- Comme formulé dans son mail du 14/01, M. Van Laethem a indiqué qu'il aurait été plus judicieux de travailler sur les épaisseurs des formations superficielles, plutôt que sur les cotes. Il est en effet envisageable de réaliser une carte d'iso-épaisseur des formations superficielles (hors alluvions) et de recaler ensuite ces formations par rapport à la surface topographique (MNT VNF). C'est cette méthode qui sera employée dans la phase 2, si elle a lieu.

- Après vérification, voici des précisions concernant la réponse à la question de M. Deleu au sujet de la marge d'erreur.

Rappelons d'abord que la distribution des erreurs de krigeage est d'allure gaussienne.

De manière générale, la marge d'erreur prise en compte correspond à un intervalle compris entre le centre de la gaussienne plus ou moins un nombre défini d'écart-type.

Dans le cas d'enjeux très importants ce nombre est de 2 (centre de la gaussienne + ou - 2 écarts type) et la probabilité pour que la valeur réelle se trouve dans cet intervalle est de 95%.

Dans notre cas, celui d'une phase d'avant-projet, ce nombre est de 1 (centre de la gaussienne + ou - 1 écart type) et la probabilité que la valeur réelle se trouve dans cet intervalle est de 68%.

Concernant la suite du projet, il a été convenu ce qui suit :

- Une "phase 2 intermédiaire" d'évaluation des données a été proposée en préliminaire à la phase 2 proprement dite. Les données à évaluer concernent l'ensemble du faisceau d'étude pour les formations Quaternaires et Tertiaires (jusqu'au contact Tertiaire/Secondaire).

- A ce titre, un avenant à la convention sera rédigé en concertation entre les directeurs des SGR Nord-pas-de-Calais et Picardie et VNF mission Seine Nord.

- Un document d'étape relatant tout ce qui a été réalisé au cours de la phase 1 et précisant les problèmes rencontrés, sera rédigé.

- La formation de 3 personnes au logiciel GDM est à prévoir pour le mois de mars 2005.

- Une convention d'usage devra être passée entre VNF et le bureau d'étude ainsi que le CETE pour la mise à disposition du logiciel GDM pour la durée du projet.

- Une réunion qui permettra d'entériner ou non la poursuite de la phase 2, est prévu le jeudi 17/02 à 14h à Béthune.

Je me renseignerai quant à la possibilité d'exporter les fichiers GDM au format Autocad et vous tiendrai au courant.

Enfin vous trouverez ci-joint un fichier power-point qui contient les images des 3 coupes nord-sud demandées dans la vallée de la Somme avec leur localisation sur fond IGN 1/25 000. La surface topographique est représentée en marron, le mur des formations superficielles en vert, la surface piézo en période de hautes eaux en bleu foncé, la surface piézo en période de basses eaux en bleu clair et le toit de la formation "marne + alternance" en pourpre.

Bien cordialement,

Carole Lembezat

COMPTE RENDU DE RÉUNION	
Rédacteur : C.VINCHON	
Projet : Modélisation 3D Canal Seine Nord	Numéro : 04PIRB05
Objet : Présentation du rapport intermédiaire provisoire et validation des actions à mener pour la phase 2	
Date : 01/04/05	Lieu VNF/MSNE Béthune
Participants : B. Deleu, C. Mathy (VNF/MSNE), F. Van Laethem (LRPC), C. Vinchon (BRGM/SGR/NPC), C. Lembezat (BRGM/ARN)	
Absents :	
Diffusion : Les participants, L. Beroud (DSP), C. Lembezat (ARN), R. Blanchin (REM), J. Bobiller (STI), C. Nail (SGR PIC)	

L'objet de la réunion était de présenter le rapport intermédiaire de la phase 1 dans sa version provisoire et de discuter avec VNF MSNE des actions à mener dans la phase 2 du projet.

En début de réunion, Benoit Deleu explique les autres éléments qui font que la solution « tunnel » reste hypothétique : l'étude sur la fonctionnalité et l'exploitation d'une solution tunnel est délicate car il n'existe pas actuellement de tel ouvrage (en terme de longueur et de gabarit). La durée du parcours total sera fortement influencée par la solution choisie et conditionne les conditions d'exploitabilité du canal. Une étude sur les processus de traversée de l'ouvrage est en cours par l'INRETS.

Il évoque les autres variantes notamment celle d'un parcours en alternance tunnel-tranchées, sur un tracé différent de celui du tunnel et à une cote supérieure (50 m)

2 hypothèses sont possibles pour les passage en tranchée : tranchée ouverte ou couverte. Les différents modes d'étancheification sont évoqués, avec la nécessité de perturber le moins possible la nappe.

- La présentation du rapport « Modélisation du secteur potentiel d'implantation du canal Seine Nord Europe (Brie -Marquion) – rapport intermédiaire » a d'ores et déjà suscité un certain nombre de remarques :
 - « Barleux » remplacera « Brie » dans le titre,
 - Ajouter dans le chapitre 6 un paragraphe sur les limites du modèle,
 - Ajouter une coupe avec la représentation de l'incertitude sur le toit des marnes,

- Utiliser la même légende de couleur pour les cartes du toit des craies « composites » et pour le mur des formations superficielles,
- Prévoir un tableau donnant les coordonnées des début et de fin de tracé des coupes.

Le rapport final comportera au format A3, les cartes fournies dans le rapport intermédiaire. Une carte de localisation des coupes sur fond scanné IGN sera également fournie au format A3.

Les remarques et commentaires des intervenants concernant le rapport intermédiaire, seront remis entre le 8 et le 11 avril.

➤ Les actions à mener dans la phase 2 du projet concernant :

- la visualisation du modèle en 3 dimensions,
- l'établissement d'un cahier des charges dans le but de réaliser des investigations complémentaires.
- Dans l'optique de disposer d'un outil de communication, VNF souhaite que le BRGM lui remette le modèle réalisé dans un format exploitable par des outils de visualisation 3D. A ce titre, plusieurs logiciels ont été évoqués :
 - GL view (viewer VRML) logiciel gratuit,
 - 3D viewer (vérifier sa gratuité et sa disponibilité)
 - Amira
 - Arc Scène (produit de la gamme ESRI, nécessite une licence particulière)

Les trois premiers utilisent des fichiers au format VRML (extension WRL).

VNF doit déterminer quel logiciel sera employé. Des échanges par mail à ce sujet sont souhaitables entre VNF et le BRGM.

- Etablir un cahier des charges pour cibler les endroits où il est nécessaire de réaliser des sondages complémentaires.

Il comprendra des orientations sur la position des sondages, le type de sondages, leur densité ainsi que les niveaux à atteindre. Une proposition de lever géophysique viendra compléter cette proposition.

Cette proposition d'investigations complémentaires sera localisé le long du tracé de la solution tunnel + tranchées. Le fichier de ce tracé au format autocad a été transmis le même jour par email.

Une réflexion devra être menée sur la réduction de l'incertitude liée à l'interprétation. On rappelle en effet que l'incertitude calculée par krigeage est liée notamment à la quantité de données, mais qu'il existe un autre type d'incertitude non quantifiable, directement lié à l'interprétation des formations lors du forage. Un « guide » d'interprétation pourrait être envisagé afin que les prochains sondages aient le même type d'interprétation.

L'ensemble de ces travaux sera repris dans un rapport final prévu pour juin.

Enfin, dans l'optique de « faire vivre » le modèle en y ajoutant des données complémentaires, mais aussi dans celle d'exploiter le modèle réalisé au cours de la phase 1, la formation au logiciel GDM, prévue dans la convention, s'avère indispensable. Les dates de formations sont à définir.

Action	Responsable	Délai	Soldé
Remarques / commentaires sur le rapport intermédiaire	Equipe de projet/VNF	Entre le 08/04 et le 11/04	
Prise en compte des remarques, édition du rapport intermédiaire dans sa version finale	C. Lembezat, Ch. Vinchon	Début mai	
Visualisation 3D	C. Lembezat	25/04	
Rédaction du cahier des charges pour la deuxième campagne	C. Vinchon, appui CL et H. Fabriol	15/05	
Formation GDM-livraison licence ; Convention d'utilisation pour la durée du projet (VNF, CETE)	J. Bobillier / R. Blanchin	A définir	
Prochaine réunion		16/05/05	
Edition du rapport et Cd joints	C. Lembezat	Juin 2005	

Annexe au compte-rendu de la réunion du 17 février 2005 à VNF/MSNE

Coût des tâches et chronogramme

Tâches	Coût/Tâches €
Préparation des données	7 450
Affinage du Modèle	5 760
Rédaction d'un cahier des charges pour la campagne de mai	3 695
Fourniture des outils pour enrichir le modèle avec les données acquises lors de la deuxième campagne (incluse le MAJ du logiciel GDM)	5 420
Visualisation 3D	2 880
Rapport final	4 900
Total HT	30 105
Total TTC	36 005,58

	février			mars					avril					mai
Semaines n°	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Préparation des données	■	■												
Affinage du modèle						■	■	■						
Rendu du rapport intermédiaire								●						
Rédaction des recommandations pour le cch									■		■			
Visualisation 3D									■					
Rédaction de la procédure à suivre pour enrichir le modèle									■		■			
Rapport final										■	■	■	■	

CR170205-VNFMSNE

Lezennes, le 25 février 2005

COMPTE RENDU DE RÉUNION	
Rédacteur : C.VINCHON	
Projet : Modélisation 3D Canal Seine Nord	Numéro : 04PIRB05
Objet : Présentation de l'avenant au cahier des charges pour la phase 2	
Date : 17/02/05	Lieu VNF/MSNE Béthune
Participants : B. Deleu, C. Mathy (VNF/MSNE), Y. Deniau (LRPC St Quentin), C. Nail (SGR/PIC), C. Vinchon (SGR/NPC)	
Absents :	
Diffusion : Les participants, L. Beroud (DSP), C. Lembezat (ARN), R. Blanchin (REM), F. Hanot, C. Luquet (CDG)	

L'objet de la réunion était de mettre au point avec VNF MSNE le contenu technique de la phase 2 du projet.

En effet, au vu des résultats présentés lors de la réunion du 19/01/05, la demande du comité de pilotage avait été de

- réorienter la phase 2 sur la réalisation d'un modèle 3D dans un secteur allant de Noyon à Compiègne, en intégrant les différentes données de sondages incluant les formations tertiaires jusqu'au contact du Secondaire.
- réaliser une visualisation 3D des résultats sur le secteur du tunnel.

Cette nouvelle approche impliquant l'exploitation d'un nombre de données beaucoup plus important qu'initialement prévu en phase 2, C. Vinchon avait proposé de rédiger un avenant au cahier des charges et un chiffrage du coût impliqué (PJ), ainsi qu'une répartition budgétaire impliquant le BRGM à hauteur de 20% au lieu de 10% dans le coût de la phase 2.

Cependant, étant donnés les délais impartis pour la réalisation du projet, VNF/MSNE a demandé au BRGM de procéder, sans attendre la validation de cet avenant, au dépouillement des données existantes en BSS pour le secteur Noyon-Compiègne. A la date de la réunion qui fait l'objet de ce compte-rendu, le tri préliminaire des données de Noyon à Compiègne avait été réalisé, et la saisie de ces forages au format RGF/GDM était programmée.

Le projet d'avenant a été transmis par mail à VNF le 4 février.

Le 17 février, B.Deleu a apporté une réponse négative de VNF/MSNE à cette proposition . Il n'est pas possible à VNF d'augmenter l'enveloppe financière prévue pour le projet. Par ailleurs, l'intérêt d'une modélisation jusqu'à la base du tertiaire, dans un secteur sans enjeux particuliers en profondeur a été considéré comme limité.

Comme il a été constaté en phase n°1 une insuffisance de données pour modéliser correctement le sous-sol, il apparaît aujourd'hui préférable d'affiner la modélisation du passage en tunnel de manière à préciser les données complémentaires à recueillir pour diminuer les incertitudes de la modélisation géologique dans le secteur du tunnel puis d'intégrer ces données complémentaires dans le modèle.

Il a donc été demandé au BRGM :

- d'affiner au maximum la modélisation du secteur du tunnel,
- en fonction des résultats et des incertitudes soulignées par la modélisation, d'établir un cahier des charges précis préalable à la deuxième campagne d'acquisition de données, sur le secteur du tunnel (pour mi avril -: appel d'offre pour la campagne),
- de fournir les éléments à VNF pour enrichir le modèle avec les données acquises lors de cette deuxième campagne,
- de réaliser avec les données du modèle GDM l'interfacage avec un outil de visualisation 3D sur le secteur du tunnel,
- de rédiger le rapport final et l'édition des livrables sur CdRom (Bd Tunnel, Coupes, visualisation 3D).

Cette proposition sera validée lors de la réunion du 1° avril, en fonction des décisions qui auront été prise sur la solution « tunnel ».

Dans cette enveloppe, le temps passé pour le dépouillement des données BSS et le tri préliminaire pour le secteur de Noyon à Compiègne est pris en compte.

En annexe est donné le chiffrage et le chronogramme de ces différentes tâches. Le présent compte-rendu et les tableaux joints devront être validés par VNF/MSNE à titre de redéfinition de la phase 2 comme contractuellement prévu dans la convention au terme de la phase 1 (articles 4.1 et 4.2)

Pour mémoire le reste à faire sur la phase 1 est

- la réalisation d'un document d'étape,
- la livraison de la licence GDM à VNF, la formation de 3 personnes au logiciel.

Enfin dans le cadre de la phase 1, le comité de pilotage avait demandé au BRGM de réaliser une carte d'iso-épaisseur des formations superficielles, et de la recaler sur coupe sur la surface topographie (en utilisant le MNT de VNF). Ce travail a été rendu lors de la réunion du 17 février.

Action	Responsable	Délai	Soldé
Validation du présent Compte rendu et du coût des tâches par l'équipe d eprojet BRGM, et VNF MSNE	Equipe de projet/VNF	Le plus rapidement possible	
Finalisation du Modèle tunnel	C. Lembezat, R. Blanchin	1 ^{er} avril	
Visualisation 3D	idem		
Rédaction du cahier des charges pour la deuxième campagne	C. Vinchon, appui CL et H. Fabriol	22 avril	
Formation GDM-livraison licence ; Convention d'utilisation pour la durée du projet (VNF, CETE)	J. Bobillier/R Blanchin	Fin mars	
Edition du rapport et Cd joints	C. Lembezat		

Annexe au compte-rendu de la réunion du 17 février 2005 à VNF/MSNE

Coût des tâches et chronogramme

Tâches	Coût/Tâches €
Préparation des données	7 450
Affinage du Modèle	5 760
Rédaction d'un cahier des charges pour la campagne de mai	3 695
Fourniture des outils pour enrichir le modèle avec les données acquises lors de la deuxième campagne (incluse le MAJ du logiciel GDM)	5 420
Visualisation 3D	2 880
Rapport final	4 900
Total HT	30 105
Total TTC	36 005,58

	février			mars					avril					mai
Semaines n°	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Préparation des données	■	■												
Affinage du modèle						■	■	■						
Rendu du rapport intermédiaire								●						
Rédaction des recommandations pour le cch									■	■	■			
Visualisation 3D									■					
Rédaction de la procédure à suivre pour enrichir le modèle									■	■	■			
Rapport final										■	■	■		

Annexe 2

Géostatistique appliquée à la modélisation géologique

Interpolation par la géostatistique

Les formations lithologiques présentent un comportement global que l'on pourrait modéliser par une approche déterministe, néanmoins elle présentent aussi des variations et des irrégularités locales qui échappent à toute représentation fonctionnelle simple et qu'il est plus rigoureux de modéliser par une approche probabiliste.

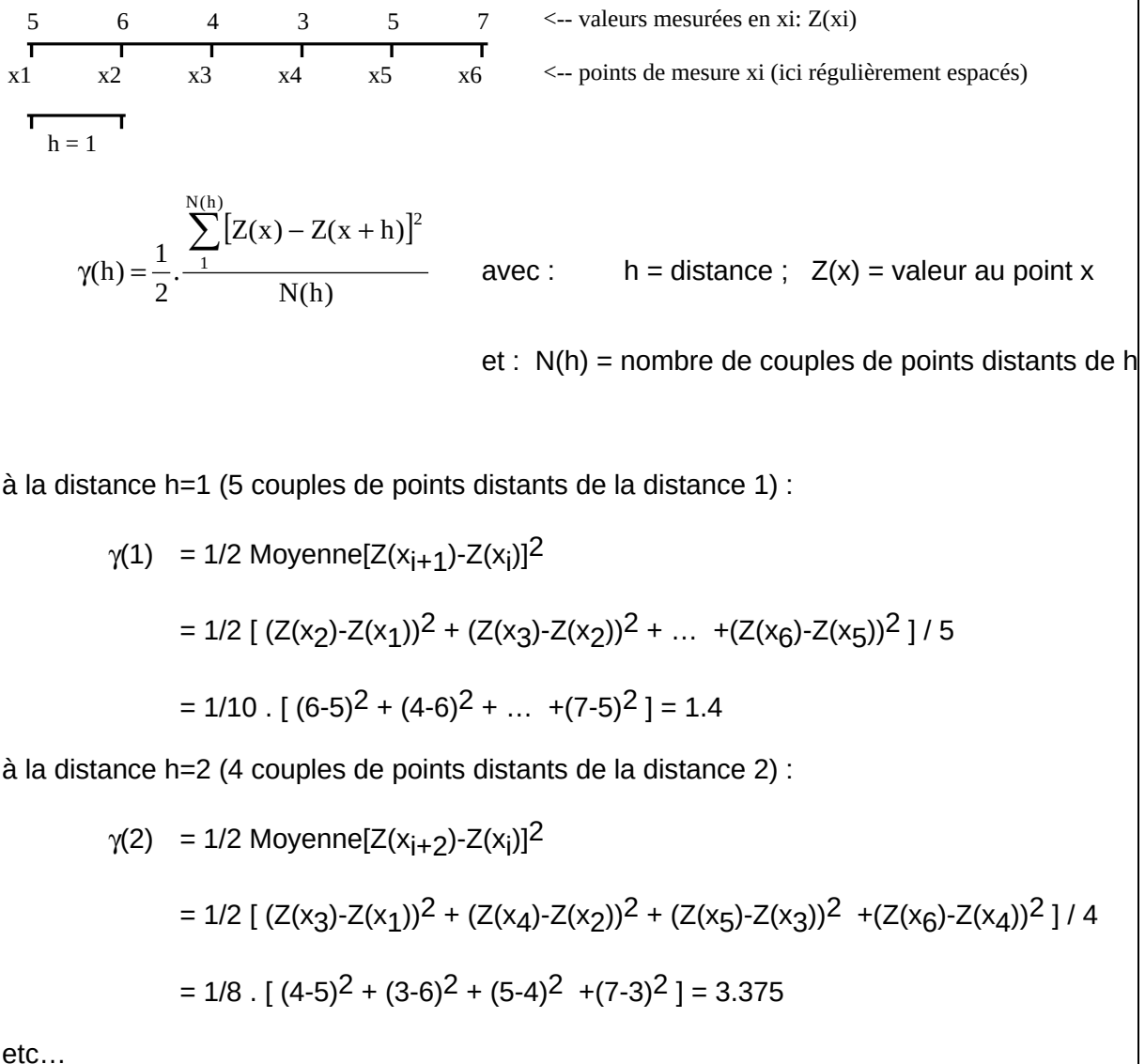
La géostatistique est une théorie et une méthodologie, fondée sur l'analyse statistique des corrélations spatiales, pour étudier les variables dites régionalisées c'est-à-dire dont l'évolution dans l'espace (et/ou le temps) présente un caractère à la fois aléatoire et structuré.

