

Modèle de terrain pour l'étude des performances épuratoires de sols naturels

Chahrazad AMAMOU

Polytech' Clermont-Ferrand (CUST) - Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur- Département Génie Civil – juin 2012 –

-Résumé-

Les assainissements non collectifs (ANC) sont de plus en plus utilisés dans les régions où la population est dispersée. La possibilité d'utiliser les sols naturels en place s'avère donc être une solution plus économique. Néanmoins, leurs capacités d'épuration doit être évaluée afin d'éviter tout rejet d'eau polluée.

Mon projet de fin d'étude a donc pour objectif de développer une méthodologie de reconnaissance des sols qui aura pour finalité l'estimation des capacités épuratoires.

Deux essais in situ ont été utilisés :

- L'essai pénétromètre PANDA qui permet d'avoir la résistance de pointe en fonction de la profondeur
- L'essai géo-endoscopique qui permet de compléter l'essai pénétromètre par une prise d'images dans la cavité laissée par le PANDA

Ce rapport présente une méthodologie de reconstruction du terrain naturel à partir des deux essais qui ont été, au cours de deux missions, effectués sur treize sites.

Il s'agit en premier temps d'analyser les résultats issus des deux campagnes d'essais afin d'obtenir des stratigraphies ponctuelles de chaque site. Dans un deuxième temps, différentes méthodes de spatialisation sont appliquées et comparées sur ces stratigraphies ponctuelles pour conclure sur le choix de la méthode la plus stable et la mieux adaptée à notre domaine d'application.

Mots Clés

ANC- géo-endoscopique -PANDA-Epuration-Sol naturel-Spatialisation

INSTITUT PASCAL POLYTECH' Clermont-Ferrand (CUST)

24, Avenue Des Landais 63170 Aubière

Travaux dirigés par M. Pierre BEUL- M. Mohamed SAHLI-Mlle Mathilde MORVAN

Terrain model to study the purification performance of natural soils

Chahrazad AMAMOU

Polytech ' Clermont-Ferrand (CUST) - Report presented in order to obtain the engineering degree - Department Civil engineering - June, 2012-

-Summary-

The non collective sanitation (NCS) is more and more used in the regions where the population is scattered. The possibility of using the natural grounds in position thus turns out to be a more economic solution. Nevertheless, their capacity of purge must be estimated to avoid any rejection of polluted water.

My project has for objective thus to develop a methodology of recognition of the grounds which will have for end the estimation of purification capacities.

Two tests were used:

- The penetrometer PANDA test who allows having the cone resistance according to the depth
- The geo-endoscopic test which allows to complete the essay penetrometer test by taking of images in the cavity left by the PANDA

This report presents a methodology of reconstruction of the natural ground from both tests which were, during two missions, made on thirteen sites.

It is a question at first time of analyzing the results stemming from both trial campaigns to obtain punctual stratigraphy of every site. Secondly, various methods of spatializing are applied and compared on this punctual stratigraphy to conclude on the choice of the method the most stable and the best adapted to our field of application.

Key Words

NCP- geo-endoscopic -PANDA- Purification- Natural ground-Spatializing

PASCAL POLYTECH INSTITUTE ' Clermont-Ferrand (CUST)

24, Avenue Des Landais 63170 Aubière

Work supervised by

Mr. Pierre BEUL-M Mohamed SAHLI-Mlle Mathilde MORVAN

Remerciements

Je remercie tout d'abord l'Ecole Hassania des Travaux publics (EHTP) et plus particulièrement Monsieur Mohamed SAHLI pour m'avoir donné la possibilité de réaliser cette expérience.

Je tiens à remercier les personnes qui ont mis au point ce stage, particulièrement M. Pierre BREUL et Mlle Mathilde MORVAN, Maître de conférences au CUST et responsable de mon encadrement scientifique pendant ce travail, pour l'aide et les conseils qu'ils m'ont apportés au cours de mon stage.

Enfin mes plus vifs remerciements s'adressent à ma famille et aux amis de toujours qui ont su me soutenir et m'encourager jusqu'au bout.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	3
LISTE DES FIGURES	5
LISTE DES TABLEAUX.....	7
INTRODUCTION	8
CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	9
1. MECANISMES D'EPURATION DU SOL.....	9
1.1. Élimination des matières en suspension	9
1.2. Élimination de la matière organique	10
1.3. Conclusion.....	11
2. CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE DES SOLS	12
2.1. Paramètres influençant la conductivité hydraulique saturée	12
2.2. Estimation de la conductivité hydraulique	15
2.3. Conclusion générale.....	30
3. INTERPOLATION SPATIALE	31
3.1. Introduction	31
3.2. Méthodes déterministes.....	31
3.3. Méthodes stochastiques.....	45
3.4. Réseaux de neurone.....	62
3.5. Conclusion.....	69
CHAPITRE II : ANALYSE ET INTERPRETATION	70
1. ANALYSE DES ESSAIS : STRATIGRAPHIES PONCTUELLES.....	70
1.1. Présentation des essais.....	70
1.2. Présentation des sites étudiés	86
1.3. Analyse des résultats	89
2. SPATIALISATION DES DONNEES	135
2.1. Interpolation des stratigraphies	135
2.2. Interpolation de la résistance de pointe	151
CONCLUSION GENERALE	161
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	162

Liste des figures

FIGURE 1 : PERMEABILITE EN FONCTION DU DEGRE DE SATURATION POUR UNE ARGILE COMPACTEE (OLSON ET DANIEL79)	14
FIGURE 2 : PARAMETRES INFLUENÇANT LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE	15
FIGURE 3 : METHODES DE MESURE DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE.....	16
FIGURE 4 : SCHEMA DE L'APPAREIL DE DARCY.....	18
FIGURE 5 : PRINCIPE DU PERMEAMETRE A CHARGE CONSTANTE.....	20
FIGURE 6 : PERMEAMETRE A CHARGE VARIABLE	21
FIGURE 7 : PRINCIPE DE L'ESSAI AU SIMPLE ANNEAU OUVERT	27
FIGURE 8 : PRINCIPE DE L'ESSAI AU SIMPLE ANNEAU FERME	27
FIGURE 9 : PRINCIPE DE L'ESSAI AU DOUBLE ANNEAU FERME.....	28
FIGURE 10 : SCHEMA DE L'INTERPOLATION QUADRATIQUE	32
FIGURE 11 : SCHEMA D'INTERPOLATION CUBIQUE	34
FIGURE 12 : SCHEMA D'INTERPOLATION PAR SPLINES CUBIQUES.....	37
FIGURE 13 : EXEMPLE DE PARTITIONNEMENT PAR POLYGONES DE THIessen	41
FIGURE 14 : PARAMETRES CARACTERISTIQUES D'UN VARIOGRAMME.....	50
FIGURE 15 : MODELES VARIOGRAMME ISOTROPES AVEC PALIER	51
FIGURE 16 : MODELE VARIOGRAMME SPHERIQUE DE PORTEE A ET DE PALIER C (LINEAIRE A L'ORIGINE).....	52
FIGURE 17 : MODELE VARIOGRAMME CUBIQUE DE PORTEE A ET DE PALIER C (PARABOLIQUE A L'ORIGINE)	53
FIGURE 18 : MODELE VARIOGRAMME EXPONENTIEL DE PARAMETRE A ET DE PALIER C (LINEAIRE A L'ORIGINE).....	54
FIGURE 19 : MODELE VARIOGRAMME GAUSSIEN DE PARAMETRE A ET DE PALIER C (PARABOLIQUE A L'ORIGINE)	55
FIGURE 20 : MODELE VARIOGRAMME A EFFET DE TROU (PARABOLIQUE A L'ORIGINE)	56
FIGURE 21 : MODELES VARIOGRAMME ISOTROPES SANS PALIER	57
FIGURE 22 : MODELE VARIOGRAMME LINEAIRE DE PENTE Ω (LINEAIRE A L'ORIGINE).....	58
FIGURE 23 : SCHEMA DE NEURONE	63
FIGURE 24 : SCHEMA DU NEURONE	63
FIGURE 25 : COURBE DE LA FONCTION SIGMOÏDE	64
FIGURE 26 : SCHEMA D'UNE CONNEXION ENTRE DEUX NEURONES I ET J	64
FIGURE 27 : SCHEMA D'UN RESEAU A COUCHES MULTIPLES	65
FIGURE 28: PRINCIPE DU PANDA.....	71
FIGURE 29 : EXEMPLE DE PENETROGRAMME OBTENU AVEC L'ESSAI PANDA	72
FIGURE 30 : EXEMPLE DE STRATIGRAPHIE A PARTIR D'UN PENETROGRAMME OBTENU PAR L'ESSAI PANDA	73
FIGURE 31 : EXEMPLE DES IMAGES OBTENUES PAR UN ENDOSCOPE.....	74
FIGURE 32 : VALEUR DU M3 PAR RAPPORT AU TAMISAT A 80 μ M [BRE99].....	76
FIGURE 33 : DEMARCHE COMPLETE DE L'ANALYSE DE LA TEXTURE [BRE99].....	78
FIGURE 34 : PENETROGRAMME OBTENU PAR L'ESSAI PANDA DANS LE CAS DU SITE CHERRY « SONDAGE 2 MISSION 2 »	80
FIGURE 35 : STRATIGRAPHIE OBTENUE PAR L'ANALYSE DU PENETROGRAMME DANS LE CAS DU SITE CHERRY « SONDAGE 2 MISSION 2 »	81
FIGURE 36 : ANALYSE DE LA TEXTURE A PARTIR DES IMAGES OBTENUES PAR L'ENDOSCOPE DANS LE CAS DU SITE CHERRY « SONDAGE 2 MISSION 2 »	84
FIGURE 37 : ANALYSE COLORIMETRIQUE A PARTIR DES IMAGES OBTENUES PAR L'ENDOSCOPE DANS LE CAS DU SITE CHERRY « SONDAGE 2 MISSION 2 »	85
FIGURE 38 : PHOTO DU SITE SEMENTRON.....	89
FIGURE 39 : EMPLACEMENT DES ESSAIS REALISES POUR LE SITE SEMENTRON (MISSION 1)	90
FIGURE 40 : ANALYSE DU PENETROGRAMME DU SITE SEMENTRON SONDAGE 1 MISSION 1	91
FIGURE 41 : ANALYSE DU PENETROGRAMME DU SITE SEMENTRON SONDAGE 2 MISSION 1	92
FIGURE 42 : ANALYSE DU PENETROGRAMME DU SITE SEMENTRON SONDAGE 5 MISSION 1	95
FIGURE 43 : PHOTO DU SITE PESTEau.....	97
FIGURE 44 : EMPLACEMENT DES ESSAIS REALISES POUR LE SITE PESTEau (MISSION1)	98
FIGURE 45 : PHOTO DU SITE LES ORMES.....	100
FIGURE 46 : EMPLACEMENT DES ESSAIS REALISES POUR LE SITE LES ORMES.....	101
FIGURE 47 : ETAT DU SABLE (COLMATE) « A DROITE » ET DU GRAVIER (PRESENCE D'EAU) « A GAUCHE » POUR LE SITE « LES ORMES SONDAGE 4 »	104
FIGURE 48 : PHOTO DU SITE USSELOT.....	105

FIGURE 49 : EMLACEMENT DES ESSAIS REALISES POUR LE SITE USSELOT	106
FIGURE 50 : COMPARAISON DE L'ETAT DU SABLE DANS LE CAS DU SONDAGE 2 « A DROITE » ET DU SONDAGE 1 « A GAUCHE » POUR LE SITE « USSELOT »	108
FIGURE 51 : EMLACEMENT DES ESSAIS REALISES POUR LE SITE METAIRIE	109
FIGURE 52 : ANALYSE DU PENETROGRAMME DU SITE METAIRIE SONDAGE 3 MISSION 2	111
FIGURE 53 : ANALYSE DU PENETROGRAMME DU SITE METAIRIE SONDAGE 4 MISSION 2	112
FIGURE 54 : PHOTO DU SITE EGLENY	113
FIGURE 55 : EMLACEMENT DES ESSAIS REALISES POUR LES SITES EGLENY POUR LA MISSION 1 ET LA MISSION 2.....	114
FIGURE 56 : L'ETAT DU SABLE DANS LE CAS DU SITE EGLENY MISSION 1 POUR LE SONDAGE 1 « A GAUCHE » LE SONDAGE 2 « AU MILIEU » ET LE SONDAGE 3 « A DROITE »	117
FIGURE 57 : COMPARAISON ENTRE L'ETAT DU SABLE POUR LA MISSION 1 « A GAUCHE » ET POUR LA MISSION 2 « A DROITE » POUR LE SITE EGLENY	117
FIGURE 58 : PHOTO DU SITE CHERRY	118
FIGURE 59 : EMLACEMENT DES ESSAIS REALISES	119
FIGURE 60 : COMPARAISON ENTRE L'ETAT DU SABLE DU SONDAGE 3 DE LA MISSION 1 « A GAUCHE » ET DU SONDAGE 1 « AU MILIEU » ET SONDAGE 2 « A DROITE » POUR LA MISSION 2 POUR LE SITE CHERRY	122
FIGURE 61 : EMLACEMENT DES ESSAIS REALISES POUR LE SITE LES FOURS	123
FIGURE 62 : ETAT DU SABLE POUR LE SONDAGE 1 « A GAUCHE » ET LE SONDAGE 2 « A DROITE » AINSI QUE L'ETAT DU GRAVIER DU SONDAGE 1 « AU MILIEU » POUR LE SITE LES FOURS	125
FIGURE 63 : EMLACEMENT DES ESSAIS REALISES POUR LE SITE LES CLERCS.....	126
FIGURE 64 : PHOTO DU SITE LES DOIGTS.....	128
FIGURE 65 : EMLACEMENT DES ESSAIS REALISES POUR LE SITE LES DOIGTS	129
FIGURE 66 : ESSAI PANDA SITE LES DOIGTS SONDAGE 2 MISSION 1.....	131
FIGURE 67 : COMPARAISON DU SABLE POUR LE CAS DU SONDAGE 1 « A GAUCHE » ET LE SONDAGE 2 « A DROITE » POUR LE SITE LES DOIGTS	133
FIGURE 68 : COMPARAISON ENTRE LES SABLES DU SONDAGE 4 MISSION 1 « A GAUCHE » ET LE SABLE DU SONDAGE 1 « AU MILIEU » ET DU SONDAGE 2 « A DROITE » MISSION 2 POUR LE SITE LES DOIGTS	134
FIGURE 69 : EMLACEMENT DES SONDAGES QUI SE TROUVE A L'EXTERIEUR DE L'ANC POUR LE SITE EGLENY.....	136
FIGURE 70 : STRATIGRAPHIE PONCTUELLE DU SONDAGE 1 DU SITE EGLENY MISSION 1	136
FIGURE 71 : STRATIGRAPHIE PONCTUELLE DU SONDAGE 2 DU SITE EGLENY MISSION 1	137
FIGURE 72 : STRATIGRAPHIE PONCTUELLE DU SONDAGE 3 DU SITE EGLENY MISSION 1	137
FIGURE 73 : STRATIGRAPHIE PONCTUELLE DU SONDAGE 3 DU SITE EGLENY MISSION 2	137
FIGURE 74 : INTERPOLATION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE LIMON DU SITE EGLENY PAR LA METHODE « CLOSEST POINT »	138
FIGURE 75 : INTERPOLATION DE LA COUCHE DE LIMON DU SITE EGLENY PAR LA METHODE TRIANGULATION AVEC L'OPTION « INTERPOLATE EDGE POINTS » A GAUCHE ET L'OPTION « NO EDGE INTERPOLATION » A DROITE	139
FIGURE 76 : VALEURS ESTIMEES AVOISINANT LE SONDAGE S2 DANS LE CAS DE L'INTERPOLATION DE LA COUCHE DE LIMON AVEC LA METHODE INVERSE DISTANCE ET P=1	144
FIGURE 77 : VALEURS ESTIMEES AVOISINANT LE SONDAGE S2 DANS LE CAS DE L'INTERPOLATION DE LA COUCHE DE LIMON AVEC LA METHODE INVERSE DISTANCE ET P=2	144
FIGURE 78 : MODELISATION EN 3D DU TERRAIN NATUREL DU SITE EGLENY PAR LA METHODE « INVERSE DISTANCE » AVEC P=2 ET N=3	145
FIGURE 79 : EMLACEMENT DES PROFILS POUR SITE EGLENY	146
FIGURE 80 : PROFIL 1 DU TERRAIN NATUREL DU SITE EGLENY INTERPOLER PAR LA METHODE INVERSE DISTANCE P=2 ET N=3.....	147
FIGURE 81 : PROFIL 2 DU TERRAIN NATUREL DU SITE EGLENY INTERPOLER PAR LA METHODE INVERSE DISTANCE P=2 ET N=3.....	147
FIGURE 82 : PROFIL 3 DU TERRAIN NATUREL DU SITE EGLENY INTERPOLER PAR LA METHODE INVERSE DISTANCE P=2 ET N=3.....	148
FIGURE 83 : PROFIL 1 DU TERRAIN NATUREL DU SITE EGLENY, INTERPOLATION PAR LA METHODE « INVERSE DISTANCE P=2 ET N=3 » AVEC COUCHE BASSE ETENDUE.....	148
FIGURE 84 : GRILLE DU MODELE SOLIDE	151
FIGURE 85 : REPRESENTATION DU VOXEL.....	151
FIGURE 86 : COMPARAISON ENTRE L'INTERPOLATION DE QP PAR LES METHODES INVERSE DISTANCE ISOTROPIQUE (GAUCHE) ET ANISOTROPIQUE (DROITE)	152
FIGURE 87 : COMPARAISON DES VALEURS AUTOUR DU SONDAGE S1 DU SITE EGLENY AVEC L'INTERPOLATION PAR LA METHODE « INVERSE DISTANCE » ISOTROPIQUE (GAUCHE) ET ANISOTROPIQUE (DROITE).....	153
FIGURE 88 : COMPARAISON DES VALEURS AUTOUR DU SONDAGE S1 DU SITE EGLENY AVEC L'INTERPOLATION PAR LA METHODE « INVERSE DISTANCE » ISOTROPIQUE (GAUCHE) ET ANISOTROPIQUE (DROITE) SANS LE SONDAGE S4	154
FIGURE 89 : COMPARAISON ENTRE L'INTERPOLATION DES RESISTANCES DE POINTE A UNE PROFONDEUR DE 0.5 M PAR L'INVERSE DISTANCE ANISOTROPIQUE AVANT (FIGURE DE DROITE) ET APRES (FIGURE DE GAUCHE) REGULARISATION DES DONNEES	156

FIGURE 90 : COMPARAISON DES VALEURS VOISINANT LE SONDAGE S1 ET S4 INTERPOLEES PAR LA METHODE INVERSE DISTANCE ANISOTROPIQUE DANS LE CAS AVANT (DROITE) ET APRES (GAUCHE) REGULARISATION DES DONNEES.....	157
FIGURE 91 : COMPARAISON DES VALEURS VOISINANT LE SONDAGE S3 INTERPOLEES PAR LA METHODE INVERSE DISTANCE ANISOTROPIQUE DANS LE CAS AVANT (DROITE) ET APRES (GAUCHE) REGULARISATION DES DONNEES.....	157
FIGURE 92 : COMPARAISON DES VALEURS VOISINANT LE SONDAGE S4 INTERPOLEES PAR LA METHODE INVERSE DISTANCE ANISOTROPIQUE DANS LE CAS AVANT (DROITE) ET APRES (GAUCHE) REGULARISATION DES DONNEES.....	158
FIGURE 93 : MODELISATION EN 3D DE LA RESISTANCE DE POINTE AVEC LA METHODE INVERSE DISTANCE ANISOTROPIQUE SANS LA REGULARISATION DES DONNEES	159

