



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



direction
départementale
de l'Équipement

Meurthe-et-Moselle



DOCUMENT PROVISOIRE

*Cartographie des formations superficielles de
la communauté urbaine du Grand Nancy en
phase préparatoire à l'élaboration des PPR*

Rapport d'avancement 2001

Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 01-URB-101

Mai 2002
BRGM/RP-51651-FR





Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



direction
départementale
de l'Équipement

Meurthe-et-Moselle



DOCUMENT PROVISOIRE

Cartographie des formations superficielles de la communauté urbaine du Grand Nancy en phase préparatoire à l'élaboration des PPR

Rapport d'avancement 2001

R. Martin, G. Fourniguet, J-C. Baubron

Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 01-URB-101

Mai 2002

BRGM/RP-51651-FR



Commentaire [B1] : Les cadres de la page sont liés à ce paragraphe !

Mots clés : Communauté Urbaine du Grand Nancy, formations superficielles, GDM, cartographie, modèle géométrique.

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

R. Martin, G. Fourniguet, J-C. Baubron (2002) – Cartographie des formations superficielles de la Communauté Urbaine du Grand Nancy – Rapport d’avancement 2001. Rapport BRGM/RP-51651-FR, 41 pages, 11 figures, 2 tableaux, 3 annexes.

© BRGM, 2002. Ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

En préalable à l'établissement des PPR (Plans de Prévention des Risques) mouvements de terrains, il convient de disposer de documents cartographiques pertinents et homogènes pour l'ensemble du bassin de Nancy et de sa région, concernant les informations géologiques de base nécessaires à cette cartographie. En particulier, les premières formations du sous-sol qui soient susceptibles de présenter des désordres sont les formations superficielles, pour lesquelles il n'existe actuellement pas de cartographie. Il convient donc d'élaborer des documents synthétiques qui seront transmis aux bureaux d'étude, en charge de réalisation des cartes d'aléas.

La morphologie (pentes accentuées) et la nature des terrains (matériaux plastiques), alliés aux écoulements d'eau de surface et souterrains constituent des facteurs d'instabilité qui pénalisent l'aménagement urbain des territoires en charge de la Communauté Urbaine du Grand Nancy (CUGN). La cartographie actuelle de l'aléa (synthétisée par l'atlas départemental des mouvements de terrain édité par le service de l'aménagement, DDE 54) ne permet pas une restitution précise compatible avec la transcription nécessitée par l'échelle des documents d'urbanisme produits sous la responsabilité de la Communauté Urbaine du Grand Nancy.

Sur le territoire de la Communauté Urbaine du Grand Nancy, les matériaux affectés par les mouvements de terrain concernent d'abord, et dans la majorité des cas, les formations superficielles. L'occurrence et l'amplitude des phénomènes sont directement en relation avec la présence de ces formations, leur nature et leur épaisseur. Or, la CUGN dispose sur son territoire d'une base de données importante issue de l'exploitation de très nombreux sondages de reconnaissance, regroupant des informations assez détaillées sur le sous-sol. L'exploitation de cette base doit servir à l'établissement de la cartographie de l'aléa afin d'en améliorer la qualité.

Le BRGM se propose donc, dans le cadre d'un programme traitant du sous-sol urbain, de synthétiser et d'analyser l'ensemble de la documentation disponible auprès des différents organismes, c'est à dire la banque des données du sous-sol gérée par le BRGM, la documentation provenant des études effectuées par le CETE, la banque de données nationale mouvements de terrains, et la base de données de la CUGN, gérée par l'ENSG. Cette synthèse s'accompagne d'un relevé systématique des désordres, tant observables sur les constructions, qu'issus de l'interprétation des affleurements accessibles.

Il en résulte une cartographie des affleurements des formations superficielles, une modélisation de la géométrie de celles-ci pour les communes du Grand Nancy, laquelle modélisation est présentée sous forme de cartes isopaques. Concrètement, la modélisation géométrique consiste à créer un modèle numérique des formations superficielles à partir d'une interpolation des données factuelles (base ASGA), par l'établissement d'une méthodologie pour la construction du modèle géométrique des formations superficielles, à application géotechnique pour la Communauté Urbaine du Grand Nancy. Cette modélisation est conduite sous GDM[®], qui permet une restitution spatiale tridimensionnelle prenant en compte les incertitudes liées à la dispersion des points de connaissance.

Commentaire [LV2] : Pour réactualiser la table des matières, mettre le curseur dedans et appuyer sur F9

Sommaire

Synthèse	3
Sommaire.....	5
Liste des figures	6
Liste des tableaux	6
Introduction	9
1. Contexte et objectif	11
1.1 l'agglomération urbaine du Grand Nancy.....	11
1.2 De l'utilité d'une cartographie des formations superficielles	11
1.3 Objectifs de l'étude	13
2. La base de l'ASGA et le travail de collecte de données complémentaires.....	15
2.1 Description de la base	15
2.2 Analyse et traitement Préliminaire de la base de données de l'ASGA.....	16
2.3 La Collecte de données complémentaires.....	17
2.4 Recensement des désordres observés et des indices hydrogéologiques	17
3. Classification des formations superficielles.....	19
3.1 Contexte géologique et hydrogéologique	19
3.2 Les formations superficielles	19
3.2.1 Les alluvions anciennes et modernes.....	20
3.2.2 Les formations de pente.....	23
3.2.3 Les formations de plateau.....	24
3.2.4 Les remblais.....	24
3.3 Conclusions pour la cartographie.....	25
4. Caractérisation géotechnique des formations superficielles	27
4.1 Relations et corrélations dans les sols : remarques préliminaires	27
4.2 Les informations de la base et analyse.....	28
4.3 Principales conclusions.....	35

5. Construction d'un modèle géométrique : cartographie des iso-épaisseurs des différents types de formations superficielles	37
5.1 Traitements géostatistiques des données :	37
5.2 Construction d'un modèle géologique	38
Conclusion	41

Commentaire [LV3] : Pour réactualiser la liste des figures, mettre le curseur dedans et appuyer sur F9

Liste des figures

Figure 1 : Synthèse des descriptions de la lithologie des formations superficielles des sondages de la base de données de l'ASGA sur la commune de Vandoeuvre.....	21
Figure 2 : Synthèse des descriptions de la lithologie des formations superficielles des sondages de la base de données de l'ASGA sur la commune de Laxou	22
Figure 3 : Coupe schématique montrant le fauchage, le laminage des couches et la géométrie des éboulis sur le flan de la côte Bajocienne.	23
Figure 4 : Diagramme de Casagrande pour les alluvions anciennes.....	31
Figure 5 : Diagramme de Casagrande pour les formations de pente	31
Figure 6 : Diagramme de Casagrande pour les alluvions modernes.....	32
Figure 7 : Diagramme de Casagrande pour les formations de plateau	32
Figure 8 : Classification USCS pour des échantillons d'alluvions	33
Figure 9 : Classification USCS pour des échantillons d'éboulis	33
Figure 10 : Classification USCS pour les échantillons des formations de plateau	34
Figure 11 : Méthodologie de construction du modèle géométrique.	39

Commentaire [LV4] : Pour réactualiser la liste des tableaux, mettre le curseur dedans et appuyer sur F9

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des essais d'identification des formations superficielles présents dans la base de l'ASGA.....	28
Tableau 2 : Récapitulatif de l'analyse des essais d'identification sur des échantillons de formations superficielles.	30

Liste des annexes

- Annexe 1 - Illustration des principaux désordres recensés dans les communes de Laxou, Vandoeuvre-lès-Nancy, Villers-lès-Nancy, Malzéville et Maxéville – *Extrait des fichiers Excel de recensement des désordres*
- Annexe 2 - Principaux résultats de l'analyse des données d'essai d'identification d'échantillons de formations superficielles de la base de l'ASGA.
- Annexe 3 - Interpolation par la géostatistique.

Introduction

La prévention des risques, qu'ils soient naturels, amplifiés, voire créés par une industrialisation et une urbanisation croissantes, est une composante majeure des décisions d'aménagement du territoire.

Dans ce domaine, l'abondance de données numériques et de modèles sophistiqués pour analyser les risques et les aléas est de première importance. La réponse à la problématique de la gestion des risques passe par la combinaison et la prise en compte de très nombreux paramètres géologiques (séismes, glissements et éboulements de terrain), climatiques, géographiques et démographiques.

L'étape finale aboutit à l'établissement d'une cartographie aussi fine que possible du risque et donc à la détermination de zones particulièrement vulnérables.

L'agglomération de Nancy occupe un vaste territoire d'environ 100 km², dont l'essentiel est inscrit dans les épandages alluviaux de la Meurthe. La morphologie (pentes accentuées) et la nature de certains terrains (matériaux plastiques), alliés aux écoulements d'eau de surface et souterrains constituent des facteurs d'instabilité qui pénalisent l'aménagement urbain. La cartographie actuelle de l'aléa (synthétisé par l'atlas départemental des mouvements de terrain édité par le Service de l'Aménagement et de l'Urbanisme, DDE54) ne permet pas une restitution précise compatible avec la transcription nécessitée par l'échelle des documents d'urbanisme produits sous la responsabilité de la Communauté Urbaine du Grand Nancy (CUGN).

Par cette étude, le BRGM propose donc, en préalable à l'établissement des PPR (plans d'exposition aux risques) mouvements de terrains, de synthétiser l'ensemble de la documentation disponible auprès des différents organismes, c'est à dire la banque des données du sous-sol gérée par le BRGM, la documentation provenant des études effectuées par le CETE, la banque de données nationale mouvements de terrains, et la base de données de la CUGN, gérée par l'ENSG afin d'effectuer une restitution cartographique des formations superficielles. Cette cartographie, homogène pour l'ensemble des territoires de la CUGN, permettra aux bureaux d'étude en charge de la réalisation des cartes d'aléas mouvements de terrain naturels, de disposer d'un document de base unique.

1. Contexte et objectif

1.1 L'AGGLOMERATION URBAINE DU GRAND NANCY

L'agglomération de Nancy occupe un vaste territoire d'environ 100 km², dont l'essentiel est inscrit dans les épandages alluviaux de la Meurthe. L'extension urbaine moderne périphérique commence à occuper les côtes de Moselle à l'Ouest, (cuesta à regard Est formée par les calcaires du Bajocien et dont la base contient la formation ferrifère), les buttes-témoins de la même formation au Nord, et s'étend sur les basses collines argileuses et marneuses des puissantes séries du Jurassique inférieur et du Trias supérieur.

La prévention des risques, qu'ils soient naturels, amplifiés, voire créés par une industrialisation et une urbanisation croissantes, est une composante majeure des décisions d'aménagement du territoire. Or, la morphologie (pentes accentuées) et la nature de certains terrains (matériaux plastiques), alliés aux écoulements d'eau de surface et souterrains constituent des facteurs d'instabilité qui pénalisent l'aménagement urbain des communes du Grand Nancy. La cartographie actuelle de l'aléa (synthétisé par l'atlas départemental des mouvements de terrain édité par le Service de l'Aménagement et de l'Urbanisme, DDE54) ne permet pas une restitution précise compatible avec la transcription nécessitée par l'échelle des documents d'urbanisme produits sous la responsabilité de la Communauté Urbaine du Grand Nancy.

1.2 DE L'UTILITE D'UNE CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Les glissements sont la forme de mouvements de terrain la plus répandue sur le territoire du Grand Nancy.

Parmi les conditions d'apparition on distingue :

- Les conditions inhérentes au milieu : la nature et la structure des terrains, la morphologie du site, la pente topographique, éventuellement le pendage des couches et la présence d'un aquifère ;
- Les facteurs déclenchants qui peuvent être d'origine naturelle ou anthropique.

Sur le territoire de la Communauté Urbaine du Grand Nancy (CUGN), les matériaux affectés concernent dans la majorité des cas les formations superficielles. L'occurrence et l'amplitude des phénomènes sont donc directement en relation avec la présence de ces formations, leur nature et leur épaisseur.

Au plan technique, pour la mise en œuvre des études préalables à l'élaboration du zonage réglementaire, la priorité est accordée aux études générales (qualitatives) et à l'analyse en retour des événements historiques. Les études générales sont réalisées à partir de l'exploitation des données existantes, de l'analyse en retour des événements passés ou en cours, et des relevés de terrain. La priorité doit leur être accordée, conformément à l'article 3 du décret du 5 octobre 1995 qui précise que l'établissement du PPR tient compte de l'état des connaissances du moment. La démarche d'expert est privilégiée par rapport aux études spécifiques qui débordent du cadre du PPR. Le recueil et le premier traitement des données peuvent être réalisés en préalable par le service instructeur. En revanche, l'analyse de terrain, l'interprétation des phénomènes naturels et la caractérisation des aléas doivent être confiées à un spécialiste.

L'analyse et l'exploitation des données de la base de l'ASGA (essentiellement forages de type « géotechnique ») correspond à un premier traitement des données, mais nécessite déjà une analyse d'expert. Ce travail de synthèse doit être fourni aux spécialistes en charge de la cartographie de l'aléa (bureau d'études privé ou public) et doit permettre ainsi d'améliorer la qualité globale de l'étude d'aléa préalable à l'élaboration du zonage réglementaire. De plus, il est essentiel que les études techniques apportent une réponse adaptée et facilement transposable aux objectifs du PPR. C'est pourquoi le mode de représentation de l'aléa doit permettre une transposition claire et effective en terme de risque, ce qui facilitera l'élaboration du zonage réglementaire du PPR. En fournissant aux bureaux d'études en charge de la cartographie de l'aléa des documents de base identiques et bien formalisés tels que la cartographie des formations superficielles, cette démarche sera facilitée. Mais en aucun cas cette cartographie ne remplacera le travail d'analyse de terrain, l'interprétation des phénomènes et la caractérisation des aléas puis la formalisation par le bureau d'étude de sa démarche d'expertise, afin d'assurer la transparence des résultats.

L'approche probabiliste basée sur une analyse fréquentielle est difficile dans le cas de glissement de terrain comme à Nancy. Elle supposerait de disposer d'un nombre suffisant de données, ce qui est rare, la plupart des mouvements de terrain n'étant pas des processus répétitifs. A défaut de pouvoir accéder à une évaluation quantitative, en termes de fréquence ou de période de retour, l'estimation de l'occurrence d'un mouvement de terrain donné repose sur la notion de prédisposition du site à produire un événement donné dans un délai retenu. Cette approche nécessite de reconnaître les antécédents, les indices précurseurs observables et les symptômes d'évolution, d'où l'utilité d'une cartographie des formations superficielles puisque leur épaisseur et leur type constituent un indice et un moyen d'évaluation des symptômes.

1.3 OBJECTIFS DE L'ETUDE

Après une analyse et une synthèse de l'ensemble de la documentation disponible concernant les formations superficielles, cette étude conduit à une méthodologie pour la construction d'un modèle géométrique de représentation des formations superficielles, sur la base de données disponibles (essentiellement la base de l'ASGA, et les études du CETE). L'outil proposé pour ce travail est le logiciel GDM développé par le BRGM.

A cette phase analytique traitant des informations existantes il est additionné les informations issues de reconnaissances systématiques de terrain concernant les désordres apparents aux infrastructures. L'ensemble permet une restitution spatialisée, appuyée sur deux éléments nouveaux :

- une base de données sur les désordres apparents pouvant être liés à des mouvements du sol ;
- cartographies numériques de documents complémentaires (carte géologique au 1/10 000, limite des formations superficielles, etc...).

2. La base de l'ASGA et le travail de collecte de données complémentaires

2.1 DESCRIPTION DE LA BASE

Depuis plus de trente années, tous les rapports des diverses études géotechniques réalisées par l'ASGA, l'Association Scientifique pour la Géologie et ses Applications (ENSG), sont archivés ainsi que divers rapports fournis par d'autres organismes ou sociétés. A partir de ces rapports, les différentes données géotechniques relevées lors des sondages, reconnaissances ou autres ont été regroupées au sein d'une banque de données.

Cette banque de données comprend plus de 5 000 données, son analyse est longue. Elle sera donc échelonnée.