Deux raisons majeures justifient la mise en œuvre d'une approche géostatistique :

- Elle permet de caractériser la variabilité spatiale du phénomène que l'on étudie, à savoir le comportement des formations retenues. L'outil utilisé est le **variogramme** qui synthétise la structure de la variable. Pour une direction donnée, il indique comment varie l'écart des valeurs prises en 2 points X et $X+h$ en fonction de la distance h . ; il renseigne sur les anisotropies éventuelles et sur le degré de régularité de la variable.
- Elle permet de résoudre le problème de l'interpolation optimale, c'est à dire de l'estimation optimale d'une valeur $Z(x_0)$ inconnue à partir des informations disponibles. L'interpolateur utilisé est le **krigeage**, seule technique qui fournit simultanément la valeur estimée et l'erreur associée caractérisée par l'écart-type de krigeage.

Le variogramme

Dans un phénomène naturel comme la topographie, les cotes mesurées en différents points, bien que variables d'un point à l'autre, ne sont pas indépendantes de leur localisation. La différence de cote Z entre deux points x et $x + h$ est d'autant plus faible que la distance h qui les sépare est petite. D'un point de vue statistique, il y a une corrélation spatiale entre les données. Cette corrélation est d'autant plus forte que les points expérimentaux sont rapprochés et que le phénomène est continu et régulier. Pour quantifier le degré de corrélation spatiale, ou plutôt la détérioration de cette corrélation avec la distance, la géostatistique fait appel à la fonction variogramme $\gamma(h)$. Cette fonction calcule, en fonction de la distance h qui sépare deux points, la valeur moyenne de $1/2[Z(x+h)-Z(x)]^2$. La figure ci-dessous illustre ce calcul.



Principe de calcul du variogramme

Le variogramme est d'abord un outil d'analyse des phénomènes naturels. En effet, l'allure et le comportement du variogramme expérimental fournissent une image synthétique des principaux traits structuraux du phénomène étudié :

- **Continuité à l'origine**

En principe $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont égaux quand h tend vers 0. En pratique toutefois, ceci n'est pas toujours vérifié. En effet il peut exister une discontinuité apparente à l'origine, qui peut être liée soit à une erreur de mesure, soit à des variations à « petites distances », en tout cas à des distances inférieures à la maille

d'échantillonnage. Cette discontinuité à l'origine est appelée "effet de pépité". Elle traduit la part de variabilité du phénomène que l'on ne peut expliquer soit en raison de la maille d'échantillonnage, qui ne permet pas de mettre en évidence des variabilités locales, soit en raison d'erreurs de mesure. La figure (b) ci-dessous montre un exemple d'effet de pépité.

- **Continuité spatiale au delà de l'origine**, traduite par les observations suivantes :
 - **portée** (distance de corrélation), phénomène stationnaire - figure (a) ci-dessous ; classiquement la valeur du variogramme est plus faible à l'origine: $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont voisins quand h est faible, donc la valeur du variogramme est faible) et augmente quand la distance augmente. Au bout d'une certaine distance entre points de mesure, la différence entre $Z(x)$ et $Z(x+h)$ n'augmente plus statistiquement, car les points ne sont plus corrélés. Cette distance limite est appelée portée (distance maximale jusqu'à laquelle des points peuvent être corrélés). A partir de cette distance, la valeur du variogramme se stabilise autour d'un palier,
 - **anisotropie**,
 - **imbrication d'échelles de variabilité**,
 - **absence de portée finie** - figure (b) ci-dessous, dérive ou tendance régionale, phénomène non stationnaire.

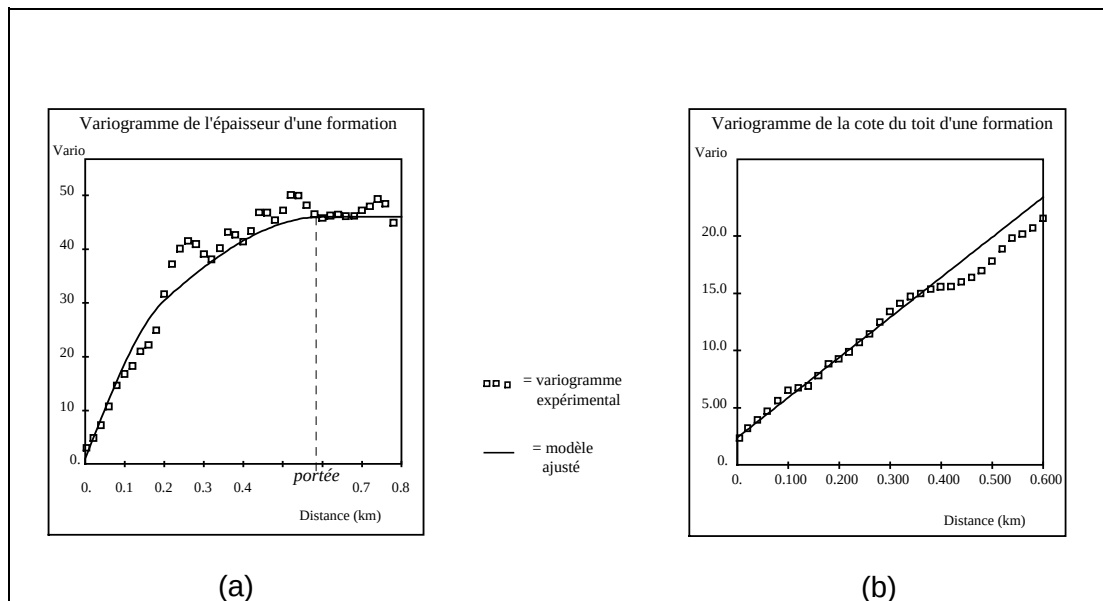


Figure 1 - Exemples types de variogrammes : (a) variable stationnaire avec portée visible.
(b) variable non stationnaire, sans portée.

Le krigeage

La méthode d'interpolation spécifique à la géostatistique est le krigeage. Par rapport aux autres méthodes d'interpolation automatique, les algorithmes du krigeage reposent sur une interprétation du phénomène à travers l'étude variographique préalable. Le krigeage présente un double intérêt :

- Il remplace le dessin par un calcul qui permet d'estimer en tout point la valeur la plus probable du paramètre étudié. Cette interpolation prend en compte :
 - la densité et la répartition des données sur le domaine étudié,
 - la plus ou moins grande continuité spatiale modélisée par le variogramme,
 - les diverses erreurs de mesure et incertitudes associées aux données.
- Il quantifie l'incertitude qui entache toute valeur interpolée. Cette incertitude, qui est une mesure de la qualité locale de la carte obtenue, est essentielle dans tous les projets où les risques encourus doivent être connus, et minimisés le cas échéant par de nouvelles mesures.

Formalisme du krigeage "ordinaire"

Le krigeage le plus utilisé est le "krigeage ordinaire". Il s'agit d'une interpolation par combinaison linéaire des données de base $Z(x_i)$. La valeur interpolée au point x , notée $Z^*(x)$, est donnée par :

$$Z^*(x) = \sum_{i=1,n} \lambda_i Z(x_i)$$

Le non biais est assuré à la condition que la somme des poids ou pondérateurs λ_i soit égale à 1 :

$$\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$$

Les pondérateurs sont alors choisis de façon à minimiser la variance d'estimation. Ceci conduit aux équations du krigeage ordinaire suivantes :

$$\sum_{j=1,n} \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x) \quad \forall i \text{ (n équations)}$$

$$\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$$

n = nombre d'informations disponibles,

i, j = indices des points de mesure ; i et j varient de 1 à n ,

- x_i, x_j = points de mesure x_i et x_j ,
 $Z(x_i), Z(x_j)$ = valeurs mesurées en x_i et x_j ,
 x = volume à estimer (point ou bloc),
 λ_i (ou λ_j) = pondérateur (ou poids) affecté à la valeur mesurée en x_i ,
 μ = paramètre de Lagrange,
 $\gamma(x_i, x_j)$ = valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h = distance entre x_i et x_j ,
 $\gamma(x_i, x)$ = valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h = distance entre x_i et x ,
 si x est un volume, on prend la valeur moyenne de γ entre x_i et ce volume.

Enfin la variance de l'erreur d'estimation, appelée **variance d'estimation** ou **variance de krigeage**, vaut :

$$S_k^2 = \sum_{i=1,n} \lambda_i \gamma(x_i, x) - \bar{\gamma}(x, x) + \mu$$

$\bar{\gamma}(x, x)$ est la valeur moyenne du variogramme entre deux points appartenant au volume x . Si le volume se réduit à un point, la distance qui sépare ces points est nulle et on a $\bar{\gamma}(x, x) = 0$.

Dans les expressions ci-dessus on voit que dans le krigeage interviennent :

- les positions des informations x_i par rapport au volume ou au point à estimer x , par le biais des valeurs de $\gamma(x_i, x)$;
- la répartition des informations, par le biais des valeurs de $\gamma(x_i, x_j)$;
- la fonction structurale variogramme γ .



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

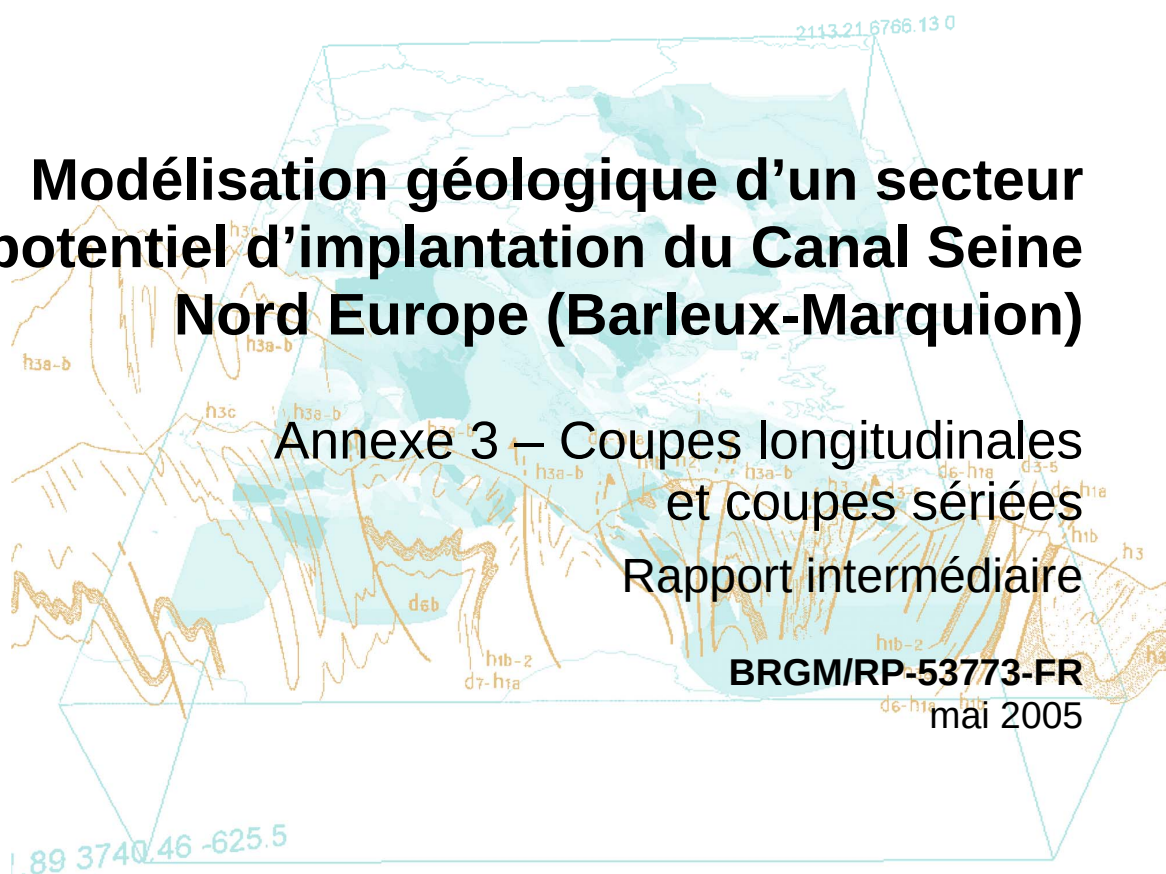
Service géologique régional Nord-Pas-de-Calais
Synergie Park
6 ter rue Pierre et Marie Curie
59260 - Lezennes – France
Tél. : 03 20 19 15 40



Modélisation géologique d'un secteur potentiel d'implantation du Canal Seine Nord Europe (Barleux-Marquion)

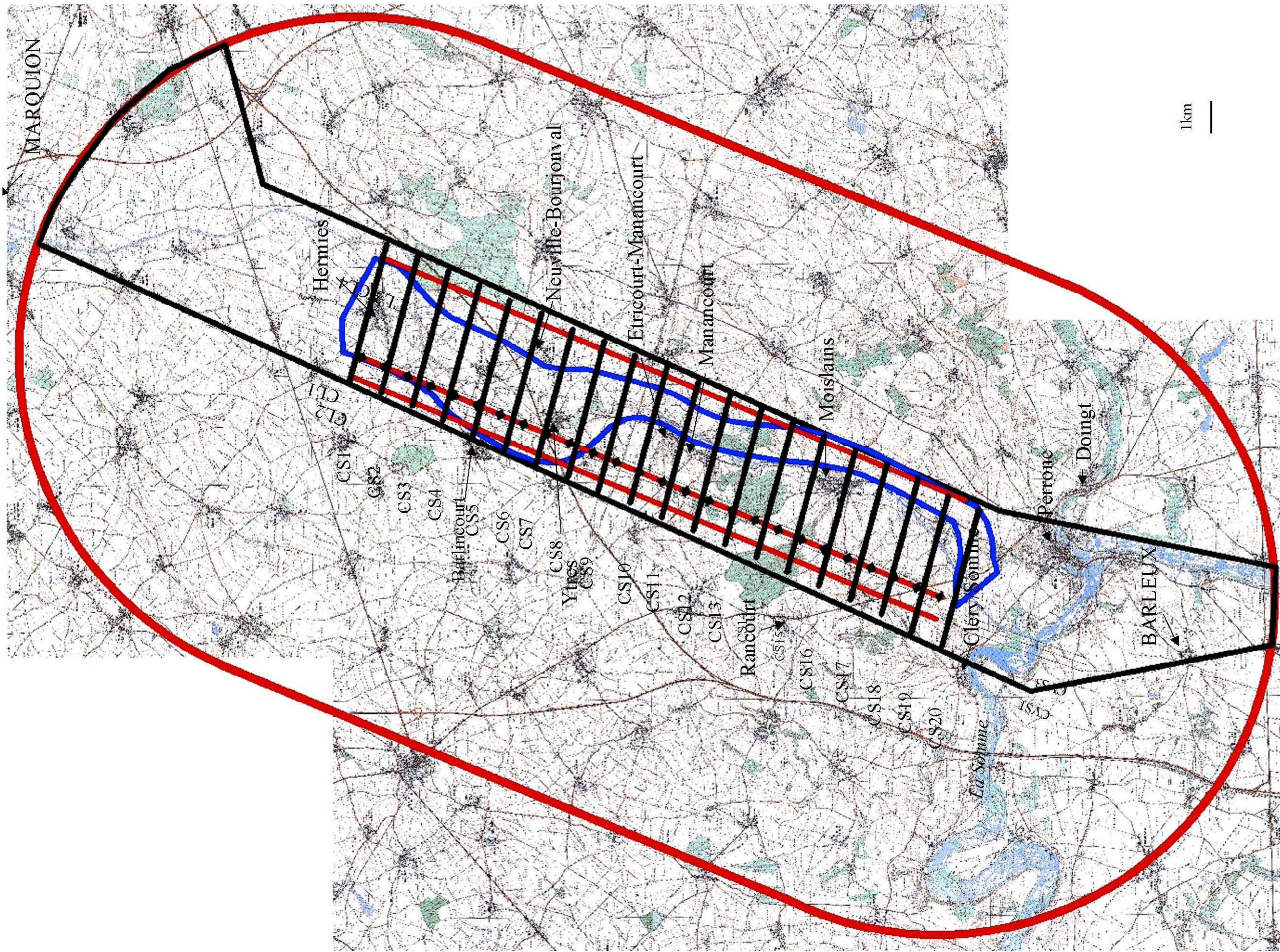
Annexe 3 – Coupes longitudinales et coupes séries Rapport intermédiaire