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : ORDRE DE GRADEUR DE LA PERMEABILITE D'APRES GERARD PHILLIPPONNAT	17
TABLEAU 2 : RESUME DES METHODES D'INTERPOLATION QUADRATIQUE, CUBIQUE, DE LAGRANGE ET PAR SPLINES CUBIQUES	40
TABLEAU 3 : DESCRIPTION DES SITES MISSION 1	86
TABLEAU 4 : BILAN DES ESSAIS MISSION 1	87
TABLEAU 5 : DESCRIPTION DES SITES MISSION 2	87
TABLEAU 6 : BILAN DES ESSAIS MISSION 2	88
TABLEAU 7 : TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS POUR LE SITE SEMENTRON	90
TABLEAU 8 : TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS SITE PESTEAU	98
TABLEAU 9 : TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS SITE LES ORMES	101
TABLEAU 10 : TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS POUR LE SITE USSELOT	106
TABLEAU 11 : TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS SITE METAIRIE	109
TABLEAU 12 : TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS SITE EGLENY	114
TABLEAU 13 : TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS SITE CHERRY.....	119
TABLEAU 14 : TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS SITE LES FOURS	123
TABLEAU 15 : TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS SITE LES CLERCS	126
TABLEAU 16 : TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS SITE LES DOIGTS	129
TABLEAU 17 : VALEURS ESTIMEES DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE LIMON DU SITE EGLENY SUIVANT LES CINQ CAS.....	141
TABLEAU 18: VALEURS REELLES DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE LIMON POUR LE SITE EGLENY	142
TABLEAU 19 : VALEUR DE L'EQM DANS LES CINQ CAS POUR LE SITE EGLENY.....	142
TABLEAU 20 : VALEURS ESTIMEES DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE LIMON DU SITE EGLENY	143
TABLEAU 21 : VALEUR DE L'ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE	143
TABLEAU 22 : VALEURS REELLES ET VALEURS ESTIMEES DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE LIMON DANS LE CAS DU SITE EGLENY ET LA VALEUR ABSOLUE DE LA DIFFERENCE ENTRE LES DEUX VALEURS.....	149
TABLEAU 23 : LES VALEURS REELLES ET LES VALEURS ESTIMEES DE LA RESISTANCE DE POINTE INTERPOLER PAR LA METHODE DE L'INVERSE DISTANCE ANISOTROPIQUE POUR UNE PROFONDEUR EGALE A 0.5.....	155
TABLEAU 24 : VALEURS DES SONDAGES A UNE PROFONDEUR DE 0.5 M OBTENUES PAR LA METHODE INVERSE DISTANCE ANISOTROPIQUE AVANT ET APRES REGULARISATION DES DONNEES	156
TABLEAU 25: LES VALEURS REELLES ET LES VALEURS ESTIMEES DE LA RESISTANCE DE POINTE INTERPOLER PAR LA METHODE DE L'INVERSE DISTANCE ANISOTROPIQUE POUR UNE PROFONDEUR EGALE A 0.5 APRES REGULATION DES DONNEES.....	158
TABLEAU 26 : POURCENTAGE D'ERREUR ENTRE LES DEUX CAS AVEC ET SANS REGULATION DES DONNEES INTERPOLE PAR L'INVERSE DISTANCE ANISOTROPIQUE.....	159

Introduction

Le sol constitue une ressource naturelle précieuse et importante à gérer. C'est un milieu à la fois support, récepteur et épurateur.

Le projet ANCREs s'intéresse à cette dernière fonction dans le cas des assainissements non collectif (ANC). L'importance de ce projet vient du fait que la contamination des eaux souterraines par la pollution due à l'activité humaine représente un risque non négligeable : l'infiltration et le traitement par le sol des eaux usées peuvent nettement diminuer ce risque.

Cependant, la problématique qui se pose est qu'il existe un vide technique en ce qui concerne l'infiltration des eaux usées et l'estimation de la capacité d'épuration des sols. Afin de remédier à ce problème, le projet ANCREs a pour objectif de mettre au point une méthodologie pour caractériser la capacité d'épuration du sol et sa perméabilité par un indicateur. Cet indicateur sera construit à partir d'indices intégrant l'état des sols et leur fonctionnement et mesurable par des dispositifs d'observation.

L'indicateur développé par le projet sera ainsi un outil d'aide pour la prise de décision quant à la capacité d'un sol à pouvoir filtrer correctement les eaux usées.

Afin d'arriver à cet objectif ultime, il est nécessaire de développer une méthodologie de reconnaissance et de caractérisation des sols spécifique. Ce mémoire s'intéresse justement au développement d'une méthodologie de reconnaissance des sols pour l'évaluation des capacités épuratoires des sols naturels.

La méthodologie proposée est basée sur deux essais in situ : la géo-endoscopie et l'essai de pénétration dynamique léger type Panda. L'analyse des résultats des deux essais va nous permettre d'avoir des stratigraphies ponctuelles. Ces stratigraphies seront ensuite interpolées afin d'obtenir des modèles en 3D de la stratigraphie du terrain et de la résistance de pointe. Des modèles qui seront finalement utilisés pour avoir une modélisation en 3D de la conductivité hydraulique du terrain.

Ce rapport se divise en deux chapitres :

Dans un premier temps, nous présentons une synthèse bibliographique qui précisera les mécanismes mis en jeu lors de l'épuration par les sols, les méthodes existantes pour l'estimation de la conductivité hydraulique et les méthodes de spatialisation des données.

Dans un second temps, nous présenterons le travail réalisé pendant ce stage afin de développer la méthodologie de reconnaissance. Après la présentation des sites étudiés et des essais effectués, une première partie sera consacrée à l'analyse de ces essais afin d'obtenir des stratigraphies ponctuelles. Une dernière partie justifiera le choix de la méthode d'interpolation la plus adaptée à notre cas d'étude.

Chapitre I: Etude bibliographique

Ce premier chapitre est une étude bibliographique divisée en trois parties. L'objectif de ce mémoire étant de développer une méthodologie de reconnaissance des sols afin d'évaluer leurs capacités d'épuration il s'est avéré nécessaire de traiter dans la première partie les mécanismes d'épuration des sols pour comprendre leur comportement face à l'infiltration des eaux usées. Dans la seconde partie, on rappellera les méthodes d'estimation de la conductivité hydraulique. Cette partie a pour but de conclure quant à la difficulté de la réalisation de ces essais surtout in situ. Une troisième et dernière partie englobera les principales méthodes existantes de spatialisation des données.

1. Mécanismes d'épuration du sol

L'assainissement non collectif (ANC) consiste à traiter les eaux usées domestiques par un système autonome par rapport au réseau collectif.

Pour l'ANC, le traitement est effectué par le sol en place (épuration par les sols) ou par un sol reconstitué par un massif de sable ou autre technique. Il a pour objectif de rejeter un effluent possédant des caractéristiques physico-chimiques acceptables pour le milieu récepteur. Cette étape de traitement est précédée par le pré-traitement qui a pour objectif d'éliminer les matières solides et déchets flottant.

Le traitement des eaux usées se fait par :

- Elimination de la matière en suspension (MES)
- Elimination de la matière organique
- Elimination des micro-organismes

1.1. Élimination des matières en suspension

L'élimination des MES s'effectue par filtration mécanique. Le processus mécanique est surtout lié à la taille des pores et à la structure du sol [Gou82]. En effet, la filtration se fait par des pores plus petits que les particules : les particules les plus grossières sont capturées à la surface et les particules les plus fines sont retenues dans la masse.

L'élimination des MES a pour conséquence de former des « couches colmatantes ». Pour le cas des matériaux grossiers cette couche est souvent repérée en profondeur contrairement aux matériaux trop fins où on l'a remarquée en surface. Cette couche a pour conséquence de réduire la conductivité hydraulique des sols.

1.2. Élimination de la matière organique

Le facteur principal qui conditionne l'élimination de la matière organique est le degré d'oxygénation du massif [Gou82]. En effet, la matière organique retenue dans le massif est dégradée par oxydation sous l'effet des micro-organismes qui s'y développent.

Un autre facteur qui joue aussi un rôle dans la dégradation de la matière organique est l'hydraulique du système. Ce paramètre détermine le temps de contact entre l'effluent et les bactéries..

Les principaux paramètres qui permettent d'évaluer la charge organique sont :

- La DCO (Demande Chimique en Oxygène) Elle s'exprime en milligramme par litre (mg/l) d'oxygène et correspond à la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les matières organiques présentes dans un échantillon
- La DBO5 (Demande Biochimique en Oxygène à cinq jours) comme on l'a vu l'épuration par le sol des matières organiques est faite par les micro-organismes. L'activité de ces derniers tend à consommer de l'oxygène et c'est cette diminution de l'oxygène dans le milieu qui est mesurée par la DBO5. Elle s'exprime également en milligramme par litre (mg/l) d'oxygène

Le rapport DCO/DBO5 donne une première estimation de la biodégradabilité de la matière organique d'un effluent donné.

Il est convenu généralement des limites suivantes :

- $DCO/DBO5 < 2$: l'effluent est facilement biodégradable.
- $2 < DCO/DBO5 < 3$: l'effluent est biodégradable avec des souches sélectionnées.
- $DCO/DBO5 > 3$: l'effluent n'est pas biodégradable.

Comme dans le cas de l'élimination des MES, l'élimination de la matière organique entraîne des modifications des paramètres hydrauliques du milieu, et notamment une diminution de la conductivité hydraulique du matériau en place [Bea05].

1.2.1.1. Élimination des micro-organismes

Les micro-organismes ont une rétention au sein du massif filtrant puis une phase d'élimination. [Ste04] L'effet de rétention se fait par deux mécanismes : la filtration purement mécanique et la fixation au sein d'un biofilm généralement précédée par l'adsorption de produits solubles biodégradables.

La filtration consiste à bloquer le mouvement à travers les pores plus petits que les micro-organismes. Plusieurs facteurs influençant la filtration des bactéries, les principaux sont :

- La dimension des grains du milieu poreux [Ste04]
- La charge hydraulique [Aus02 - Ste04]
- Le degré de colmatage du filtre [Ste04]

L'adsorption quant à elle est un phénomène de surface par lequel les molécules se fixent sur les surfaces des solides adsorbants.

Les facteurs physiques qui influencent l'adsorption sont la température, le milieu poreux, la vitesse du fluide, la présence de matière organique et le biofilm [Pun01 - Ste04].

De façon générale, les paramètres qui permettent d'augmenter le temps de rétention hydraulique et donc les opportunités de contact micro-organismes-surface favorisent leur élimination [Pun01 - Bom03].

Les facteurs chimiques influençant l'adsorption sont la force ionique et le pH [Sél02 - Bom03]. Plusieurs études sur le transport des bactéries en colonnes à travers un milieu poreux ont montré qu'une solution aqueuse de force ionique élevée réduit l'effet des forces répulsives (Jew95 cité par Ste04). Le pH peut altérer les caractéristiques de surface du micro-organisme.

Les mécanismes d'élimination quant à eux combinent des facteurs physiques, chimiques et biologiques selon que ça soit des bactéries ou des virus.

Pour les bactéries leur taux de mortalité est spécifique à chaque espèce. Dans le sol, la survie des bactéries est fonction de plusieurs facteurs parmi eux :

- L'humidité : Les bactéries se maintiennent mieux dans un sol humide [Cam76] cités par [Ste04].
- La température : La survie des bactéries est meilleure aux basses températures. Ainsi, les conditions climatiques ont un effet sur les performances épuratoires des systèmes d'infiltration [Ger84 - Le Bih00].

Pour les virus, ils présentent des temps de survie beaucoup plus importants que les bactéries. Ils peuvent persister jusqu'à 175 jours dans le sol [Gerba75]. L'inactivation des virus est principalement contrôlée par la température [Yat88 - Nas01], elle augmente avec celle-ci.

1.3. Conclusion

Le sol présente un pouvoir épurateur vis-à-vis des divers polluants rencontrés dans les effluents domestiques. Comme on vient de le voir, les performances épuratoires d'un sol sont fonction de sa capacité à pouvoir réduire les matières en suspension (MES), les matières organiques et les micro-organismes présent dans les eaux usées domestiques.

Cependant cette capacité ne conditionne pas à elle seule les performances épuratoire des sols. En effet, un autre paramètre joue un rôle important lors de l'infiltration des eaux. Ce paramètre concerne le mode de fonctionnement hydraulique du sol. Une deuxième partie sera donc consacrée à la notion de conductivité hydraulique d'un sol ainsi qu'à la description des méthodes existante permettant de l'estimer.

2. Conductivité hydraulique des sols

Actuellement, il existe plusieurs essais qui permettent la mesure de la conductivité hydraulique. L'objectif de cette partie est de présenter quelques uns de ces essais afin de conclure quant à la difficulté de leurs réalisation et de montrer ainsi l'intérêt que peut apporter le développement d'une méthode de reconstruction des sols à partir d'essais in situ plus facile à réaliser.

2.1. Paramètres influençant la conductivité hydraulique saturée

La conductivité hydraulique est une propriété importante qui permet de quantifier l'intensité d'un écoulement dans un milieu poreux sous l'influence d'un gradient hydraulique.

Les écoulements dans les milieux poreux se font par des chemins complexes et tortueux à travers des séries de pores interconnectés et de différentes tailles et formes.

Les paramètres influençant la conductivité hydraulique peuvent être divisés en deux groupes :

- Paramètres liés aux matériaux
- Paramètres liés aux fluides

2.1.1. Paramètres liés aux matériaux

Les facteurs influençant la conductivité hydraulique ont été regroupés en trois catégories par Murray [Mur95]:

2.1.1.1. Les caractéristiques physiques des particules

- Les dimensions des particules (granulométrie) :

La distribution de la taille des particules est une propriété importante pour définir la conductivité hydraulique. Cette dernière dépend principalement de la taille des pores, qui est

elle-même liée à la distribution des tailles de grain, de la forme des grains et de la structure du sol. En général, plus les particules sont petites plus les vides entre elles sont petits.

- La forme des particules (arrondie, anguleuse, etc.)
- la texture des particules (rugosité)

La conductivité hydraulique change selon la forme et la texture des particules. Quand les particules sont lisses et sphériques elles permettent un écoulement plus facile et elles augmentent la conductivité hydraulique. Réciproquement, les particules de forme irrégulière créent de plus longs chemins d'écoulement pour que le fluide les traverse, elles réduisent donc la conductivité. Généralement, les particules à surface rugueuse produisent une plus grande résistance de friction au flux de fluide, de ce fait réduisent la conductivité.

2.1.1.2. L'arrangement des particules (état de serrage)

- La densité sèche (porosité, indice des vides)
- La configuration des particules (orientation, alignement, ségrégation)

La conductivité hydraulique est influencée par les arrangements de la structure des grains (état de compacité). En effet, pour un matériau donné, elle est forte lorsque le sol est à l'état lâche et faible lorsque le sol est compact (dense).

2.1.1.3. Les caractéristiques des pores

- La forme et la distribution du volume des pores
- La tortuosité (longueur du chemin d'écoulement)

Le degré de saturation joue également un rôle très important. En effet, dans les sols partiellement saturés les pores du sol contenant des vides piégés ne participent pas complètement à l'écoulement du fluide, et la section effective à travers laquelle l'écoulement s'effectue se trouve réduite. Ainsi, la conductivité hydraulique maximale possible est celle que l'on obtient dans le cas du sol saturé [Sed11].

Donc la conductivité hydraulique est fonction du degré de saturation, mais la forme exacte de la relation ne peut être généralisée et peut varier selon la structure interne du sol.

La **Figure 1** traite l'exemple d'une argile compactée : elle donne la courbe de la conductivité hydraulique en fonction du degré de saturation. On remarque effectivement que la valeur maximale de la conductivité hydraulique est dans le cas où le degré de saturation est égale à 1 : c'est-à-dire dans le cas d'un sol saturé.

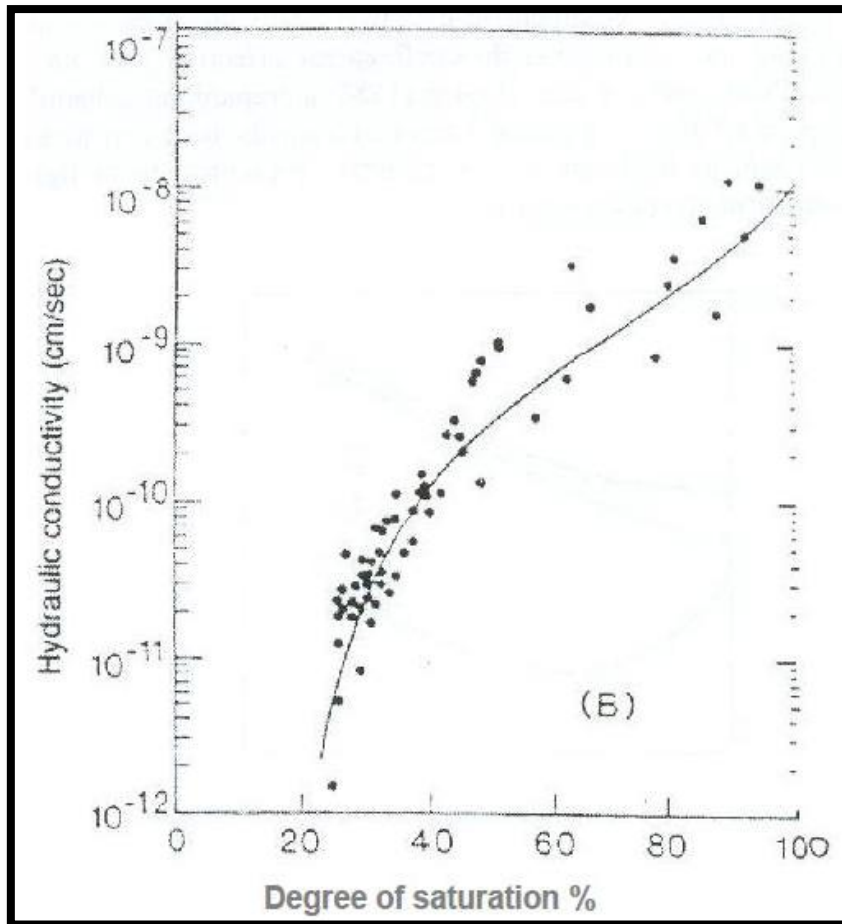


Figure 1 : Perméabilité en fonction du degré de saturation pour une argile compactée (Olson et Daniel79)

Il est à noter aussi que la minéralogie joue un rôle important sur la conductivité hydraulique. En effet, pour les sols fins, les différents types de minerais se tiennent sur différentes épaisseurs de l'eau adsorbée et par conséquent la taille efficace de pore change. Ainsi, la composition minérale affecte la perméabilité des argiles, mais a peu d'effet sur les sols granulaires.

2.1.2. Paramètres liés aux fluides

2.1.2.1. Les caractéristiques du fluide

- la viscosité du fluide

Concernant l'influence de la viscosité du fluide, il est à noter que la conductivité hydraulique est inversement proportionnelle à la viscosité du fluide qui varie inversement avec la température. Par conséquent, la valeur de k_s augmente avec une augmentation de la température des fluides [Hil71], [Mus91], [Re93b]. À titre d'exemple, augmenter la température de l'eau de 10°C à 25°C entraînera une augmentation de 45% du k_s si tous les autres facteurs restent égaux par ailleurs [Re93a].

2.1.2.2. Les apports des fluides

Outre que les caractéristiques propre aux fluides, un autre paramètre lié au fluide influence la conductivité hydraulique. Ce paramètre est les apports se trouvant dans le fluide qui traverse le sol. Ces apport auront pour conséquence :

- la colonisation de la porosité par la biomasse,
- le colmatage physique par les MES qui joue un rôle très important dans la réduction de la conductivité hydraulique [Bou09].