Les données enregistrées sont de deux types :

- les observations qualitatives : caractéristiques observées, cette information étant de nature non numérique ;
- les mesures : résultats d'essais pratiqués.

Ces données ne sont pas enregistrées isolément dans la base, mais par groupes, correspondant à des ensembles logiques définis :

- Les « profils » : informations générales sur un point de collecte des données (Position, date, ...) ;
- Les « dossiers » : ce sont des informations générales sur un ensemble de « profils » établis dans le cadre d'une opération unique ;
- Les « couches » : ce sont des descriptions des roches rencontrées en profondeur et de leur rattachement à un étage stratigraphique. Un même « profil » contient généralement plusieurs « couches » ;
- Les essais in-situ : ce sont des tableaux correspondant à des mesures effectuées à différentes profondeurs ;
- Les « échantillons » : ce sont des descriptions des roches prélevées à différentes profondeurs ;
- Les essais sur échantillons : ce sont les résultats d'analyses de laboratoire.

2.2 ANALYSE ET TRAITEMENT PRELIMINAIRE DE LA BASE DE DONNEES DE L'ASGA

Dans le cadre de ce programme, la base est analysée commune par commune. Cette partie se déroule donc en trois étapes :

- sélection des points de renseignement localisés sur le territoire de la commune (sondage, tranchée, etc..) ;
- sélection des points pertinents (sondage, tranchée, etc..), c'est à dire ceux pour lesquels des formations superficielles sont reconnues ;
- report des données, formation par formation, sur un fond topographique au 1/5000^{ème}.

L'interprétation des points de connaissance n'est pas toujours aisée. Notamment, la distinction entre alluvions « modernes » et « anciennes » n'est pas toujours faite dans la base. L'affectation à tel ou tel type d'alluvions sera donc faite sur des critères de localisation géographique (terrasse alluviale, fond de talweg etc..).

Par exemple, pour la commune de Malzéville, la majorité des alluvions « anciennes » reconnues dans la base de donnée est localisée dans des sondages en bord de Meurthe sous des alluvions « modernes ». Ces alluvions qualifiées « d'anciennes » ne sont donc pas au sens géologique du terme réellement d'anciennes terrasses alluviales, elles ont donc été reportées sur la cartographie à 1/5000 comme « alluvions modernes ». Les alluvions anciennes correspondent en effet aux dépôts du lit majeur du fleuve avant son re-créusement. Elles seront donc situées en position altimétrique supérieure aux alluvions récentes.

De même, il apparaît souvent des confusions entre formations de pente et remblais. Pour les répertoire, les critères de choix s'appuient :

- sur la fréquence de la formation dans les points voisins (étendue probable) ;
- l'historique de la zone (mémoire des travaux réalisés) ;
- la topographie ;
- la lithologie.

Selon la profondeur d'investigation, le mur de la formation reconnue n'est pas toujours atteint. Même si cela apporte une information à priori sur son épaisseur minimale, il est parfois utile de confronter celle ci à d'autres sondages. Ainsi pour le tracé de la voie de contournement de Malzéville, les épaisseurs des formations de la base ont été augmentées après comparaison avec les données issues des informations provenant des travaux du CETE.

2.3 LA COLLECTE DE DONNEES COMPLEMENTAIRES

Les informations complémentaires proviennent essentiellement de :

- données de sondages (CETE, étude récentes de projets routiers, etc.) ;
- cartes anciennes, notamment les anciens fonds topographiques pour le suivi des carrières et gravières, qui ont été remblayées depuis ;
- rapports d'étude ou de sinistre ;
- l'enquête de terrain.

Ces informations permettent de tracer, valider et préciser les limites des formations superficielles issues de l'interprétation de la base de données.

En outre, l'enquête de terrain permet de construire et compléter une base de données sur les désordres observés.

2.4 RECENSEMENT DES DESORDRES OBSERVES ET DES INDICES HYDROGEOLOGIQUES

Les visites de terrain permettent un recensement sommaire des désordres observés sur les habitations et la voirie¹, ainsi que des principaux indices d'écoulement des eaux (sources, puits, captages...). Les observations concernant les désordres sont structurées sous la forme d'un fichier Excel et localisées sur une carte.

Les dégâts aux habitations sont majoritairement des fissurations. Toutes les fissures observées n'ont pas la même importance, leur origine est en effet plus souvent liée à de mauvaises procédures constructives qu'à des mouvements importants et imprévisibles du sol.

Ainsi la fréquence des fissurations relevées n'est pas la même selon des critères :

- de mouvements du sol ;
- d'ancienneté des bâtiments ;
- de qualité des constructions ;
- d'entretien des constructions.

¹ Ces désordres ne sont pas à mettre systématiquement en relation avec des mouvements naturels du sol, ils peuvent être dus à de mauvaises procédures constructives sur l'habitation elle-même ou bien dans son environnement.

Cependant nous constatons que la fréquence maximale des désordres observés se situe préférentiellement au niveau de ruptures de pentes sur des formations superficielles de type formation de pente.

Trois catégories de fissures peuvent être distinguées :

- Fissures horizontales

Elles sont la plupart du temps relativement étendues. Elles soulignent souvent la structure du bâtiment, poutre ou dalle.

- Fissures verticales

Elles ont une extension et sont de formes variables. Elles apparaissent :

entre deux constructions

Plusieurs facteurs peuvent en être à l'origine. Parmi ceux-ci, citons :

- une différence de nature des matériaux entre des murs mitoyens. La température dilate les matériaux engendrant une contrainte différentielle qui reste tout de même faible, mais peut provoquer une cassure.
- une différence dans les fondations de l'immeuble qui engendre des tassements différentiels.

en milieu de façade

Elles s'initient généralement au niveau d'une limite hétérogène, sous le toit, en bordure inférieure de fenêtre, et présentent parfois un écartement conséquent (quelques centimètres).

- Fissures obliques

Elles sont généralement moins étendues et moins apparentes que les précédentes. Elles présentent en fait à la fois une composante verticale et horizontale, ce qui les fait couramment apparaître en forme de marche d'escalier. Elles rejoignent souvent les coins de fenêtre ou bien les pignons de bâtiment.

Des illustrations de ces différents désordres sont présentées en annexe 1, ainsi qu'un extrait du fichier Excel concernant la commune de Villers-lès-Nancy.

3. Classification des formations superficielles

3.1 CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Le substratum de la région de Nancy est constitué par des dépôts du Lias, principalement marneux, et du Dogger calcaire. Les formations superficielles sont composées d'alluvions anciennes et modernes, de formations de pente et de limons. En outre, des zones ont été remblayées de matériaux divers.

Les terrains secondaires de Lorraine, affectés d'un léger pendage général occidental, affleurent en larges auréoles méridiennes au sein desquelles la succession d'assises alternativement dures et tendres détermine des reliefs de côte.

La base du Bajocien (Dogger inférieur) et l'Aalénien sous-jacent sont le siège d'une nappe donnant des eaux de bonne qualité et de débit parfois intéressant. Cette nappe détermine un grand nombre de sources autour du plateau.

Les formations de pente ne sont pas partout des aquifères permanents (certains ont tout de même permis la mise en place de captages). L'interface entre les éboulis et un substratum argileux plus imperméable favorise l'accumulation d'eau dans les pentes, ce qui se traduit souvent par des éboulis très humides en bas de pente (il y a en moyenne de 0,5 à 1 m de terrain très humide).

L'ensemble des niveaux superficiels peut permettre, de par leurs natures, de légères circulations d'eau de ruissellement et d'infiltration.

3.2 LES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Les données de sondages sont organisées dans la base en quatre types de formations superficielles. Il est très difficile de caractériser d'un point de vue lithologique toutes les formations rencontrées pour les communes du Grand Nancy (voir figure 1 et 2). Dans le cadre de cette étude, la cartographie se limite donc à représenter les quatre grands types de formations reconnues dans la base de données.

3.2.1 Les alluvions anciennes et modernes

La lithologie des alluvions anciennes et modernes est proche. Elle se compose de galets, de graviers et de sable de roches quartzitiques ou cristallines ainsi que d'argiles et de limons. Ces différents composants peuvent être dans toutes les proportions possibles.

On trouve le plus souvent les associations suivantes :

- alluvions grossières à galets, graviers et sable ;
- alluvions fines à sables, limons et argiles.

Les alluvions anciennes forment des terrasses, et il est à noter que la partie supérieure de ces terrasses est très souvent composée d'argiles et de sables, tandis que la partie inférieure est plutôt graveleuse.

L'analyse des termes lithologiques de la base (voir figure 1 et 2) traduit bien cette disparité lithologique.

Les alluvions modernes se trouvent dans la vallée alluviale actuelle de la Meurthe et peuvent atteindre une dizaine de mètres d'épaisseur. Elles sont le siège d'une nappe d'eau alimentée par la rivière (nappe alluviale ou nappe d'accompagnement).

Les alluvions anciennes se retrouvent sur de nombreuses terrasses anciennes de la Meurthe. La cartographie de ces formations est très difficile à effectuer. Les grandes terrasses situées sur le bord sud de la Meurthe font partie de ces formations, ce sont les plus hautes ; elles peuvent dominer le cours actuel de la Meurthe d'une quarantaine de mètres. Leur puissance atteint couramment 10 à 15 m. Elles sont le siège d'écoulement alimentées par les pluies et par les résurgences de l'aquifère situé à la base du Bajocien et dans l'Aalénien.

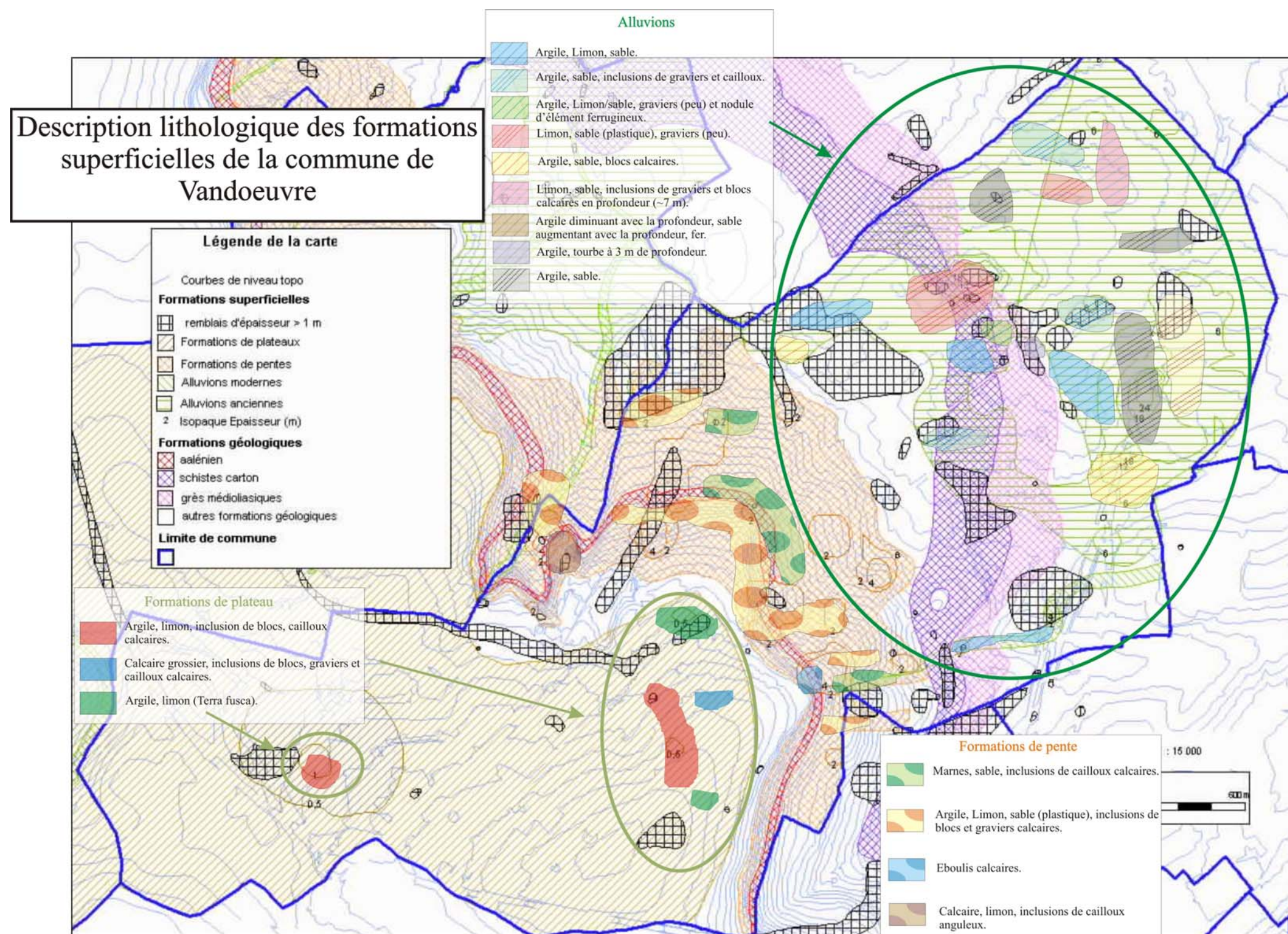


Figure 1 : Synthèse des descriptions de la lithologie des formations superficielles des sondages de la base de données de l'ASGA sur la commune de Vandoeuvre.

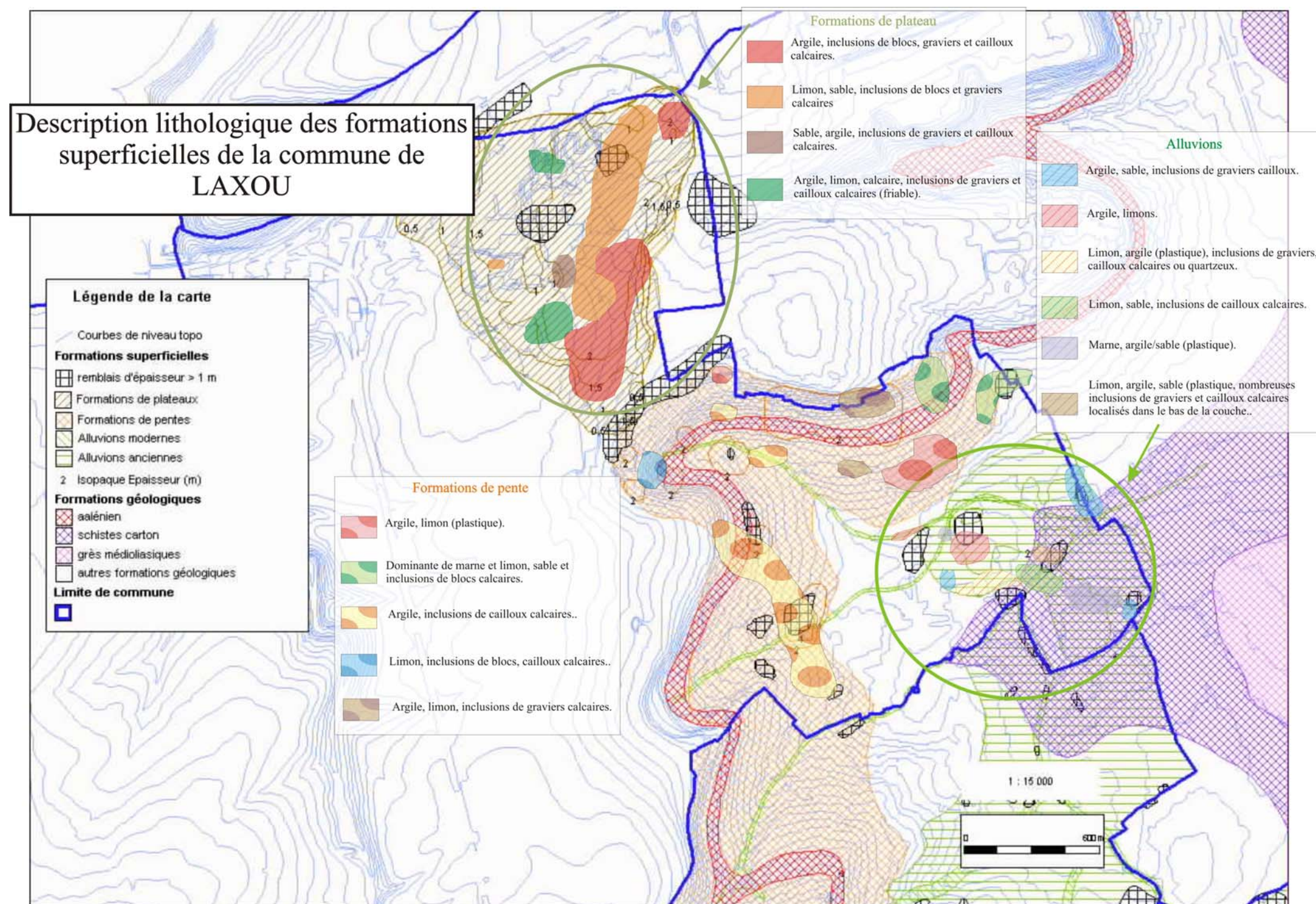


Figure 2 : Synthèse des descriptions de la lithologie des formations superficielles des sondages de la base de données de l'ASGA sur la commune de Laxou

3.2.2 Les formations de pente

Les formations de pente s'étendent sur le versant de la côte bajocienne. La lithologie, ou tout du moins la granulométrie des éléments est variable, depuis des blocs de plusieurs mètres cubes à des grouines plus fines (la grouine est composée d'éléments calcaires millimétriques provenant de la fragmentation de la falaise calcaire sous l'effet du gel, c'est une formation de contexte périglaciaire) et même des argiles. Il peut s'agir d'énormes blocs glissés comme c'est le cas à Malzéville. Ces derniers sont en fait des pans complets détachés de la falaise Bajocienne. Mélangés à ces éboulis on rencontre des grouines, des limons de plateau et du « fer fort ». Il est souvent difficile, au pied des falaises Bajociennes, de différencier les formations en place des pans effondrés, éboulis et formations altérées sur place.