BRGM/RP-53773-FR
mai 2005



Géosciences pour une Terre durable

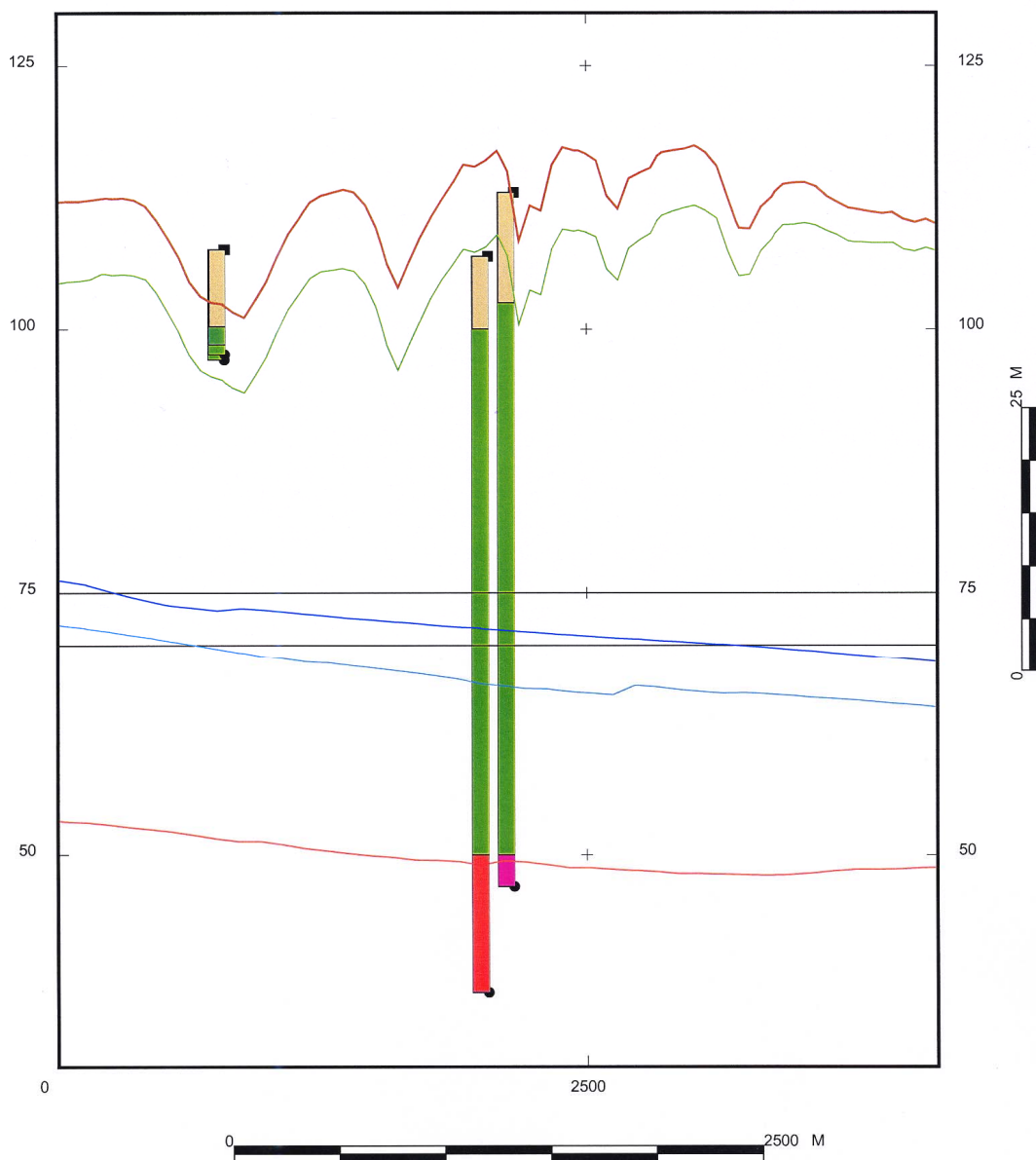
brgm

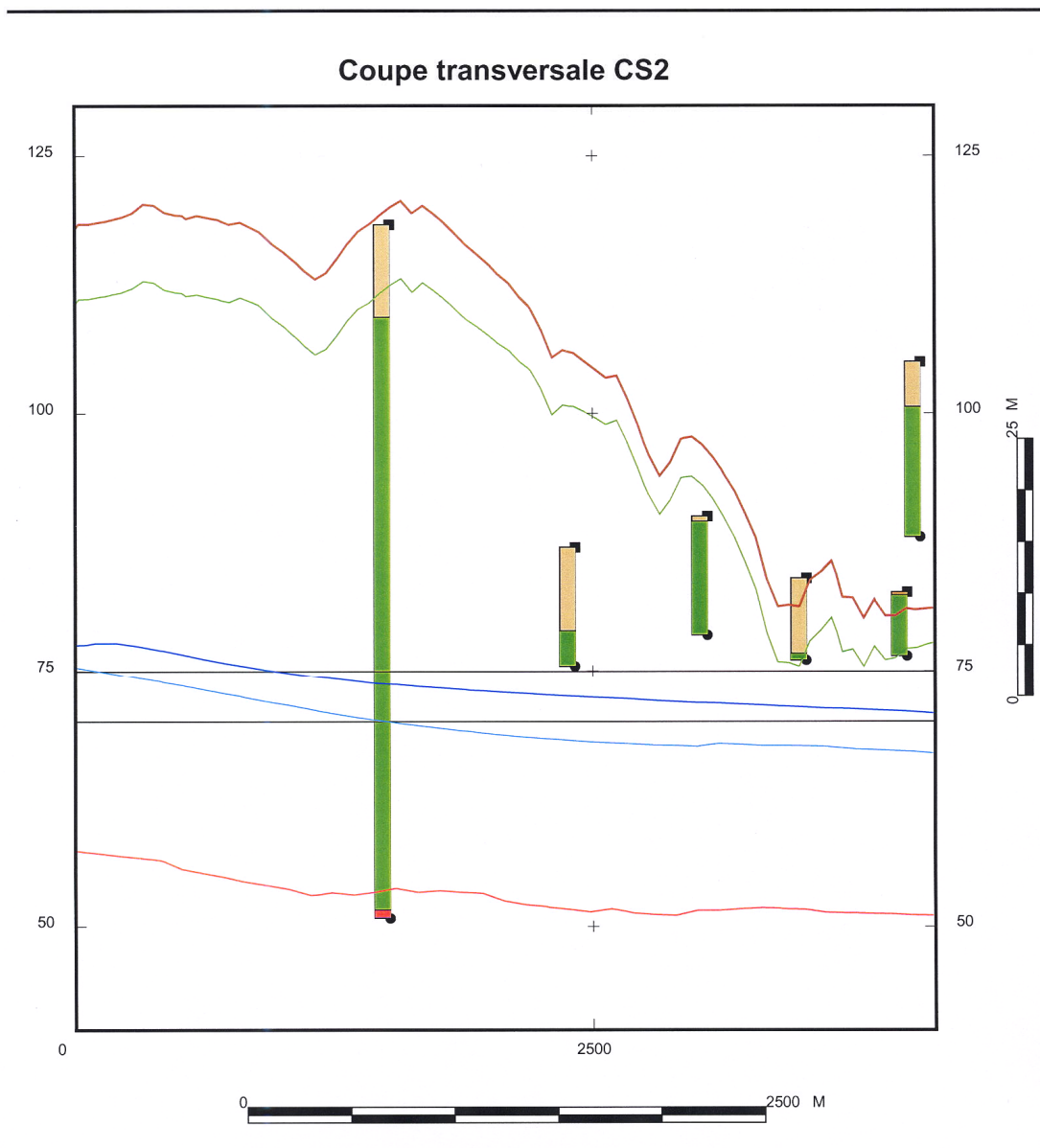


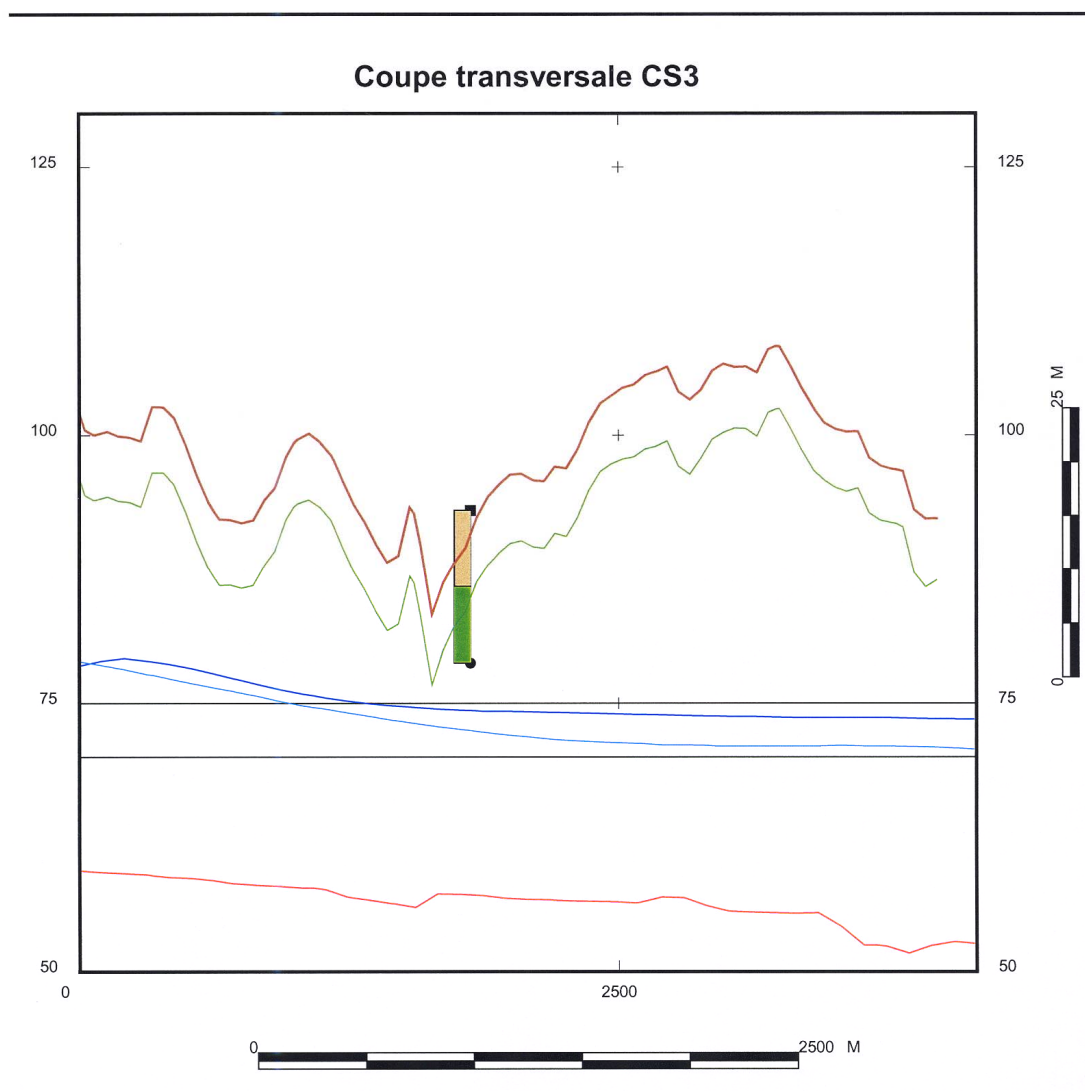
Légende pour l'habillage des sondages

	Remblais
	Alluvions non organiques
	Alluvions organiques
	Limons
	Colluvions
	Formations Tertiaires
	Craie altérée
	Craie
	Bancs durs
	Alternance marnes et calcaire
	Marnes
	Formations infraturoniennes
	lacune d 'information