Les paramètres influençant la conductivité hydraulique sont résumés dans le graphique suivant (**Figure 2**):

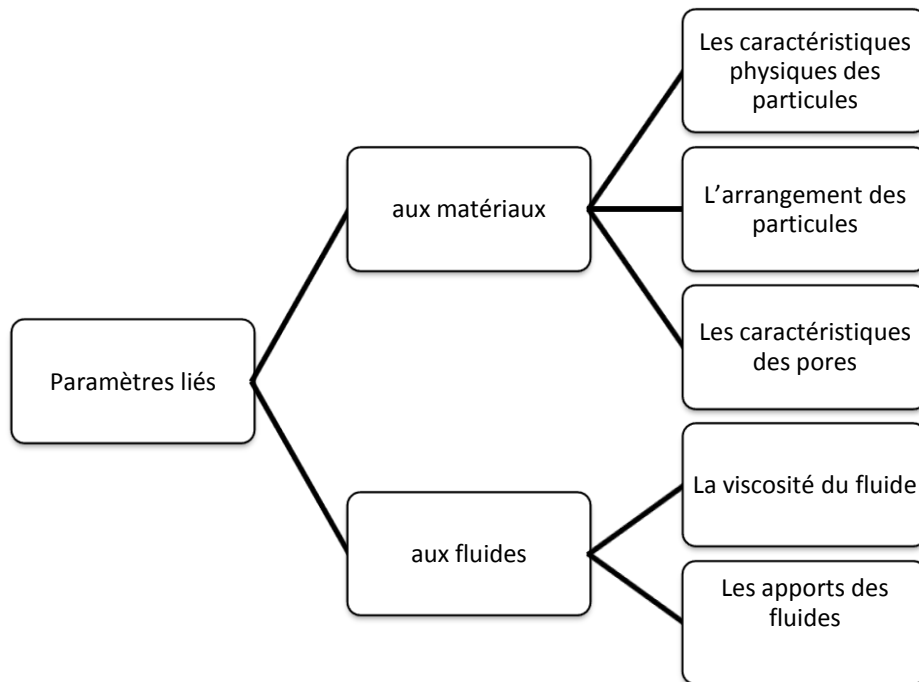


Figure 2 : Paramètres influençant la conductivité hydraulique

Après avoir décrit les paramètres influençant la conductivité hydraulique, la deuxième partie traitera des diverses méthodes existantes pour l'estimation de la conductivité hydraulique.

2.2. Estimation de la conductivité hydraulique

L'estimation de la conductivité peut se faire soit in situ ou au laboratoire. La mesure in situ peut se faire en surface ou en profondeur. Quant à la mesure au laboratoire, elle peut se faire dans le cas d'un sol non saturé ou saturé. La **Figure 3** résume les différentes méthodes pour la mesure de la conductivité hydraulique.

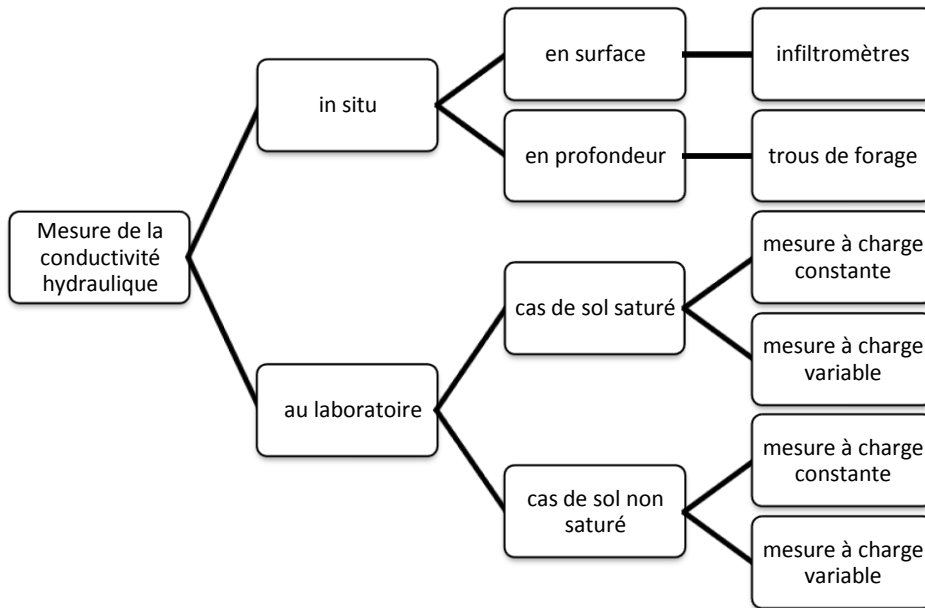


Figure 3 : Méthodes de mesure de la conductivité hydraulique

2.2.1. Estimation de la conductivité hydraulique au laboratoire

2.2.1.1. Généralités

Les essais de laboratoire, sont habituellement effectués sur des éprouvettes de sol homogène, taillées dans des carottes prélevées sur le terrain et ramenées aux dimensions requises pour l'appareil de mesure. Ces essais offrent l'avantage de pouvoir assurer les conditions de saturation des sols contrairement aux mesures in situ.

2.2.1.2. Conductivité hydraulique dans le cas de sol saturé

On parle de conductivité hydraulique saturée quand la saturation du sol est atteinte : inexistence d'air dans les pores.

Dans ce cas, l'échantillon prélevé est mis à saturer pendant une durée selon le degré de conductivité hydraulique supposée du milieu testé (plus de 24 heures pour les argiles). Le **Tableau 1** présente quelque ordre de grandeur de la conductivité hydraulique saturée en fonction de la nature du sol :

Nature	Ordre de grandeur de k en (m/s)	Degré de conductivité hydraulique
Graviers moyens à gros	10^{-3} à 10^{-1}	Très élevé
Petits graviers, sable	10^{-3} à 10^{-5}	Assez élevé
Sable très fin, sable limoneux, loess	10^{-5} à 10^{-7}	Faible
Limon compact, argile silteuse	10^{-7} à 10^{-9}	Très faible
Argile franche	10^{-9} à 10^{-12}	Pratiquement imperméable

Tableau 1 : Ordre de grandeur de la perméabilité d'après Gérard Phillipponnat

Il existe deux techniques pour réaliser la mesure la conductivité hydraulique au laboratoire d'un sol saturé:

A charge constante :

L'éprouvette est traversée par un fluide de telle façon que la charge hydraulique au sommet de l'échantillon soit constante jusqu'à ce que le régime permanent soit atteint.

Cette méthode est adaptée pour les sols de grande conductivité $k > 10^{-5}$ m/s (sables).

A charge variable :

Dans ce type d'appareil, la charge hydraulique appliquée au sommet de l'échantillon est variable au cours du temps.

Il est adapté pour les sols de faible conductivité $k < 10^{-5}$ m/s (argiles).

La mesure de la conductivité hydraulique dans les deux techniques sont basées sur la loi de Darcy.

2.2.1.2.1. Loi de Darcy dans le cas de sol saturé

La notion de conductivité hydraulique doit son origine à Henri Darcy, un ingénieur des ponts et chaussée et des mines qui en 1856 définit pour la première fois cette grandeur dans un article intitulé « les fontaines publiques de la ville de Dijon ».

Par une expérience (**Figure 4**) Darcy mesurait le débit de fluide recueilli après percolation d'eau à travers une colonne de sable.

A partir des résultats issus des divers tests effectués, Darcy déduit la relation empirique suivante :

$$Q = k \times \frac{\Delta h}{L} \times A = k \times i \times A \tag{Équation 1}$$

Avec :

Q : débit d'écoulement (m³/s).

k : constante, connue sous le nom de coefficient de perméabilité de Darcy ou conductivité hydraulique (m/s).

$\Delta h = H_A - H_B$: la charge hydraulique en (m).

L : longueur de l'échantillon (m).

i : gradient hydraulique.

A : section de l'échantillon normale à la direction de l'écoulement (m^2).

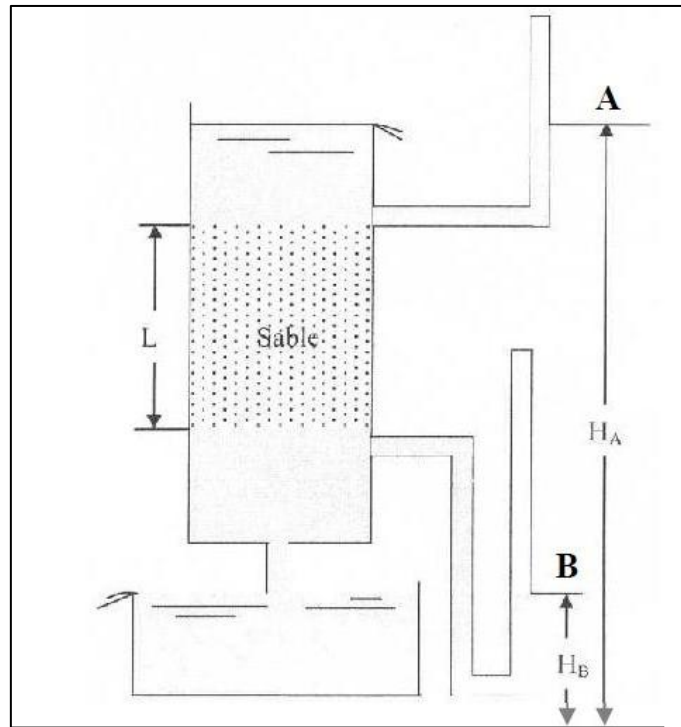


Figure 4 : Schéma de l'appareil de Darcy

L'expression la plus simplifiée et utilisée de la loi de Darcy est :

$$\mathbf{v} = \mathbf{k} \times \mathbf{i} \quad \text{Équation 2}$$

C'est une relation qui relie la vitesse d'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux au gradient hydraulique.

La loi de Darcy ne peut être valable que si les hypothèses suivantes sont respectées [Dul92] :

- Les forces d'écoulement sont dues à la viscosité (les forces d'inertie sont négligées) : cette hypothèse concerne l'isotropie du milieu poreux et donc de la conductivité hydraulique. Elle est alors définie par un scalaire indépendamment de la direction de l'écoulement.
- Le milieu poreux est totalement saturé par une seule phase fluide.
- Les écoulements du fluide sont supposés laminaires (vitesse lente).

- Le fluide n'a pas d'interaction physico-chimique avec le matériau.

2.2.1.2.2. Principe du perméamètre

Le perméamètre est composé d'une enceinte étanche dans la quelle est placée un échantillon de sol de section A et de longueur L. Les deux extrémités de l'échantillon sont reliées à deux tubes par l'intermédiaire de pierres poreuses.

Cet appareil se base sur l'essai de Darcy et se fait soit à charge constante soit à charge variable selon la nature du sol. [NF X 30-442]

La saturation de l'échantillon est importante : on considère que l'échantillon est saturé lorsque les bulles d'air disparaissent complètement du milieu (sortie d'eau continue) [Bou09].

Une fois l'échantillon saturé, on applique sur l'échantillon une charge hydraulique « Δh ».

Dans le cas où l'essai est effectué à charge constante (**Figure 5**), on mesure le débit à la sortie et on déduit la conductivité hydraulique par la formule suivante (formule de Darcy) :

$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{A} \times \mathbf{i}} = \frac{\mathbf{Q} \times \mathbf{L}}{\mathbf{A} \times \Delta \mathbf{h}} \quad \text{Équation 3}$$

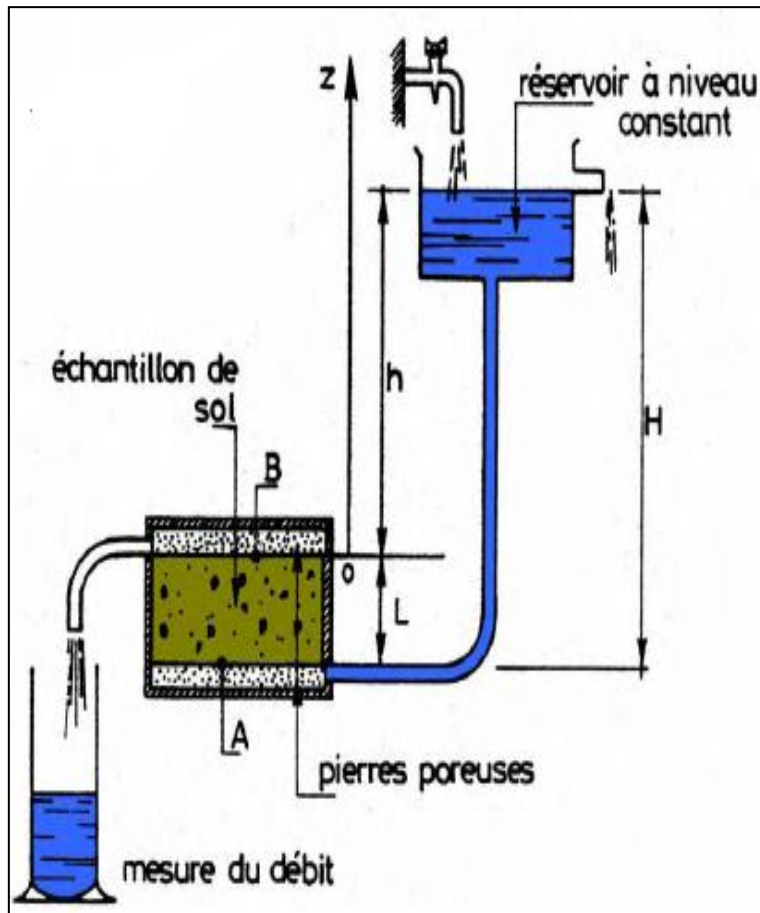


Figure 5 : Principe du perméamètre à charge constante

Dans le cas où l'essai est effectué à charge variable (**Figure 6**), on mesure en fonction du temps, la descente du niveau d'eau dans le tube. On déduit la conductivité hydraulique par la formule suivante :

$$k = \frac{s \times L}{S \times t} \times \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \text{Équation 4}$$

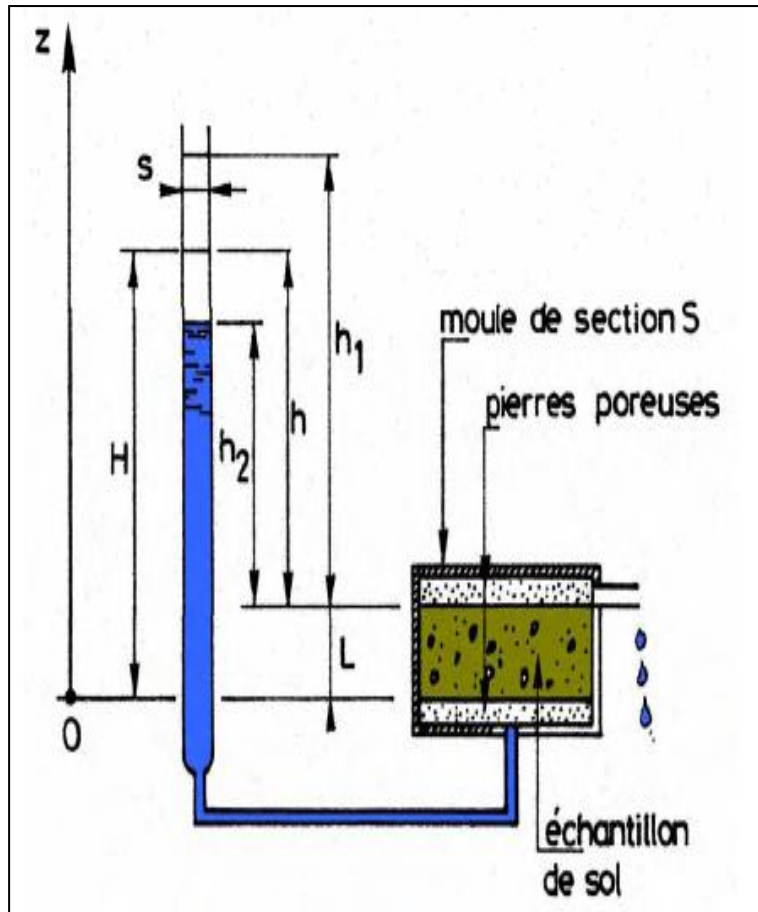


Figure 6 : Perméamètre à charge variable

2.2.1.3. Conductivité hydraulique dans le cas de sol non saturé

On parle de sol non saturé quand les vides de ce milieu ne sont pas totalement remplis par le liquide. Le sol non saturé met en jeu des interactions entre les phases solide (particules du sol), liquide (eau) et gazeuse (air) contrairement au sol saturé.

Ces interactions affectent les paramètres hydrauliques du sol non saturé. Notamment l'interaction entre le liquide et le gaz qui crée une pression appelée pression capillaire ou succion.

2.2.1.3.1. *Succion du sol*

L'interaction gaz, eau et solide rend le comportement mécanique d'un sol non saturé beaucoup plus complexe que celui d'un sol saturé. En outre, la pression d'eau est inférieure à la pression du gaz dans un sol non saturé. Cette différence de pression entre le gaz et l'eau est appelée succion.

On distingue trois succions différentes :

- La succion matricielle.
- La succion osmotique.
- La succion totale.

La succion matricielle est la capacité de rétention d'eau à l'intérieur de la matrice solide du sol.

Elle est définie par la formule suivante :

$$\Psi = u_a - u_w = \frac{2 \times \sigma_{aw}}{r} \quad \text{Équation 5}$$

Avec :

Ψ : la succion matricielle (kPa),

u_a : la pression d'air du sol (kPa),

u_w : la pression de l'eau interstitielle (kPa),

σ_{aw} : la tension de surface air-eau (kN/m),

r : le rayon de courbure du ménisque air-eau (m).

La succion osmotique est la capacité de rétention d'eau par les sels présents sous forme dissouts dans l'eau interstitielle. Elle est due à la différence de concentration en sel en différents points de la matrice du sol. En géotechnique, elle n'est en général pas prise en compte, car son influence serait négligeable [Bou09].

La succion totale est la somme de la succion matricielle et de la succion osmotique. En géotechnique, la succion totale est donc généralement prise équivalente à la succion matricielle.

2.2.1.3.2. *Succion et conductivité hydraulique non saturée*

La variation de la succion influence la conductivité hydraulique : l'augmentation de la succion implique une diminution de la conductivité hydraulique.

En conditions saturées, la conductivité hydraulique est constante et sa valeur est maximale.

Au fur et à mesure que le sol se désature, sa teneur en eau (w) diminue et sa succion augmente. La conductivité hydraulique diminue avec l'augmentation de la tortuosité des canaux d'écoulement par l'effet de la présence de l'air immobile dans les pores au fur et à mesure que le sol se draine, ce qui réduit l'espace disponible pour l'écoulement d'eau.

Dans ces conditions, la conductivité hydraulique n'est pas constante et l'écoulement est donc régi à la fois par la quantité d'eau disponible dans la porosité (teneur en eau w) et par l'indice des vides e .

La conductivité hydraulique, exprimée en fonction de « e » et « w », peut être représentée par la teneur en eau volumique « θ » qui est fonction de ces deux paramètres.

La teneur en eau volumique est la relation liant le volume de l'eau présent dans le sol et le volume total du sol, cette relation est exprimée par la formule suivante :

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{w \times \rho_d}{\rho_w} = n \times S_r \quad \text{Équation 6}$$

Il existe deux techniques pour réaliser la mesure de la conductivité hydraulique non saturée :

En régime permanent :

Dans le système d'écoulement le flux, la teneur en eau et la succion ne varient pas avec le temps.