Il est possible cependant de retenir une 'géométrie type' de ces formations par rapport à la topographie :

- sous la bordure du plateau peuvent se trouver de gros blocs ;
- ensuite viennent les éboulis grossiers, les plus gros éléments ayant une taille décimétrique. Leur épaisseur dépasse rarement 3 m ;
- en dessous de la rupture de pente se trouvent des grouines et des argiles qui peuvent atteindre plus d'une dizaine de mètres d'épaisseur.

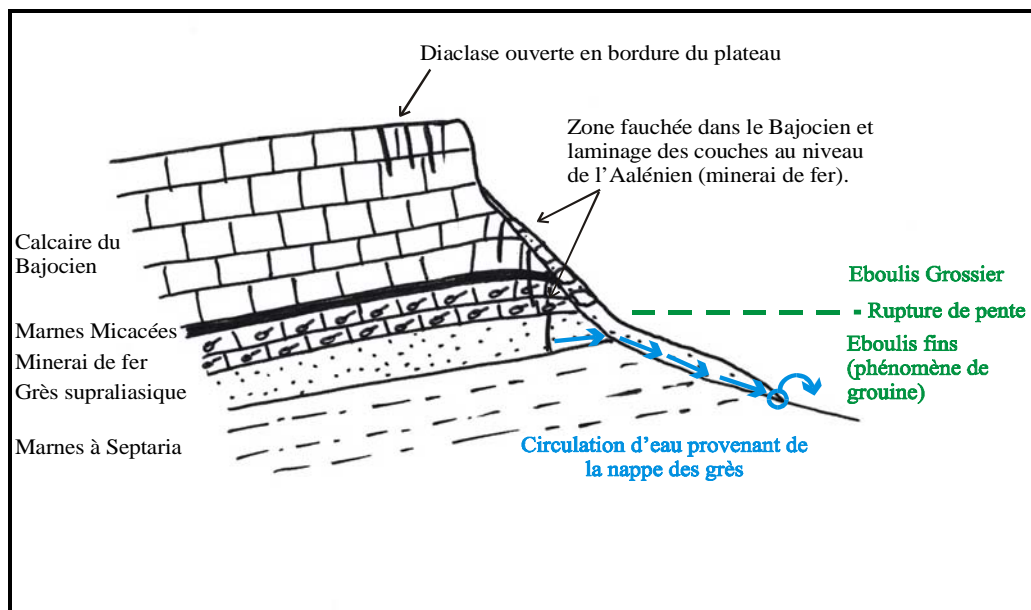


Figure 3 : Coupe schématique montrant le fauchage, le laminage des couches et la géométrie des éboulis sur le flan de la côte Bajocienne.

Ces formations posent des problèmes géotechniques complexes du fait de leur variabilité lithologique, de leur géométrie en fonction de l'état du substratum sous-jacent (en particulier la teneur en eau), notamment à cause du problème de fauchage des couches à proximité de la surface. La fraction argileuse des grouines peut induire des mouvements différentiels.

3.2.3 Les formations de plateau

Les formations de plateau couvrent des surfaces importantes sur les plateaux calcaires du Jurassique moyen et sur le Dogger, et ont une puissance décimétrique à métrique. Elles se caractérisent par une granulométrie fine, et surtout par la prédominance de la fraction granulométrique de 2 à 50 microns, qui correspond aux argiles et limons. La fraction sableuse peut varier de 10 à 40 %, le restant étant constitué d'argiles. On peut distinguer trois types de couverture : couverture limoneuse, couverture limono-sableuse et limono-argileuse, cette dernière étant appelée terra-fusca (argiles de décalcification développées sous un climat froid).

Pour une meilleure lisibilité de la carte, ces trois types de couvertures ont été regroupées en une même formation.

3.2.4 Les remblais

La lithologie des remblais est très variable et est dépendante de l'utilisation faite du remblai ou bien de son origine. Ils sont utilisés pour le comblement d'anciennes carrières et pour le terrassement d'infrastructures urbaines. Dans le secteur de Nancy, ils peuvent être constitués de graves, de matériaux de démolition, de scories (laitiers) de hauts fourneaux, de sables, de calcaire concassé et même parfois de limons ou d'argiles.

3.3 CONCLUSIONS POUR LA CARTOGRAPHIE

Les figures 1 et 2 traduisent la disparité lithologique des formations superficielles. Les descriptions faites dans la base de données sont parfois complexes voir erronées. La classification de tel ou tel sondage dans tel ou tel type de formation doit donc intégrer des aspects complémentaires que sont :

- l'analyse de la topographie ;
- l'analyse de l'hydrographie ;
- l'analyse du substratum rocheux ;
- l'analyse de l'historique des secteurs en terme d'aménagement (terril, anciennes carrières).

Le choix d'afficher un niveau descriptif « assez faible », par la distinction d'uniquement 4 types de formation est donc le plus adapté à la donnée disponible. Ce point est confirmé par l'analyse géotechnique qui est présentée au chapitre 4.

La prise en compte de ce niveau de connaissance sera effectuée lors de la construction du modèle géométrique par une correction systématique de celui-ci par un géologue « expert » (ASGA, ENSG, BRGM) possédant la connaissance de terrain.

4. Caractérisation géotechnique des formations superficielles

4.1 RELATIONS ET CORRELATIONS DANS LES SOLS : REMARQUES PRELIMINAIRES

Les paramètres utilisés pour décrire les propriétés physiques et mécaniques des sols sont de natures très variées :

- Paramètres d'identification et d'état (porosité, indices des vides, ...) ;
- Paramètres de déformabilité (indices de compression, module oedométrique,...) ;
- Paramètres de résistance (cohésion, angles de frottement, ...) ;
- Paramètres de perméabilité.

Dans la pratique de la mécanique des sols, des corrélations entre ceux-ci sont utilisées, en particulier comme moyen de contrôle des résultats des essais in-situ et en laboratoire. Eventuellement, les corrélations entre paramètres sont utilisées comme moyen de fabrication de valeurs complémentaires de certains d'entre-eux en fonction des autres.

Les corrélations qui existent sont plus ou moins générales. Cependant leur validité est limitée à la nature des sols étudiés. Les propriétés des sables, des tourbes ou des argiles n'obéissent pas aux mêmes lois ; elles sont d'ailleurs souvent décrites par des paramètres spécifiques. De même, les corrélations établies sur un site et valables pour celui-ci peuvent se révéler inadaptées ailleurs, même si le sol est de même nature. Cette divergence traduit notamment l'influence des autres paramètres que ceux exprimés par la corrélation utilisée. Les conditions d'utilisation de corrélations dépendent de la fiabilité de celles-ci. Certains paramètres sont liés, à l'intérieur d'une couche de sol d'un site déterminé, par des relations proches d'une relation mathématique. Si on analyse simultanément des données provenant de 2 sites, pour des sols de même nature, on trouve en général que les valeurs des paramètres sont plus dispersées et cette dispersion augmente quand le nombre de sites s'accroît et quand on regroupe des données relatives à différents types de sol (en nature et situation géographique). Les erreurs expérimentales, lors des essais d'identification et de la détermination de corrélations, exercent une influence défavorable sur la qualité des corrélations.

Il est, pour ces diverses raisons, indispensable de connaître l'origine des corrélations utilisées dans le cadre de toute étude géotechnique, et d'être conscient de la variabilité possible des paramètres autour d'une relation moyenne affichée.

4.2 LES INFORMATIONS DE LA BASE ET ANALYSE

Pour les formations superficielles, les essais renseignés dans la base concernent principalement des essais d'identification, des essais de cisaillement et des essais de compressibilité. Les essais d'identification sont des essais relativement simples, habituellement réalisés pour caractériser les sols. Les principaux sont les suivants :

- Analyse granulométrique ;
- Détermination des limites d'Atterberg ;
- Valeur de bleu ;
- Equivalent de sable ;
- Teneur en matières organiques.

Les essais in situ qui correspondent à des profils en fonction d'une profondeur ne sont pas traités en raison de la difficulté à affecter les résultats avec précision à telle ou telle formation. Il s'agit d'essais pressiométriques, d'essais de pénétromètre de laboratoire, d'essais de pénétromètre dynamique (soit résistance dynamique, soit nombre de coups).

Le tableau suivant résume le nombre d'essais réalisés et renseignés dans la base sur des échantillons de formations superficielles.

	Nbre total	Essai d'identification		Essai de Cisaillement	Essai de Compressibilité
		Limite d'Atterberg, teneur en eau.	Essai granulométrique		
Alluvions	429	312	182	10	53
Alluvions modernes	11	7	4	0	1
Alluvions anciennes	418	305	178	10	52
Formations de pentes	74	60	27	5	2
Formations de plateaux	18	18	15	1	1

Tableau 1 : Récapitulatif des essais d'identification des formations superficielles présents dans la base de l'ASGA.

En annexe 2, sont présentés, formation par formation, les principaux résultats de l'analyse de la base de l'ASGA. Le tableau 2 récapitule les caractéristiques générales, les analyses granulométriques étant replacées par rapport à la classification USCS.

	Diagramme de Casagrande	Teneur en eau	Poids volumique sec	Degré de Saturation	Cohésion au Scissomètre	Indice des vides
ALLUVIONS ANCIENNES	Les échantillons forment une famille (voir Figure 4)	80 % des échantillons ont une teneur en eau comprise entre 10 et 30%	80 % des échantillons entre 14 et 18 kN.m ⁻³	70 % des échantillons entre 90 et 100 %	65 % des échantillons entre 20 et 60 kPa	70 % des échantillons entre 0,5 et 1
ALLUVIONS MODERNES	Peu d'information	80 % des échantillons ont une teneur en eau < 40 %	1 seul échantillon : 15,9 kN.m ⁻³	pas de valeur	pas de valeur	1 seul échantillon : 0,806
FORMATIONS DE PENTES	Tous les échantillons se situent sur le même axe (voir Figure 5)	80 % des échantillons ont une teneur en eau < 30 %	80 % des échantillons entre 16 et 20 kN.m ⁻³	2 échantillons : 80 % et 85 %	70 % des échantillons ont une cohésion < 40kPa	2 échantillons : 0,605 et 0,644
FORMATIONS DE PLATEAUX	Tous les échantillons se situent sur le même axe	50 % des échantillons ont une teneur en eau comprise entre 10 et 18 %	pas de valeur	pas de valeur	pas de valeur	pas de valeur

Tableau 2 : Récapitulatif de l'analyse des essais d'identification sur des échantillons de formations superficielles.

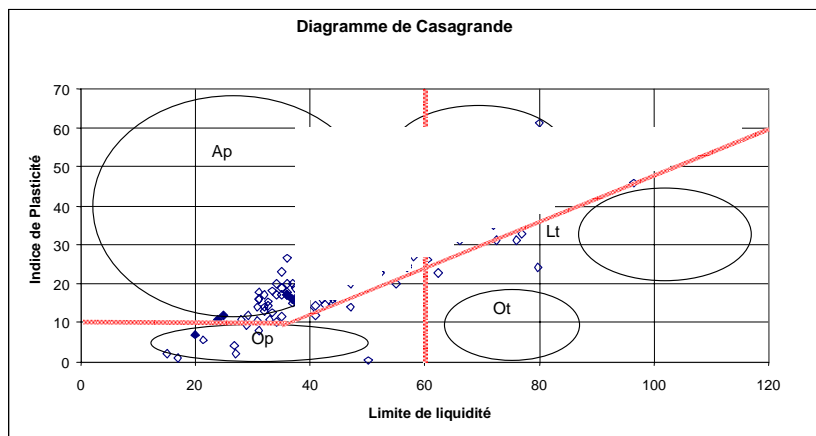


Figure 4 : Diagramme de Casagrande pour les alluvions anciennes

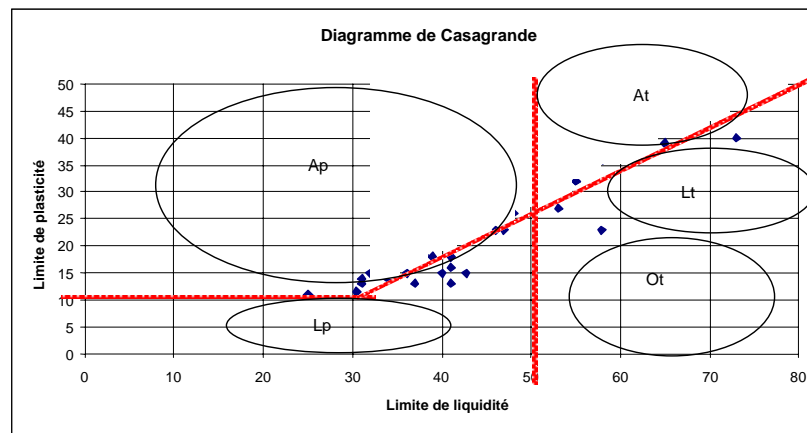


Figure 5 : Diagramme de Casagrande pour les formations de pente

Légende :	Ap : Argile peu plastique	Op : Sol organique peu plastique
	At : Argile très plastique	Ot : Sol organique très plastique
	Lt : Limon très plastique	