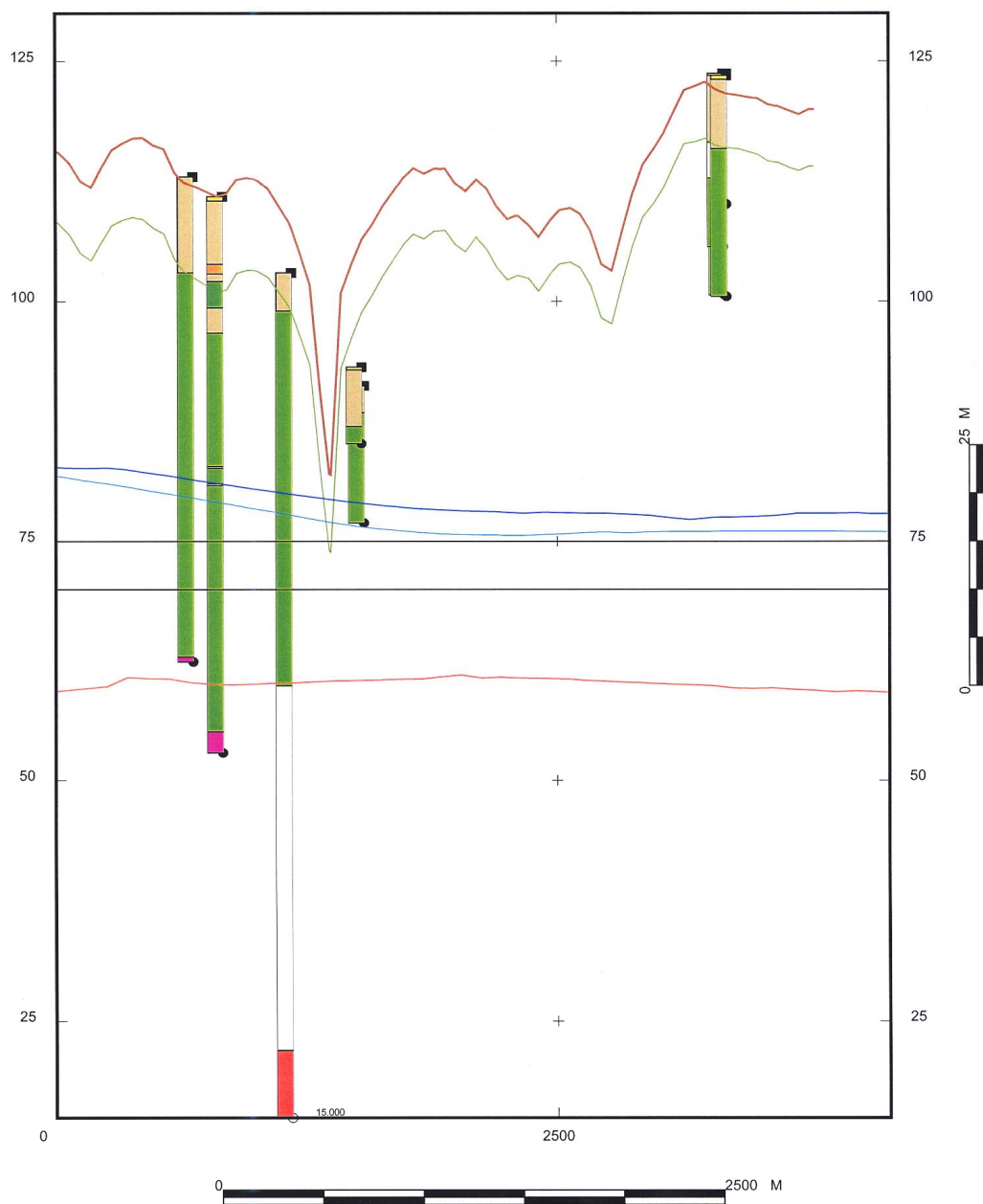
Coupe transversale CS1



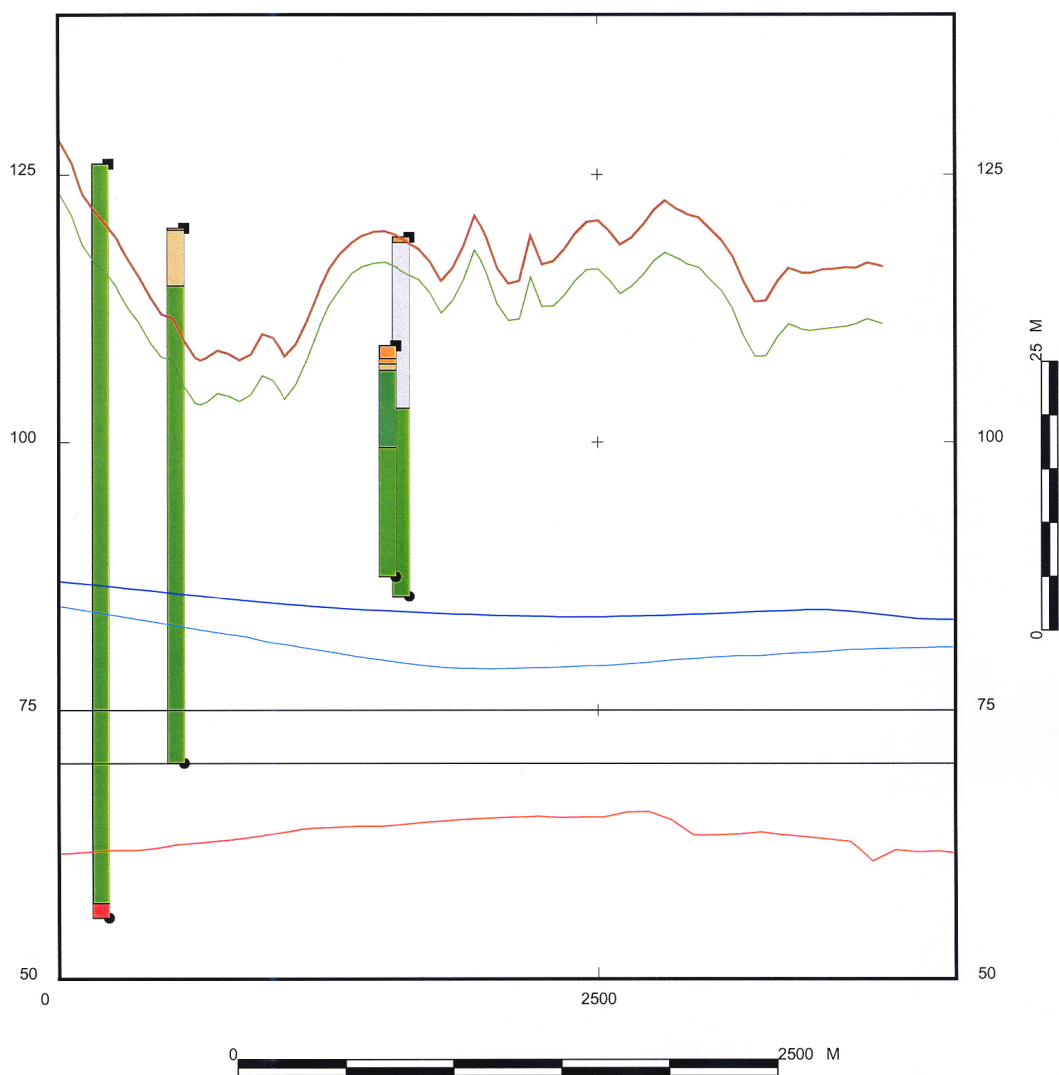




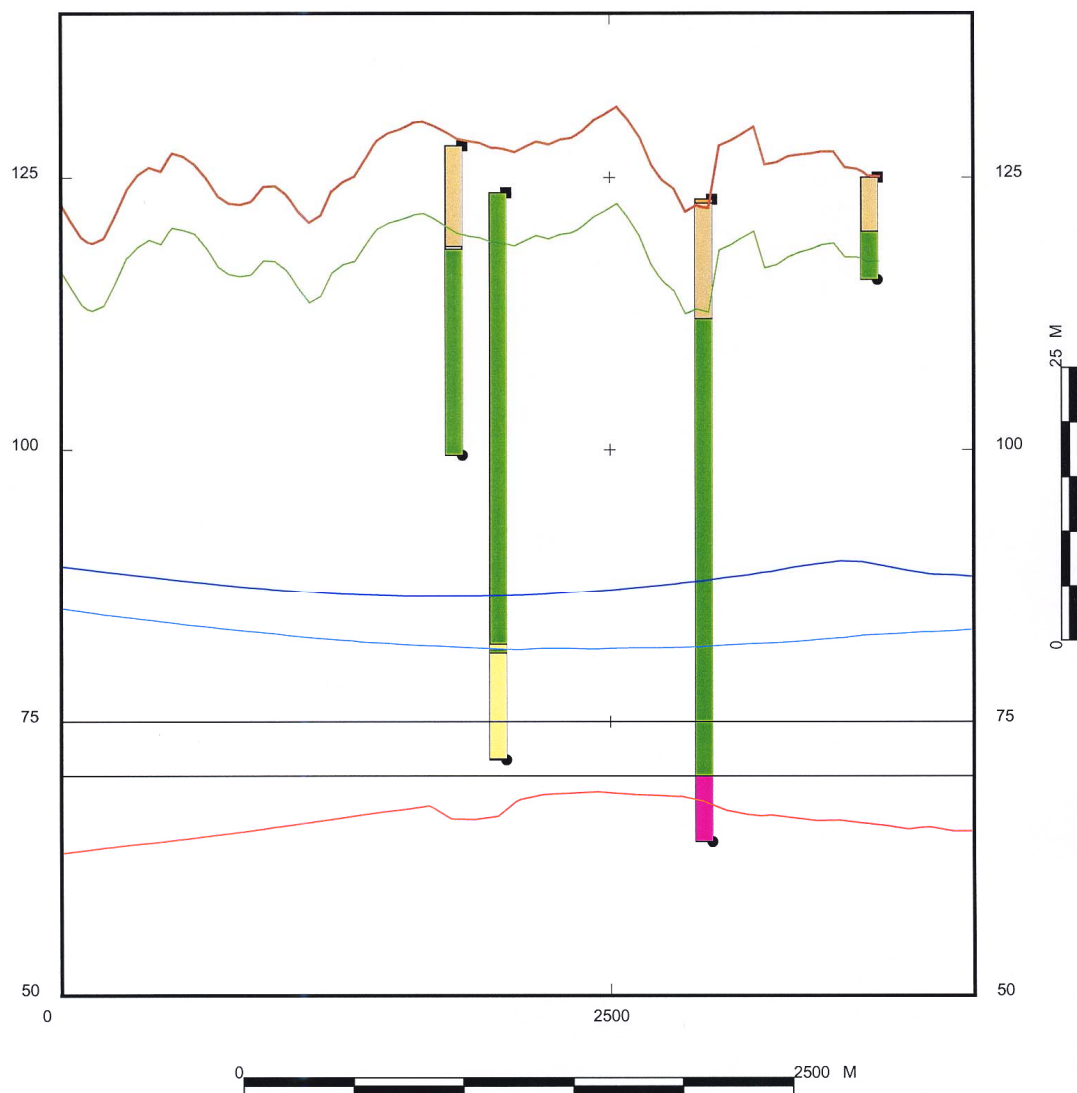
Coupe transversale CS4

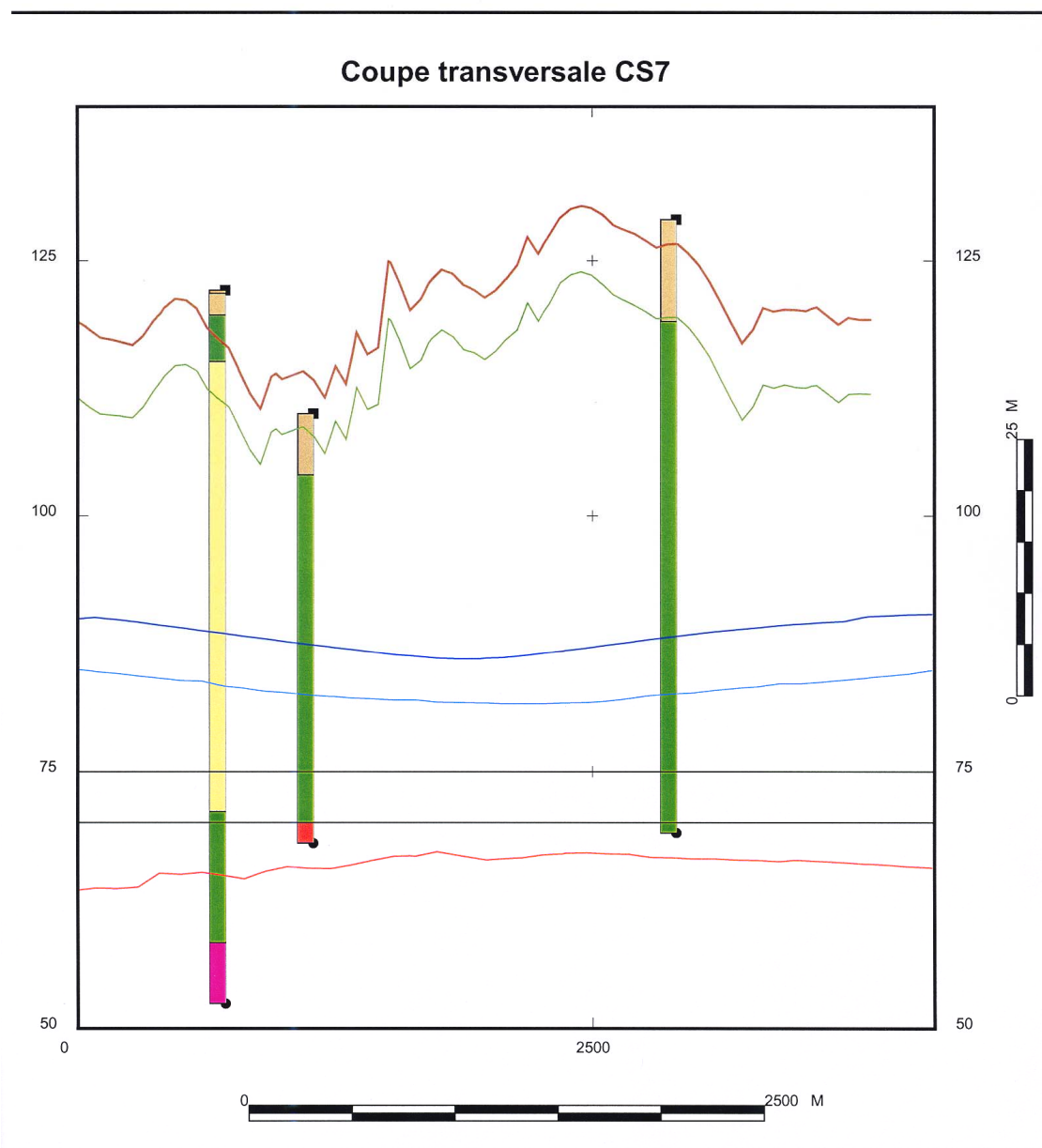


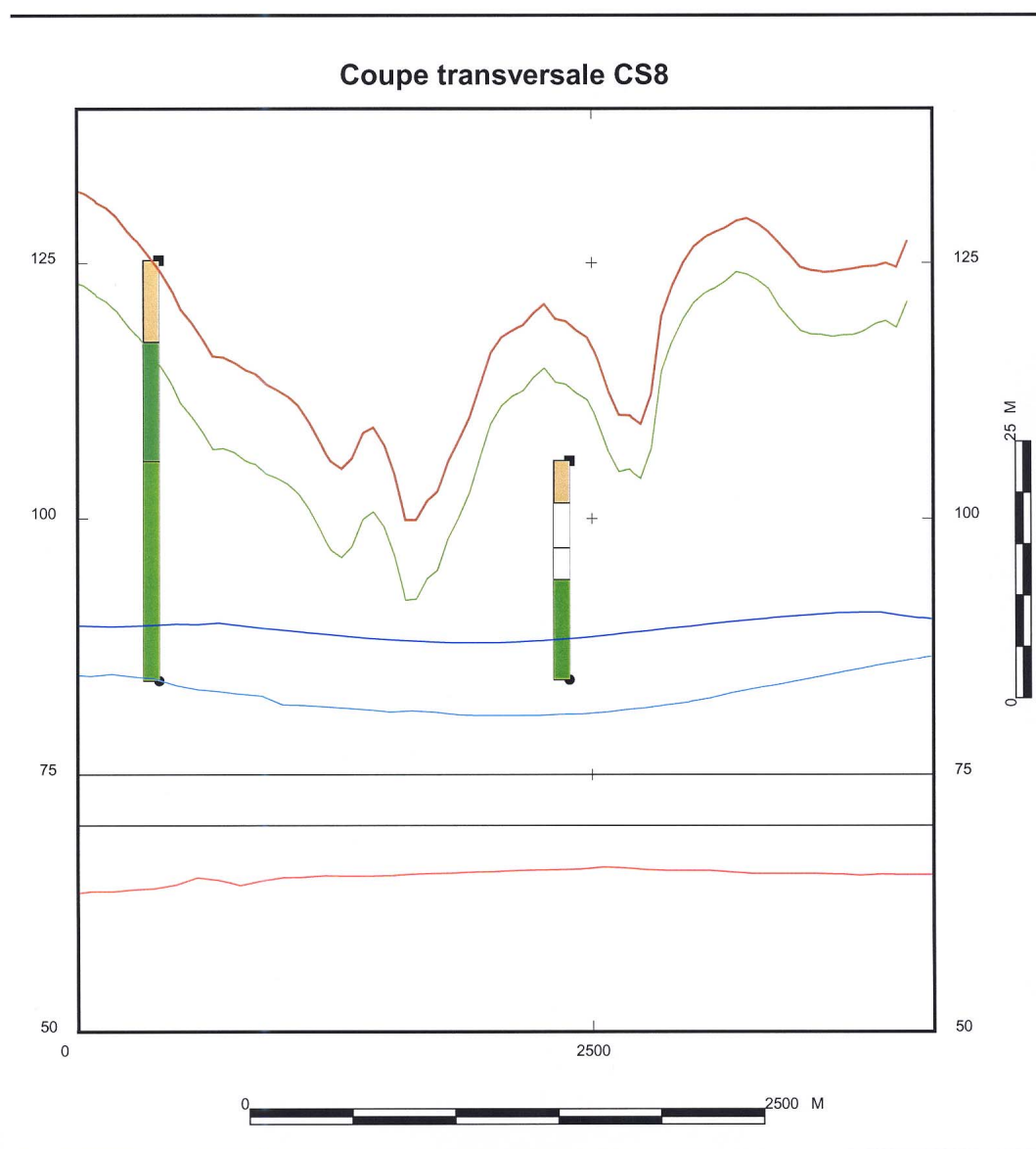
Coupe transversale CS5



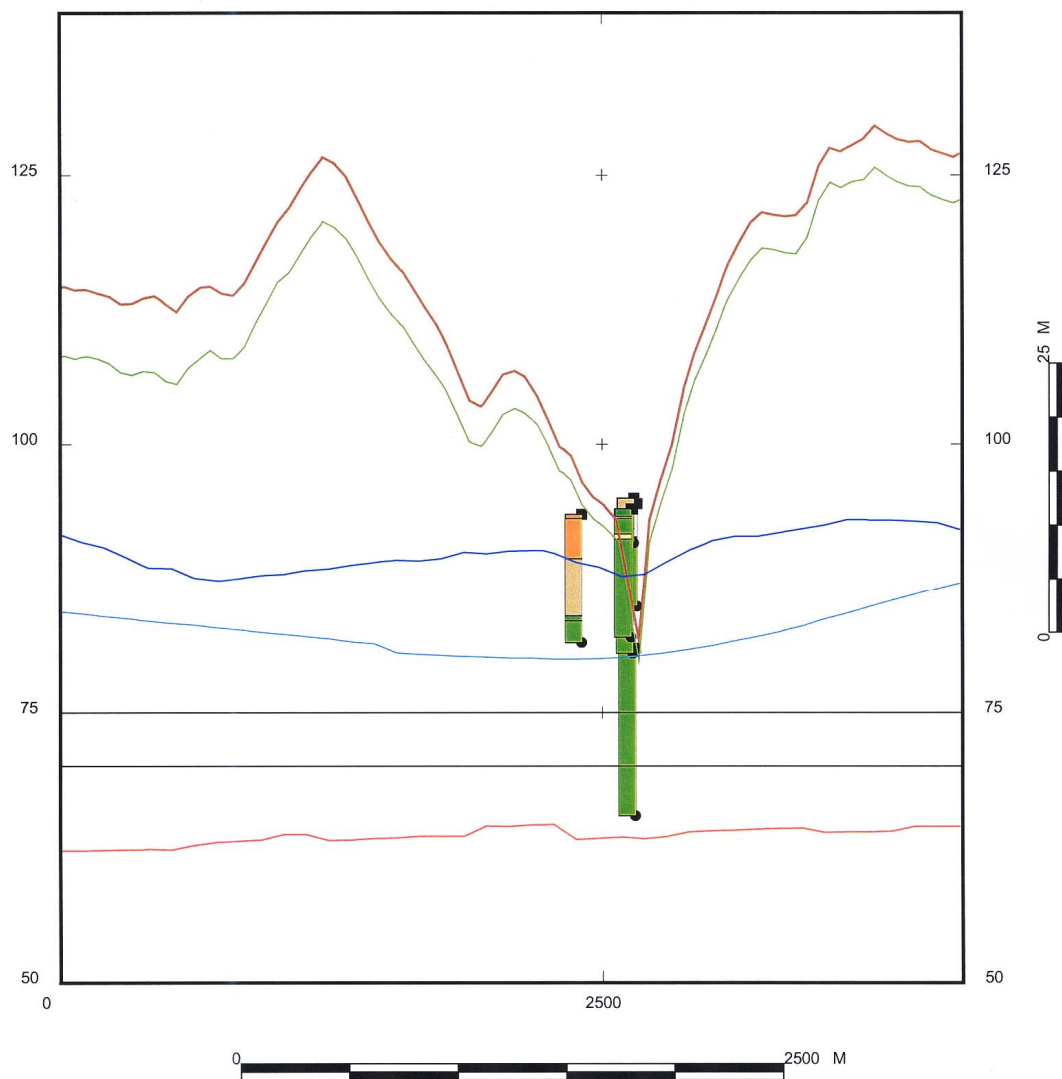
Coupe transversale CS6



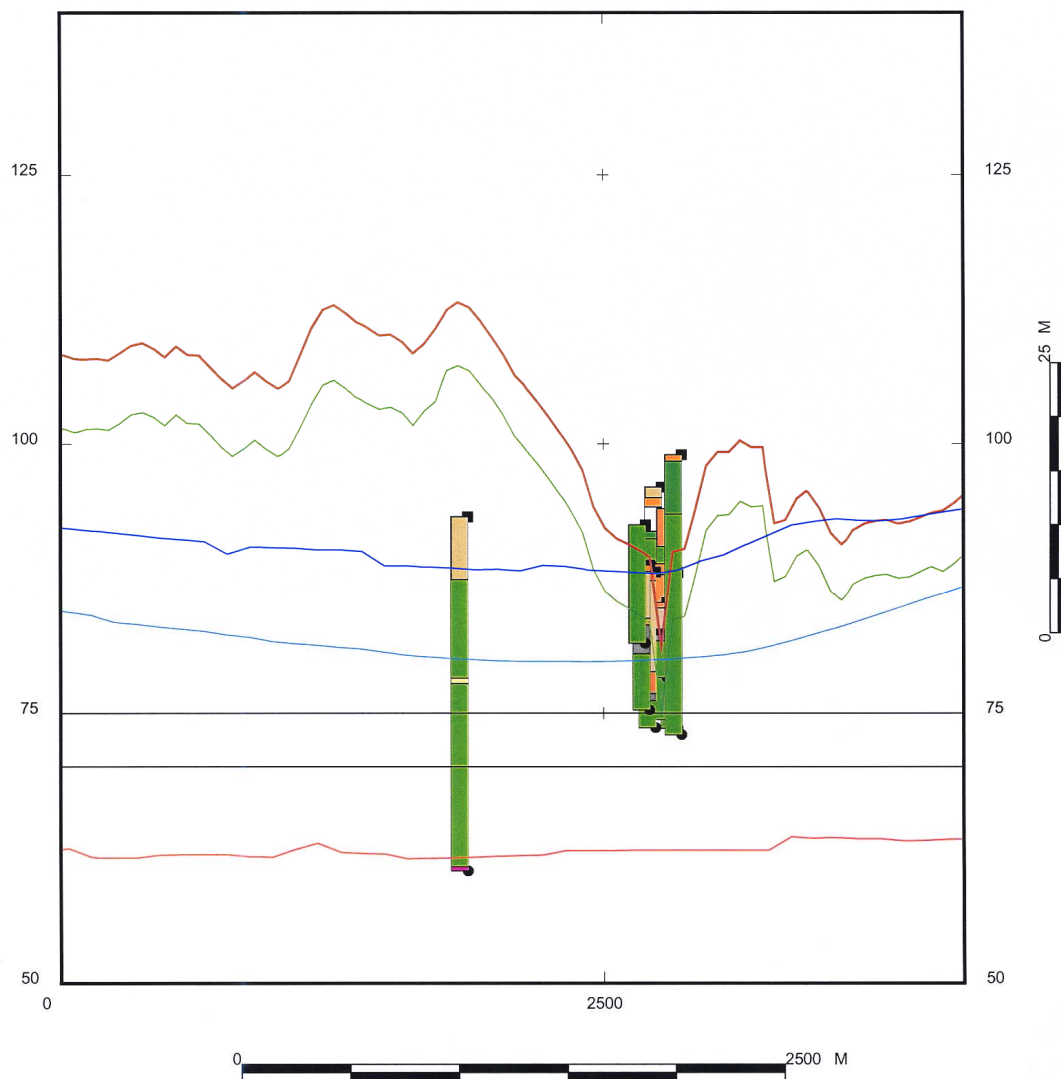