L'essai consiste à maintenir un gradient hydraulique constant à travers un échantillon de sol et à mesurer le débit sortant en régime permanent. Le régime permanent est atteint quand le volume d'eau qui entre dans l'échantillon est identique à celui qui le quitte.

La conductivité hydraulique qui correspond à la succion matricielle appliquée est calculée à partir de la loi de Darcy généralisée comme pour un essai classique de perméabilité à charge constante d'un sol saturé.

Les méthodes de référence sont : [Amr96]

- La méthode des deux plaques : proposée par Richard (31), elle est considérée comme l'une des premières méthodes de détermination de k_u en régime d'écoulement permanent.
- La méthode de la longue colonne : appelée aussi méthode du flux permanent contrôlé, elle a été proposée par Corey (1985).
- La méthode de l'air piégé : elle a été proposée par Watson (67b).

- La méthode par centrifugation : proposée par Nimmo et al (87), cette technique de mesure par centrifugation a permis de réduire le temps d'essai en accélérant les transferts de fluide dans le sol par l'augmentation de l'accélération de la pesanteur. Il est à signaler que cette méthode est en cours de normalisation aux USA sous la référence « ASTM D1821 ».
- La méthode des aiguilles : proposée par Dirksen (91), cette méthode est complexe, longue et demande un matériel spécifique, elle est dédiée aux sols fins.

En régime transitoire :

Dans le système d'écoulement le flux, la teneur en eau et la succion varient avec le temps.

En régime transitoire, et contrairement aux méthodes en régime permanent, les conditions d'écoulement telles que la teneur en eau et le potentiel matriciel (suction matricielle) sont imposées sur l'échantillon du sol. La conductivité hydraulique est alors calculée à partir des données transitoires en appliquant l'équation de Darcy généralisée durant de courtes périodes de mesure, pendant lesquelles les conditions d'écoulement imposées sont considérées quasi-permanentes. Ce régime transitoire permettra de réaliser plus rapidement la mesure surtout dans le cas des sols fins.

En régime transitoire, trois méthodes de mesure peuvent être distinguées : la méthode à suppression d'air, la méthode osmotique et la méthode des profils instantanés.

2.2.1.3.3. *Loi de Darcy généralisée dans le cas de sol non saturé*

Dans le cas d'un sol non saturé, la conductivité hydraulique est définie par la loi de Darcy généralisée comme le facteur de proportionnalité reliant le débit par unité de surface et par unité de temps au gradient de potentiel d'écoulement Φ provoquant l'écoulement :

$$\mathbf{k} = \frac{-\mathbf{q}}{\text{grad}(\Phi)} \quad \text{Équation 7}$$

En l'absence de potentiel osmotique, le terme ϕ regroupe le potentiel matriciel ψ et le potentiel gravitaire z (dans le cas d'un sol saturé le potentiel matriciel est nul).

2.2.1.4. Conclusion

Toutes les méthodes de mesure de la conductivité hydraulique au laboratoire sont basées sur la loi de Darcy. Cette loi consiste à établir une relation entre la vitesse de l'écoulement de l'eau dans le sol et le gradient hydraulique. Le but des essais au laboratoire est donc de mesurer ces deux paramètres.

On distingue deux types de techniques de mesure. Si les paramètres d'écoulement ne dépendent pas du temps alors on est dans le cas de méthode de mesure en régime permanent

sinon s'ils varient avec le temps alors on est dans le cas de méthode de mesure en régime transitoire (variable).

L'inconvénient majeur des mesures au laboratoire est le caractère local de la mesure. En effet, lors de la mesure de la conductivité hydraulique au laboratoire les échantillons utilisés sont de petites dimensions et ne peuvent donc représenter la conductivité hydraulique d'une grande partie du terrain.

Ce problème est réglé par les mesures in situ qui sont décrites ci-dessous.

2.2.2. Mesure de la conductivité hydraulique in situ

L'avantage des essais in situ par rapport aux essais au laboratoire est qu'ils permettent de tester le sol sur un volume plus représentatif et d'inclure l'écoulement à travers les macropores et les fissures.

Cependant les conditions de saturation totale se produisent rarement dans le sol en place : les mesures in situ sont donc caractérisées par une saturation au champ qui reflète la présence d'air dans certains pores. La conductivité hydraulique dans les conditions de saturation au champ : k_{wfs} est estimée à la moitié de celle à la saturation complète : k_{ws} .

Les essais de mesure de la conductivité hydraulique in situ sont de deux types :

- Les mesures in situ en surface
- Les mesures in situ en profondeur

2.2.2.1. Mesure in situ en surface : infiltromètres

Les dispositifs de mesure de la conductivité hydraulique in situ en surface sont les infiltromètres.

On distingue deux techniques :

- Techniques de mesure de la conductivité hydraulique à la saturation au champ : infiltromètre classique de type simple ou double anneau.
- Techniques qui permettent d'établir la relation entre la conductivité hydraulique et la succion du sol au voisinage de la saturation : infiltromètre avec imposition de succion.

2.2.2.1.1. *Infiltromètre classique*

La mesure avec les infiltromètres classiques de type simple ou double anneau est une technique de mesure de la conductivité hydraulique à la saturation au champ.

La mesure avec l'infiltromètre est basée sur la loi de Darcy pour les sols saturés :

$$\mathbf{v} = \mathbf{k} \times \mathbf{i}$$

La vitesse correspond à la vitesse en régime permanent. En effet, au fur et à mesure que le sol se sature la vitesse diminue et devient constante.

Pour les infiltromètres classiques les hypothèses pour déterminer la conductivité hydraulique sont :

- L'écoulement est principalement vertical
- Le sol est homogène et uniformément mouillé au dessus du front d'infiltration
- Pas de fuite au niveau de la zone de contact sol-infiltromètre
- Le front d'humidification ne dépasse pas la base de l'anneau
- La présence d'air dans le sol n'offre aucune résistance à l'écoulement lors du déplacement du front d'infiltration vers le bas
- Le gonflement du sol n'est pas pris en compte et l'effet des conditions aux limites au dessous de l'anneau est négligé
- La succion au niveau du front d'humidification est prise égale à zéro si elle ne peut être déterminée

On distingue deux types d'infiltromètres classiques :

Infiltromètre à simple anneau :

L'infiltromètre à simple anneau est de deux types :

- infiltromètre à simple anneau ouvert : dans ce cas l'anneau est ouvert (**Figure 7**)
- infiltromètre à simple anneau fermé : dans ce cas l'anneau est fermé (**Figure 8**)

L'avantage de l'infiltromètre à simple anneau fermé par rapport à l'infiltromètre à simple anneau ouvert est d'éviter le problème d'évaporation qui influence la vitesse d'infiltration mesurée.

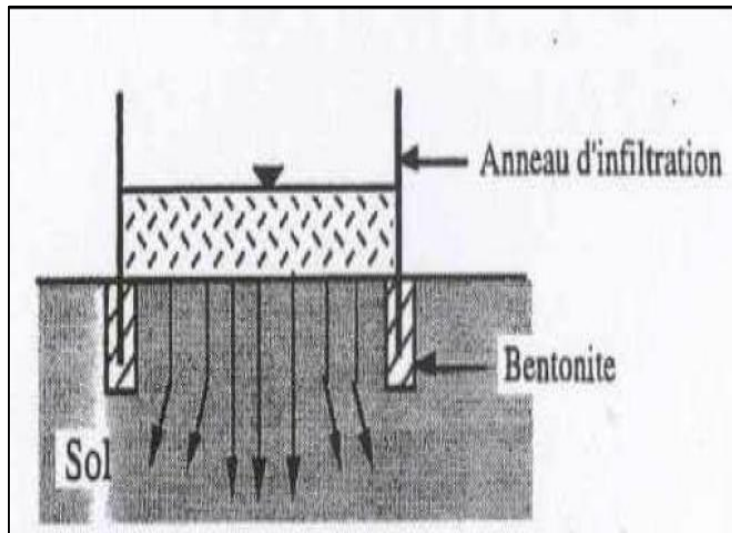


Figure 7 : Principe de l'essai au simple anneau ouvert

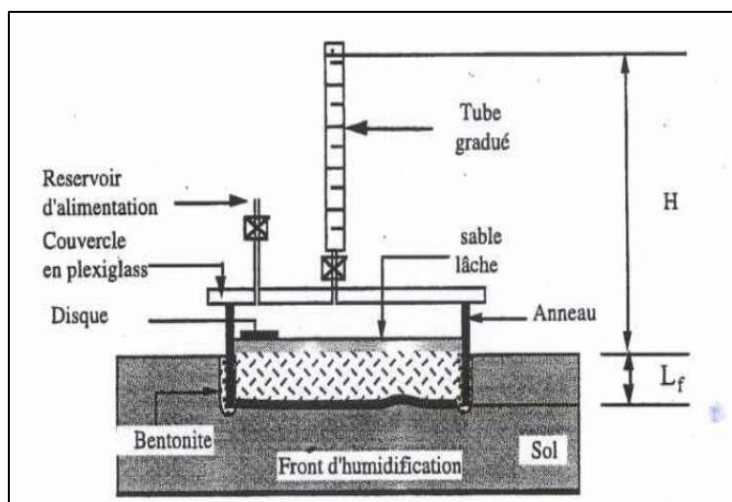


Figure 8 : Principe de l'essai au simple anneau fermé

Les infiltromètres à simple anneau permettent de mesurer la conductivité hydraulique verticale allant jusqu'à 10^{-9} m/s. Cependant, ils présentent le risque d'écoulements latéraux à la base du cylindre quand le front d'infiltration dépasse la profondeur d'enfoncement de celui-ci.

Pour remédier à ce problème on utilise les infiltromètres à double anneau.

Infiltromètres à double anneau :

Ces infiltromètres sont composés d'un anneau interne et d'un anneau externe. Le rôle de l'anneau externe est de limiter les fuites latérales de l'eau qui proviennent de l'anneau interne.

L'infiltromètre à double anneau est de deux types : ouvert et fermé.

L'infiltromètre à double anneau fermé est composé d'un anneau interne fermé et d'un anneau externe ouvert (**Figure 9**).

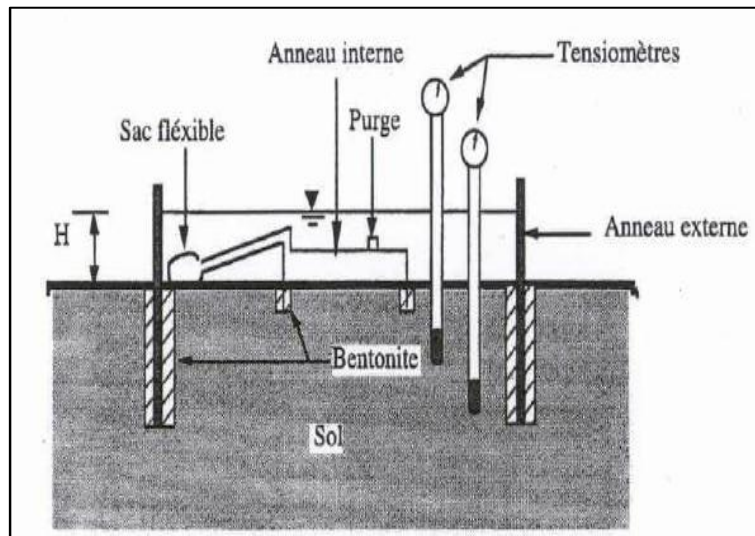


Figure 9 : Principe de l'essai au double anneau fermé

Les infiltromètres ouverts font l'objet de la NF X 30-418. Les infiltromètres fermés font l'objet de la NF X 30-420.

Si les infiltromètres à anneau permettent d'estimer la conductivité hydraulique du sol à la saturation, ils ne permettent pas par contre d'avoir une information sur la relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau du sol.

Il existe des méthodes en régime permanent qui permettent de mesurer la conductivité hydraulique en relation avec la teneur en eau ou la succion : infiltromètre avec imposition de succion.

2.2.2.1.2. *infiltromètre avec imposition de succion*

Les infiltromètres avec imposition de succion permettent d'avoir la courbe de la conductivité hydraulique en fonction de la succion. Pour une succion donnée, la conductivité hydraulique est calculée par la loi de Darcy.

Contrairement aux infiltromètres classiques, les infiltromètres à succion contrôlée permettent d'obtenir la relation entre la conductivité et la succion. Cependant dans les deux cas la mesure est effectuée en surface. Il existe un autre type d'essai in situ qui permet de remédier à ce problème qui est l'essai in situ en profondeur présenté ci-dessous.

2.2.2.2. Mesure in situ en profondeur : trous de forage

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de mesurer la conductivité hydraulique à différentes profondeurs. La mesure peut se faire à charge constante ou à charge variable.

Le principe de cette méthode est de mesurer la vitesse d'infiltration de l'eau en régime permanent à partir d'un puits cylindrique creusé à l'intérieur d'un sol non saturé.

Les normes régissant les mesures de la conductivité hydraulique in situ en profondeur sont :

- NF X 30-423 : Essai à charge variable
- NF X 30-424 : Essai à charge constante
- NF X 30-425 : Essai à charge variable en système fermé

2.2.2.3. Conclusion

La mesure de la conductivité hydraulique in situ peut se faire en surface par les infiltromètres ou en profondeur par les trous de forage.

L'avantage des mesures in situ est qu'elles permettent une mesure sur un volume plus grand par rapport aux mesures au laboratoire et aussi d'intégrer les fissures dans l'estimation de la conductivité hydraulique. Mais contrairement aux mesures au laboratoire, les conditions de saturation sont rarement produites.

2.3. Conclusion générale

Durant cette partie de la bibliographie, on a vu que la mesure de la conductivité hydraulique peut se faire soit au laboratoire soit in situ.

La mesure en laboratoire permet d'atteindre les conditions de saturation mais son caractère local fait d'elle une méthode inadéquate pour la reproduction du caractère épuratoire global d'un sol naturel.

Les essais in situ quant à eux étendent la mesure sur un volume un peu plus grand et permette de faire des mesures en surface et en profondeur. Cependant, les conditions de saturation n'étant pas toujours assurées pour les mesures in situ, il faut attendre le temps de l'infiltration des eaux pour atteindre le régime permanent avant de commencer réellement les mesures. Ce temps peut s'avérer être très grand.

Pour palier à ces problèmes et avoir une vision globale de la conductivité hydraulique d'un sol on doit tout d'abord commencer par reconstruire le terrain en place à partir d'essais ponctuels. La reconstruction du terrain sera faite à l'aide des méthodes d'interpolation. La dernière partie de la bibliographie traite les méthodes d'interpolation spatiale. Une seule de ces méthodes sera utiliser pour le deuxième chapitre d'analyse et qui sera le plus en adéquation avec notre cas d'étude.

3. Interpolation spatiale

3.1. Introduction

L'interpolation spatiale est une méthode qui consiste à estimer la valeur d'une variable en un point où l'on ne dispose pas de mesure à partir des valeurs connues de la même variable en d'autres points.

Il est à noter que dans le cas où le point où d'estimation de la variable se trouve à l'extérieur du champ de points de mesures on parle d'extrapolation au lieu d'interpolation.

Il existe de nombreuses méthodes d'interpolation qui peuvent être divisées en deux familles :

- les méthodes d'interpolation classiques basées sur des algorithmes purement déterministes.
- Les méthodes d'estimation stochastiques qui s'appuient sur une modélisation probabiliste du phénomène étudié.

3.2. Méthodes déterministes

Les méthodes déterministes sont basées sur des propriétés purement géométriques de l'échantillon d'observation et ne permettent pas une évaluation de leur précision (estimation de l'erreur). Parmi ces méthodes, on trouve :

3.2.1. Interpolation quadratique

3.2.1.1. Introduction

L'interpolation quadratique consiste à relier deux points par une équation de 2^{ème} degré : une parabole.

La parabole entre deux points doit vérifier les conditions suivantes :

- La courbe doit passer par deux points imposés
- En un point la pente doit être égale à la pente de la fin de la parabole précédente

Ces conditions permettent de supprimer les cassures dans la courbe dues à la différence de pentes à la jonction de deux paraboles. On obtient ainsi une courbe fluide.

Pour la première parabole, la pente est choisie arbitrairement.

3.2.1.2. Construction d'un arc de parabole [Gui08]

Tout au long de cette partie, nous allons utiliser les notations suivantes (**Figure 10**):

- $P_0(x_0, y_0); P_1(x_1, y_1); \dots; P_n(x_n, y_n)$: les n points imposés
- $a_i; b_i; c_i$: les coefficients des paraboles pour $i \in [0, n-1]$
- $q_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i$: équation de la parabole sur $[x_i; x_{i+1}]$ pour $i \in [0, n-1]$
Equation 8

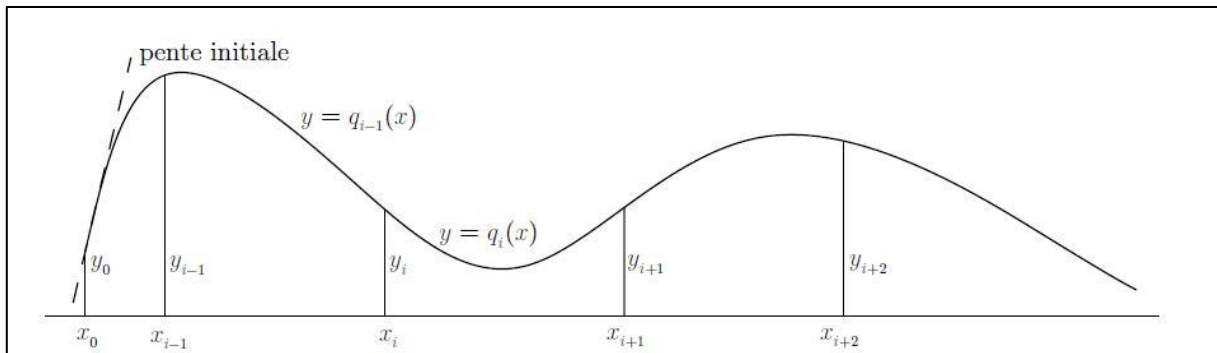


Figure 10 : Schéma de l'interpolation quadratique

Pour construire l'arc entre P_i et P_{i+1} , on utilise les conditions précitées dans le paragraphe précédent et qui donnent les équations suivantes :

- Passage de la courbe par :

$$x_i : q_i(x_i) = y_i = a_i x_i^2 + b_i x_i + c_i \quad \text{Équation 9}$$

$$x_{i+1} : q_i(x_{i+1}) = y_{i+1} = a_i x_{i+1}^2 + b_i x_{i+1} + c_i \quad \text{Équation 10}$$

- Egalité des pentes en P_i : en x_i la tangente de q_i sera la même que celle de q_{i-1} :

$$\begin{aligned} q'_i(x_i) &= q'_{i-1}(x_i) \\ 2a_i x_i + b_i &= 2a_{i-1} x_i + b_{i-1} \end{aligned} \quad \text{Équation 11}$$

Il est à noter que l'interpolation n'est possible que si $x_0 < x_1 < \dots < x_n$

La résolution du système suivant pour $i \in [1, n-1]$ permet de trouver les coefficients $a_i; b_i; c_i$:

$$\begin{aligned} y_i &= a_i x_i^2 + b_i x_i + c_i \\ y_{i+1} &= a_i x_{i+1}^2 + b_i x_{i+1} + c_i \end{aligned}$$

$$2a_i x_i + b_i = 2a_{i-1} x_i + b_{i-1}$$

Pour le premier arc le terme $2a_{i-1}x_i + b_{i-1}$ est choisi arbitrairement.

3.2.1.3. Inconvénients de la méthode

- Le choix de la pente initiale est très important : La courbe peut avoir une allure complètement différente selon le choix de la pente initiale. De plus, elle influence toute la courbe. Les courbes sont donc imprévisibles.
- Une parabole ne possédant pas de points d'inflexion, ceux-ci doivent absolument se trouver sur les points P_i .