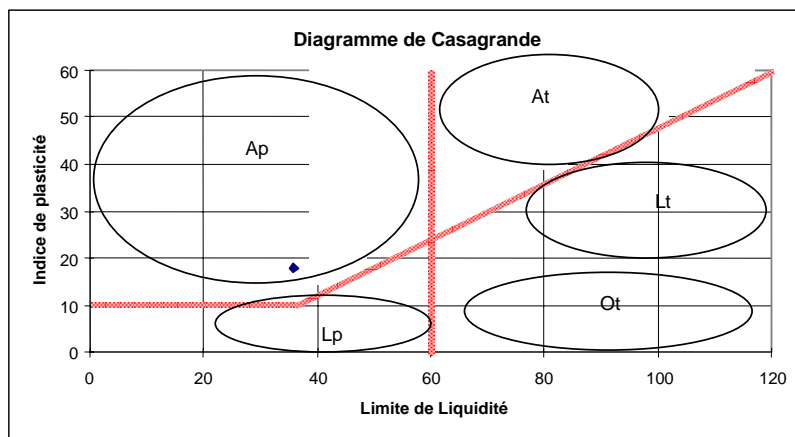


Figure 6 : Diagramme de Casagrande pour les alluvions modernes

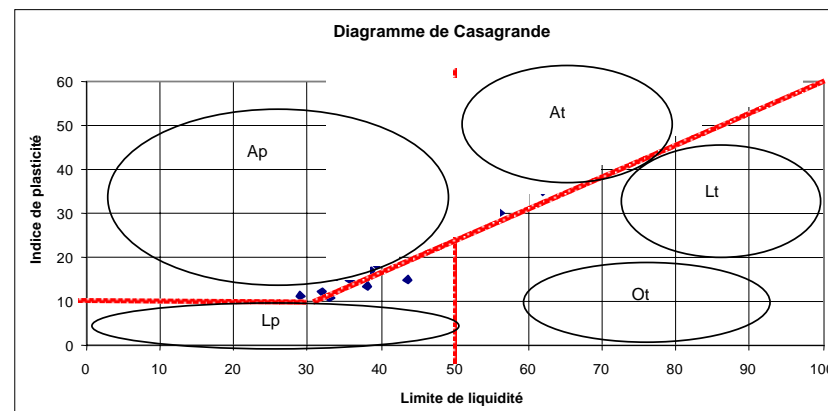


Figure 7 : Diagramme de Casagrande pour les formations de plateau

Légende :	Ap : Argile peu plastique	Op : Sol organique peu plastique
	At : Argile très plastique	Ot : Sol organique très plastique
	Lt : Limon très plastique	

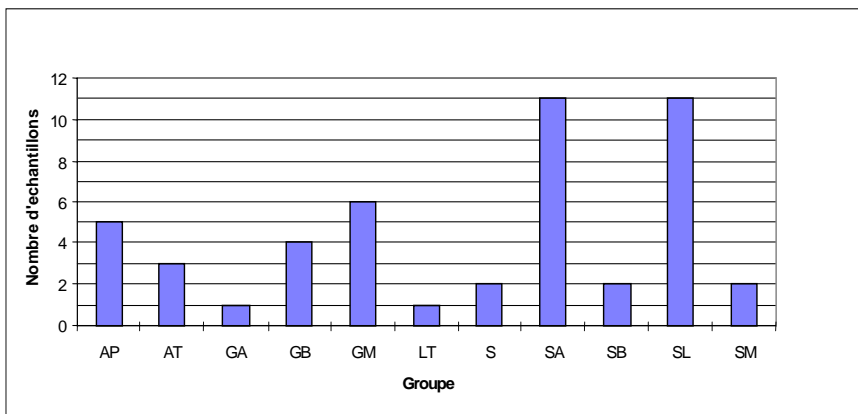


Figure 8 : Classification USCS pour des échantillons d'alluvions

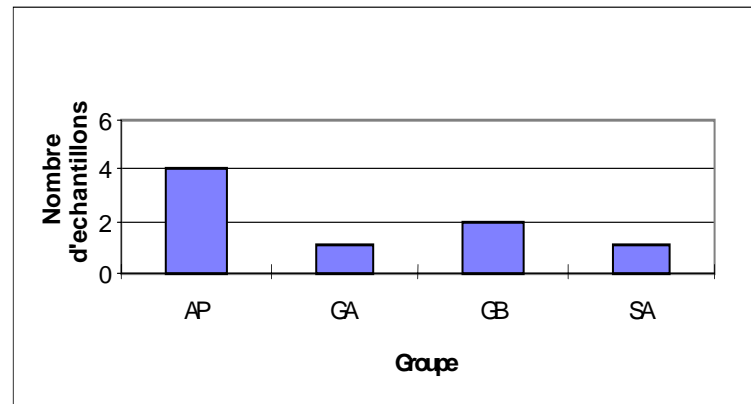
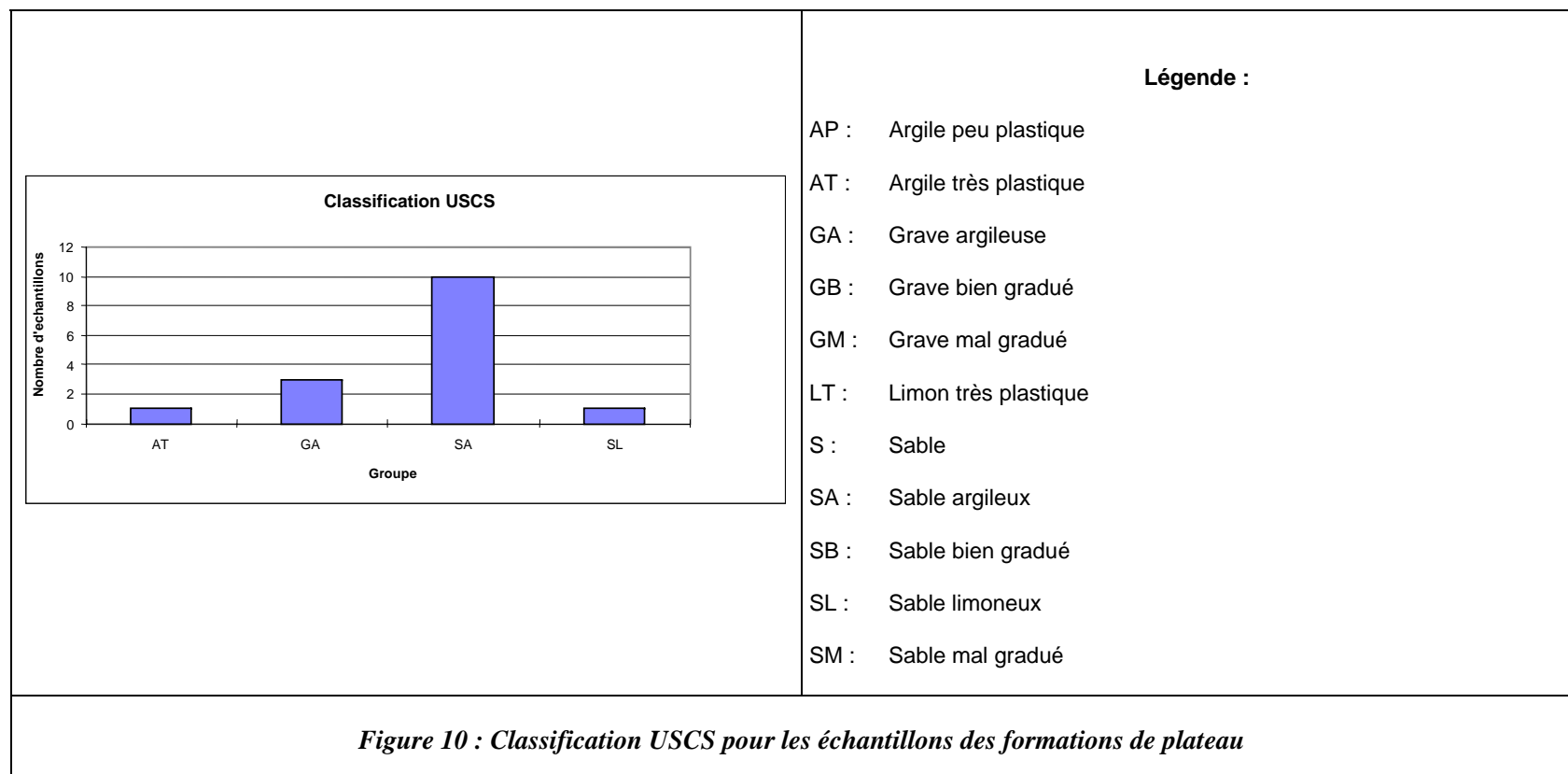


Figure 9 : Classification USCS pour des échantillons d'éboulis



4.3 PRINCIPALES CONCLUSIONS

Cette première analyse démontre les limites d'exploitation des données géotechniques explicitées en 4.1. Il n'est pas envisageable de proposer des valeurs moyennes pour chaque types de formations et de les généraliser à l'ensemble des communes. Dans tous les cas les informations de la base de données ne peuvent servir qu'à une réflexion d'expert qui doit, selon les cas (localisation, contexte), analyser et synthétiser les compléments d'informations que donnent cette base de données en fonction des objectifs fixés par un aménageur.

5. Construction d'un modèle géométrique : cartographie des iso-épaisseurs des différents types de formations superficielles

5.1 TRAITEMENTS GEOSTATISTIQUES DES DONNEES :

L'approche méthodologique développée dans le cadre de cette étude pour apprécier les épaisseurs des formations superficielles utilise des outils géostatistiques (voir annexe 3). Pour toute problématique faisant appel aux outils d'interpolation automatique, la technique elle-même a une grande influence sur la qualité des résultats, et les choix des paramètres d'interpolation ne sont pas à négliger pour tirer le meilleur parti de l'information disponible.

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

- Elle permet de caractériser la variabilité spatiale du paramètre qu'on étudie. L'outil utilisé est une fonction mathématique, connue sous le nom de **variogramme** qui synthétise la structure spatiale de la variable. Pour toute direction fixée, il indique comment varie, en moyenne quadratique, l'écart des valeurs prises en 2 points en fonction de leur distance **h (x et $x+h$)**. Il renseigne sur les anisotropies éventuelles et le degré de régularité de la variable ;
- Elle permet de résoudre le problème de l'interpolation optimale, c'est à dire de l'estimation sans biais d'une valeur inconnue, à partir des données factuelles disponibles. L'outil, « l'interpolateur », est le **krigeage**, seule technique qui fournisse simultanément l'estimation optimale et la précision de cette estimation, caractérisée par l'écart-type de krigeage. L'avantage immédiat est de pouvoir quantifier les incertitudes locales en tout point de l'espace.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse variographique (voir annexe 3) a pour but d'appréhender et de caractériser la variabilité spatiale de l'épaisseur de chacune des formations superficielles. Cette analyse passe nécessairement par le calcul et l'interpolation des variogrammes expérimentaux. Les variogrammes directionnels sont calculés dans le plan horizontal suivant quatre directions orthogonales. Ils correspondent, en présence d'un phénomène anisotrope, à un degré de variabilité maximale et minimale. Des tests variographiques sont ensuite réalisés. Ils consistent à faire une interpolation par krigeage, en adoptant deux modèles de variogrammes, pour vérifier la sensibilité des résultats. La comparaison des résultats repose sur le calcul des écarts entre les épaisseurs estimées par les deux krigeages.

5.2 CONSTRUCTION D'UN MODELE GEOLOGIQUE

La modélisation des épaisseurs des formations superficielles est nécessaire pour avoir une vision globale de celles-ci et enrichir l'analyse de l'aléa.

L'objectif de l'étude consiste à modéliser la géométrie des formations superficielles des territoires des communes du Grand Nancy et à présenter les modèles obtenus sous forme de cartes isopaques. Concrètement, la modélisation géométrique consiste à créer un modèle numérique des formations à partir d'une interpolation des données factuelles (base ASGA).

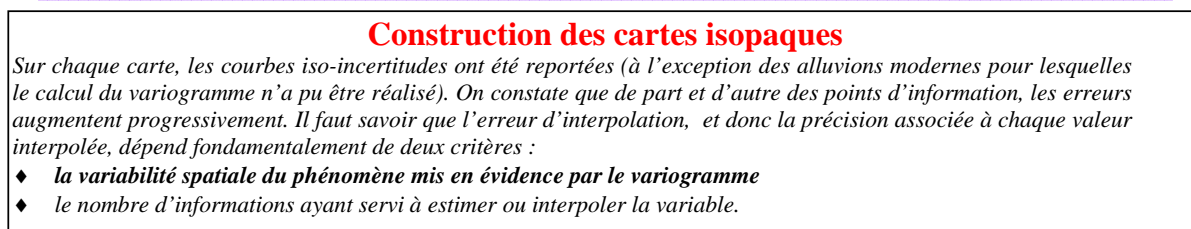
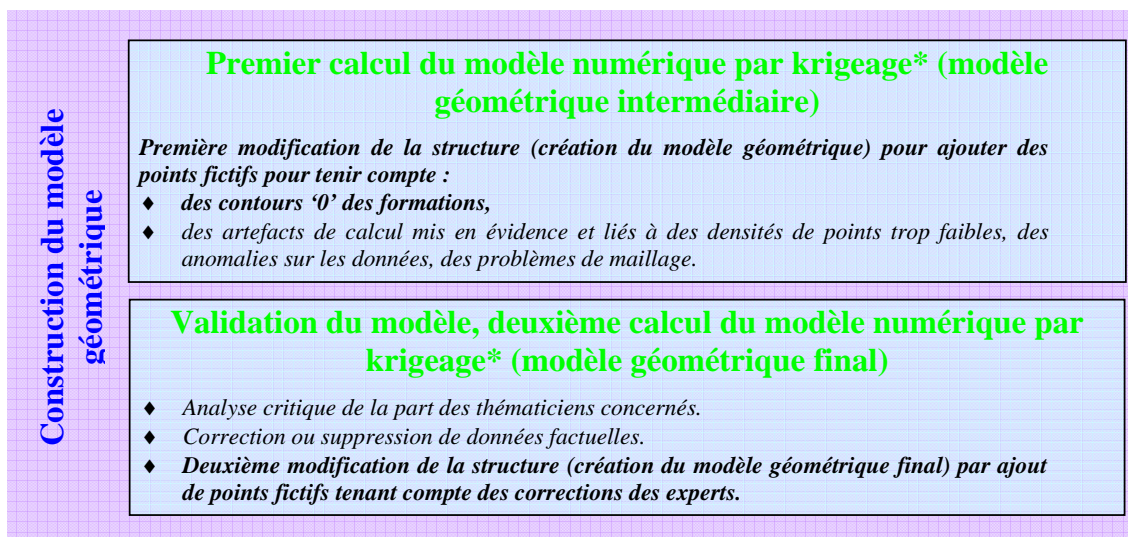
Pour ce modèle nous disposons d'un modèle numérique de terrain (M.N.T.), d'un fichier manuel de sondages ou points de connaissance sur le territoire de la Communauté et de la carte géologique digitalisée à l'échelle du 1/10000^{ème} (Original élaboré par l'ASGA, modifié). Le logiciel GDM sert alors de support à l'archivage des données et permet de réaliser des interpolations en 3D.

Pour chaque formation, la réalisation d'une carte passe par les étapes suivantes :

1. l'analyse critique des données ;
2. l'analyse variographique des variables ;
3. le calcul du modèle numérique ;
4. la validation du modèle numérique ;
5. la construction des cartes isopaques.

L'interpolation entre les points de connaissance se heurte à l'hétérogénéité de la répartition spatiale. Les modèles bruts donnés par l'application de lois d'interpolation dans GDM sont donc de ce fait erronés. Pour obtenir des résultats cohérents en absence de données factuelles (continuité des alluvions au fond d'un talweg par exemple), il est nécessaire d'enrichir la base de points fictifs. Ces points sont placés après une première analyse des résultats de l'interpolation. Il est donc nécessaire d'utiliser un processus itératif permettant de corriger l'interpolation par introductions successives de données complémentaires pour lisser les courbes interpolées. Cette opération conduit à la construction d'un modèle géologique constitué de la base de points de connaissance vrais et de points fictifs. Ce modèle évoluera avec le temps, par l'ajout de nouveaux points de connaissance et par le résultat du travail de cartographie sur les communes limitrophes.

La Figure 11 récapitule la démarche qui a été adoptée.



* : Pour chaque formation, la construction d'une carte passe par une étape préliminaire qui consiste à calculer un modèle numérique en interpolant l'épaisseur aux nœuds d'une grille régulière. L'outil d'interpolation utilisé est le krigeage, seule technique qui calcule l'erreur inhérente à toute estimation et qui permet ainsi de connaître en tout point d'une carte, sa qualité. On utilise les paramètres issus du variogramme théorique pour effectuer ce krigeage. L'exploitation de cette erreur permet de tracer les courbes dites d'iso-incertitude, donnant ainsi en tout point de la carte une mesure de la précision associée au paramètre que l'on modélise. Concrètement, le tracé des courbes iso-incertitudes montrent comment se dégrade la qualité d'une carte lorsque l'on s'éloigne des informations factuelles ou des points d'information.