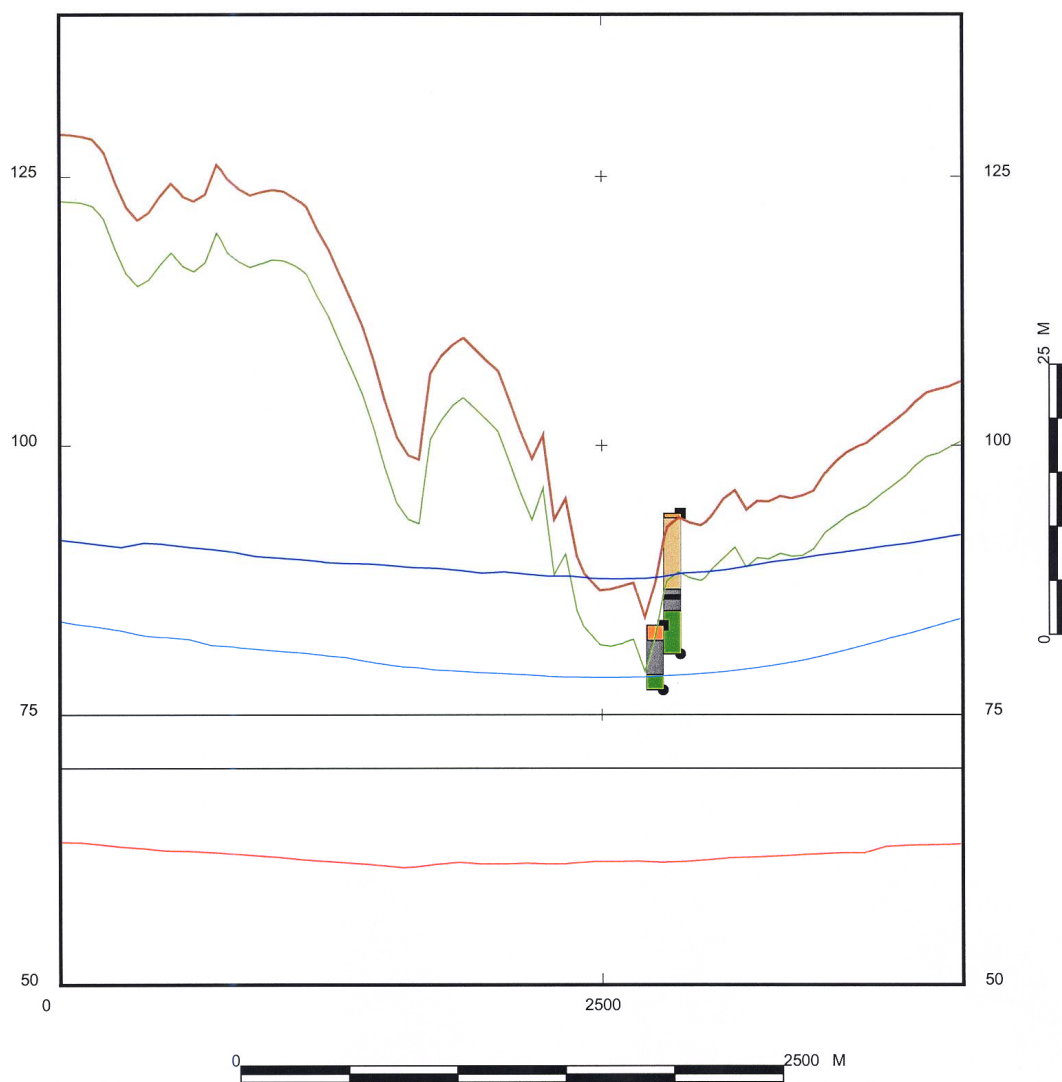
Coupe transversale CS9



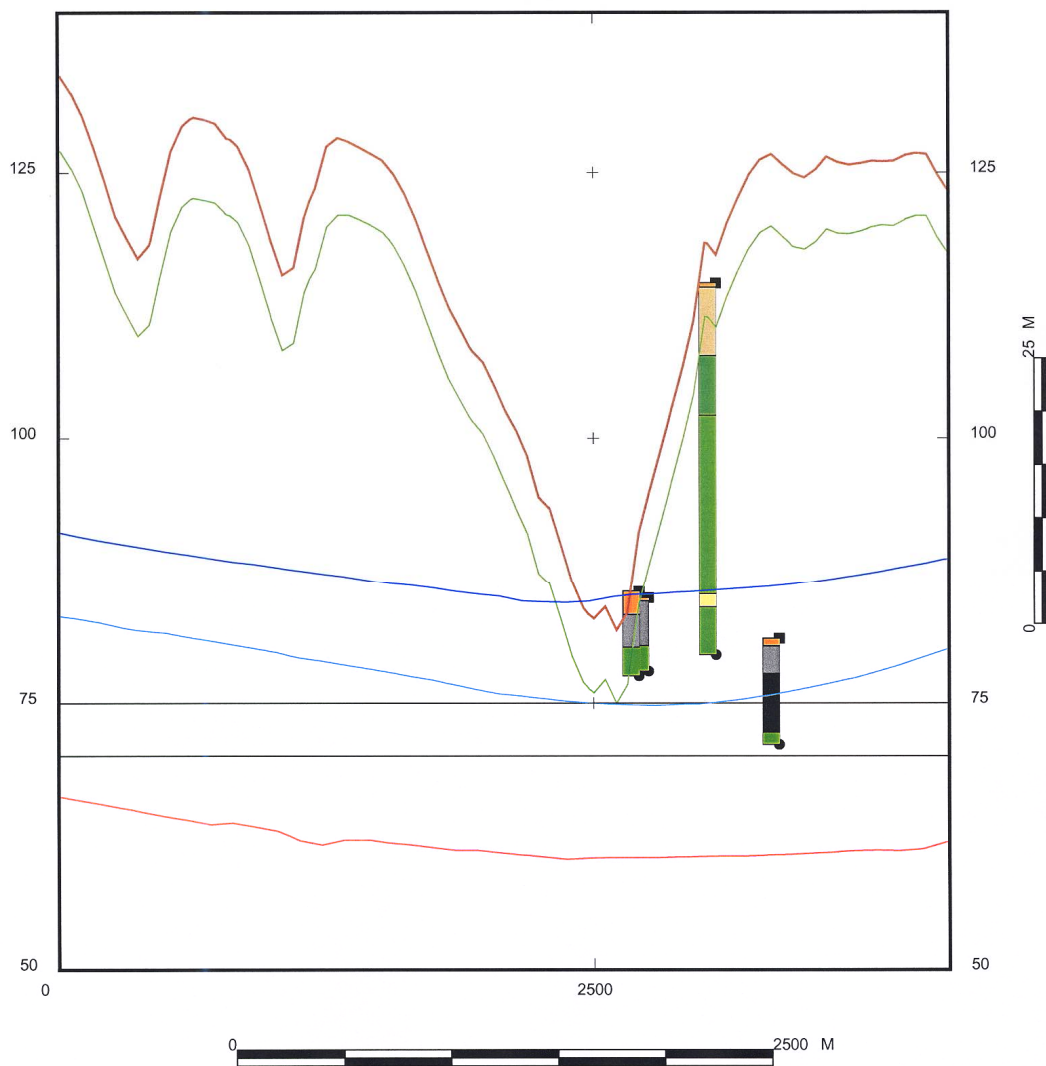
Coupe transversale CS10

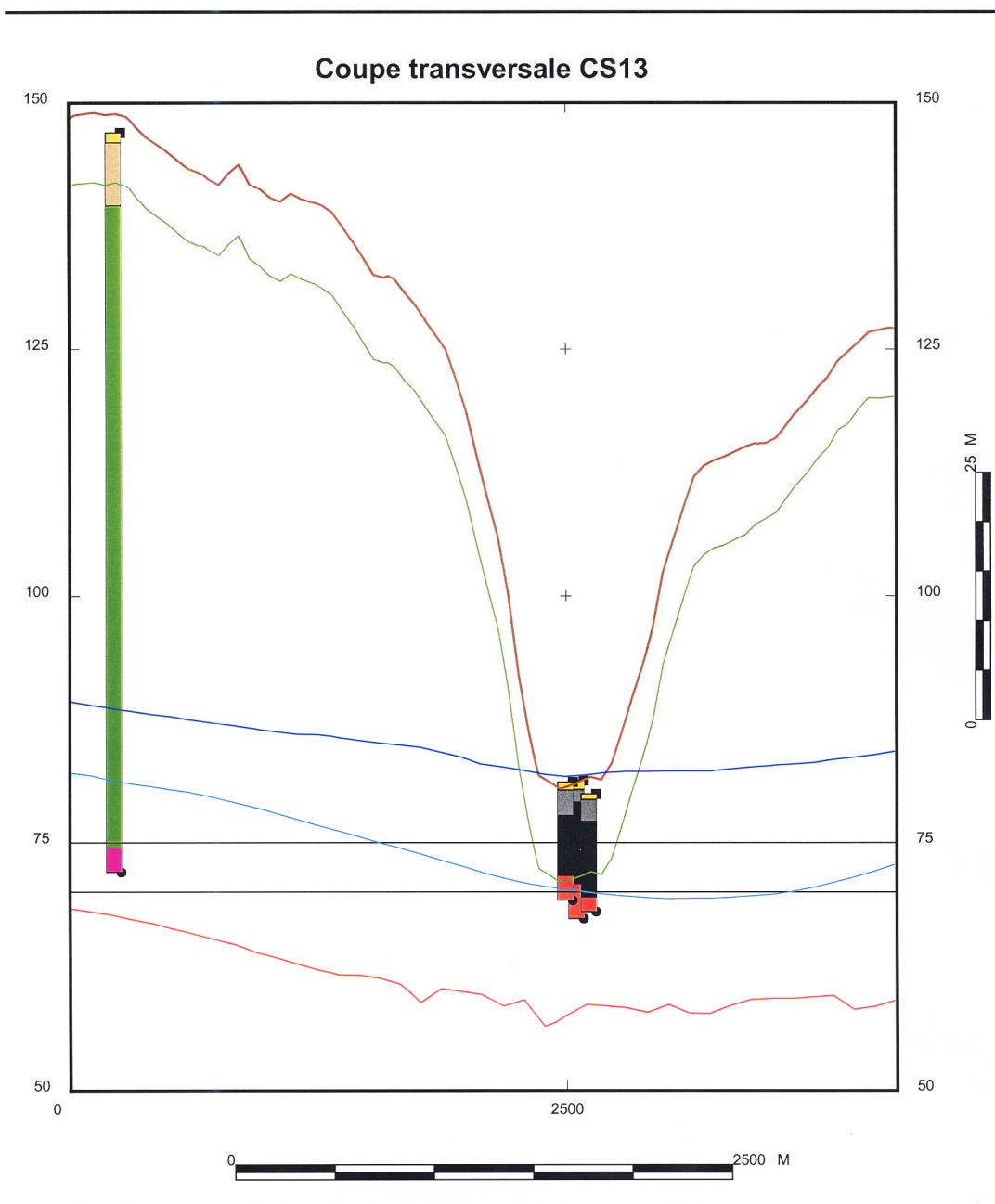


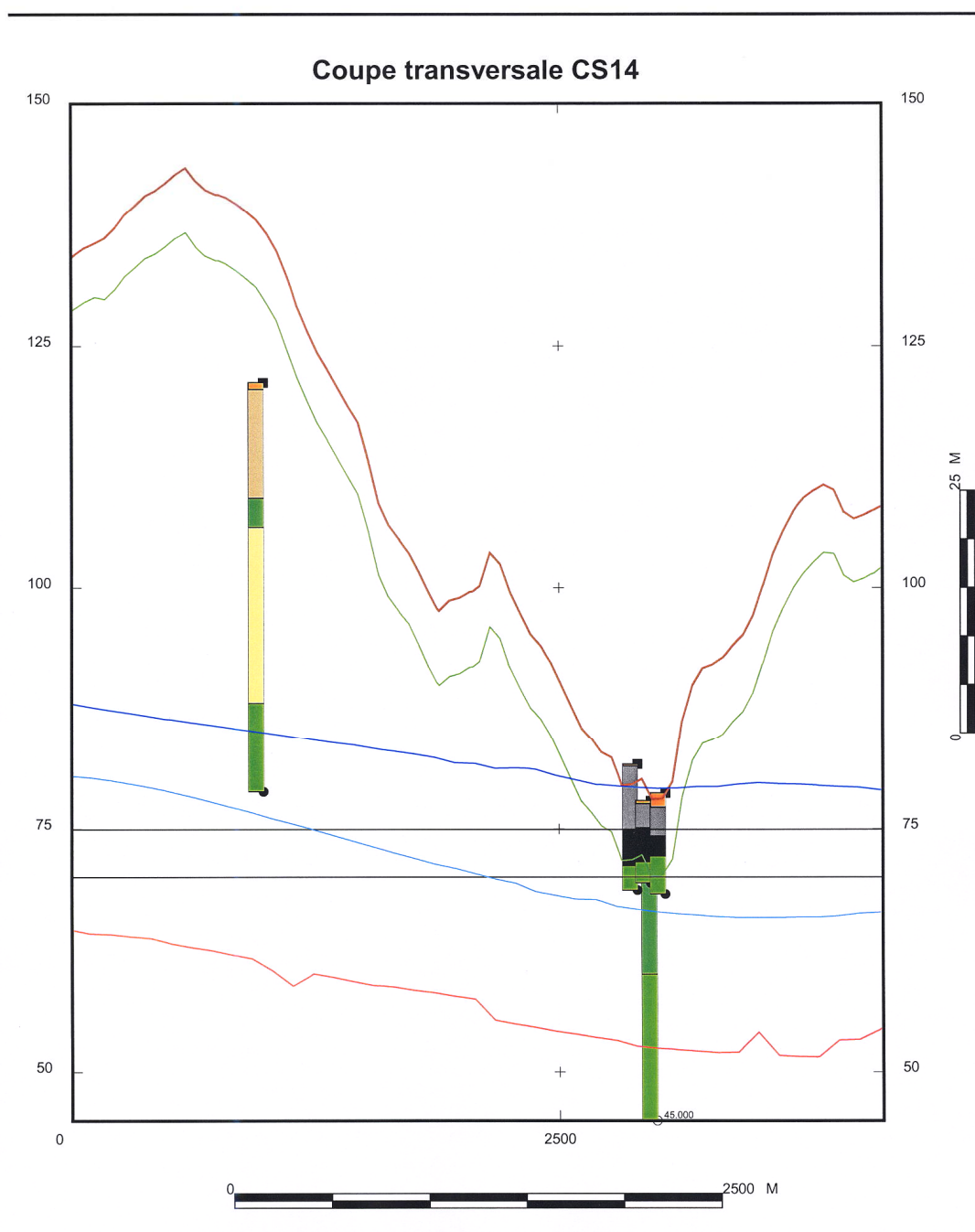
Coupe transversale CS11

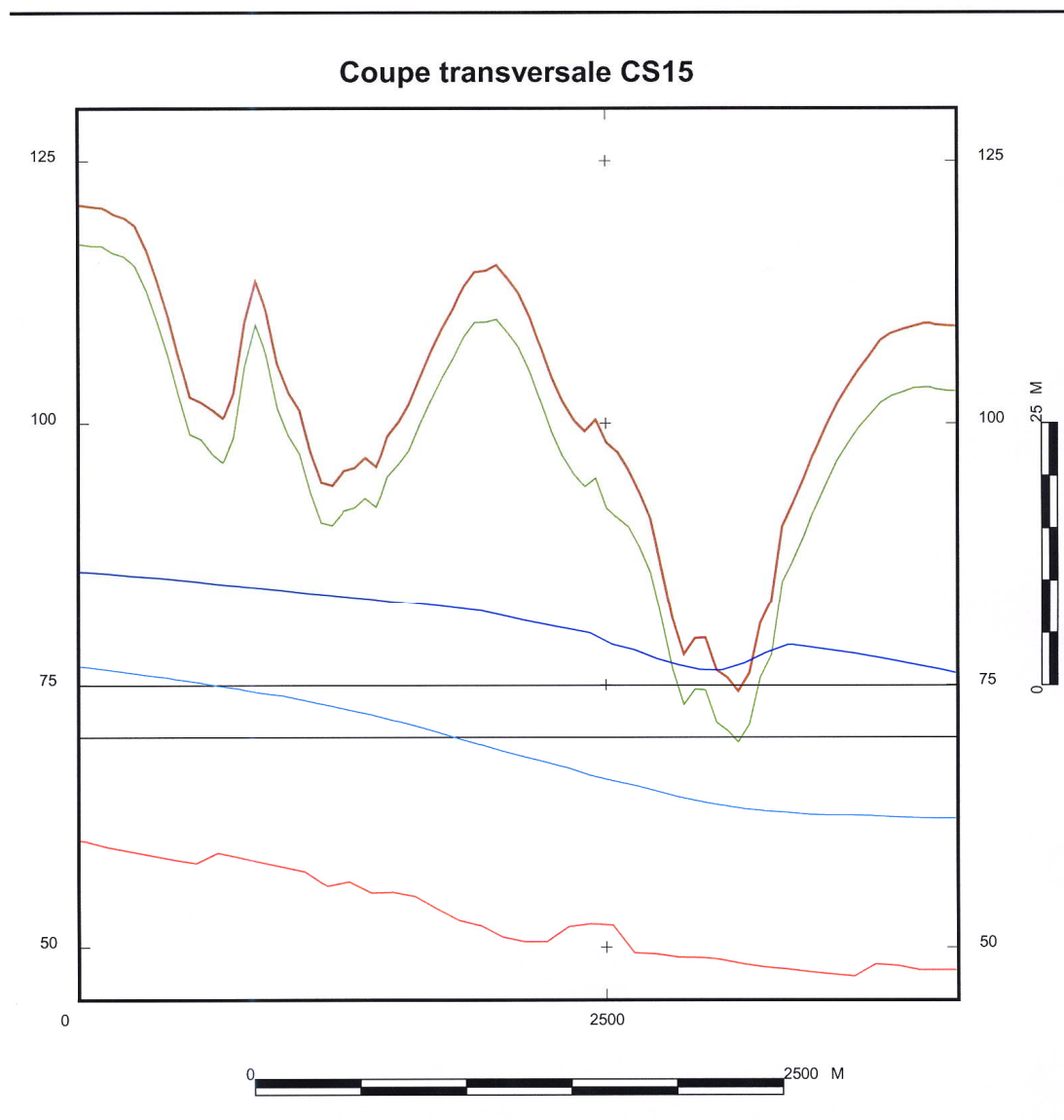


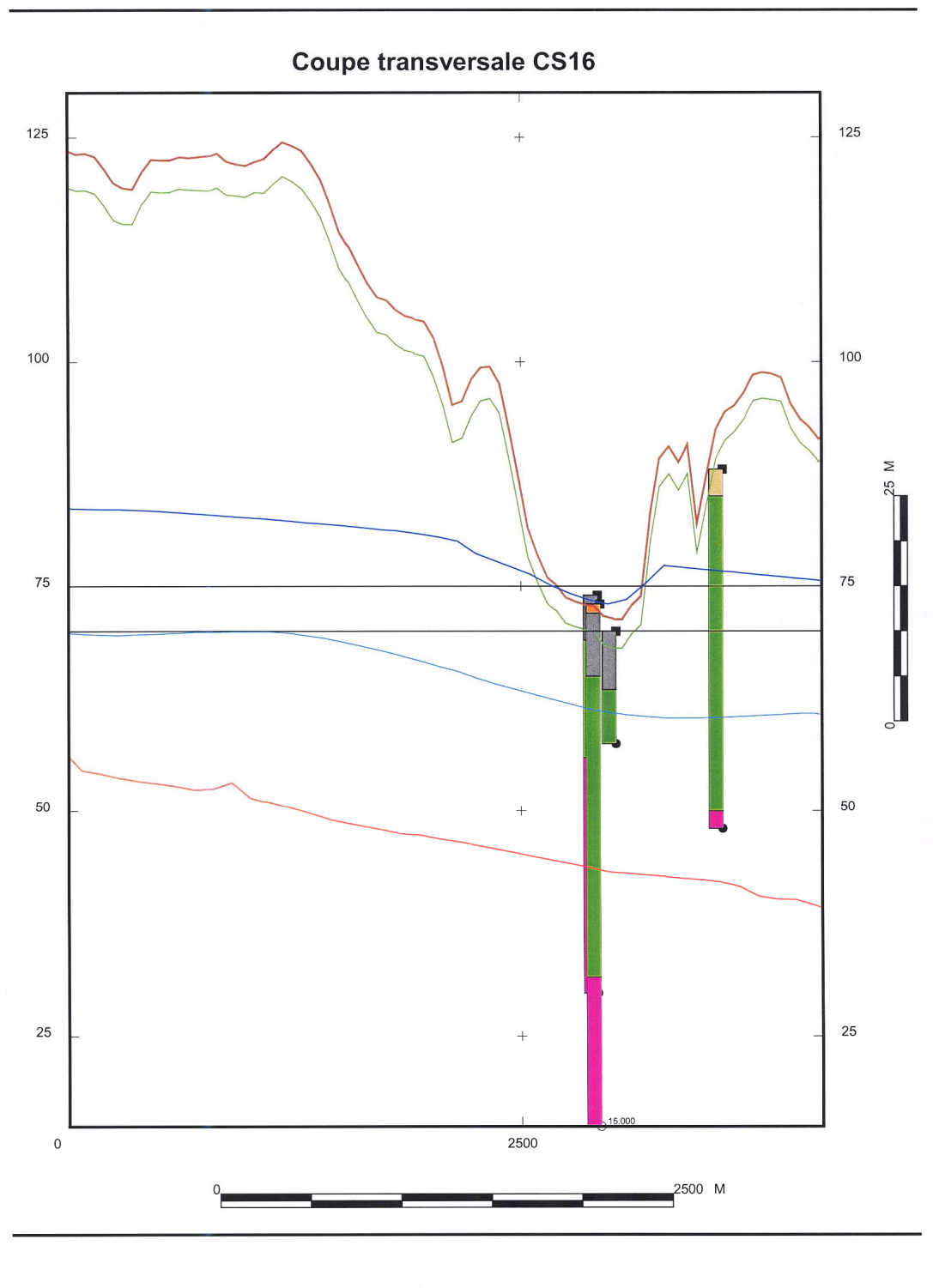
Coupe transversale CS12

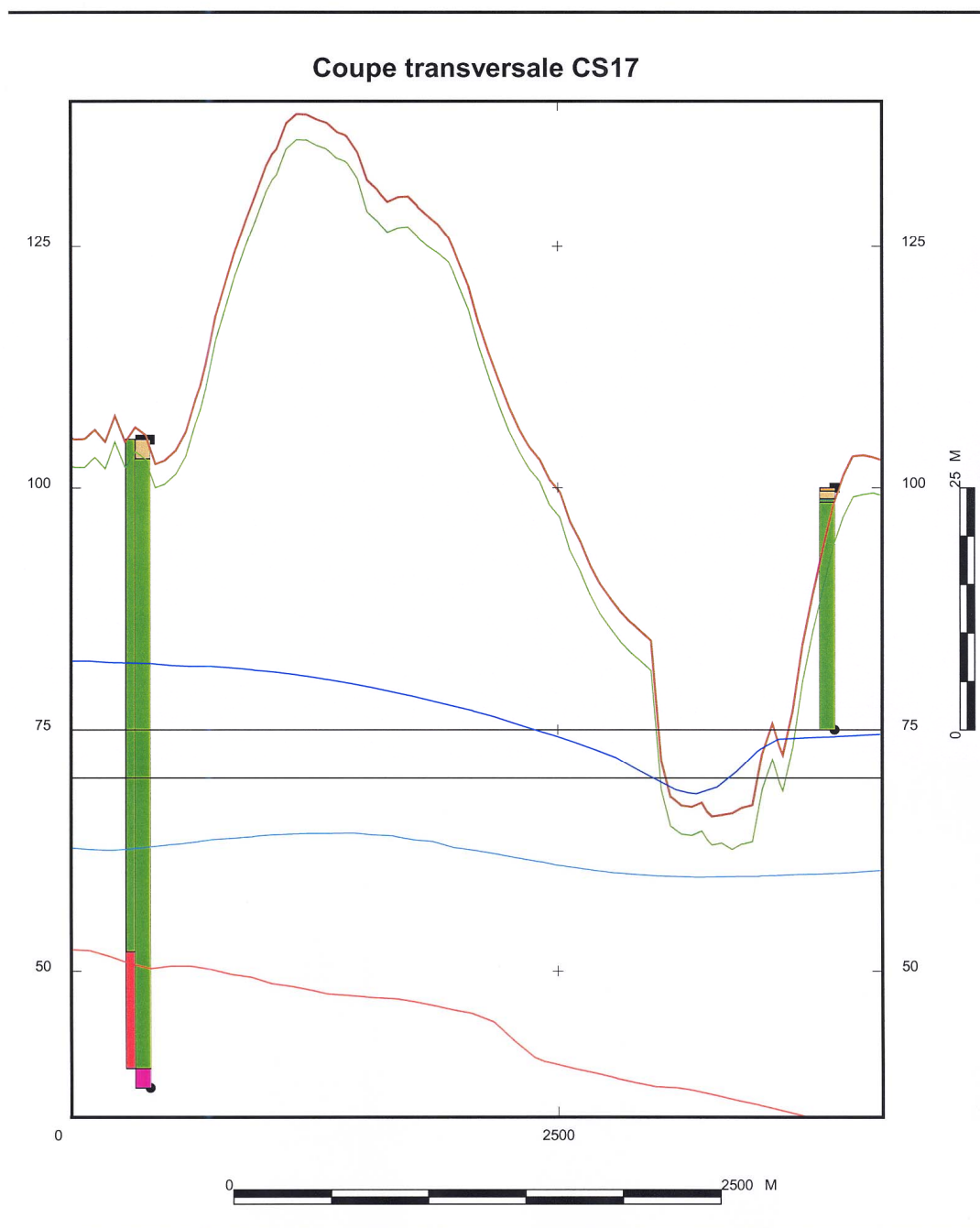