Parmi les méthodes qui permettent de supprimer ces inconvénients, il y'a la méthode d'interpolation cubique.

3.2.2. Interpolation cubique

3.2.2.1. Introduction

La méthode d'interpolation cubique diffère de la méthode d'interpolation quadratique par :

- La courbe est d'ordre trois : cubique
- Le choix de la tangente en un point P_i : la tangente en un point doit être parallèle à la droite reliant le point précédant au point suivant.

3.2.2.2. Construction de l'arc de la cubique [Gui08]

Tout au long de cette partie, nous allons utiliser les notations suivantes (**Figure 11**):

- $P_0(x_0, y_0); P_1(x_1, y_1); \dots; P_n(x_n, y_n)$: les n points imposés
- y'_i : la pente de la tangente en P_i
- $\alpha_i; \beta_i; \gamma_i; \delta_i$: les coefficients de la courbe cubique pour $i \in [0, n-1]$
- $C_i(x) = \alpha_i x^3 + \beta_i x^2 + \gamma_i x + \delta_i$: équation de la courbe cubique sur $[x_i; x_{i+1}]$ pour $i \in [0, n-1]$ Équation 12

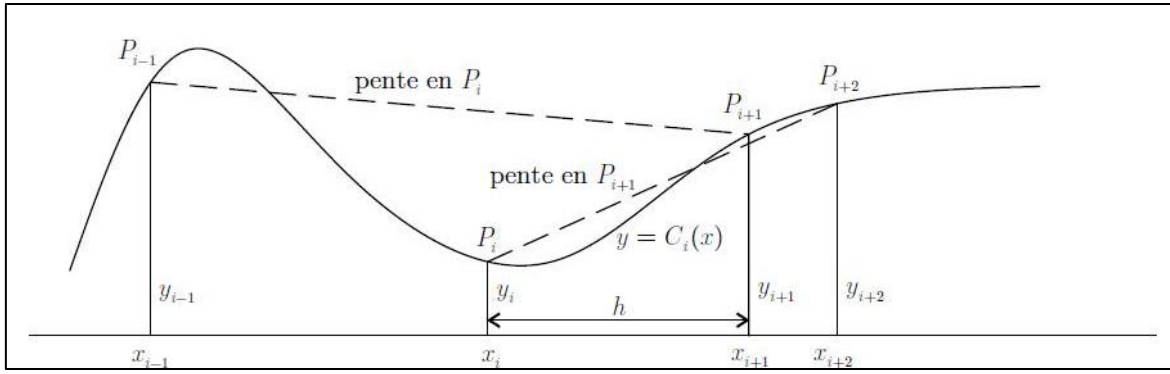


Figure 11 : Schéma d'interpolation cubique

Les conditions se traduisent par les équations suivantes :

$$C_i(x_i) = y_i \text{ et } C_i(x_{i+1}) = y_{i+1} \quad \text{Équation 13}$$

$$C'_i(x_i) = y'_i \text{ et } C'_i(x_{i+1}) = y'_{i+1} \quad \text{Équation 14}$$

Pour faciliter le calcul, on effectue le changement de variable suivant : $x = x_i + t \times h$ avec $h = x_{i+1} - x_i$ et $t \in [0,1]$.

On obtient donc :

$$C_i(x) = C_i(x_i + t \times h) = Q_i(t) = a_i t^3 + b_i t^2 + c_i t + d_i \quad \text{Équation 15}$$

$$\text{Et } Q'_i(t) = h C'_i(x_i + t \times h) = 3a_i t^2 + 2b_i t + c_i \quad \text{Équation 16}$$

Et les conditions deviennent :

$$Q_i(0) = d_i = y_i \text{ et } Q_i(1) = a_i + b_i + c_i + d_i = y_{i+1}$$

$$\text{Et } Q'_i(0) = c_i = h \times y'_i \text{ et } Q'_i(1) = 3a_i + 2b_i + c_i = h \times y'_{i+1}$$

Pour simplifier les notations on utilisera la notation suivante : $p_i = Q'_i(0)$ et $p_{i+1} = Q'_i(1)$

Nous obtenons donc :

$$a_i = 2y_i - 2y_{i+1} + p_i + p_{i+1} \quad \text{Équation 17}$$

$$b_i = 3y_{i+1} - 3y_i - p_{i+1} - 2p_i \quad \text{Équation 18}$$

$$c_i = p_i \quad \text{Équation 19}$$

$$d_i = y_i \quad \text{Équation 20}$$

Il reste donc à déterminer les tangentes. On a la tangente au point P_i est parallèle à la droite reliant les points P_{i-1} et P_{i+1} .

$$y'_i = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad \forall i \in [1, n - 1] \quad \text{Équation 21}$$

Pour le premier et le dernier point, on choisit les pentes suivantes :

$$y'_0 = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad \text{Équation 22}$$

$$y'_n = \frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} \quad \text{Équation 23}$$

Maintenant que les pentes sont connues, il suffit de calculer les $p_i = h \times y'_i$ et la résolution du système permet de trouver les coefficients de la courbe cubique.

3.2.2.3. Inconvénients de la méthode

Malgré que l'interpolation cubique permet de remédier aux problèmes de l'interpolation quadratique à savoir :

- En interpolation cubique les points d'inflexions sont possibles ailleurs que sur les points imposés.
- En interpolation cubique, la courbe est robuste c'est-à-dire que le changement d'un point n'influence pas toute la courbe.

L'inconvénient de cette interpolation est que la fonction obtenue est de classe C^1 mais pas de classe C^2 : la pente ne possède pas de < cassures > mais le rayon de courbure présente des < cassures > cela nuit à la fluidité de la courbe.

3.2.3. Interpolation de Lagrange

3.2.3.1. Principe de la méthode

Le principe de cette méthode est de relier tous les points par une seule fonction polynomiale.

Le polynôme qui permet de relier les points c'est-à-dire qui vaut y_0 en x_0 et y_n en x_n est le polynôme de Lagrange $L(x)$:

$$L(x) = y_0 l_0 + \dots + y_n l_n \quad \text{Équation 24}$$

Avec :

$$l_i(x) = \prod_{j \neq i} \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad \text{Équation 25}$$

Ce polynôme peut être écrit de la manière suivante :

$$L(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \quad \text{Équation 26}$$

Donc on obtient le système d'équation suivant :

$$\begin{aligned} y_0 &= a_0 + a_1x_0 + \dots + a_nx_0^n \\ y_1 &= a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_1^n \\ &\dots \\ y_n &= a_0 + a_1x_n + \dots + a_nx_n^n \end{aligned} \quad \text{Équation 27}$$

C'est un système de $n+1$ équations à $n+1$ inconnues dont la résolution permet de trouver le polynôme interpolant les points imposés.

3.2.3.2. Inconvénients de la méthode

La courbe obtenue par cette méthode peut être complètement aberrante : plus nous prenons de points à interpoler plus la courbe oscille entre ces points.

De plus le degré n du polynôme fait que les manipulations de cette méthode peuvent devenir lourdes dans le cas où on a plusieurs points.

3.2.4. Interpolation par splines cubiques :

3.2.4.1. Introduction

La différence entre cette méthode et l'interpolation cubique est que dans le cas de l'interpolation par splines cubiques en plus de la continuité de la pente on a aussi celle du rayon de courbure.

Pour une fonction donnée, l'équation du rayon de courbure est la suivante :

$$R = \frac{(1+f'^2(x))^{3/2}}{|f''(x)|} \quad \text{Équation 28}$$

Donc pour assurer la continuité du rayon de courbure, la continuité de la dérivée ne suffit pas. Il faut en plus la continuité de la dérivée seconde : fonction de classe C^2 .

3.2.4.2. Construction de la cubique [Gui08]

Tout au long de cette partie, nous allons utiliser les notations suivantes (**Figure 12**):

- $P_0(x_0, y_0); P_1(x_1, y_1); \dots; P_n(x_n, y_n)$: les n points imposés
- $S_k(x)$: l'équation de la courbe cubique
- $\sigma_k = S''_k(x_k)$: dérivée seconde en un point x_k pour $k \in [0, n-1]$

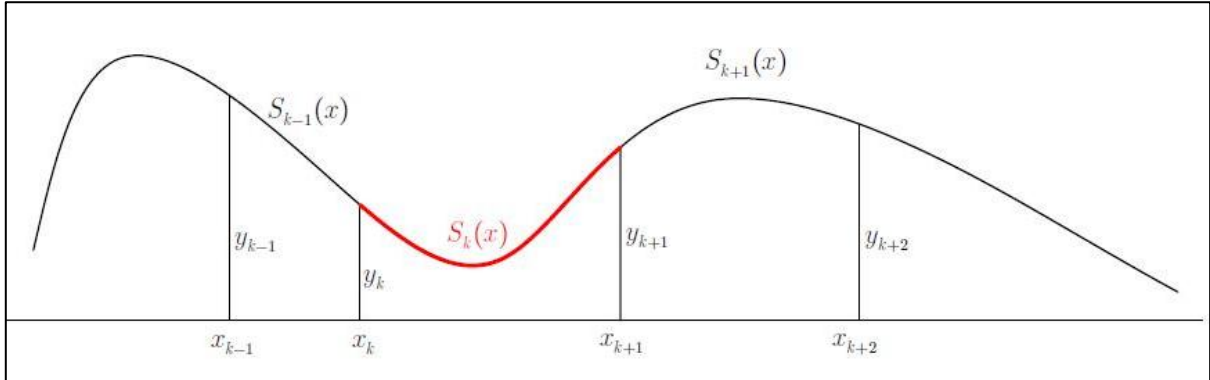


Figure 12 : Schéma d'interpolation par splines cubiques

Pour définir la cubique $S_k(x)$ sur $[x_k, x_{k+1}]$ pour $k \in [0, n-1]$, on utilise les équations précitées :

$$S_k(x_k) = y_k \text{ et } S_k(x_{k+1}) = y_{k+1} \quad \text{Équation 29}$$

$$S'_k(x_k) = S'_{k-1}(x_k) \text{ et } S'_k(x_{k+1}) = S'_{k+1}(x_{k+1}) \quad \text{Équation 30}$$

$$\sigma_k = S''_k(x_k) = S''_{k-1}(x_k) \text{ et } \sigma_{k+1} = S''_k(x_{k+1}) = S''_{k+1}(x_{k+1}) \quad \text{Équation 31}$$

On a $S_k(x)$ est de degré trois, donc $S''_k(x)$ est de degré un. On obtient donc :

$$S''_k(x) = \sigma_k \times \frac{x-x_{k+1}}{x_k-x_{k+1}} + \sigma_{k+1} \times \frac{x-x_k}{x_{k+1}-x_k} \quad \text{Équation 32}$$

Après intégration deux fois on obtient :

$$S'_k(x) = \sigma_k \times \frac{(x-x_{k+1})^2}{2 \times (x_k-x_{k+1})} + \sigma_{k+1} \times \frac{(x-x_k)^2}{2 \times (x_{k+1}-x_k)} + C_k \quad \text{Équation 33}$$

$$S_k(x) = \sigma_k \times \frac{(x-x_{k+1})^3}{6 \times (x_k-x_{k+1})} + \sigma_{k+1} \times \frac{(x-x_k)^3}{6 \times (x_{k+1}-x_k)} + C_k \times x + D_k \quad \text{Équation 34}$$

Avec C_k et D_k des constantes d'intégration.

Afin de faciliter les calculs, on pose :

$$C_k \times x + D_k = A_k \times (x - x_k) + B_k \times (x_{k+1} - x) \quad \text{Équation 35}$$

On obtient alors :

$$S_k(x) = \sigma_k \times \frac{(x-x_{k+1})^3}{6 \times (x_k - x_{k+1})} + \sigma_{k+1} \times \frac{(x-x_k)^3}{6 \times (x_{k+1} - x_k)} + A_k \times (x - x_k) + B_k \times (x_{k+1} - x) \quad \text{Équation 36}$$

Les conditions sur la courbe cubique impliquent :

$$S_k(x_k) = y_k = \sigma_k \times \frac{(x_k - x_{k+1})^2}{6} + B_k \times (x_{k+1} - x_k) \quad \text{Équation 37}$$

$$S_k(x_{k+1}) = y_{k+1} = \sigma_{k+1} \times \frac{(x_{k+1} - x_k)^2}{6} + A_k \times (x_{k+1} - x_k) \quad \text{Équation 38}$$

En injectant A_k et B_k dans $S_k(x)$ on obtient la fonction cubique suivante :

$$S_k(x) = \sigma_k \times \frac{(x-x_{k+1})^3}{6 \times (x_k - x_{k+1})} + \sigma_{k+1} \times \frac{(x-x_k)^3}{6 \times (x_{k+1} - x_k)} + y_k \frac{x_{k+1} - x}{x_{k+1} - x_k} - \frac{\sigma_k}{6} \times (x_{k+1} - x_k) \times (x_{k+1} - x) + y_{k+1} \frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k} - \frac{\sigma_{k+1}}{6} \times (x_{k+1} - x_k) \times (x - x_k) \quad \text{Équation 39}$$

On dérive :

$$S'_k(x) = \frac{\sigma_k}{6} \times \left(\frac{-3(x-x_{k+1})^2}{(x_{k+1} - x_k)} + (x_{k+1} - x_k) \right) + \frac{\sigma_{k+1}}{6} \times \left(\frac{3(x-x_k)^2}{(x_{k+1} - x_k)} - (x_{k+1} - x_k) \right) - \frac{y_k}{(x_{k+1} - x_k)} + \frac{y_{k+1}}{(x_{k+1} - x_k)} \quad \text{Équation 40}$$

On évalue la dérivée en x_k et x_{k+1} :

$$S'_k(x_k) = \frac{\sigma_k}{6} \times (-2(x_{k+1} - x_k)) + \frac{\sigma_{k+1}}{6} \times (-(x_{k+1} - x_k)) - \frac{y_k}{(x_{k+1} - x_k)} + \frac{y_{k+1}}{(x_{k+1} - x_k)} \quad \text{Équation 41}$$

$$S'_k(x_{k+1}) = \frac{\sigma_k}{6} \times ((x_{k+1} - x_k)) + \frac{\sigma_{k+1}}{6} \times (2(x_{k+1} - x_k)) - \frac{y_k}{(x_{k+1} - x_k)} + \frac{y_{k+1}}{(x_{k+1} - x_k)} \quad \text{Équation 42}$$

On peut déduire de la dernière équation que :

$$S'_{k-1}(x_k) = \frac{\sigma_{k-1}}{6} \times ((x_k - x_{k-1})) + \frac{\sigma_k}{6} \times (2(x_k - x_{k-1})) - \frac{y_{k-1}}{(x_k - x_{k-1})} + \frac{y_k}{(x_k - x_{k-1})} \quad \text{Équation 43}$$

Pour $k \in [1, n]$.

En utilisant la condition d'égalité des pentes au point x_k on a :

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{k-1}}{6} \times ((x_k - x_{k-1})) + \frac{\sigma_k}{6} \times (2(x_{k+1} - x_{k-1})) + \frac{\sigma_{k+1}}{6} \times ((x_{k+1} - x_k)) \\ = \frac{y_{k+1} - y_k}{(x_{k+1} - x_k)} - \frac{y_k - y_{k-1}}{(x_k - x_{k-1})} \end{aligned}$$

Équation 44

Pour $k \in [1, n-1]$

Pour résoudre le système il faut fixer arbitrairement σ_0 et σ_n : en effet le système est composé de $n-1$ équations et $n+1$ inconnues.

Après avoir trouvé les σ_k par résolution du système, il suffit de les remplacer dans l'équation de la cubique entre deux points imposés.

3.2.4.3. Inconvénients de la méthode

Cette méthode d'interpolation par spline cubique donne des courbes très harmonieuses : en effet la courbe est de classe C^2 donc on n'aura pas de cassure des rayons de courbure.

Cependant et contrairement à la méthode d'interpolation cubique, cette méthode ne permet pas d'avoir des courbes très robustes : en effet, tous les points sont liés et le changement d'un de ceux-ci influe sur tout le système d'équations.

Un autre inconvénient est que la résolution est beaucoup plus complexe que pour les autres types d'interpolation que nous avons vu.

3.2.5. Conclusion

Avant de passer à un autre type d'interpolation déterministe qui est basé sur le partitionnement de l'espace, on résume le principe, les conditions sur les courbes ainsi que les inconvénients des méthodes présentées ci-dessus. Le **Tableau 2** présente un récapitulatif de ces méthodes.

Interpolation quadratique		
Principe	Conditions	Inconvénients
Relier deux points successifs par un arc de parabole.	Passage de la courbe par les points imposés. En un point la pente doit être égale à la pente de la fin de la parabole précédente.	Le choix de la pente initiale a une grande influence sur la courbe Les minimum et maximum de la variable doivent impérativement se trouver dans les points d'observation
Interpolation cubique		
Principe	Conditions	Inconvénients
Relier deux points successifs par une cubique.	Passage de la courbe par les points imposés. La tangente en un point doit être parallèle à la droite reliant le point précédant au point suivant.	la fonction obtenue est de classe C^1 mais pas de classe C^2
Interpolation de Lagrange		
Principe	Inconvénients	
Relier tous les points par une seule fonction polynomiale.	Plus le nombre de points d'observation augmente plus la courbe oscille entre ces points et plus la manipulation devient plus complexe.	
Interpolation par splines cubiques		
Principe	Conditions	Inconvénients
Relier deux points successifs par une courbe d'ordre trois.	Passage de la courbe par les points imposés. La courbe est de classe C^2 .	La courbe interpolant les points n'est pas très robuste. La résolution est plus complexe que les autres méthodes.

Tableau 2 : Résumé des méthodes d'interpolation quadratique, cubique, de Lagrange et par splines cubiques

3.2.6. Interpolation par partitionnement de l'espace

3.2.6.1. Polygones de Thiessen

3.2.6.1.1. Principe

La méthode consiste à partitionner l'espace géographique en polygones nommés polygones de Thiessen.

Le polygone d'influence d'un point d'observation est défini de telle façon que tous les points du polygone sont plus proches du point d'observation en question que de tous les autres.

La méthode consiste donc à déterminer un zonage où la valeur de la variable à prédire est a priori la même que celle du site d'observation : méthode du plus proche voisin (closest point).

La **Figure 13** présente un exemple de partitionnement par polygones de Thiessen.

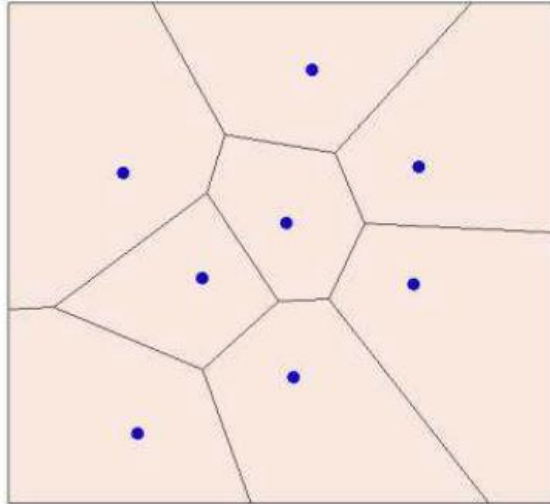


Figure 13 : Exemple de partitionnement par polygones de Thiessen

3.2.6.1.2. *Inconvénients de la méthode*

Le découpage en polygone de Thiessen dépend seulement de la configuration géométrique des sites d'observations et non des valeurs prises par ces sites.

Cette méthode d'interpolation ne renvoie pas à une bonne représentation du phénomène naturel. En effet, les discontinuités n'ont rien à voir avec de possibles discontinuités réelles : pour des sites avec la même configuration géométrique et un phénomène différent on aura la même partition.