Figure 11 : Méthodologie de construction du modèle géométrique.

Conclusion

Au terme d'une deuxième année d'opération, la méthodologie de construction d'un modèle géométrique pour représenter les épaisseurs des formations superficielles des territoires du Grand Nancy a pu être éprouvée. Les années prochaines vont permettre d'enrichir ce modèle et notamment de corriger les interprétations aux frontières des communes qui n'ont pas encore été traitées.

Les planches hors texte présentent le travail effectué pour les 5 premières communes de la CUGN, qui sont Vandoeuvre-lès-Nancy, Villers-lès-Nancy, Malzéville, Maxéville et Laxou.

Ce modèle géométrique est enrichi d'une base sur les désordres aux infrastructures. Ainsi les études de cartographie de l'aléa pourront intégrer ces documents, qui doivent de ce fait, permettre d'améliorer la qualité de celle-ci. En effet, les bureaux d'études consultés pourront concentrer leur effort sur le choix des analyses multicritères et des paramètres pris en compte dans celles-ci. Notamment un effort de transparence sur les méthodes de cartographie utilisées pourra être exigé, afin d'homogénéiser les différents travaux.

Commentaire [B5] : Les cadres de la page sont liés à ce paragraphe !

Annexes

Commentaire [B6] : Les cadres de la page sont liés à ce paragraphe !

Annexe 1 :

Illustration des principaux désordres recensés dans les communes de Laxou, Vandoeuvre-lès-Nancy, Villers-lès-Nancy, Malzéville et Maxéville –

Extrait des fichiers Excel de recensement des désordres



Fissure horizontale rectiligne et continue



Fissure oblique



Fissure verticale



Fissure oblique et horizontale



Décalage entre deux bâtiments



Fissure ouverte dans la chaussée suite à un affaissement



Fissures horizontales

Cartographie des formations superficielles dans le cadre d'un programme P.P.R. - Commune de Villers-lès-Nancy													
Réf.		Localisation		Coordonnées			Observations			Désordres		Mouvements de terrains	Commentaires
Lett	n°	n°	rue	X	Y	Z	Géol.	Hydrogéol.	Végétation	Immeubles	Voiries		(Informations municipales)
A	1	2.	Boulevard Maréchal Foch							Fv			épaisseur 2 cm, il s'agit d'un joint entre 2 maisons, anciennes façades.
A	2	4.	Boulevard Maréchal Foch							Fv			épaisseur 1 cm, ancienne façade, localisation au niveau du milieu de la façade.
A	3	7.	Boulevard Maréchal Foch							Fv			épaisseur 1 cm, longueur 60cm, à côté du pignon gauche, ancienne façade, cassure déjà rebouchée.
A	4	11.	Boulevard Maréchal Foch							Fv			épaisseur inférieure à 1mm, se prolonge de bas en haut, il s'agit d'une limite entre 2 maisons.
A	5	20.	Boulevard Maréchal Foch							Fo			épaisseur 2 cm, bordure d'une fenêtre, ancienne façade, (photo n°3) .
A	6	26.	Boulevard Maréchal Foch							Fo			épaisseur <1mm, localisée sous le toit, longueur 30cm, façade moyennement ancienne.
A	7	31.	Boulevard Maréchal Foch							Fh+Fv+Fo			Fo sous les fenêtres, Fv entre fenêtres, Fh en bordure de pignons, épaisseur 0,5cm (photos 4 et 5).
A	8	40,38.	Boulevard Maréchal Foch							Fh			épaisseur 0,5cm, longueur 1m, façade ancienne.
A	9	43.	Boulevard Maréchal Foch							Fh+Fv			Cassure en escalier, épaisseur 0,5cm, sur un pignon de maison, sur bordure de fenêtre, façade ancienne.
A	10	63.	Avenue de Saurupt							Fh+Fv			Fv : épaisseur 0,5cm, localisée sur tout le tour de la maison, façade moyennement ancienne ; Fh : sous le toit.
A	11	35.	Avenue de Saurupt							Fh+Fv			Fh : épaisseur <0,5cm, ; Fv : sous le toit de la maison, façade ancienne.

Commentaire [B7] : Les cadres de la page sont liés à ce paragraphe !

Annexe 2 :

Principaux résultats de l'analyse des données d'essai d'identification d'échantillons de formations superficielles de la base de l'ASGA.

A. Alluvions

429 échantillons concernent les alluvions dont 312 échantillons ont subi des essais d'identification.

A.1. Alluvions modernes :

Onze échantillons sont distingués comme alluvions modernes. Cependant, dans la base certains échantillons ne sont pas renseignés avec précision (absence de renseignement sur leur âge). Par défaut, ils ont été considérés comme des échantillons d'alluvions anciennes, étant donné l'importance de celles-ci dans la base de données. De plus, au vue de la synthèse lithologique effectuée pour les communes de Laxou et Vandoeuvre-lès-Nancy, il a été constaté à l'aide des cartes de répartition des formations superficielles, réalisées en 2000 dans le cadre de cette étude, que tous les échantillons non renseignés ont été prélevés dans des zones d'alluvions anciennes.

Pour pouvoir être plus précis il faudrait corréler la base de données avec des cartes de répartition des formations superficielles des autres communes, mais celles-ci ne sont pas encore disponibles.

Les essais d'identification donnent les limites d'Atterberg pour 7 échantillons. Ils sont replacés dans un diagramme de Casagrande²

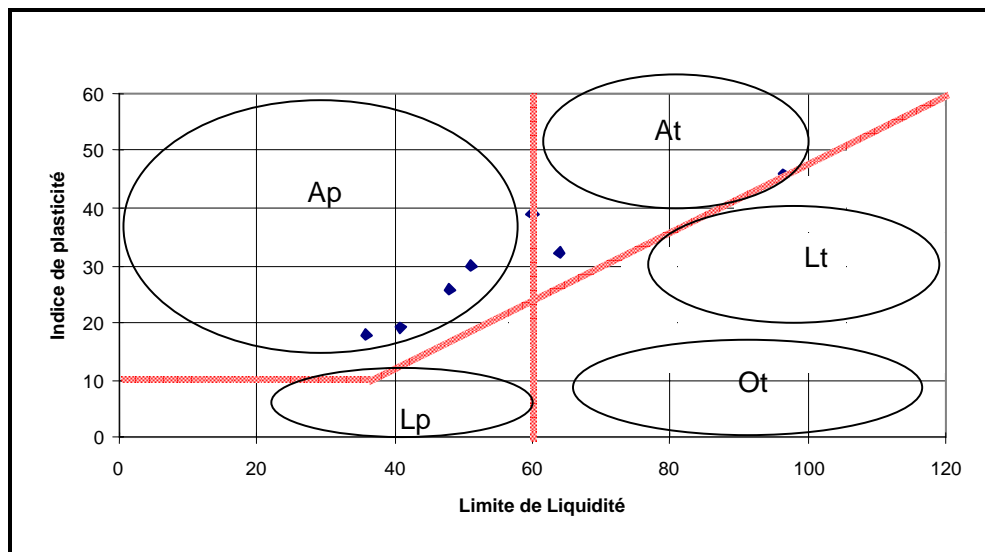


Diagramme de Casagrande pour les alluvions modernes

La teneur en eau des alluvions modernes a été mesurée pour les 7 échantillons. Les valeurs obtenues en pourcentage sont de 30,5 ; 34,5 ; 29,3 ; 20 ; 49,5 ; 90,2 (valeur suspecte) ; soit 21,7 en moyenne. Ces valeurs restent donc comprises entre 20 % et 50 %.

La dernière valeur disponible concernant les alluvions modernes est le poids volumique sec des grains. Un seul échantillon est renseigné pour un poids volumique sec de 15,9 kN.m³.

Il n'y a pas d'autres données exploitables en ce qui concerne les essais d'identification des alluvions modernes.

²

Ap	Argile peu plastique	Ot	Sol organique très plastique
Lp	Limon peu plastique	Lt	Limon très plastique
At	Argile très plastique		

A.2. Alluvions anciennes :

418 échantillons concernent les alluvions anciennes, dont 305 échantillons ont subi des essais d'identification.

a) Diagramme de Casagrande

180 échantillons (59 % de la totalité) ont des informations concernant les limites de liquidité et indice de plasticité, qui permettent d'établir le diagramme de Casagrande.

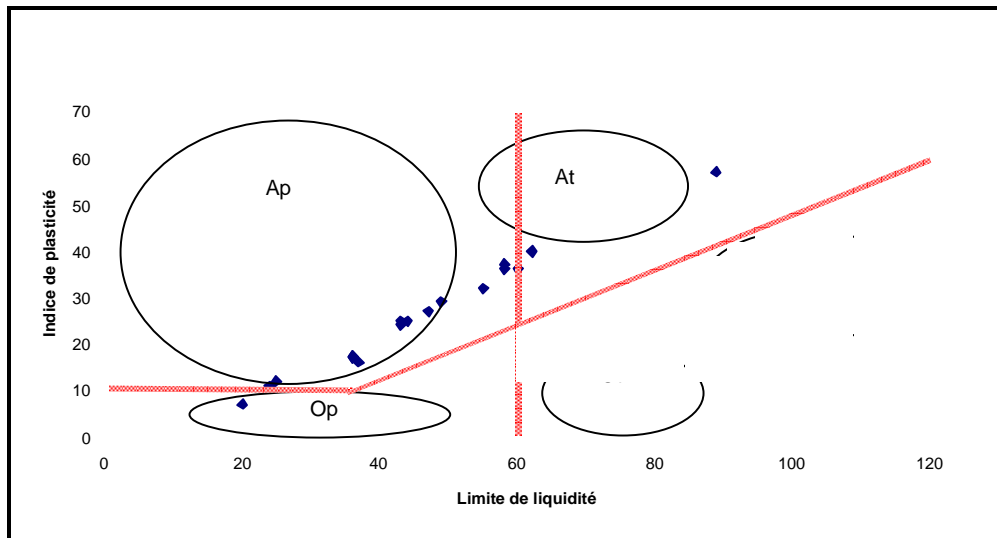
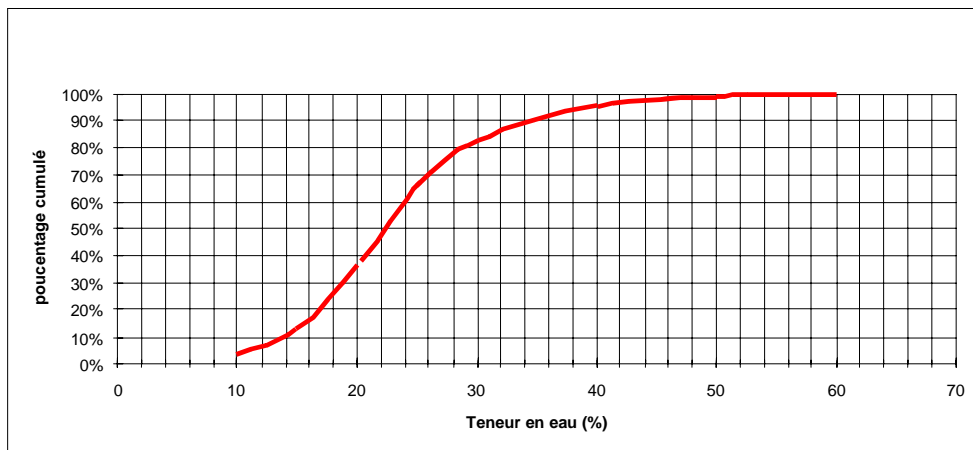


Diagramme de Casagrande pour les alluvions anciennes

b) Teneur en eau

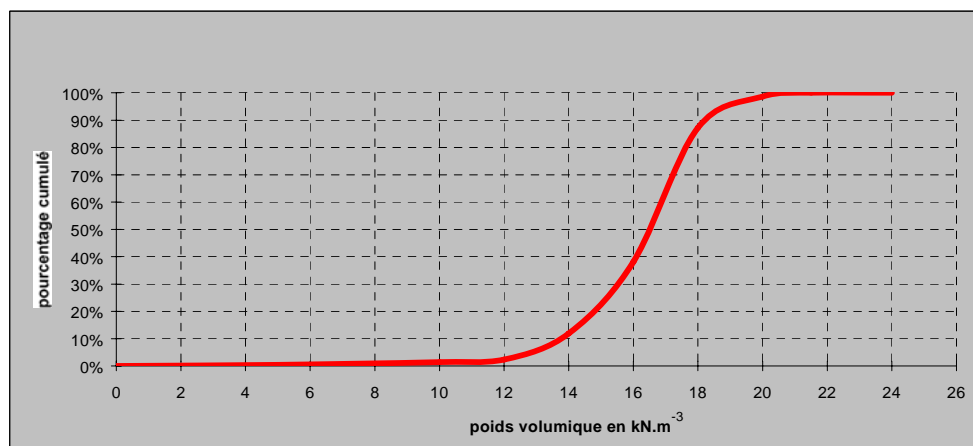
La détermination de la teneur en eau porte sur 287 échantillons (c'est à dire 94 % des échantillons qui ont subi les essais d'identification), ce qui permet de tracer le diagramme de synthèse suivant :



Teneur en eau des alluvions anciennes (pourcentage cumulé pour 287 essais)

c) Poids volumique sec

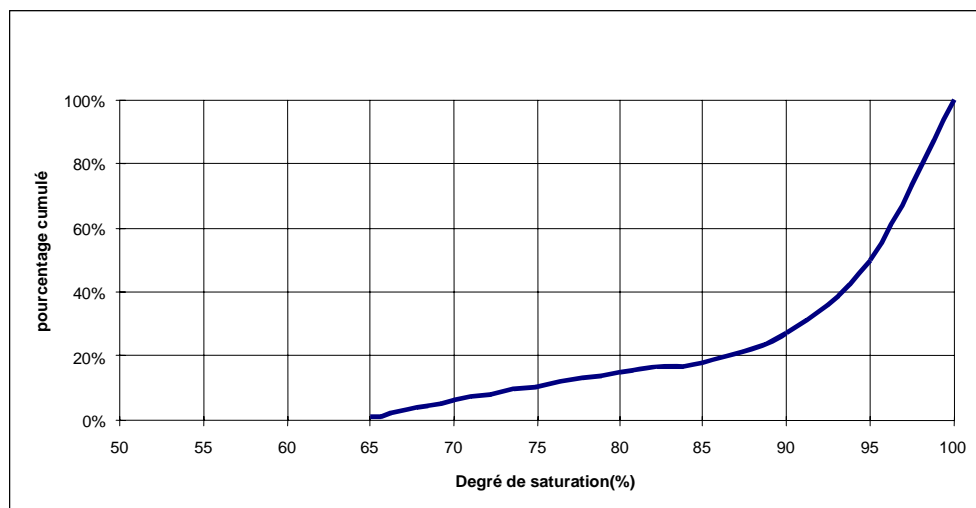
Le nombre d'échantillons ayant des valeurs renseignées pour le poids volumique sec (209 échantillons soit 68,5 % des échantillons d'alluvions anciennes) permet de réaliser un diagramme des pourcentages cumulés du poids volumique des échantillons.



Pourcentages cumulés des poids volumiques des alluvions anciennes

d) Degré de saturation :

106 échantillons sont renseignés (soit 35 % des échantillons d'alluvions anciennes).