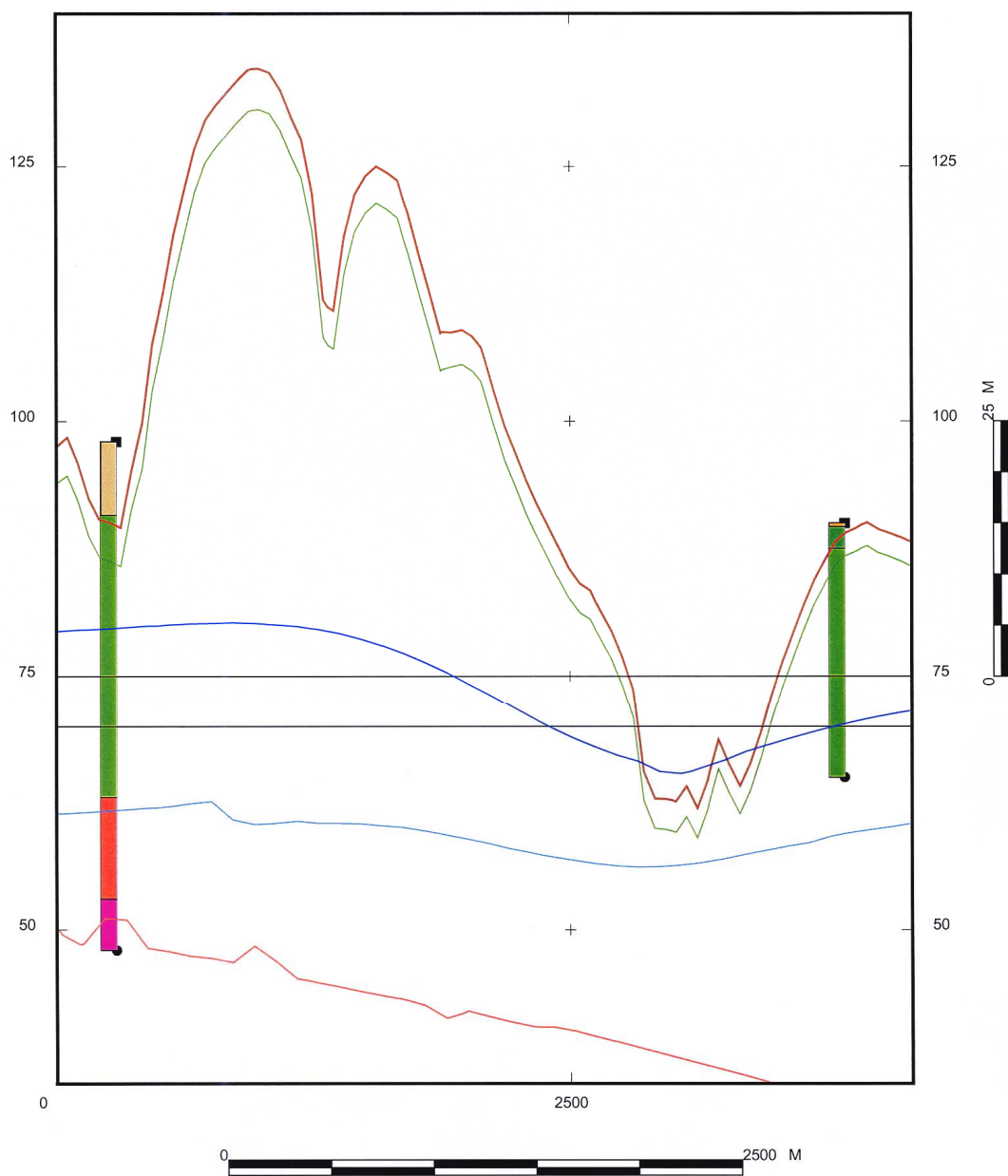




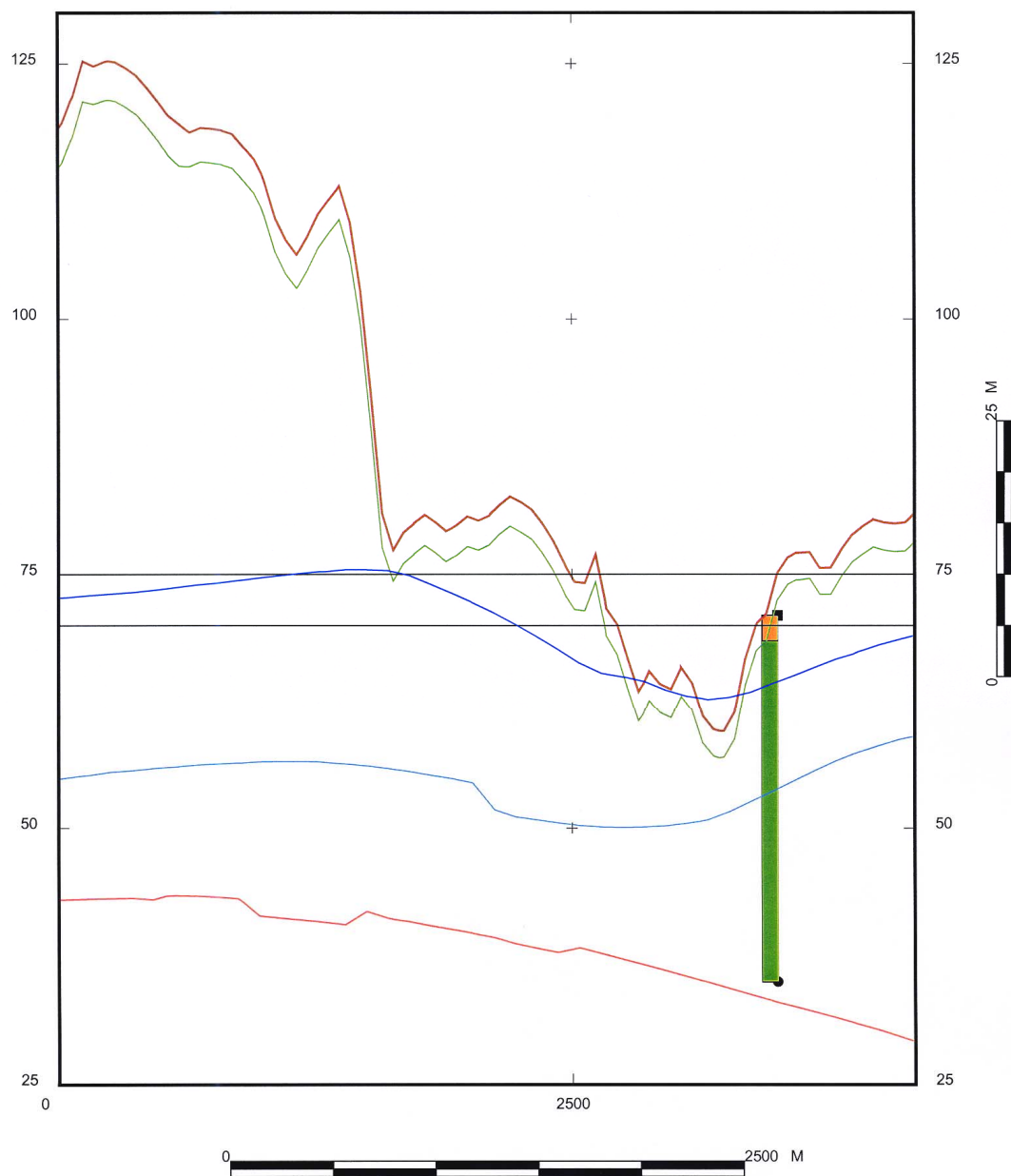


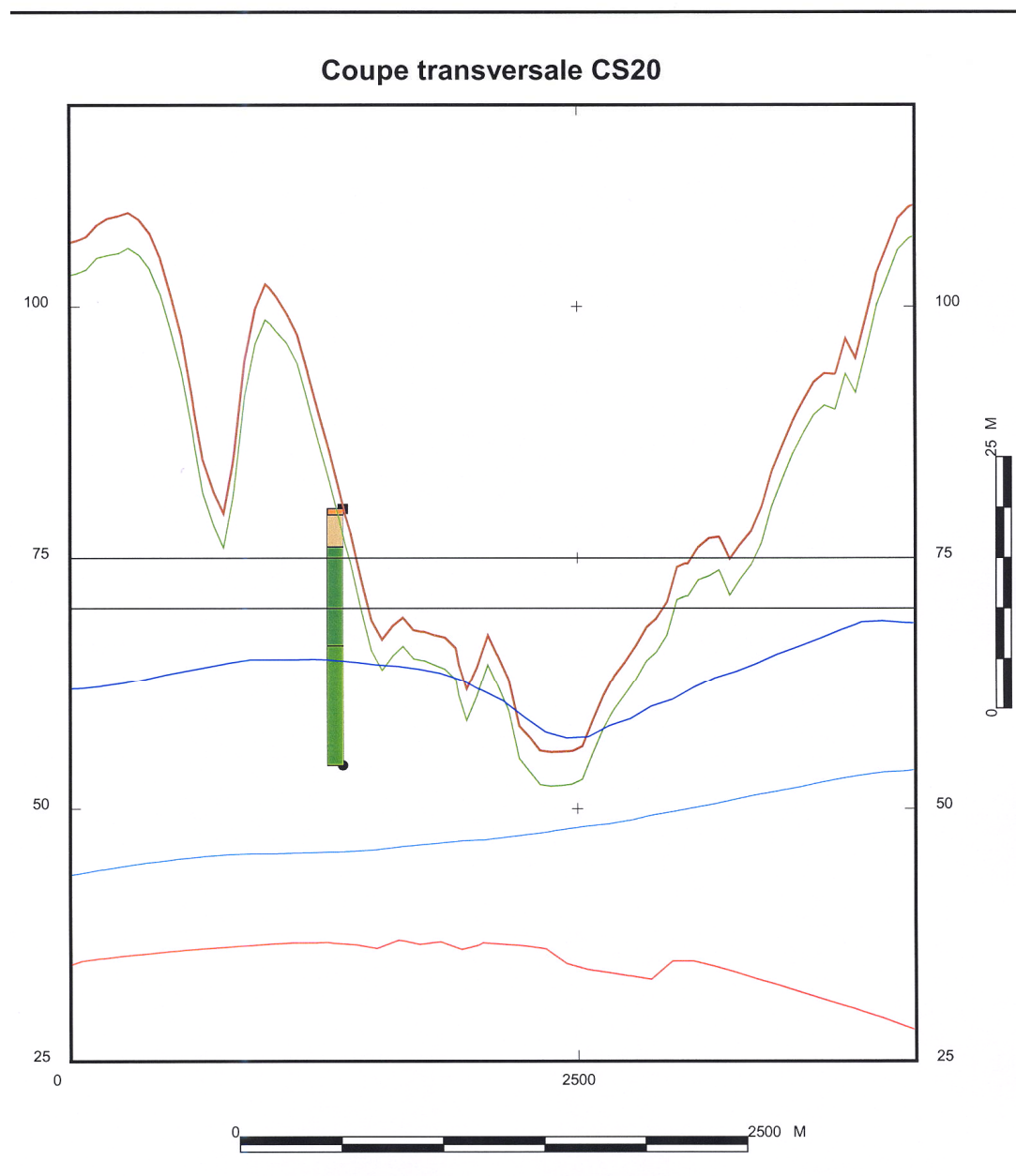


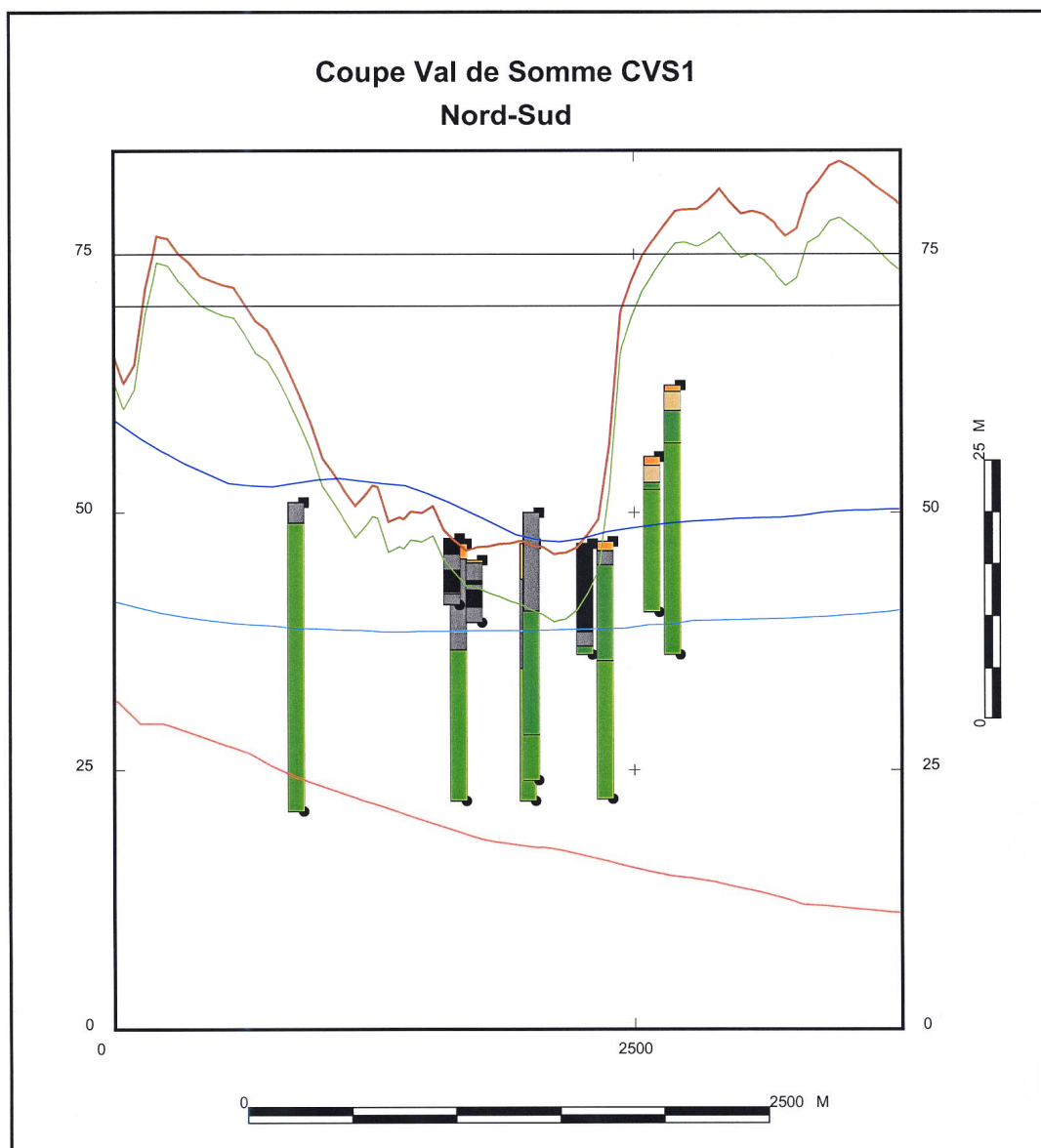
Coupe transversale CS18



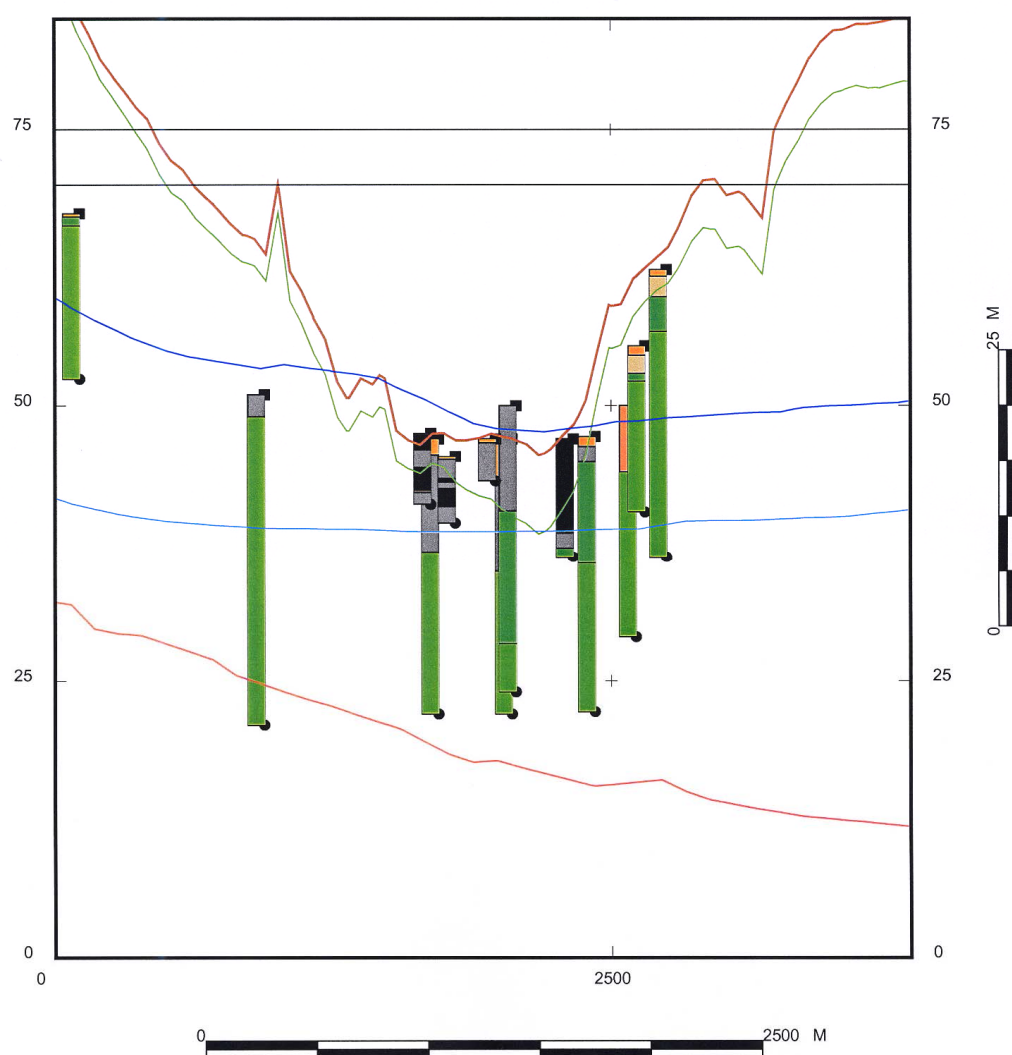
Coupe transversale CS19



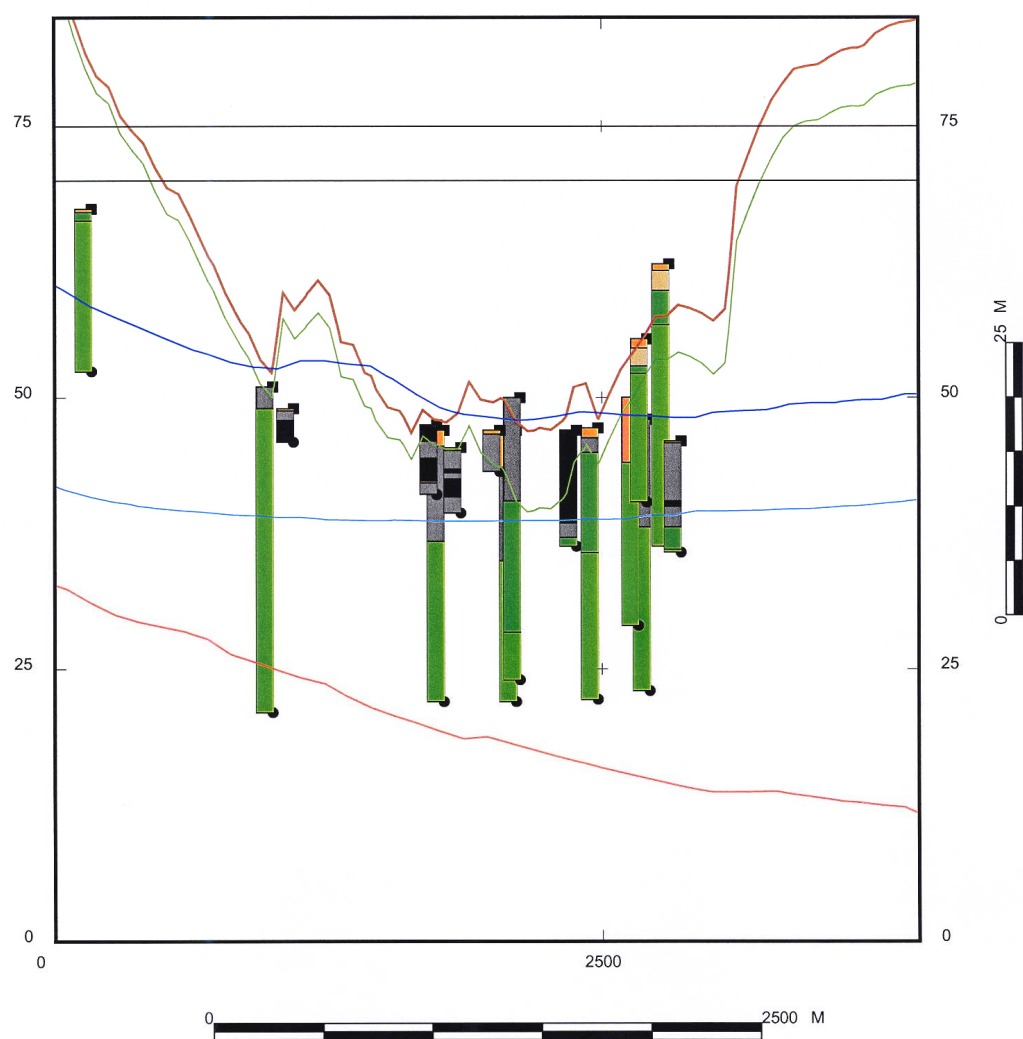




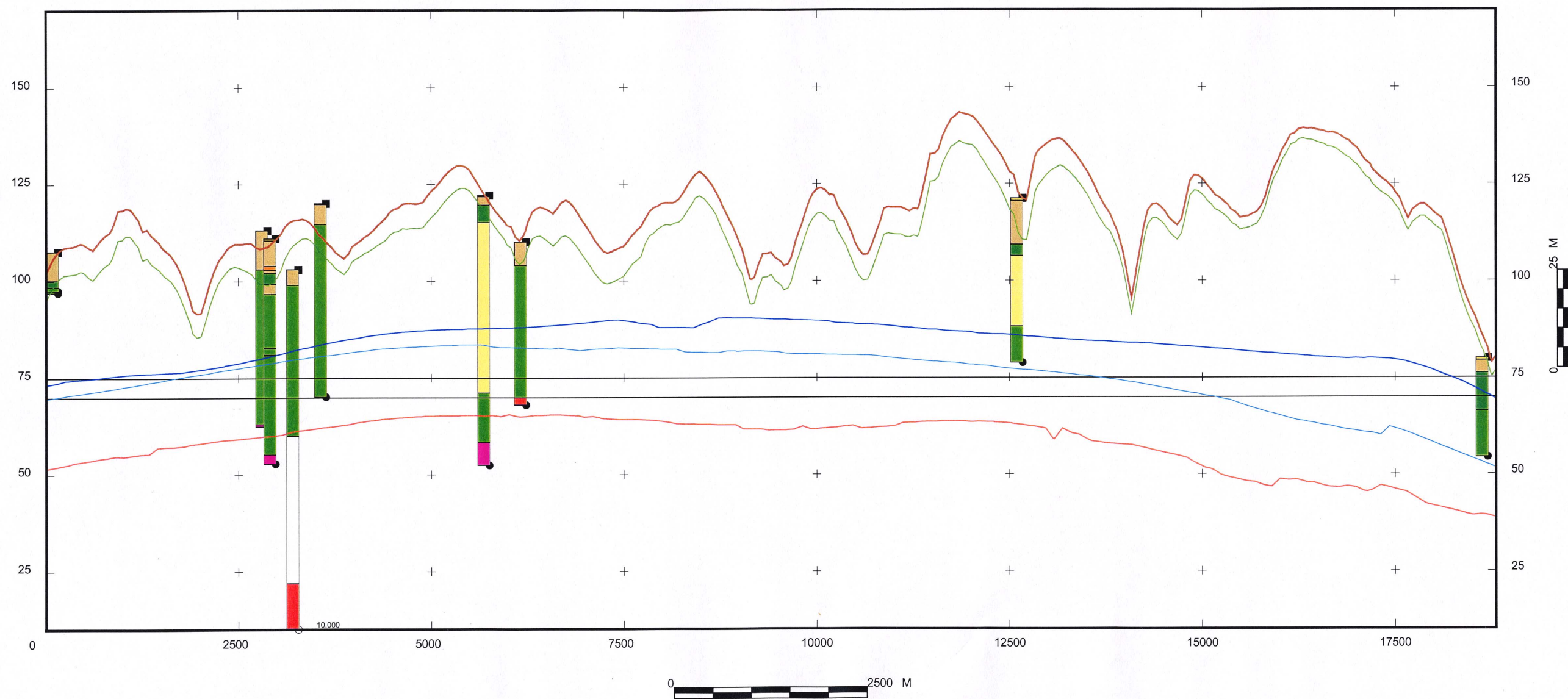