L'une des méthodes qui permet de palier à ce problème de discontinuités est la méthode de Sibson basée sur le partitionnement en polygone de Thiessen.

3.2.6.1.3. *Méthode de Sibson*

Après construction du polygone de Thiessen autour du site à estimer S_0 . Il faut calculer les surfaces d'intersection ($P(S_0, i)$) entre le polygone précédent et ceux des sites voisins.

Sibson propose une estimation de S_0 à l'aide d'une combinaison linéaire des valeurs des sites voisins $Z(S_0)$ pondérée par les surfaces ($P(S_0, i)$).

L'estimation de la variable régionalisée d'un site S_0 est donc d'après Sibson :

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^n \frac{P(S_0, i)}{P(S_0)} \times Z(S_i) \tag{Équation 45}$$

Avec :

- n : nombre d'observation
- $P(S_0)$: Surface du polygone de Thiessen en S_0
- $P(S_0, i)$: Surface d'intersection du polygone d'observation i et celle de S_0

Dans ce cas de figure :

- L'estimation est unique en S_0
- L'estimation est exacte : $\forall i = 1 \dots n \hat{Z}(S_i) = Z(S_i)$

3.2.6.2. Triangulation

3.2.6.2.1. Principe de la méthode

La triangulation consiste à diviser le champ en triangles disjoints avec comme sommet les sites d'observations.

De ce fait, la construction des triangles n'est pas unique. Il existe donc différentes approches, la plus utilisée étant la triangulation de Delaunay.

3.2.6.2.2. Triangulation de Delaunay

A partir du diagramme de Thiessen, on peut construire le dual : on doit relier par un segment toutes les paires de sites dont les régions de Thiessen sont adjacentes « les points séparés par une arrête de Thiessen ».

Les propriétés d'une telle triangulation sont :

- L'ensemble du domaine n'est pas recouvert : on opère seulement dans la partie convexe des sites.
- Les cercles circonscrits à chacun des triangles ne contiennent pas d'autre site d'observation.

Il existe plusieurs méthodes pour l'interpolation de données à partir d'une triangulation. Ici, nous allons exposer la méthode d'interpolation linéaire :

3.2.6.2.3. Interpolation linéaire

On considère un triangle (S_1, S_2, S_3) contenant le point à estimer S_0 . Si on utilise une interpolation linéaire on obtient donc :

$$\hat{Z}(S_0) = \alpha \cdot x + \beta \cdot y + \gamma \quad \text{Équation 46}$$

En utilisant la valeur de la variable aux sommets du triangle on obtient :

$$\alpha \cdot x_1 + \beta \cdot y_1 + \gamma = Z_1 \quad \text{Équation 47}$$

$$\alpha \cdot x_2 + \beta \cdot y_2 + \gamma = Z_2 \quad \text{Équation 48}$$

$$\alpha \cdot x_3 + \beta \cdot y_3 + \gamma = Z_3 \quad \text{Équation 49}$$

La résolution de ce système nous permet d'avoir les coefficients α, β et γ et ainsi trouver la valeur de la variable régionalisée en S_0 :

$$\hat{Z}(S_0) = \frac{|S_1 S_0 S_2| \times Z_3 + |S_1 S_0 S_3| \times Z_2 + |S_2 S_0 S_3| \times Z_1}{|S_1 S_2 S_3|} \quad \text{Équation 50}$$

Avec : $|S_1 S_2 S_3|$ surface du triangle formée par : (S_1, S_2, S_3) .

La solution devient donc la somme pondérée des aires des triangles formés par les 3 sommets et le point à estimer.

Chaque site d'observation reçoit donc un poids égal à la proportion de surface occupée par le triangle qui lui est opposé : plus le point recherché est proche d'un site d'observation plus la valeur de la variable régionalisée est proche de la valeur observée en ce site.

L'interpolation linéaire présente les propriétés suivantes :

- L'estimation est unique pour une triangulation donnée.
- Cette méthode est exacte.
- L'extrapolation n'est pas possible au delà de l'enveloppe convexe des sites d'observation.

3.2.7. Méthodes barycentriques

N'étant pas limitées au voisinage direct du point d'intérêt, les méthodes barycentriques présentent l'avantage de prendre en compte plus de données du champ d'observation.

Un poids plus important est affecté aux sites les plus proches, un poids moindre aux sites plus éloignés.

Parmi les méthodes barycentriques utilisées on trouve :

3.2.7.1. IDWA : moyenne pesée de l'inverse de la distance

C'est la méthode barycentrique la plus utilisée.

C'est une méthode qui permet d'estimer la variable par une combinaison linéaire des valeurs des points d'observation.

Le principe sur lequel se base cette méthode est que l'influence relative d'un point diminue avec la distance qui le sépare du point ou on veut estimer la variable.

Cette méthode consiste donc à attribuer un poids inversement proportionnel à la distance entre les sites et le point à estimer :

$$\widehat{Z}(S_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z(S_i)}{\|S_i - S_0\|}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\|S_i - S_0\|}} \quad \text{Équation 51}$$

On peut généraliser cette formule en prenant comme pondération une puissance p de la distance entre les sites et le point à estimer. On obtient donc :

$$\widehat{Z}(S_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z(S_i)}{\|S_i - S_0\|^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\|S_i - S_0\|^p}} \quad \text{Équation 52}$$

On remarque que :

- Si $p \rightarrow 0$: moyenne arithmétique

Cette méthode d'interpolation est exacte. Les valeurs interpolées sont limitées par les valeurs minimales et maximales du champ d'observation, la pondération étant positive.

Cette méthode a un inconvénient majeur, elle est indifférente à la configuration géométrique des observations, seule la distance compte. Elle tend à surpondérer les données groupées alors qu'elles sont redondantes. Un autre inconvénient est l'effet « oeil de bœuf » autour des points de données. Ce sont des cerles concentriques autour de ces points. Malgré ces inconvénients c'est cette méthode qui sera utiliser pour notre analyse car elle est la plus en adéquation avec notre cas d'étude.

3.2.8. Conclusion

Les méthodes déterministes sont des méthodes d'interpolation par des fonctions mathématiques. Elles regroupent les méthodes d'interpolation dont la fonction de structure (fonction de pondération) est choisie à priori. Malgré que l'utilisation et l'informatisation de ces données soient faciles elles ne permettent pas d'analyser la variabilité spatiale des données et ne fournissent pas des informations sur l'erreur d'estimation.

Pour palier à ces problèmes, on peut utiliser les méthodes stochastiques qui sont des méthodes basées sur les lois de la statistique.

3.3. Méthodes stochastiques

3.3.1. Introduction

Les méthodes stochastiques sont des méthodes basées sur l'analyse probabiliste afin de décrire le phénomène étudié.

L'avantage de ces méthodes par rapport aux méthodes déterministes est qu'elles permettent l'évaluation de la précision d'une estimation c'est-à-dire d'estimer l'écart entre la valeur estimée et la valeur réelle.

3.3.2. Notation et définition

- Variable régionalisée : représente la valeur des grandeurs mesurées sur un espace appelé champ (exemple : résistance de pointe mesurée par essai pénétromètre dans des sites prédéfinis).
- Notation :
 - Z : la variable régionalisée
 - D : le champ
 - $s \in D$: une position dans le champ
 - $Z(s)$: une valeur prise par la variable régionalisée au point s
 - $\hat{Z}(s)$: estimation de $Z(s)$
 - h : la distance qui sépare deux points

3.3.3. Notion de fonction aléatoire

La fonction aléatoire est définie comme : $\{Z(s) \text{ avec } s \in D\}$.

La variable régionalisée constitue donc une réalisation de la fonction aléatoire.

Pour caractériser cette fonction aléatoire, il faut connaître sa loi spatiale. La loi spatiale d'une fonction aléatoire correspond à la donnée de toutes les lois de probabilité de tous les vecteurs aléatoires $\{Z(s_1), \dots, Z(s_n)\}$ extraits de la fonction aléatoire $Z(s)$.

La détermination entière de cette loi spatiale est très complexe, on limite donc sa description à la description de ses deux premiers moments. Le but est alors de retrouver les caractéristiques de la loi à partir de la seule connaissance de ces 2 moments.

3.3.3.1. Moments

3.3.3.1.1. Moments du premier ordre

Le moment du premier ordre d'une fonction aléatoire consiste à étudier sa loi monovariée (soit la loi en un site) : on s'intéresse à l'espérance mathématique qui est dépendante du point s :

$$E[Z(s)] = m_Z(s) \quad \text{Équation 53}$$

3.3.3.1.2. Moments du second ordre

Les moments du second ordre fournissent une description de la loi spatiale bivariée de la fonction aléatoire $Z(s)$, c'est à dire la loi de probabilité entre les valeurs prises en deux sites s_1 et s_2 quelconques.

La description de la loi bivariée se fait par :

La covariance centrée entre $Z(s_1)$ et $Z(s_2)$ qui est donnée par :

$$\begin{aligned} cov[Z(s_1), Z(s_2)] &= E\{[Z(s_1) - m_Z(s_1)][Z(s_2) - m_Z(s_2)]\} = E\{[Z(s_1)Z(s_2)]\} - \\ &[m_Z(s_1)m_Z(s_2)] = C(s_1, s_2) \end{aligned} \quad \text{Équation 54}$$

Elle caractérise le degré de ressemblance entre les valeurs prises en s_1 et s_2 .

La variance est la covariance entre la variable aléatoire $Z(s_1)$ et elle-même :

$$var[Z(s_1)] = cov[Z(s_1), Z(s_1)] = E\{[Z(s_1) - m_Z(s_1)][Z(s_1) - m_Z(s_1)]\} \quad \text{Équation 55}$$

La variance mesure la dispersion de la variable aléatoire autour de sa moyenne.

Le semi variogramme entre $Z(s_1)$ et $Z(s_2)$ est :

$$\gamma(s_1, s_2) = \frac{1}{2} var[Z(s_1) - Z(s_2)] \quad \text{Équation 56}$$

Il caractérise la dissemblance entre les valeurs prises par la variable aléatoire entre les sites s_1 et s_2 .

Ces moments sont les principaux paramètres de la fonction aléatoire : ils contiennent l'information la plus pertinente et la plus utile. L'objectif est donc de pouvoir caractériser ces deux moments à partir de la mesure de la variable régionalisée : c'est ce qui est appelé l'inférence statistique.

Toute hypothèse faite implique des restrictions. L'utilisation uniquement des deux premiers moments de la loi spatiale implique que l'on ne peut utiliser que des combinaisons linéaires pondérées de $Z(s)$: seules expressions pour lesquelles on peut calculer l'espérance et la covariance.

3.3.3.2. Inférence statistique

L'inférence statistique consiste à reconstituer les caractéristiques de la fonction aléatoire (en l'occurrence ses deux premiers moments) à partir d'une réalisation de la variable régionalisée (soit un ensemble de données expérimentales). [Bos11]

Or pour pouvoir décrire un phénomène unique par les lois de probabilités et par une seule réalisation de la variable régionalisée il faut émettre des hypothèses limitatives qui sont :

- l'ergodicité de la fonction
- la stationnarité du processus

3.3.3.2.1. Ergodicité

L'hypothèse d'ergodicité suppose que l'information statistique peut être obtenue à partir d'une seule réalisation quelconque de la fonction aléatoire définie sur un domaine spatial infiniment grand. [Bos11]

Ainsi la restitution des moments de la fonction aléatoire peut être faite par la connaissance d'un grand nombre de valeurs de la variable régionalisée (une réalisation de la fonction aléatoire).

3.3.3.2.2. Stationnarité

Il existe plusieurs degrés de stationnarité :

Hypothèse de stationnarité du second ordre :

Cette hypothèse stipule que deux paires de points espacées d'un même vecteur h ont des caractéristiques (moyenne et covariance) semblables : la variable régionalisée ne dépend pas de sa position dans l'espace, elle garde les mêmes caractéristiques où que l'on se place. Cela permet de se détacher de la localisation et de se restreindre uniquement à la distance qui sépare les points d'observations.

$$\forall s \in D, E[Z(s)] = m$$

Équation 57

$$\forall s \in D, \forall s + h \in D, cov[Z(s + h), Z(s)] = C(h) \quad \text{Équation 58}$$

L'équation 57 traduit le fait que l'espérance mathématique existe et n'est pas dépendante du point.

L'équation 58 traduit le fait que la covariance entre chaque paire $\{Z(s + h), Z(s)\}$ existe et ne dépend que de h : distance entre site (et pas du point de l'espace).

Deux propriétés en découlent :

- La variance est la même en chacun des sites s .
- Le variogramme entre deux sites dépend uniquement de la distance qui les sépare.

$$\forall s \in D, var[Z(s)] = cov[Z(s), Z(s)] = C(0) \quad \text{Équation 59}$$

$$\forall s \in D, \forall s + h \in D, \frac{var[Z(s+h) - Z(s)]}{2} = \gamma(h) = C(0) - C(h) \quad \text{Équation 60}$$

L'hypothèse de stationnarité d'ordre 2 ne peut être validée de manière rigoureuse et infaillible à partir de mesures expérimentales : c'est une décision plus ou moins judicieuse prise par l'utilisateur. [Bos11]

Hypothèse de stationnarité intrinsèque :

Une fonction aléatoire est dite intrinsèque quand ses accroissements sont stationnaires au second ordre :

$$\forall s \in D, \forall s + h \in D, E[Z(s + h) - Z(s)] = 0 \quad \text{Équation 61}$$

$$\forall s \in D, \forall s + h \in D, var[Z(s + h) - Z(s)] = E\{[Z(s + h) - Z(s)]^2\} = 2\gamma(h) \quad \text{Équation 62}$$

Dans ce cas la variance et covariance de la fonction aléatoire ne sont pas forcément définies.

On remarque que l'hypothèse de stationnarité du second ordre implique l'hypothèse intrinsèque. La réciproque est fautive. [Bos11]

L'hypothèse de stationnarité choisie impose de plus des contraintes supplémentaires car elle ne garantit pas nécessairement l'existence de l'espérance et de la variance de toutes les combinaisons linéaires pondérées.

On appelle combinaison linéaire autorisée une combinaison linéaire qui possède une espérance et une variance.

Hypothèse stationnaire d'ordre 2 :

Dans ce cas, toutes les combinaisons linéaires pondérées sont autorisées.

Hypothèse intrinsèque :

Si la fonction aléatoire est intrinsèque, seules les combinaisons linéaires d'un poids total nul sont autorisées car elles peuvent s'écrire sous la forme d'accroissements. [Bos11]

3.3.4. Variogramme

Le variogramme permet la mesure de la dissemblance entre les valeurs en fonction de leurs séparations.

Le variogramme théorique est défini comme :

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} \text{var}[\mathbf{Z}(\mathbf{s} + \mathbf{h}) - \mathbf{Z}(\mathbf{s})] = \frac{1}{2} E\{[\mathbf{Z}(\mathbf{s} + \mathbf{h}) - \mathbf{Z}(\mathbf{s})]^2\} = \mathbf{C}(\mathbf{0}) - \mathbf{C}(\mathbf{h}) \quad \text{Équation 63}$$

Cependant le variogramme réel d'une fonction aléatoire est généralement inconnu, mais il peut être évalué à partir des données d'échantillonnages : variogramme expérimental.

Le variogramme expérimental est calculé empiriquement à partir d'un ensemble de données expérimentales $\{z(\mathbf{s}_i)\}/\mathbf{s}_i \in D$. Il est donné par la formule suivante :

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2|N(\mathbf{h})|} \sum_{(i,j) \in N(\mathbf{h})} [z(\mathbf{s}_i) - z(\mathbf{s}_j)]^2 \quad \text{Équation 64}$$

Avec :

$N(\mathbf{h}) = \{(i, j)/\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j = \mathbf{h}/i \mp j\}$ est l'ensemble des paires distinctes et $|N(\mathbf{h})|$ est le cardinal de $N(\mathbf{h})$. En pratique, les données n'étant pas régulièrement espacées, on définira l'ensemble $N(\mathbf{h})$ par : $N(\mathbf{h}) = \{(i, j)/\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j \approx \mathbf{h}/i \mp j\}$.

Le variogramme est une fonction de h , croissante et souvent caractérisée par quatre paramètres (**Figure 14**):

- L'effet pépite : C_0
- Le palier : $C+C_0$
- La portée : a

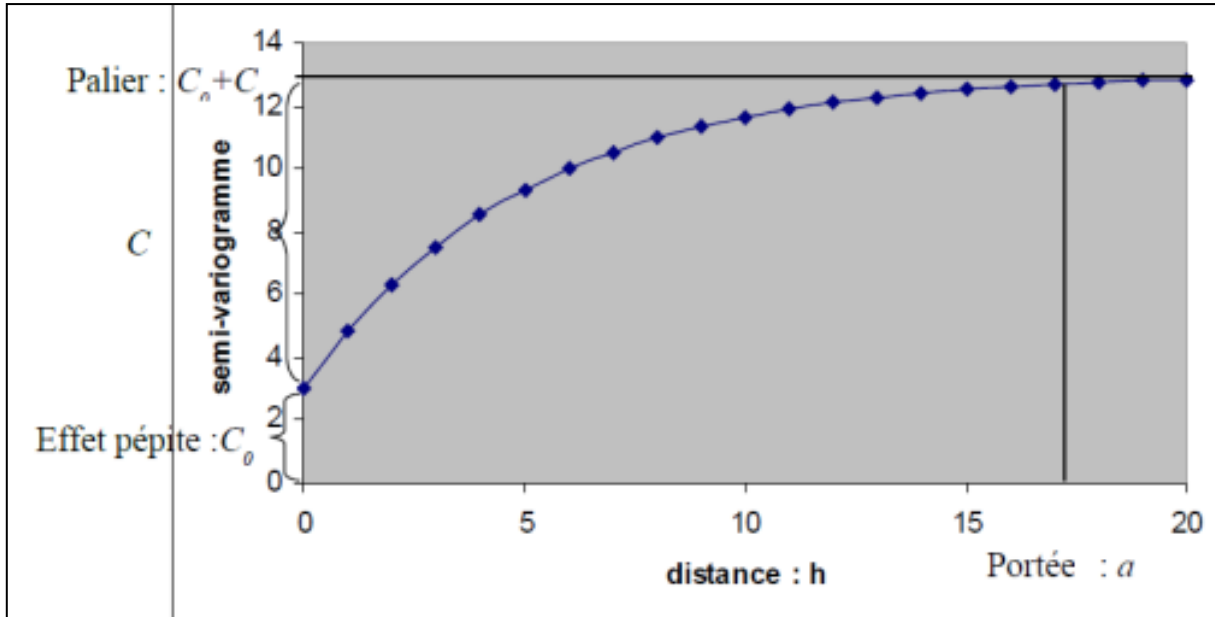


Figure 14 : Paramètres caractéristiques d'un variogramme

L'effet de pépite : Le comportement à l'origine du variogramme reflète le degré de régularité spatiale de la variable régionalisée. Si le variogramme présente un saut à l'origine (effet de pépite), cela indique une absence partielle de corrélation entre les valeurs prises en deux sites très proches. C'est-à-dire qu'il y a une faible ressemblance entre les valeurs régionalisées très voisines.

Le palier : Valeur du variogramme pour la distance égale à la portée.

La portée : Distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout. Leur covariance est nulle.

3.3.4.1. Modélisations du variogramme

Le variogramme expérimental n'est pas défini partout, notamment aux distances h pour lesquelles il n'existe pas de paire de points de mesures. Ainsi lui est-il ajusté une fonction mathématique appelée modèle de variogramme. Il est recommandé d'utiliser des modèles éprouvés ou des modèles construits à partir de modèles éprouvés.