Pourcentages cumulés de degré de saturation des alluvions anciennes

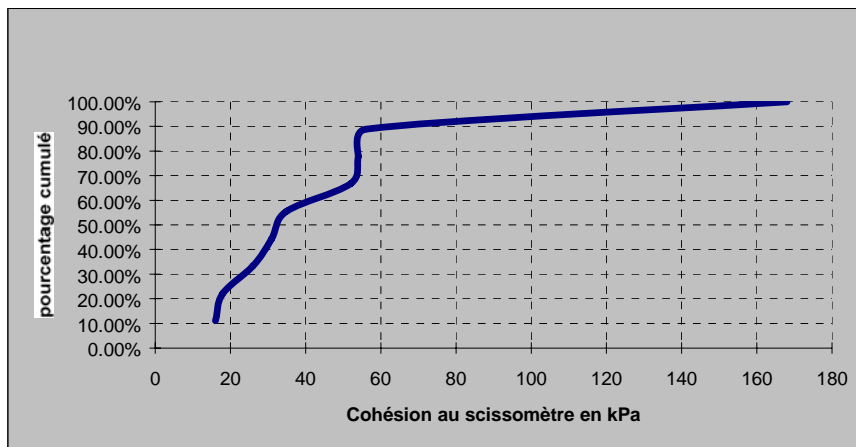
e) Résistance à la compression et scissomètre :

- 15 échantillons sont renseignés (soit 5 % des alluvions anciennes).

Rc	< 0,25 (consistance très molle)	0,25-0,5 (consistance molle)	0,56 (mi-consistante)	Total
Nombre d'échantillons	7	7	1	15
Pourcentage	46,67 %	46,67 %	6,67 %	100,00 %

Tableau récapitulatif de la répartition de la résistance à la compression des échantillons d'alluvions anciennes

- 9 échantillons sur 305 (~ 3%) ont des renseignements concernant la cohésion au scissomètre. Ils permettent d'établir le diagramme de répartition suivant :



Pourcentages cumulés de cohésion au scissomètre des alluvions anciennes

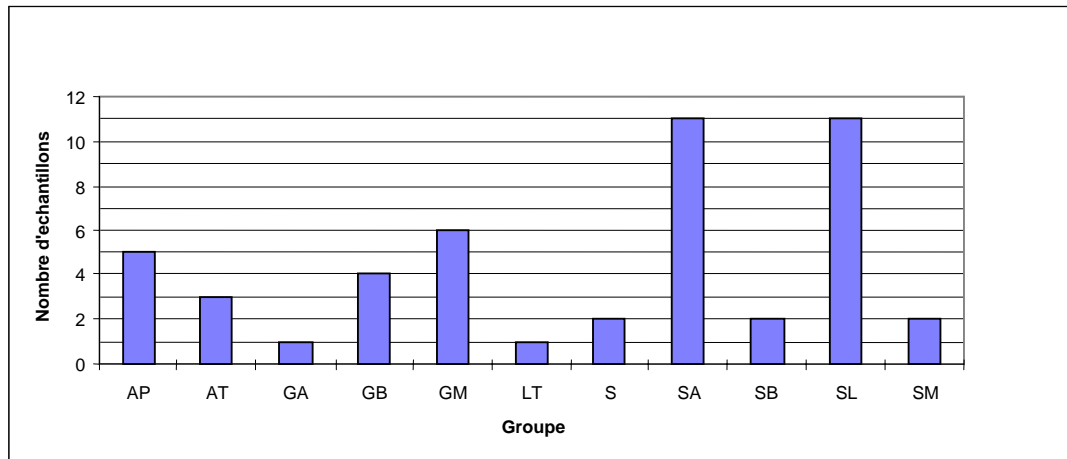
A.3. Essais granulométriques

Les essais granulométriques - essai par tamisage et par sédimentométrie - renseignent sur la taille des grains et sur la classification USCS des sols.

Il y a 182 échantillons d'alluvions qui ont subi des essais granulométriques dont seulement 4 concernant les alluvions modernes.

Concernant la classification USCS, 2 échantillons sont dans la classe GM (Grave mal gradué) et un dans la classe GB (grave bien gradué).

Alluvions anciennes : 178 échantillons d'alluvions anciennes ont été traités, qui présentent la répartition USCS suivante:



Répartition des échantillons d'alluvions anciennes selon les classes de sols

Légende :

AP	Argile peu plastique	S	Sable
AT	Argile très plastique	SA	Sable argileux
GA	Grave argileuse	SB	Sable bien gradué
GB	Grave bien gradué	SL	Sable limoneux
GM	Grave mal gradué	SM	Sable mal gradué
LT	Limon très plastique		

A.4. Essai de Cisaillement

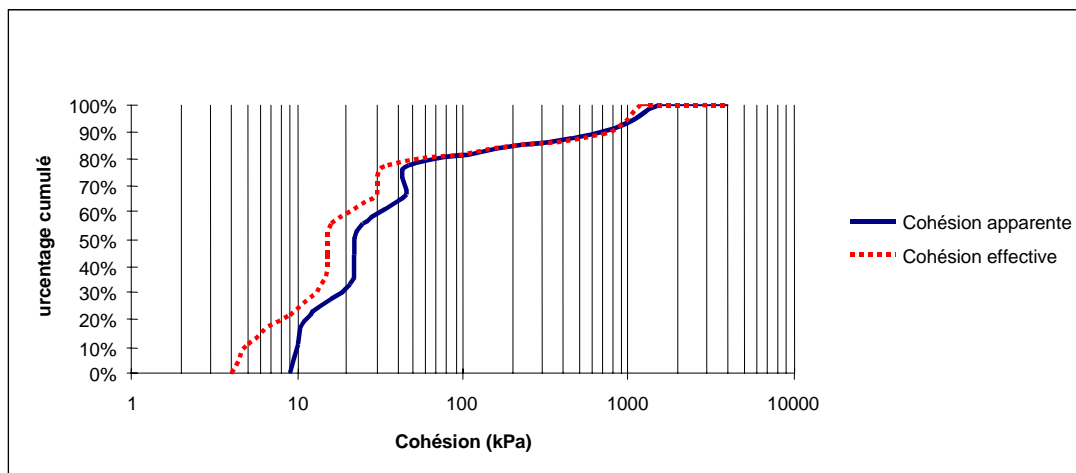
Essai triaxial C.U (Consolidé Non drainé).

Cet essai constitue 19 % des essais de cisaillement

Il n'y a pas d'échantillon concernant les alluvions modernes qui ait été traité.

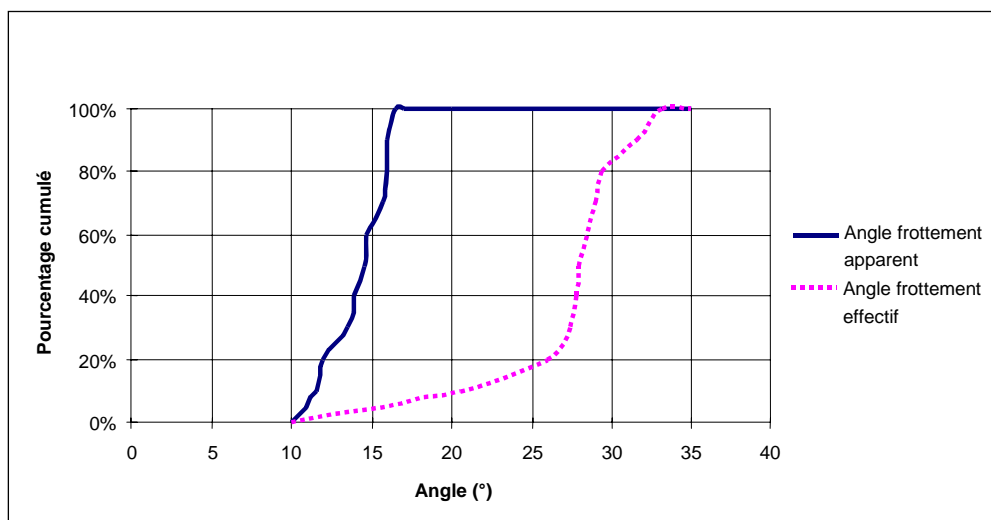
10 échantillons (19,5 % des essais de cisaillement) concernent les alluvions anciennes.

Cohésion (apparente / effective) 90 % des échantillons ont des renseignements sur ces valeurs, ce qui est illustré par la figure suivante :



Pourcentages cumulés de cohésions apparentes et effectives des alluvions anciennes

Angle de frottement : tous les échantillons ont des renseignements sur ces valeurs, illustré par la figure suivante :



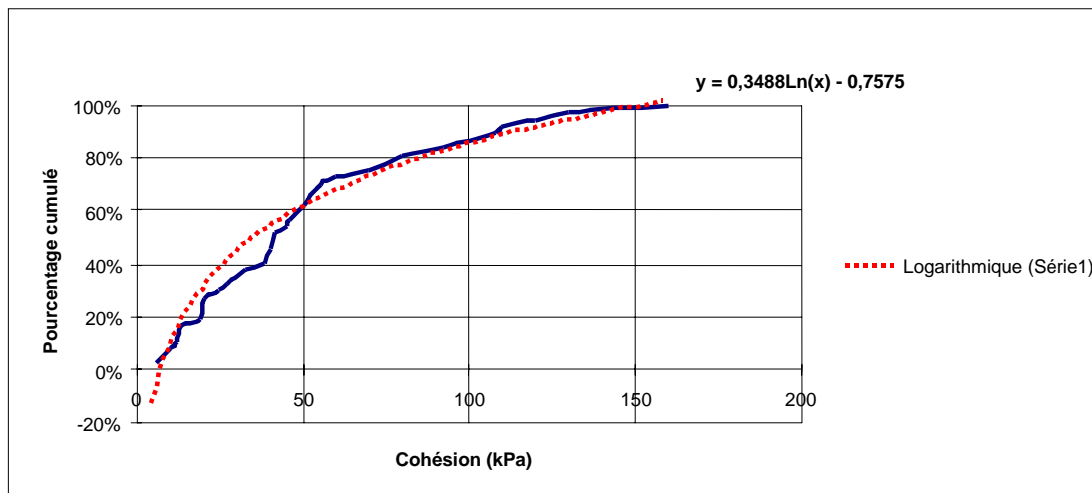
Pourcentages cumulés de l'angle de frottement des alluvions anciennes

Essai à la boîte de Casagrande essai U.U. (Non consolidé Non drainé)

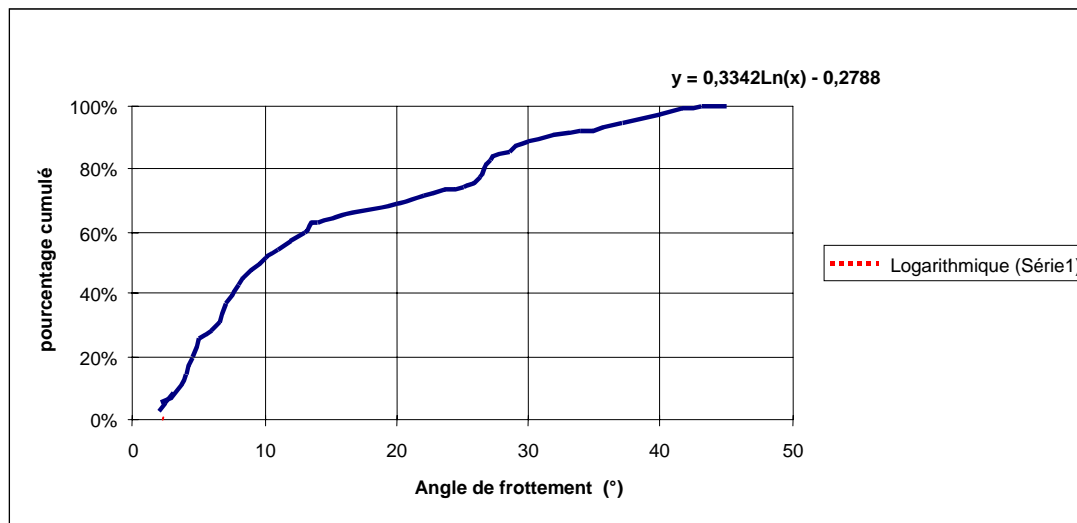
81 % des essais de cisaillement ont été effectués selon cette méthodologie.

Un seul échantillon d'alluvions modernes a subi cet essai, dont les résultats sont : cohésion : 30 kPa ; angle de frottement : 15°.

Pour les alluvions anciennes, 41 échantillons sur 51 ont subi cet essai, et on constate que 90 % des résultats sont des valeurs renseignées pour la cohésion et 85 % sont des valeurs renseignées pour l'angle de frottement.



Pourcentages cumulés de cohésion des alluvions anciennes



Pourcentages cumulés de l'angle de frottement des alluvions anciennes

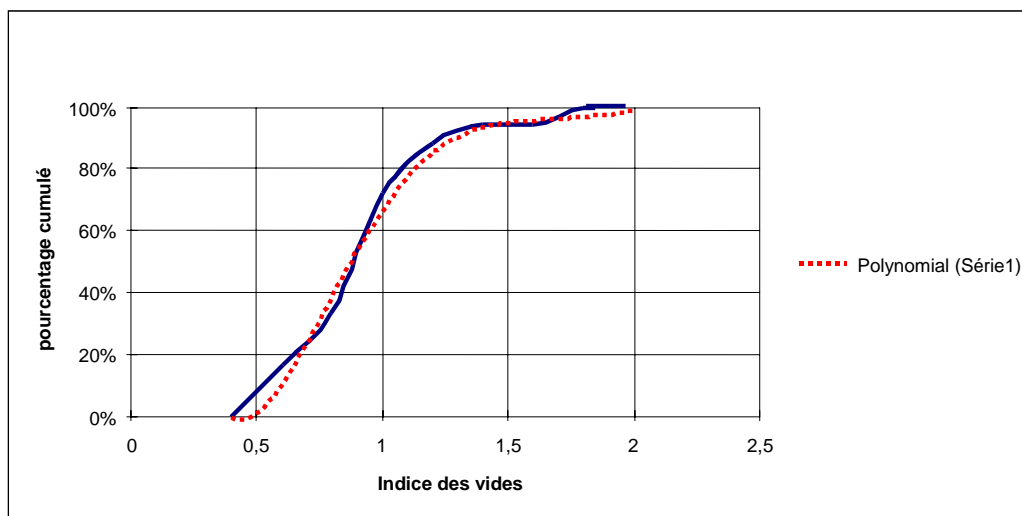
Sur ces deux graphiques, au vu du comportement de la courbe originale (en traits continus), il est nécessaire de représenter une courbe de tendance, qui est de type logarithmique d'ordre 2, et dont l'équation figure à l'asymptote.

a) Essai de Compressibilité

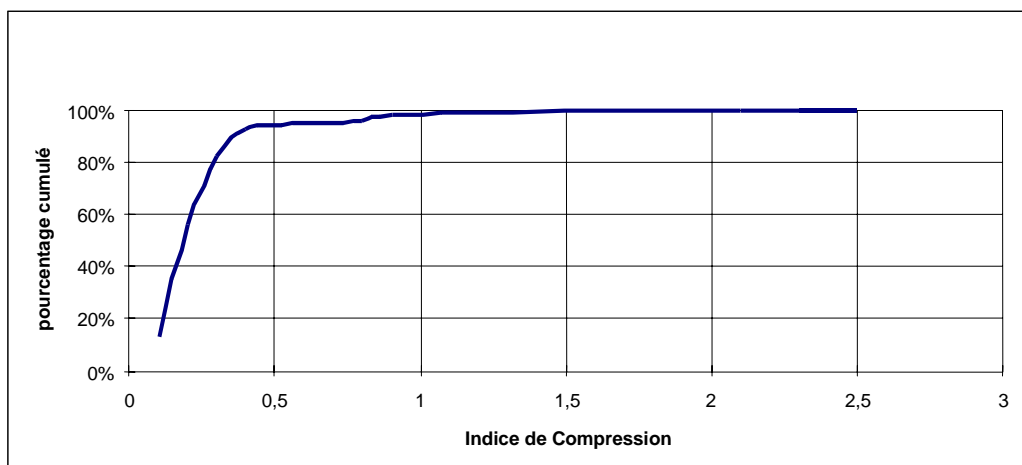
53 échantillons d'alluvions ont subi des essais de compressibilité, mais seulement un seul a été effectué pour les alluvions modernes.

Pour cet échantillon, les valeurs suivantes ont été observées : indice des vides initial égal à 0,806 ; et indice de compression à 0,251.