**Coupe Val de Somme CVS2
Nord-Sud**



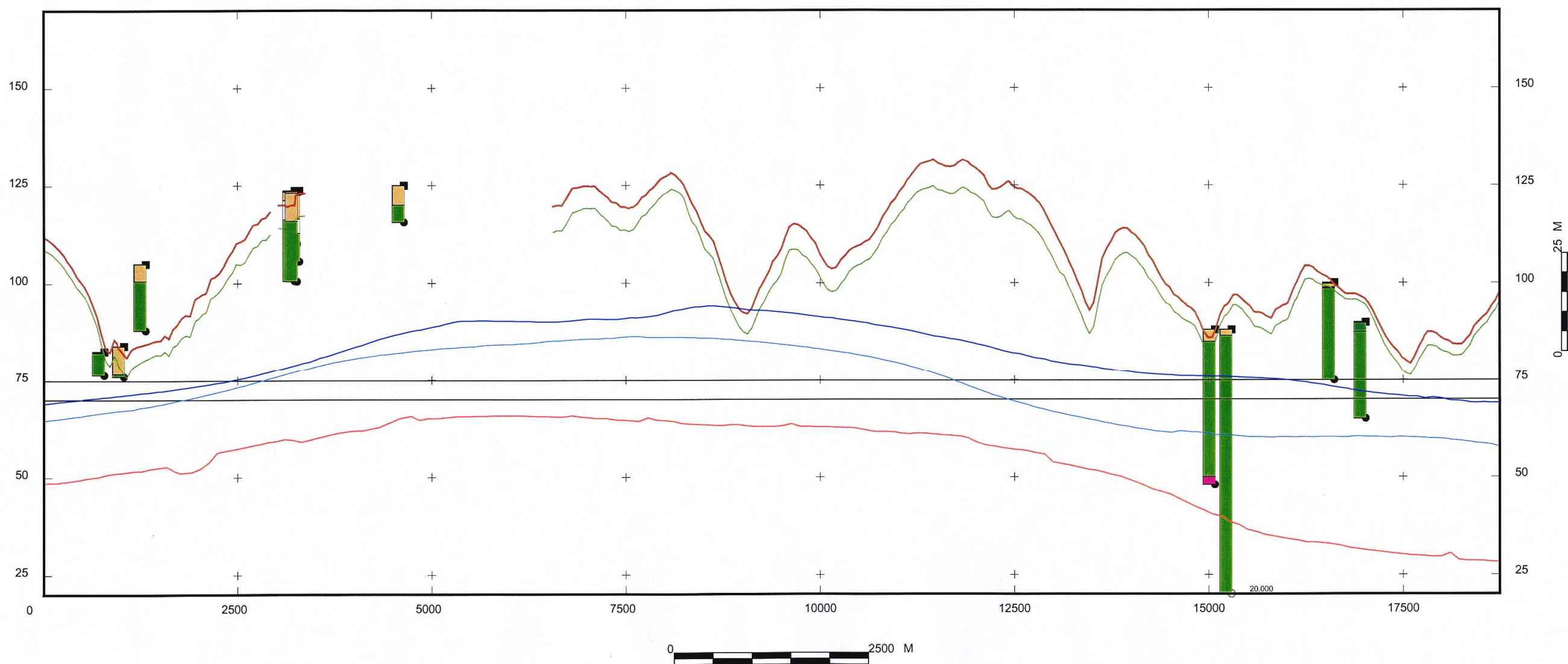
**Coupe Val de Somme CVS3
Nord-Sud**



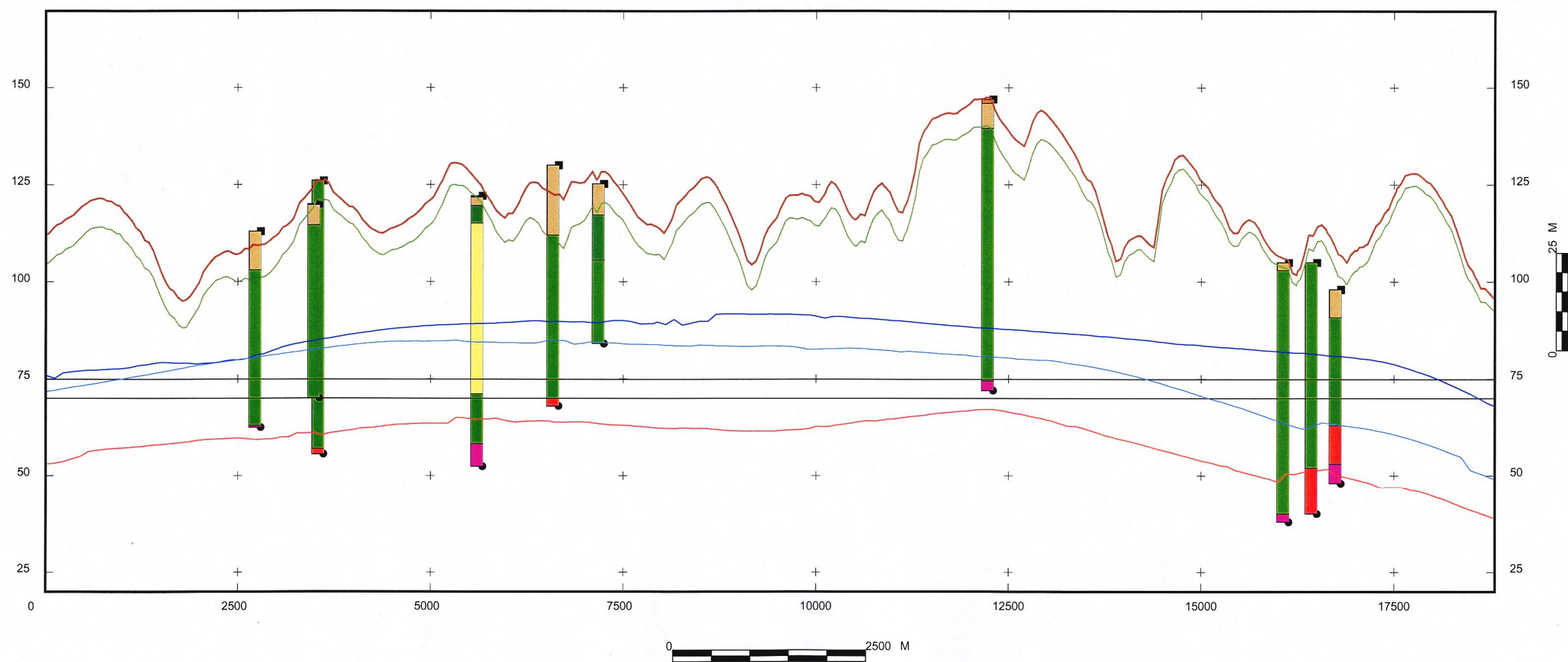
Coupe longitudinale L1
(axe du tunnel selon projet)



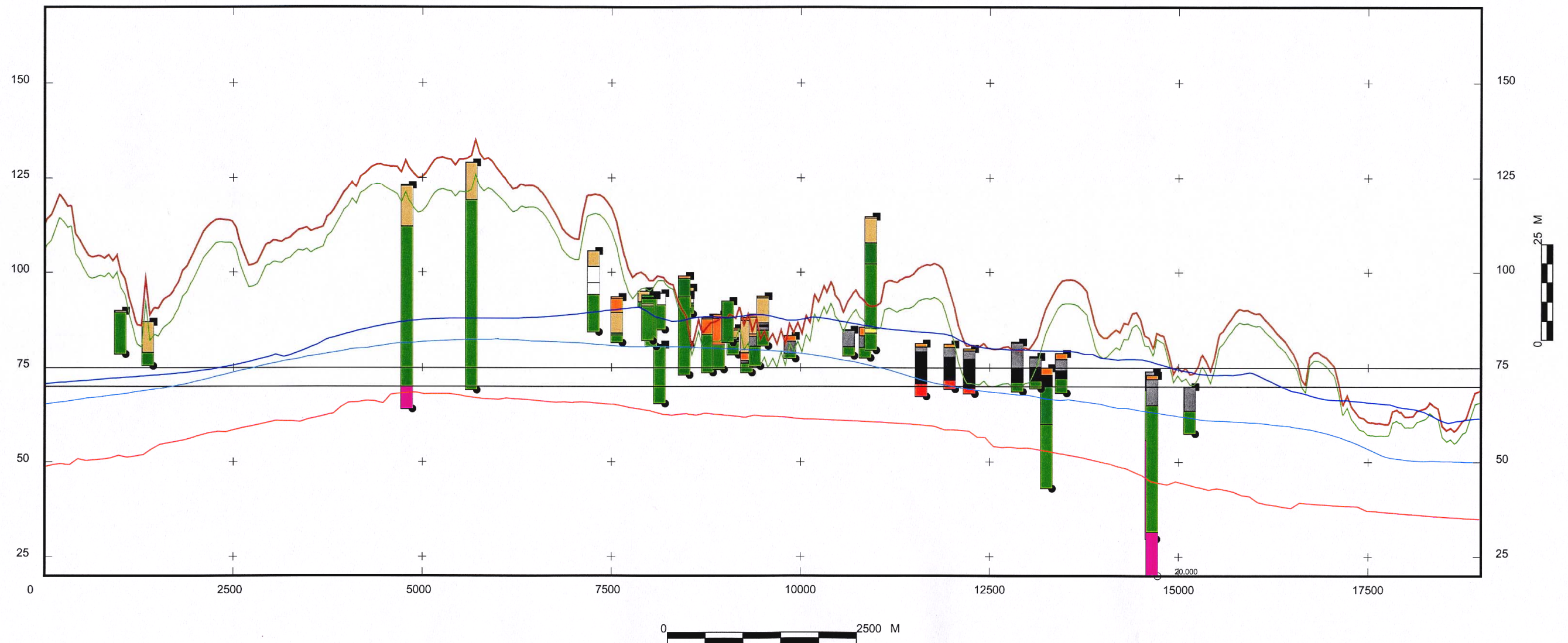
Coupe longitudinale L2
(650 m à l'ouest de l'axe du tunnel selon
projet)



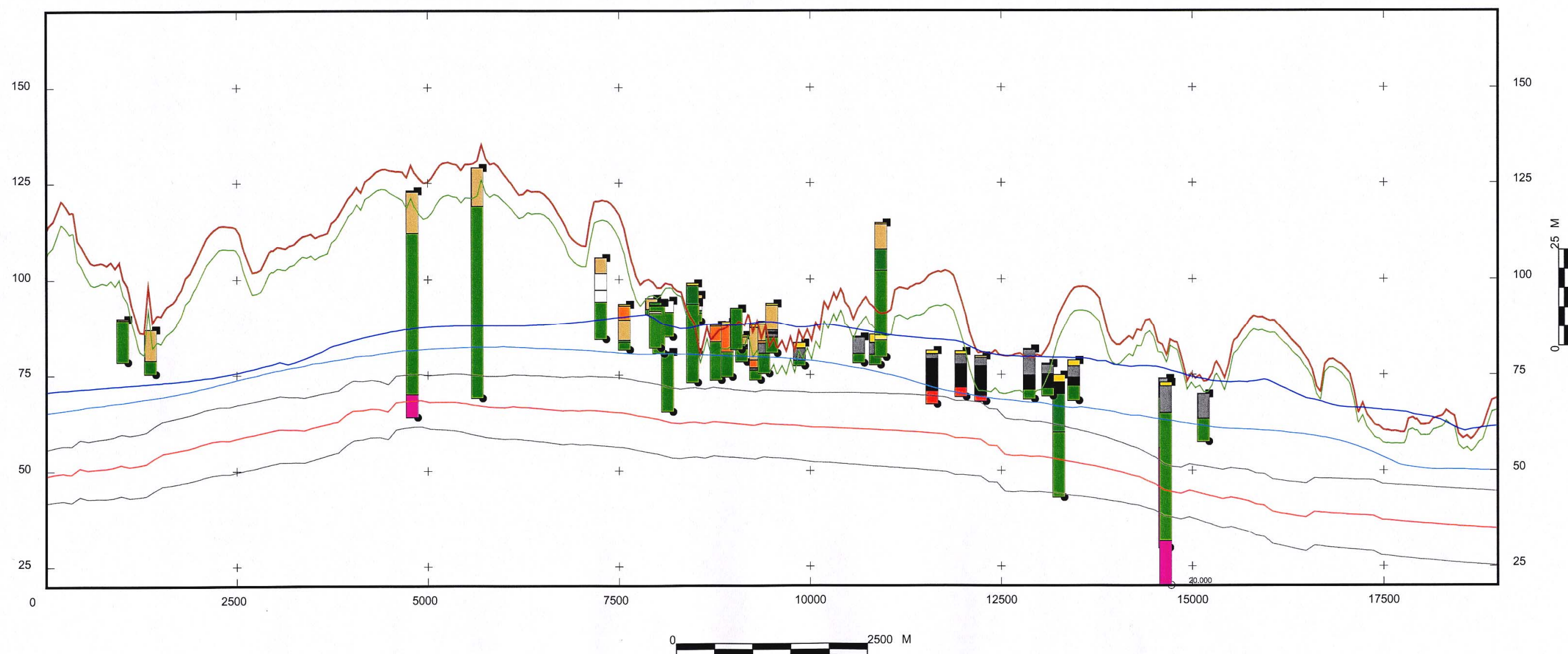
Coupe longitudinale L3