Parmi les modèles éprouvés on trouve :

- **Modèles isotropes avec palier : (Figure 15)**

Modèle pépitique de palier C : comportement discontinu à l'origine. Il est caractéristique des gisements miniers, en particulier aurifères.

$$\gamma(r) = \begin{cases} 0 & \text{pour } r = 0 \\ C & \text{pour } r > 0 \end{cases} \quad \text{Équation 65}$$

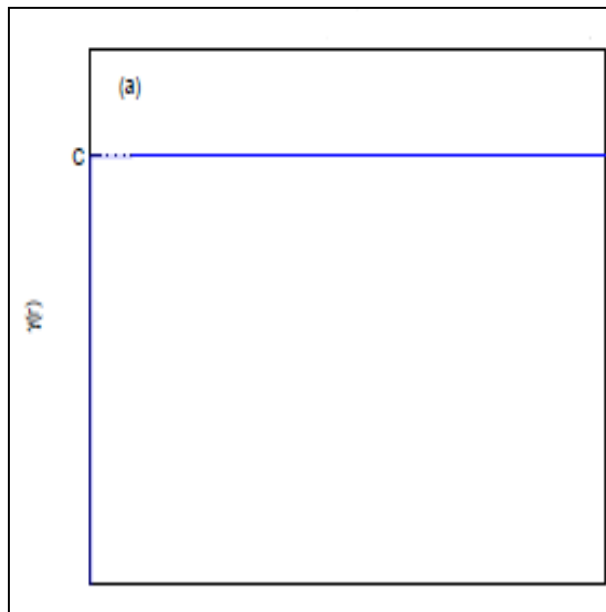


Figure 15 : Modèles variogramme isotropes avec palier

- **Modèle sphérique de portée a et de palier C : linéaire à l'origine.(Figure 16)**

$$\gamma(r) = \begin{cases} C\left(\frac{3}{2}\frac{r}{a} - \frac{1}{2}\frac{r^3}{a^3}\right) & \text{pour } 0 \leq r \leq a \\ C & \text{pour } r > a \end{cases} \quad \text{Équation 66}$$

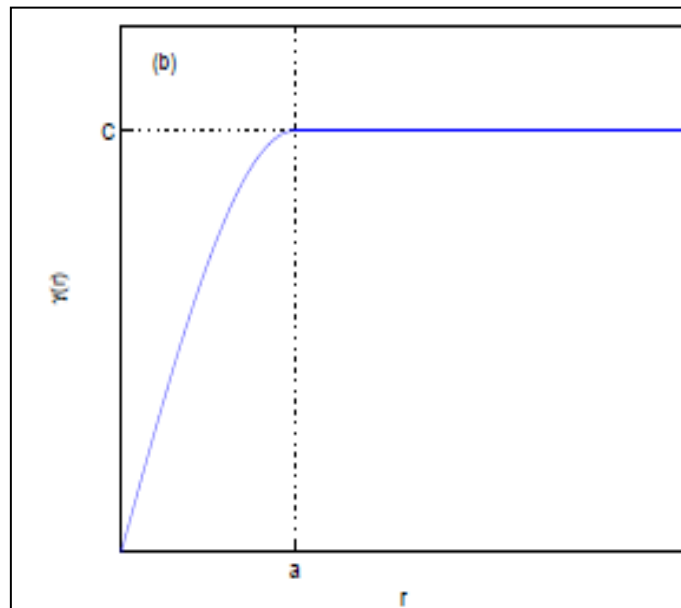


Figure 16 : Modèle variogramme sphérique de portée a et de palier C (linéaire à l'origine)

- Modèle cubique de portée a et de palier C : parabolique à l'origine(Figure 17)

$$\gamma(r) = \begin{cases} C \left(\frac{7r^2}{a^2} - \frac{35r^3}{4a^3} + \frac{7r^5}{2a^5} - \frac{3r^7}{4a^7} \right) & \text{pour } 0 \leq r \leq a \\ C & \text{pour } r > a \end{cases} \quad \text{Équation 67}$$

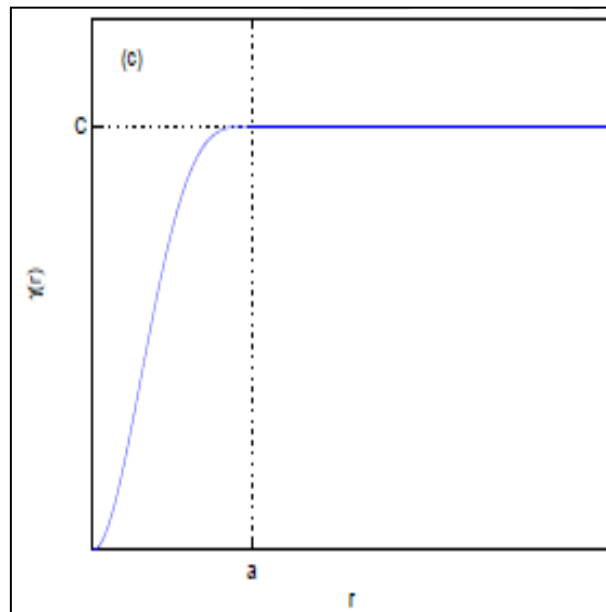


Figure 17 : Modèle variogramme cubique de portée a et de palier C (parabolique à l'origine)

- Modèle exponentiel de paramètre a et de palier C : linéaire à l'origine.(Figure 18)

$$\gamma(r) = C(1 - e^{-\frac{r}{a}})$$

Équation 68

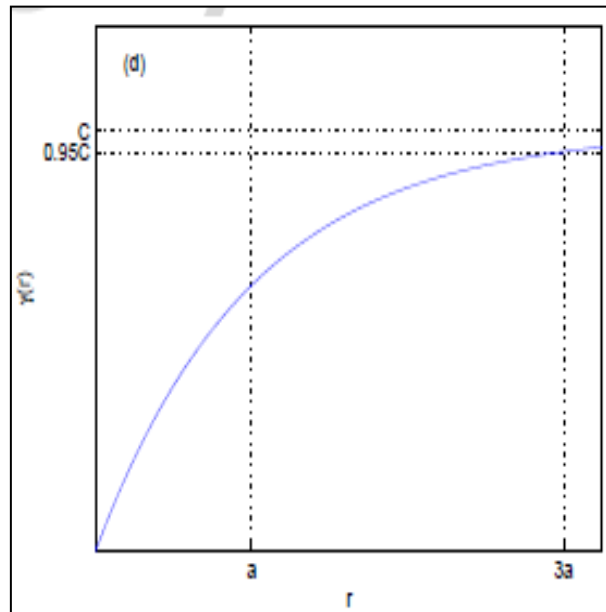


Figure 18 : Modèle variogramme exponentiel de paramètre a et de palier C (linéaire à l'origine)

- Modèle gaussien de paramètre a et de palier C : parabolique à l'origine.(Figure 19)

$$\gamma(r) = C(1 - e^{-\frac{r^2}{a^2}})$$

Équation 69

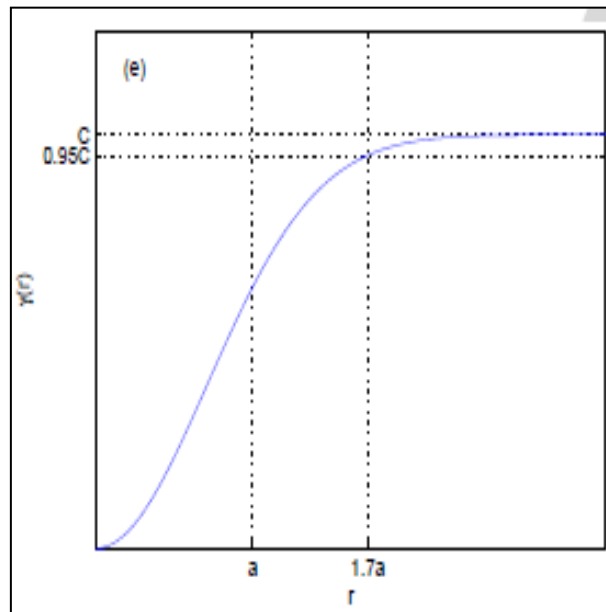


Figure 19 : Modèle variogramme gaussien de paramètre a et de palier C (parabolique à l'origine)

- **Modèle à effet de trou : parabolique à l'origine (Figure 20)**

Il permet de modéliser un variogramme moins stable, présentant des fluctuations autour du palier : il est caractéristique de données plus hétérogènes.

$$\gamma(r) = C \left[1 - \frac{\sin\left(\frac{r}{a}\right)}{\frac{r}{a}} \right]$$

Équation 70

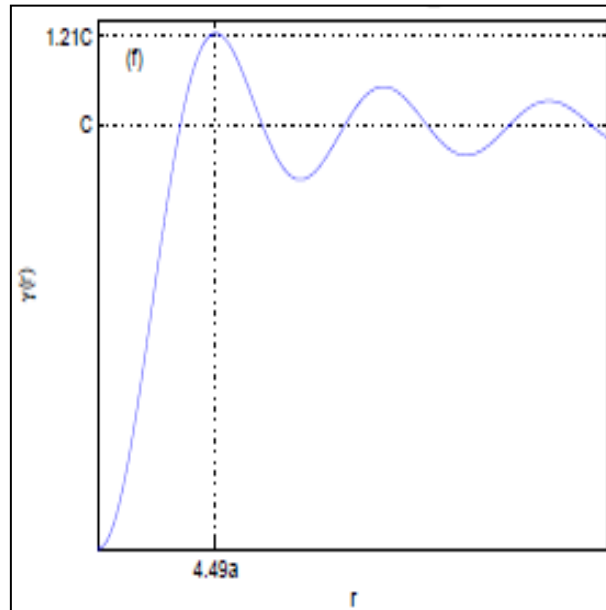


Figure 20 : Modèle variogramme à effet de trou (parabolique à l'origine)

- **Modèles isotropes sans palier : (Figure 21)**

Modèle puissance d'exposant θ et de facteur d'échelle ω : $\theta \in [0; 2]$. Plus θ est proche de 2, plus la variable régionalisée est régulière. Plus θ est proche de 0, plus son comportement est erratique.

$$\gamma(r) = \omega r^\theta$$

Équation 71

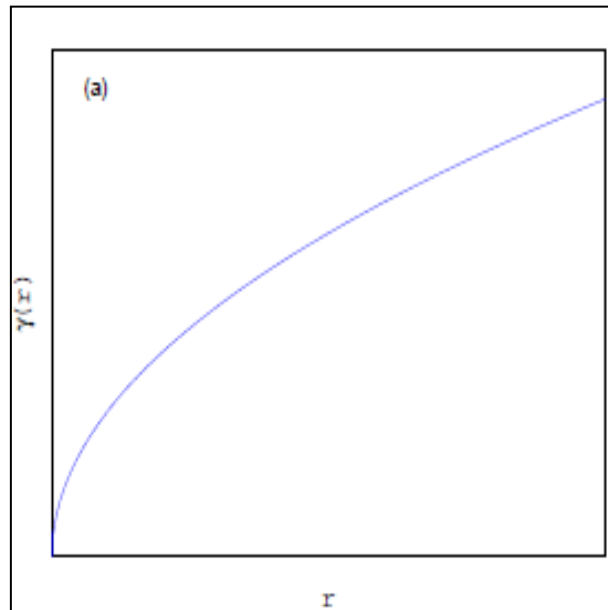


Figure 21 : Modèles variogramme isotropes sans palier

- Modèle linéaire de pente ω : linéaire à l'origine.(Figure 22)

$$\gamma(r) = wr$$

Équation 72

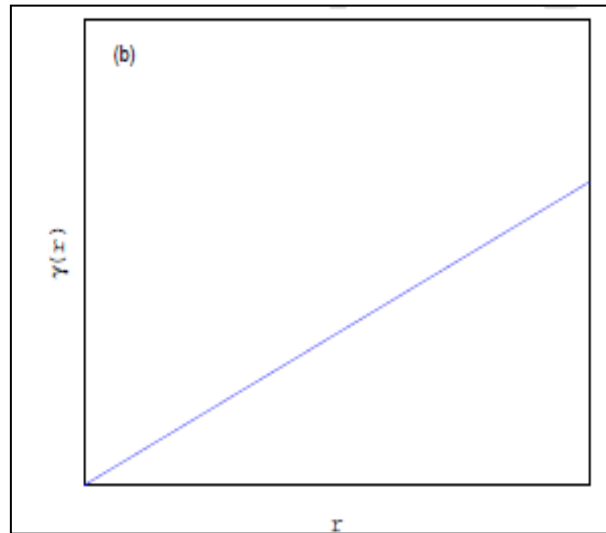


Figure 22 : Modèle variogramme linéaire de pente ω (linéaire à l'origine)

3.3.5. Le krigeage

3.3.5.1. Principe de la méthode

Le krigeage est une méthode d'interpolation applicable à des données spatiales.

Elle s'appuie sur la géostatistique linéaire, notamment le variogramme.

Le krigeage est un interpolateur exact (la valeur estimée sur un point de mesure est égale à la valeur du point de mesure) et également un interpolateur optimal (il minimise la variance sur l'erreur d'estimation).

3.3.5.2. Hypothèses et contraintes

Voisinage :

Dans la plupart des cas, il n'est pas nécessaire de prendre toutes les données disponibles pour le calcul car elles peuvent être trop nombreuses ou trop éloignées et ainsi le calcul en serait plus long et pas nécessairement plus précis.

On appelle voisinage du krigeage le domaine du champ qui contient le site à estimer et les données utilisées pour l'interpolation.

La sélection des sites d'intérêt peut se faire soit par un critère de nombre (les n plus proches) ou de distances (les n sites situés à une distance inférieure à un rayon maximal).

Contraintes :

L'objectif est d'estimer le plus précisément possible la grandeur recherchée par une combinaison linéaire pondérée des observations. Ce critère de précision se traduit par une minimisation de l'erreur quadratique moyenne. Ces conditions se traduisent mathématiquement en 4 contraintes.

– Contrainte de linéarité : L'estimée doit être une combinaison linéaire des données :

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0)z(s_i) \quad \text{Équation 73}$$

– Contrainte d'autorisation : L'espérance et la variance de l'erreur de prévision $\hat{z}(s_0) - z(s_0)$ doivent obligatoirement exister (cette contrainte intervient dans le cas stationnaire intrinsèque puisqu'elle existe obligatoirement dans le cas de la stationnarité d'ordre 2).

– Contrainte de non biais : L'espérance de l'erreur de prévision est nulle.

– Contrainte d'optimalité : les poids λ_i doivent être estimés de manière à minimiser la variance de l'erreur de prévision.

Estimation :

Dans le cas de l'étude d'une seule variable régionalisée, sous l'hypothèse de stationnarité intrinsèque : on parle de krigeage ordinaire. C'est le type de krigeage le plus communément utilisé.

Le krigeage doit donc répondre aux 4 contraintes énoncées précédemment.

– Contrainte de linéarité : L'estimée est donc une combinaison linéaire des observations

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0)z(s_i)$$

– Contrainte d'autorisation : On doit assurer l'existence de l'espérance et de la variance de l'erreur de prévision. On a :

$$\hat{Z}(s_0) - Z(s_0) = [\sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0)Z(s_i)] - Z(s_0) = [\sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0)[Z(s_i) - Z(s_0)]] + Z(s_0)[\sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0) - 1] \quad \text{Équation 74}$$

L'erreur de prévision prend donc la forme d'une combinaison linéaire des accroissements si et seulement si $\sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0) = 1$. Dans ce cas, on a bien l'existence de la variance et de l'espérance sous l'hypothèse de stationnarité intrinsèque.

-Contrainte de non biais : On doit s'assurer que l'estimateur de l'erreur de prévision est non biaisé :

On a :

$$E\left(\widehat{Z}(s_0) - Z(s_0)\right) = \left[\sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0) E(Z(s_i) - Z(s_0))\right] \quad \text{Équation 75}$$

L'espérance des accroissements étant nulle sous l'hypothèse intrinsèque, on a bien un estimateur de l'erreur de prévision non biaisé.

- Contrainte d'optimalité : On cherche à minimiser l'erreur de prévision $\widehat{Z}(s_0) - Z(s_0)$

Cette minimisation sous la contrainte $\sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0) = 1$ se ramène à la recherche des extrema du Lagrangien suivant :

$$\mathcal{L}(\lambda_1(s_0), \dots, \lambda_n(s_0), \mu) = E\left[\left(\sum_{j=1}^n \lambda_j(s_0) [Z(s_j) - Z(s_0)]\right)^2\right] + 2\mu\left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0)\right) \quad \text{Équation 76}$$

Où μ représente un multiplicateur de Lagrange.

Après développement, on peut réécrire le Lagrangien sous la forme :

$$\mathcal{L} = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i(s_0) \lambda_j(s_0) \gamma_{ij} + 2 \sum_{j=1}^n \lambda_j(s_0) \gamma_{j0} + 2\mu \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0)\right) \quad \text{Équation 77}$$

Avec :

$$\gamma_{ij} = \gamma(s_i, s_j) \quad \text{Équation 78}$$

Le calcul des dérivées partielles premières de \mathcal{L} par rapport aux $\lambda_i(s_0)$ donne les équations constituant le système de krigeage :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_i(s_0)} = -2 \sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0) \gamma_{ij} + 2\gamma_{i0} - 2\mu = 0 \quad \text{Équation 79}$$

On obtient le système à résoudre :

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0) \gamma_{ij} + \mu = \gamma_{i0} \quad \text{Équation 80}$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0) = 1 \quad \text{Équation 81}$$

Qui peut être écrit sous forme matriciel :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{0} & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \dots & \gamma_{1n} & \mathbf{1} \\ \gamma_{21} & \mathbf{0} & \gamma_{23} & \dots & \gamma_{2n} & \mathbf{1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \gamma_{n3} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \dots & \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1(s_0) \\ \lambda_2(s_0) \\ \dots \\ \lambda_n(s_0) \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \dots \\ \gamma_{n0} \\ \mathbf{1} \end{pmatrix} \quad \text{Équation 82}$$

3.3.5.3. Propriétés du krigage

La variance de l'erreur d'estimation au point s_0 est donnée par :

$$\sigma^2(s_0) = \text{var}[\hat{z}(s_0) - z(s_0)] = \sum_{i=1}^n \lambda_i(s_0) \gamma_{i0} + \mu \quad \text{Équation 83}$$

La variance dépend donc des paramètres du krigage (termes λ_i) ainsi que de la structure spatiale de la fonction aléatoire (variogramme).

Le choix du modèle variographique à utiliser est très important et il doit être le plus cohérent possible avec ce qui a été observé : la qualité de l'estimation et l'appréciation de sa précision reposent uniquement sur ce choix. En effet, c'est cette fonction variographique qui va tenir compte à la fois de la géométrie des données, des caractéristiques de la régionalisation et de la précision de l'estimation.

3.3.6. Conclusion

Le Krigage est une méthode stochastique, contrairement aux autres approches d'interpolation, il permet d'appréhender la structure spatiale du phénomène étudié.

En effet, le poids affecté à chaque point d'observation est pondéré par une fonction issue des données. Cette fonction n'est pas fixée a priori mais suite à l'analyse du variogramme. Avec cette méthode il y a donc moins de contraintes sur le choix du plan d'échantillonnage.

Cependant, l'inconvénient majeur du krigage et plus généralement de toutes les méthodes basées sur la statistique est le nombre de points de données. En effet, pour que le résultat de l'interpolation soit satisfaisant il faut un nombre assez important de points ce qui n'est pas le cas de toutes les campagnes d'essais effectuées.

Une troisième et dernière approche d'interpolation spatiale sera discutée dans la partie suivante. Cette approche est la méthode des réseaux de neurone.

3.4. Réseaux de neurone

L'élaboration du modèle des réseaux de neurones a été basée sur le modèle plus complexe des réseaux de neurones biologique et ils ont pour fonction le traitement des données.