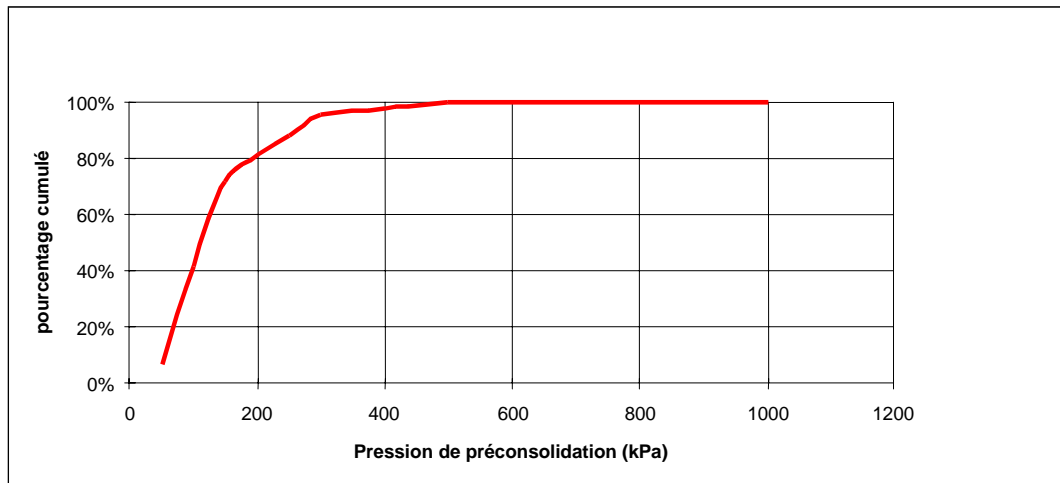
Sur les 52 échantillons d'alluvions anciennes, l'indice des vides initial a été mesuré pour 35 % d'entre eux. L'indice de compression a été effectué sur chacun des échantillons, et la pression de consolidation a été mesurée 83 % d'entre eux. La courbe de tendance est de type polynomiale d'ordre 5.



Pourcentages cumulés de l'angle de l'indice des vides des alluvions anciennes



Pourcentages cumulés de l'indice de compression des alluvions anciennes



Pourcentages cumulés de la pression de consolidation des alluvions anciennes

B. Formations de pente

Dans la base de données, 74 échantillons sont répertoriés en tant que formations de pente. Ces échantillons ont fait l'objet des tests géotechniques suivants :

a) Essais d'identification

60 échantillons au total - On connaît leur limite de liquidité et leur indice de plasticité pour 66 % d'entre eux, ce qui est résumés par le diagramme de Casagrande ci-après.

La teneur en eau des échantillons est connue pour 84 % d'entre eux, et le poids volumique sec est connu pour 42 % d'entre eux.

En ce qui concerne le degré de saturation, il n'est connu que pour 2 échantillons, soit seulement 3 % de l'effectif concernant les formations de pente. Ces 2 valeurs sont 80 % et 85 %.

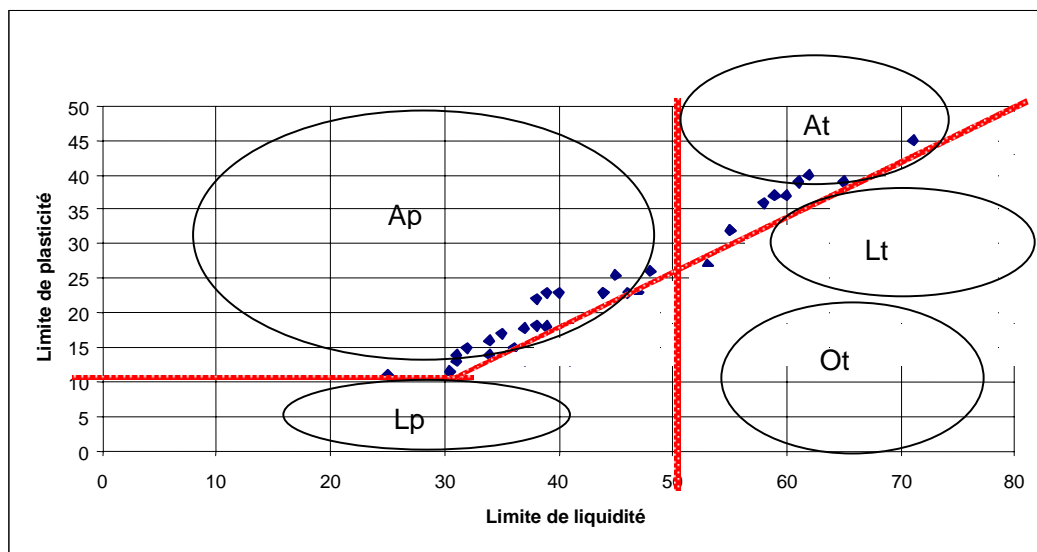
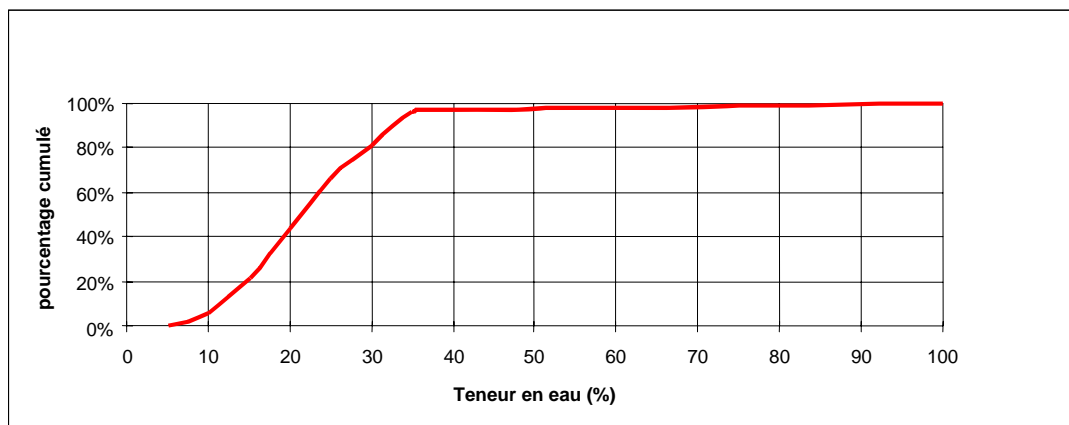
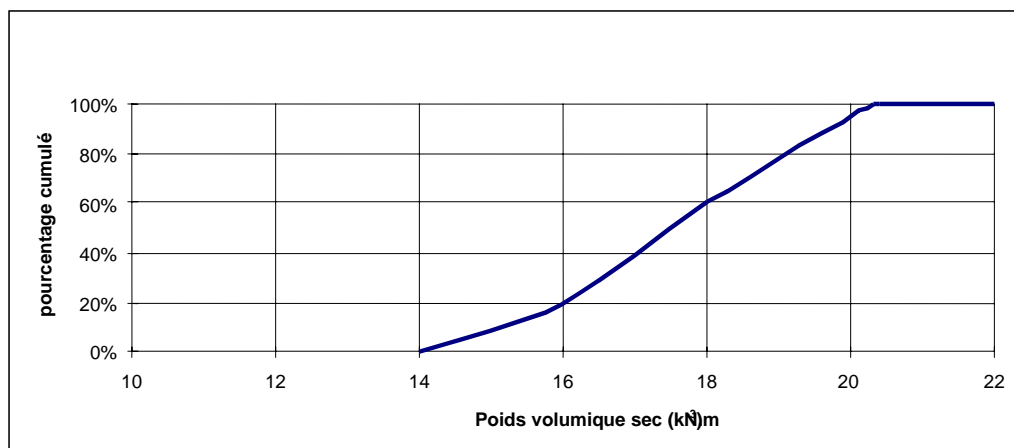


Diagramme de Casagrande pour les échantillons des formations de pentes



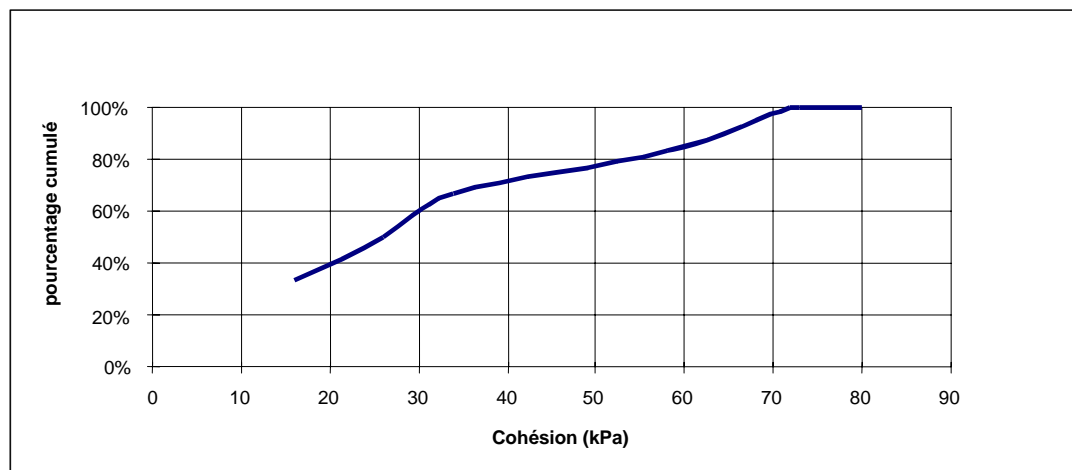
Pourcentages cumulés des teneurs en eau pour les échantillons des formations de pentes



Pourcentages cumulés des poids volumiques secs des échantillons des formations de pentes

b) Essai au scissomètre

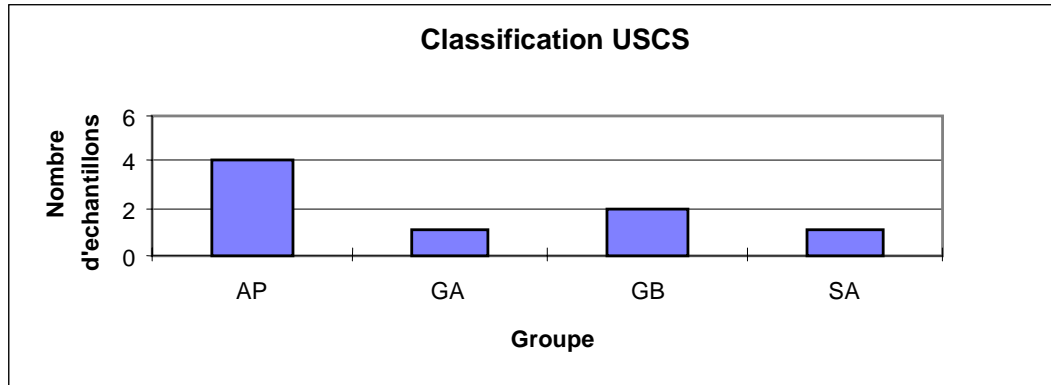
6 échantillons sur 60 (soit 10 %) ont des renseignements concernant la cohésion au scissomètre.



Pourcentages cumulés des cohésions des échantillons des formations de pentes

c) Essai granulométrique

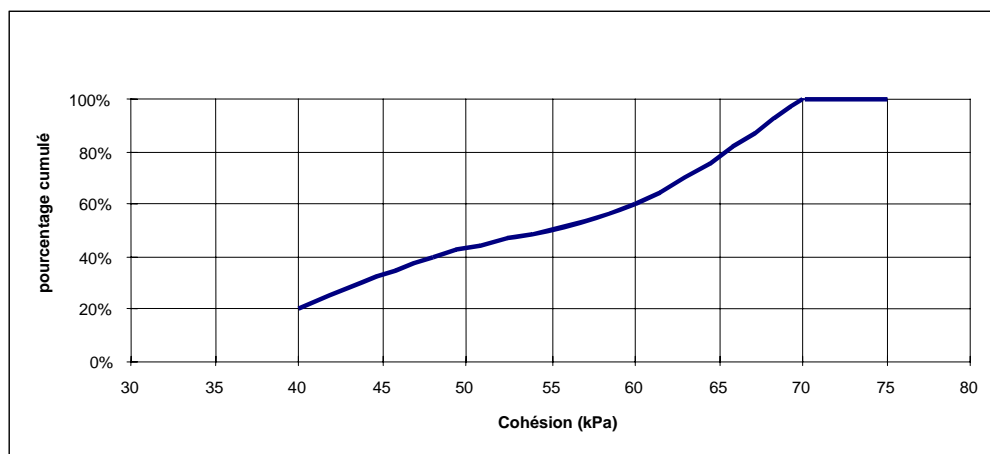
Les essais ont été réalisés sur 27 échantillons, dont 8 échantillons ont pu être classés.



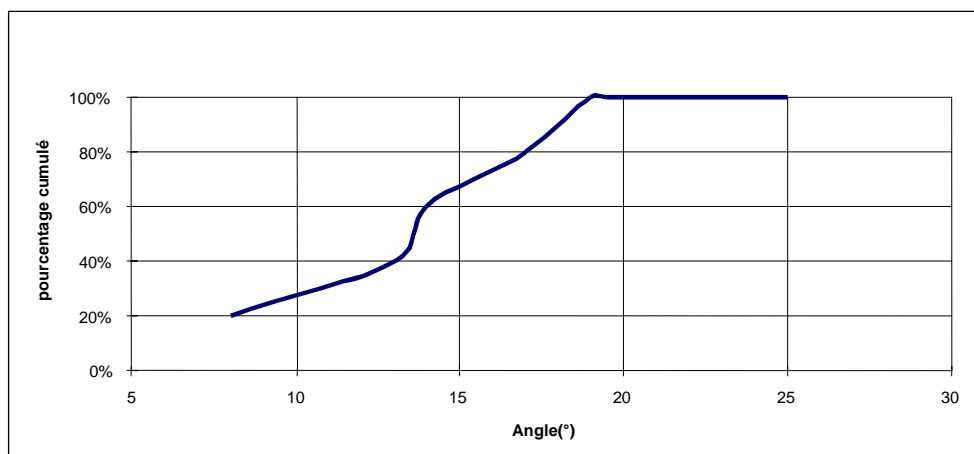
Répartition des échantillons des formations de pentes selon la classe de sols

d) Essai de cisaillement

5 échantillons ont subi des essais de cisaillement. Un seul type d'essai a été effectué, l'essai U.U.



Pourcentages cumulés de cohésion apparente pour les échantillons des formations de pentes



Pourcentages cumulés des angles de frottement des échantillons des formations de pentes

e) Essai de compressibilité

Seulement 2 échantillons de formations de pentes ont subi ces essais. Les résultats sont les suivants :

	Indice des vides	Indice de pré-consolidation
Echantillon 1	0,644	60
Echantillon 2	0,605	90

C. Formations de plateau

Seulement 18 échantillons correspondant à cette catégorie sont répertoriés dans la base de données.

a) Essais d'identification

Ces 18 échantillons de formations de plateau ont subi des essais d'identification.

17 échantillons ont des valeurs renseignées pour les limites de liquidité et les indices de plasticité, et peuvent donc être répertoriés dans un diagramme de Casagrande.