(3 km à l'est de l'axe du tunnel selon
projet)

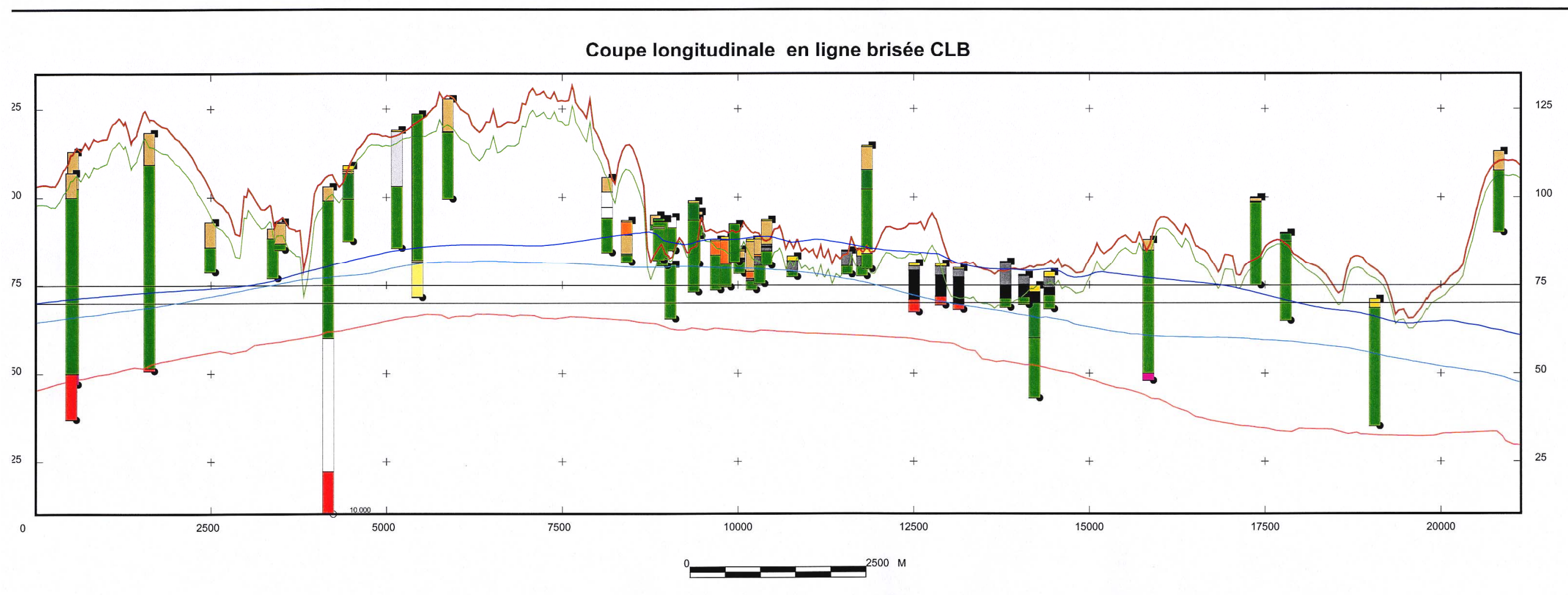


Coupe longitudinale L4
(CL3 décalée vers l'ouest)



Coupe longitudinale L4
avec marge d'incertitude sur le toit des marnes en
gris







Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Nord-Pas-de-Calais
Synergie Park
6 ter rue Pierre et Marie Curie
59260 - Lezennes – France
Tél. : 03 20 19 15 40