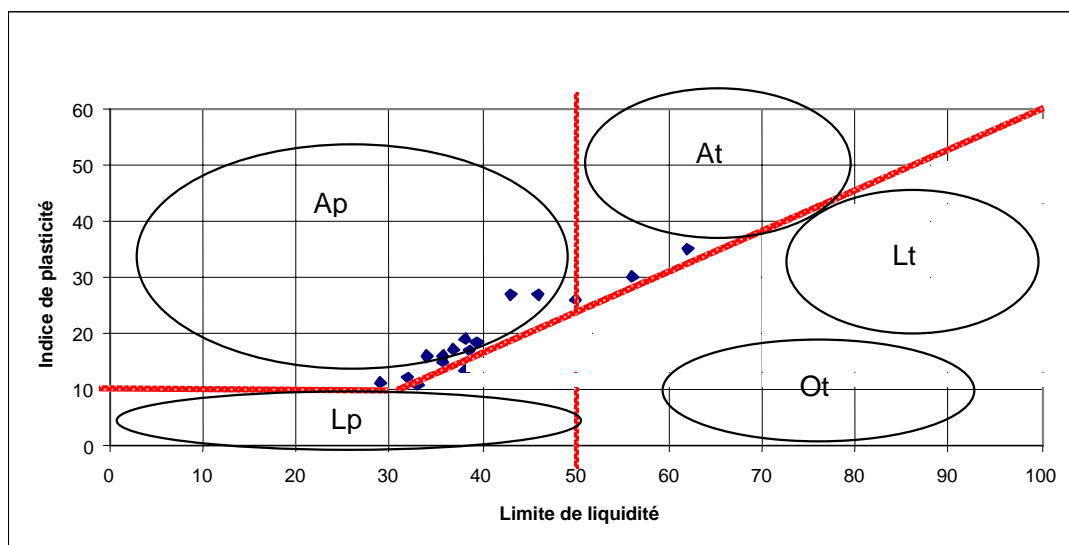
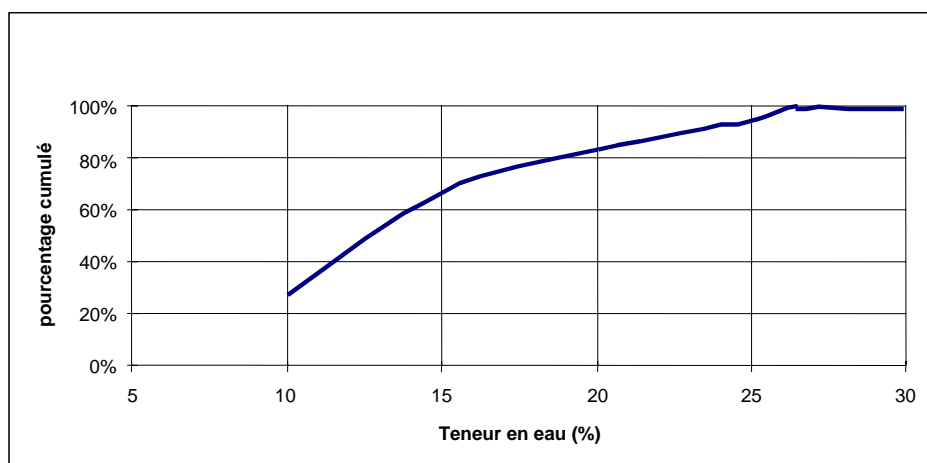


Diagramme de Casagrande pour les formations de plateau

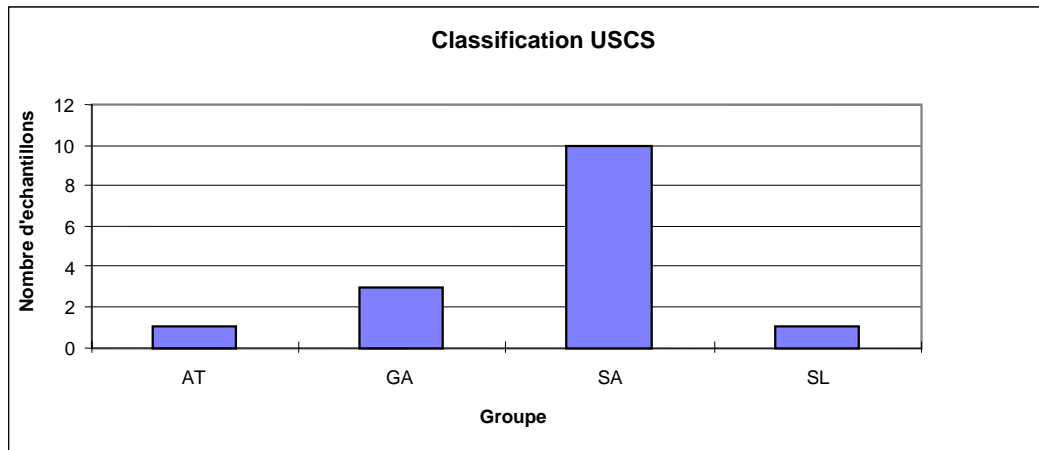
La teneur en eau a été mesurée pour la totalité des échantillons répertoriés.



Pourcentages cumulés des teneurs en eau des échantillons des formations de plateau

b) Essai granulométrique

15 échantillons ont subi les essais granulométriques. La classification USCS a été déterminée pour chacun d'entre eux.



Répartition des échantillons des formations de plateau selon la classe de sols

c) Essai de cisaillement

Un seul échantillon a subi un essai de cisaillement, l'essai U.U, qui donne les valeurs de l'angle de frottement apparent, soit 18°, et la cohésion apparente, soit 60kPa.

d) Essai de compressibilité

Un seul échantillon a subi un essai de cisaillement, qui donne pour indice de compression 0,204, et pour indice de pression de pré-consolidation 11 kPa.

Commentaire [B8] : Les cadres de la page sont liés à ce paragraphe !

Annexe 3 :

Interpolation par la géostatistique

Cette annexe donne quelques informations théoriques concernant les éléments de géostatistique utilisés ici. On y trouve notamment des définitions et des bases des principaux outils mis en œuvre, à savoir le variogramme et le krigeage.

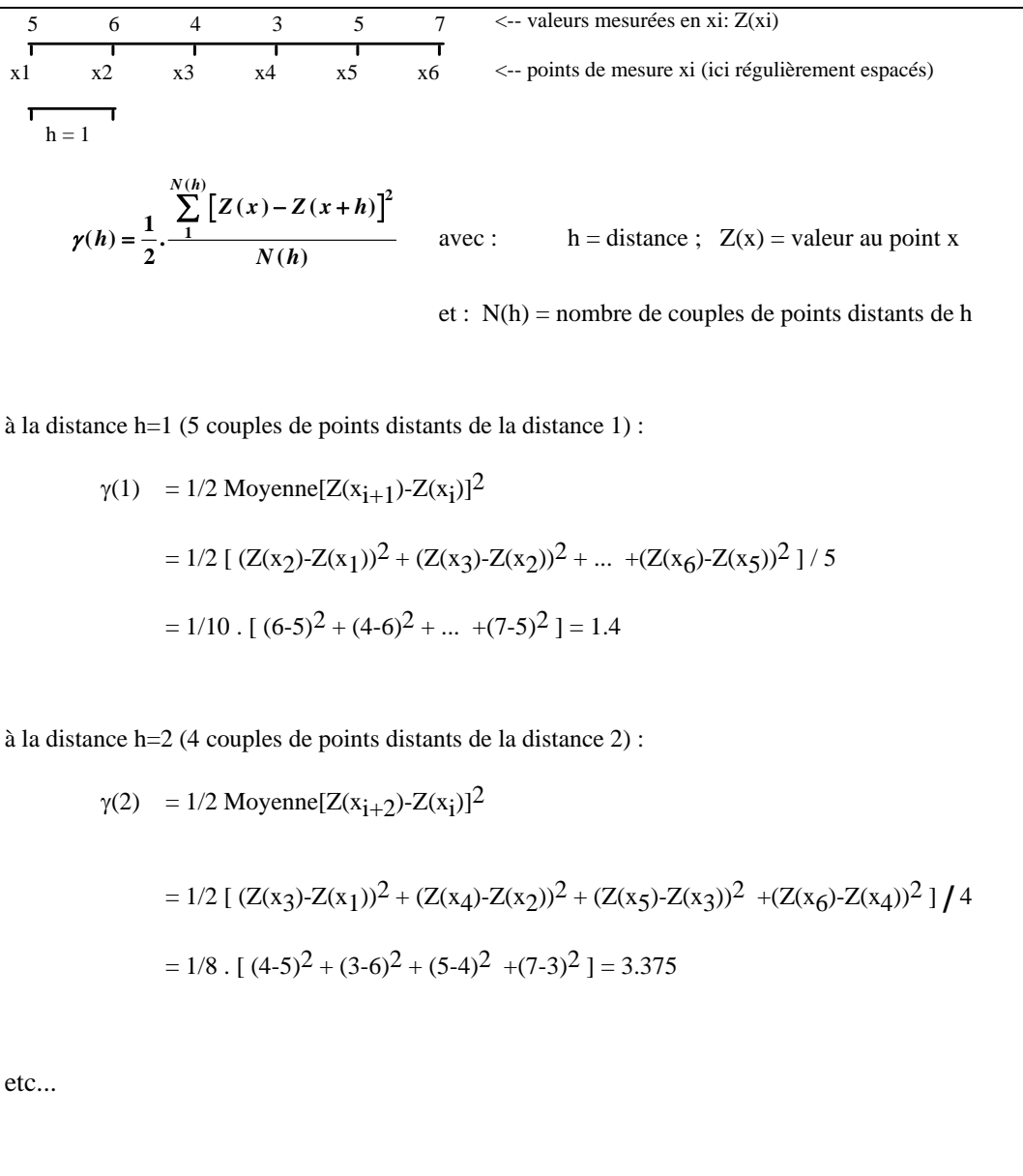
Les outils de la géostatistique

La géostatistique utilisée en sciences de la terre utilise 2 outils fondamentaux :

- le variogramme ;
- le krigeage.

Le variogramme

Dans un paramètre 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 manière dont se dégrade cette corrélation avec la distance, la géostatistique fait appel à la fonction variogramme $\gamma(h)$. Cette fonction, fondée sur la distance **h** qui sépare deux points, calcule la valeur moyenne de $1/2[Z(x+h)-Z(x)]^2$. La figure ci-après illustre ce calcul.



Principe de calcul du variogramme.

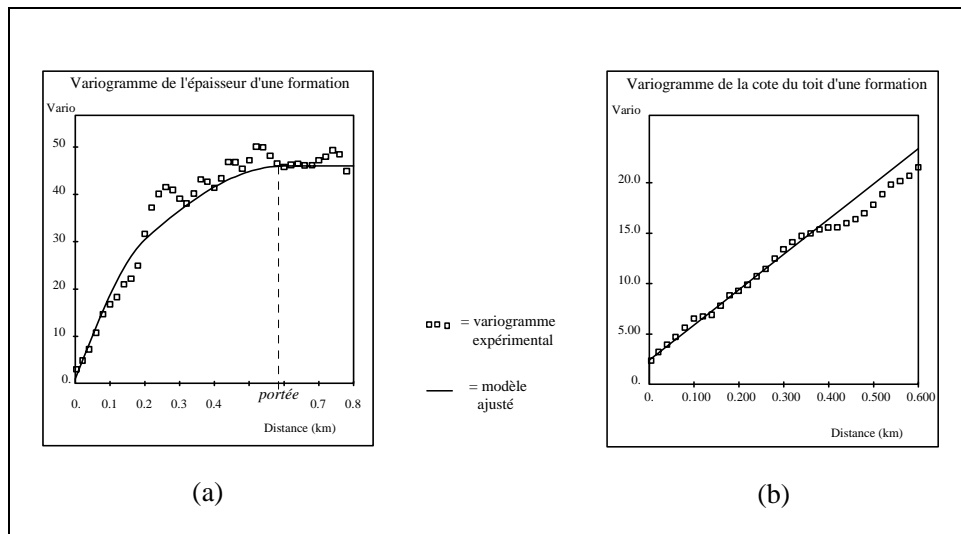
Le variogramme est d'abord un outil d'analyse des phénomènes naturels. En effet, l'allure et le comportement du variogramme expérimental fournissent une image synthétique des principaux traits structuraux du phénomène étudié :

- la continuité à l'origine.

En principe $Z(\mathbf{x})$ et $Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$ sont égaux quand \mathbf{h} tend vers $\mathbf{0}$. 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".

- la continuité spatiale au-delà de l'origine, traduite par les observations suivantes :

- la portée (distance de corrélation), phénomène stationnaire - figure (a) ci-après-. Classiquement la valeur du variogramme est plus faible à l'origine : $Z(\mathbf{x})$ et $Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$ sont voisins quand \mathbf{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 $Z(\mathbf{x})$ et $Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$ 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.
- les anisotropies directionnelles.
- les imbrications d'échelles de variabilité.
- une dérive ou tendance régionale, marquée par l'absence de portée finie, qui traduit un phénomène non stationnaire. Elle est illustrée par la figure (b) ci-après.



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

Le krigeage

La méthode d'interpolation de la géostatistique est le krigeage. Par rapport aux autres méthodes d'interpolation automatique, le krigeage présente l'avantage de reposer sur une interprétation du phénomène : l'étude variographique préalable. Le krigeage présente un double intérêt :

1. 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.

2. 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 la notion de risque doit être quantifiée, et minimisée le cas échéant par de nouvelles mesures pour être inférieures à un seuil fixé.

Formalisme du krigeage "ordinaire"

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

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

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 :

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

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

- n = nombre d'informations disponibles
- i, j = indices des points de mesure ; i et j varient de 1 à n
- $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ = points de mesure \mathbf{x}_i et \mathbf{x}_j
- $Z(\mathbf{x}_i), Z(\mathbf{x}_j)$ = valeurs mesurées en \mathbf{x}_i et \mathbf{x}_j
- \mathbf{x} = volume à estimer (point ou bloc)
- λ_i (ou λ_j) = pondérateur (ou poids) affecté à la valeur mesurée en \mathbf{x}_i
- μ = paramètre de Lagrange
- $\gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ = valeur du variogramme $\gamma(\mathbf{h})$ pour \mathbf{h} = distance entre \mathbf{x}_i et \mathbf{x}_j
- $\gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x})$ = valeur du variogramme $\gamma(\mathbf{h})$ pour \mathbf{h} = distance entre \mathbf{x}_i et \mathbf{x} ,
si \mathbf{x} est un volume, on prend la valeur moyenne de γ entre \mathbf{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 \mathbf{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 \mathbf{x}_i par rapport au volume ou au point à estimer \mathbf{x} , par le biais des valeurs de $\gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x})$;
- la répartition des informations, par le biais des valeurs de $\gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$;
- la fonction structurale variogramme γ .

Exemple de krigeage ordinaire avec 2 points

Pour une estimation d'un point \mathbf{x} à partir de deux informations ponctuelles situées en \mathbf{x}_1 et \mathbf{x}_2 , la valeur estimée au point \mathbf{x} vaut $Z^*(\mathbf{x}) = \lambda_1 Z(\mathbf{x}_1) + \lambda_2 Z(\mathbf{x}_2)$ et le système s'écrit :

$$\lambda_1 \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) + \lambda_2 \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mu = \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x})$$

$$\lambda_1 \gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_1) + \lambda_2 \gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_2) + \mu = \gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{x})$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1$$

$\gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1)$ vaut 0 puisque la distance entre \mathbf{x}_1 et lui-même vaut 0. De même pour $\gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_2)$. Par ailleurs, $\gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ et $\gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_1)$ sont égaux à la valeur de $\gamma(\mathbf{h})$ pour \mathbf{h} = distance entre \mathbf{x}_1 et \mathbf{x}_2 .

Le système se simplifie de la façon suivante :

$$\lambda_2 \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mu = \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x})$$

$$\lambda_1 \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mu = \gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{x})$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1$$

La variance de krigeage vaut :

$$S_k^2 = \lambda_1 \gamma(x_1, x) + \lambda_2 \gamma(x_2, x) + \mu$$

Variantes du krigeage

Des variantes du krigeage ordinaire permettent de traiter des phénomènes présentant une tendance ou dérive (krigeage universel), d'estimer la probabilité de dépassement d'un seuil (krigeage d'indicatrice, krigeage disjonctif), ou sont adaptées à des distributions particulières (krigeage log-normal).

De plus, les techniques de krigeage se sont enrichies pour tenir compte des interprétations des autres spécialistes : un exemple courant est celui de la prise en compte des failles et discontinuités reconnues.

BRGM
SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL LORRAINE
1, avenue du Parc de Brabois – 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy – France
Tél. : 03.83.44.81.49 – Fax : 03.83.44.15.18