Un réseau de neurone est composé de :

- Neurones : se sont des éléments simples qui permettent le traitement de l'information. A chaque neurone est associé une fonction d'activation qui transforme le signal d'entrée en signal de sortie.
- Connexions : se sont les éléments qui permettent de faire passer l'information. A chaque connexion est associée un poids qui pondère le signal.

3.4.1. Le neurone

Le réseau de neurone est constitué de nœuds appelés neurones reliés entre eux par des connexions qui permettent la circulation de l'information.

Un neurone est une fonction mathématique ayant des entrées et une sortie (**Figure 23**). Il transforme les entrées par l'intermédiaire d'une fonction d'activation en une sortie (équation 84).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{Équation 84}$$

Avec :

- x_i : Entrées
- y : Sortie
- f : Fonction d'activation

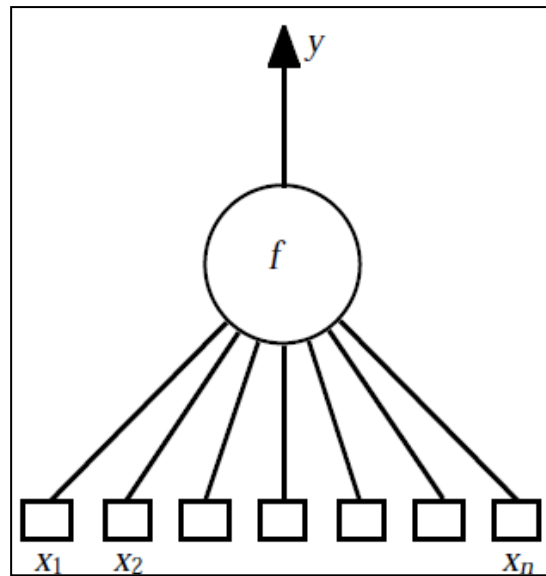


Figure 23 : Schéma de neurone

Souvent, les neurones les plus utilisés sont ceux pour lesquels la fonction « f » est une fonction non linéaire d'une combinaison linéaire des entrées (**Figure 24**). Ce neurone ne réalise donc qu'une somme pondérée suivie d'une fonction non linéaire.

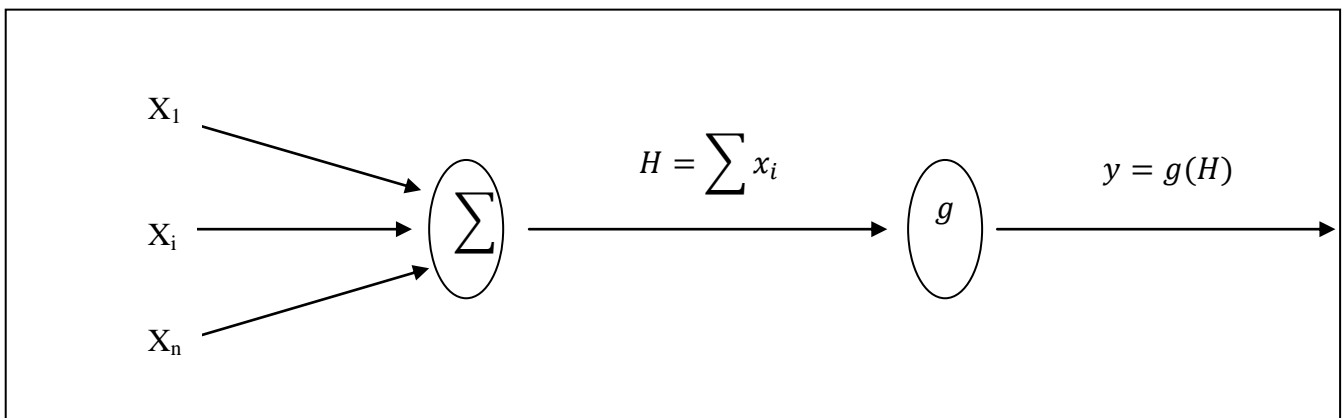


Figure 24 : Schéma du neurone

Ainsi, on peut séparer le neurone en deux parties :

- Une fonction d'intégration H qui réduit les n entrées à une valeur numérique (souvent cette fonction est la fonction somme)
- Une fonction d'activation qui produit la valeur de sortie du neurone

Les fonctions d'activation les plus utilisées sont :

- Fonction identité
- Fonction sigmoïde (**Figure 25**). C'est une courbe en S et qui a pour fonction :

$$g(x) = \frac{1}{1+e^{-\lambda x}}$$

Équation 85

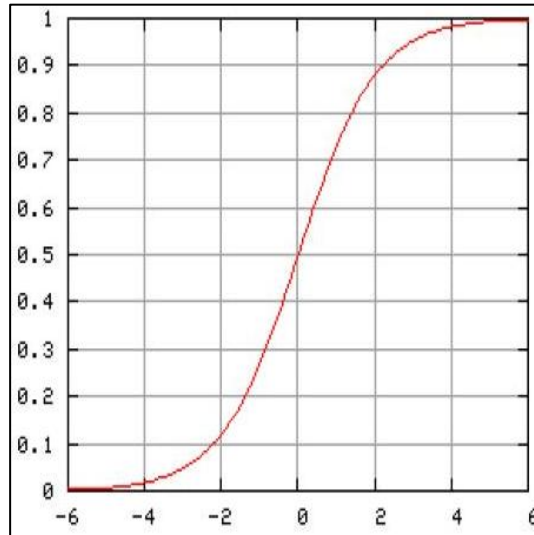


Figure 25 : Courbe de la fonction sigmoïde

Les liaisons entre les différents neurones se fait par les connexions présentées si dessous.

3.4.2. Connexions

Le rôle des connexions est de faire passer l'information d'un neurone à un autre. Pour chaque connexion est associée un poids. La **Figure 26** présente un schéma de connexion entre deux neurones avec :

- La sortie du neurone i est notée o_i
- W_{ij} est le poids de la connexion entre le neurone i et j
- $W_{ji} \cdot o_i$ l'information transmise au neurone j

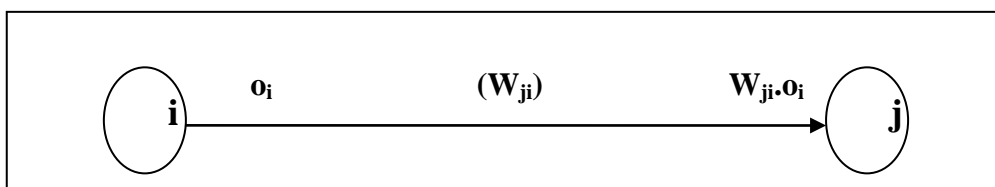


Figure 26 : Schéma d'une connexion entre deux neurones i et j

3.4.3. Réseaux de neurones à couches

Un réseau est donc constitué de neurones liés entre eux par des connexions. Le type de réseau de neurones le plus utilisé est un réseau à couches.

Ce type de réseau est composé de plusieurs couches (**Figure 27**). Une couche d'entrée où chaque valeur d'entrée est associée à un neurone. Le nombre d'unité de la couche est donc égal à la dimension du vecteur d'entrée.

- Une couche de sortie qui donne le vecteur de sortie.
- Des couches cachées qui sont des couches intermédiaires et qui ne sont pas toujours présentes.

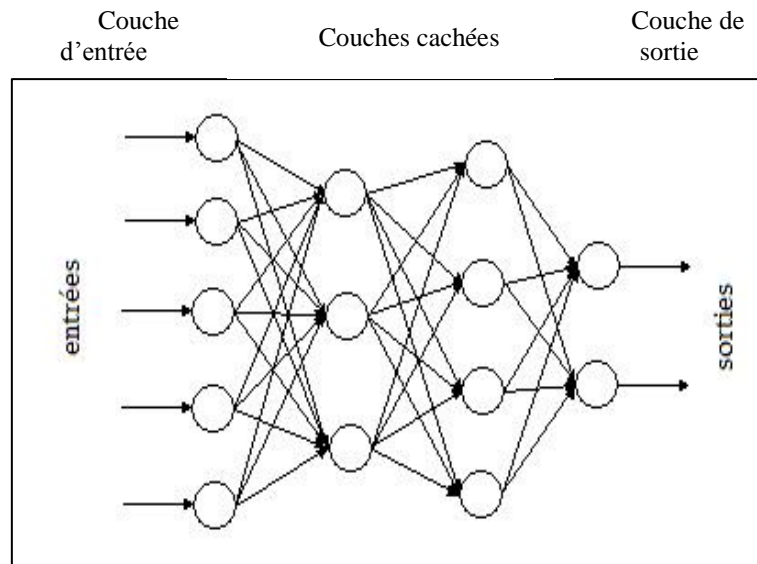


Figure 27 : Schéma d'un réseau à couches multiples

Après avoir décrit les composantes d'un réseau (les neurones), les liens qui les relient (connexions) et les différentes couches (couche d'entrée, couche de sortie et couches cachées). On passe maintenant à la description de la propriété qui est à l'origine de l'intérêt pratique des réseaux de neurones dans divers domaines : l'approximation parcimonieuse.

3.4.4. Propriété fondamentale des réseaux de neurones : approximation parcimonieuse

La propriété d'*approximation* des réseaux de neurones peut être énoncée comme suit : « toute fonction bornée suffisamment régulière peut être approchée avec une précision arbitraire, dans un domaine fini de l'espace de ses variables, par un réseau de neurones comportant des couches de neurones cachés en nombre fini, possédant tous la même fonction d'activation, et un neurone de sortie linéaire » [Hor89].

Cependant cette propriété n'est pas spécifique aux réseaux de neurones. En effet, beaucoup d'autres familles paramétrées possèdent cette propriété comme par exemple les splines.

L'avantage des réseaux de neurones par rapport aux autres méthodes est que cette approximation est parcimonieuse, c'est-à-dire qu'à précision égale, les réseaux de neurones nécessitent moins de paramètres ajustables (les poids des connexions) que les approximateurs universels couramment utilisés.

Dans le cas des réseaux de neurones le nombre de poids varie linéairement avec le nombre de variables de la fonction à approcher, alors qu'il varie exponentiellement pour la plupart des autres approximateurs. En effet, lorsque l'approximation est une combinaison linéaire de fonctions élémentaires fixées, on ne peut ajuster que les coefficients de la combinaison ; En revanche, lorsque l'approximation est une combinaison linéaire de fonctions non linéaires à paramètres ajustables (le cas des réseaux de neurones), on ajuste à la fois les coefficients de la combinaison et la forme des fonctions que l'on combine. Donc la souplesse supplémentaire, conférée par le fait que l'on ajuste la forme des fonctions que l'on superpose, permet d'utiliser un plus petit nombre de fonctions élémentaires, donc un plus petit nombre de paramètres ajustables [Dre98].

Après avoir décrit les composants d'un réseau de neurones et la propriété principale de ce type de réseau, on va maintenant passer à la méthode d'approximation : l'apprentissage des réseaux de neurones.

3.4.5. Apprentissage du réseau de neurones

Le but des réseaux de neurones est de trouver une estimation de la fonction réelle. Cette procédure est faite par la méthode d'apprentissage qui consiste à trouver la combinaison idéale des poids associés aux connexions.

Dans le cas des réseaux de neurones à couches, la méthode d'apprentissage est l'apprentissage avec rétropropagation de l'erreur.

3.4.5.1. Apprentissage avec rétropropagation de l'erreur

Le principe de cette méthode est de changer les poids des connexions en fonction de leur influence sur l'erreur : ($|valeur\ cible - valeur\ de\ sortie|$)

La première étape consiste à comparer le vecteur de sortie au vecteur cible pour chaque vecteur d'entrée présenté au réseau.

La deuxième étape consiste à déterminer l'influence des poids sur la réponse du réseau.

Ces deux étapes seront répétées pour chaque couple de vecteur entrée-sortie disponible.

Ci-dessous on présentera la méthode dans le cas d'un réseau à une seule couche cachée et avec la même fonction d'activation f . Cette méthode pourra être appliquée aux autres cas avec plus d'une seule couche cachée: [Huy 98]

Notation :

- $g: R^n \rightarrow R^m$ Fonction à approximer
- $g': R^n \rightarrow R^m$ Approximation de la fonction g
- P nombre de vecteurs utilisés pour l'apprentissage
- x^p p^{eme} vecteur d'entrée $p=1, 2, \dots, P$
- t^p p^{eme} vecteur cible
- z^p p^{eme} vecteur de sortie
- t_i^p i^{eme} composante du vecteur cible t^p
- n Dimension du vecteur d'entrée
- m Dimension du vecteur de sortie
- h Nombre d'éléments de la couche cachée
- v_{ji} poids de la connexion entre le i^{eme} élément de la couche d'entrée et le j^{eme} élément de la couche cachée.
- W_{jk} poids de la connexion entre le j^{eme} élément de la couche cachée et le k^{eme} élément de la couche de sortie.

La valeur d'entrée du j^{eme} neurone de la couche cachée est :

$$H_j = \sum_{i=0}^n v_{ji} \times x_i \quad j = 1, 2, \dots, h \quad \text{Équation 86}$$

La valeur de sortie du j^{eme} neurone de la couche cachée est donc:

$$y_j = f(H_j) \quad \text{Équation 87}$$

La valeur d'entrée du k^{eme} neurone de la couche de sortie est :

$$I_k = \sum_{j=0}^h w_{kj} \times y_j \quad k = 1, 2, \dots, m \quad \text{Équation 88}$$

La valeur de sortie du k^{eme} neurone de la couche cachée est donc:

$$z_k = f(I_k) \quad \text{Équation 89}$$

Donc :

$$z_k = f(\sum_{j=0}^h w_{kj} \times f(H_j)) \quad \text{Équation 90}$$

L'erreur quadratique sur t^p pour le passage du vecteur x^p est :

$$E^p = E = \frac{1}{2} \times \sum_{i=1}^m (t_i - z_i)^2 \quad \text{Équation 91}$$

La quantité $\frac{\partial E}{\partial W_{kj}}$ représente l'influence du poids W_{kj} sur l'erreur E . la correction sur W_{kj} à l'instant s est :

$$\Delta w_{kj} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{kj}(s)} \quad \text{Équation 92}$$

Avec η coefficient d'apprentissage.

Il reste donc à déterminer la valeur de $\frac{\partial E}{\partial W_{kj}}$. On a :

$$\frac{\partial E}{\partial w_{kj}} = \frac{\partial E}{\partial I_k} \times \frac{\partial I_k}{\partial w_{kj}} \quad \text{Équation 93}$$

Or :

$$\frac{\partial E}{\partial I_k} = \frac{\partial E}{\partial z_k} \times \frac{\partial z_k}{\partial I_k} = -(t_k - z_k) \times f'(I_k) \quad \text{Équation 94}$$

Et :

$$\frac{\partial I_k}{\partial w_{kj}} = y_j \quad \text{Équation 95}$$

Donc :

$$\frac{\partial E}{\partial w_{kj}} = -(t_k - z_k) \times f'(I_k) \times y_j \quad \text{Équation 96}$$

On obtient donc la correction à apporter aux poids qui relient la couche cachée à la couche de sortie :

$$\Delta w_{kj} = \eta \times (t_k - z_k) \times f'(I_k) \times y_j = \eta \times \delta_k \times y_j \quad \text{Équation 97}$$

Avec :

$$\delta_k = -(t_k - z_k) \times f'(I_k) \quad \text{Équation 98}$$

La même démarche permet de trouver la correction à apporter aux poids qui relient la couche d'entrée à la couche cachée :

$$\Delta v_{ji} = \eta \times \delta_j \times x_i \quad \text{Équation 99}$$

Avec :

$$\delta_j = f'(H_j) \times \sum_{k=1}^n \delta_k \times w_{kj} \quad \text{Équation 100}$$

Et :

$$\delta_k = - (t_k - z_k) \times f'(I_k) \quad \text{Équation 101}$$

3.5. Conclusion

L'étude bibliographique nous a permis dans une première partie de comprendre les mécanismes d'épuration des sols face à l'infiltration des eaux usées. L'un des paramètres les plus importants qui influence les mécanismes d'épuration est la conductivité hydraulique. Une deuxième partie a été donc consacrée aux méthodes de mesure de la conductivité hydraulique, cette partie nous a permis de conclure quant à la difficulté de réaliser les essais de mesure de la conductivité hydraulique. Une dernière partie a été consacrée aux méthodes d'interpolation de données, cette partie va nous permettre par la suite de choisir la méthode la plus adaptée à notre étude.

Notre objectif ultime est de développer une méthodologie qui permet de reproduire la perméabilité du terrain naturel à partir d'essais ponctuels facile à réaliser et efficace. Pour atteindre ce but, ce rapport présente une démarche de reconstruction de la stratigraphie et de la résistance de pointe du terrain naturel. Cette reconstruction couplée à la perméabilité qui est fonction de la nature du sol (stratigraphie) et l'état de compactage (résistance de pointe) va permettre de reproduire le modèle de la perméabilité du terrain.

Chapitre II : Analyse et interprétation

Le travail pendant mon stage a été divisé en deux parties. Une première partie qui consiste en l'analyse des résultats des essais pour obtenir les stratigraphies ponctuelles. Une deuxième partie qui consiste en l'interpolation par le logiciel RockWorks et l'analyse des résultats obtenus.

1. Analyse des essais : stratigraphies ponctuelles

Cette première partie a pour objectif d'obtenir les stratigraphies ponctuelles qui vont nous servir par la suite à reconstruire le modèle des terrains des sites visités. Cette étude a été donc effectuée sur treize sites et on a utilisé deux essais in situ qui sont :

- Essai pénétromètre de type PANDA
- Essai de géoendoscopie

D'abord, on commencera par décrire les essais utilisés et leurs fonctionnements. Ensuite, on passera à la présentation des sites visités et les essais effectués. Finalement, une dernière partie sera consacrée à l'analyse de chaque sondage pour chaque site.

1.1. Présentation des essais

Les deux essais utilisés sont le pénétromètre PANDA et la géoendoscopie. L'avantage de ces essais est qu'ils sont faciles à manipuler et peu encombrant pour des essais in situ.

1.1.1. Essai pénétromètre de type PANDA

Le PANDA (Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur) est un pénétromètre dynamique léger à énergie variable [NF X 94-105] . Il est conçu pour le contrôle de compactage et la reconnaissance des sols en général.

L'avantage du PANDA par rapport aux autres essais pénétrométrique est que c'est un essai simple mobile et léger tout en restant fiable.

L'essai consiste à enfoncer un train de tiges manuellement dans le sol à l'aide d'un marteau standardisé. Pour chaque coup donné, Il permet grâce à un capteur de vitesse et un capteur d'enfoncement de mesurer la résistance de pointe. En effet, la résistance est calculée par la formule des Hollandais [NF X 94-105] qui intègre l'énergie de battage (énergie fournie par le marteau) et l'enfoncement correspondant :

$$q_p(z) = \frac{1}{s \times e} \times \frac{1}{2} \times M \times V^2 \times \frac{1}{1 + \frac{P}{M}} \quad \text{Équation 102}$$

Avec :

- $q_p(z)$: Résistance de pointe à la profondeur Z .
- S : Section de la pointe du train de tige (2,4 ou 10 cm²)
 - Les pointes de 4 et de 10 cm² sont des pointes perdues. Elles permettent de diminuer considérablement le frottement latéral. Elles sont principalement utilisées en reconnaissance des sols.
 - La pointe de 2 cm² est une pointe fixe non débordante et elle sert au contrôle de compactage.
- e : Enfoncement de la tige
- M : Masse frappante
- V : Vitesse de la masse frappante
- P : Masse morte entraînée

La **Figure 28** présente les différentes composantes du pénétromètre PANDA.

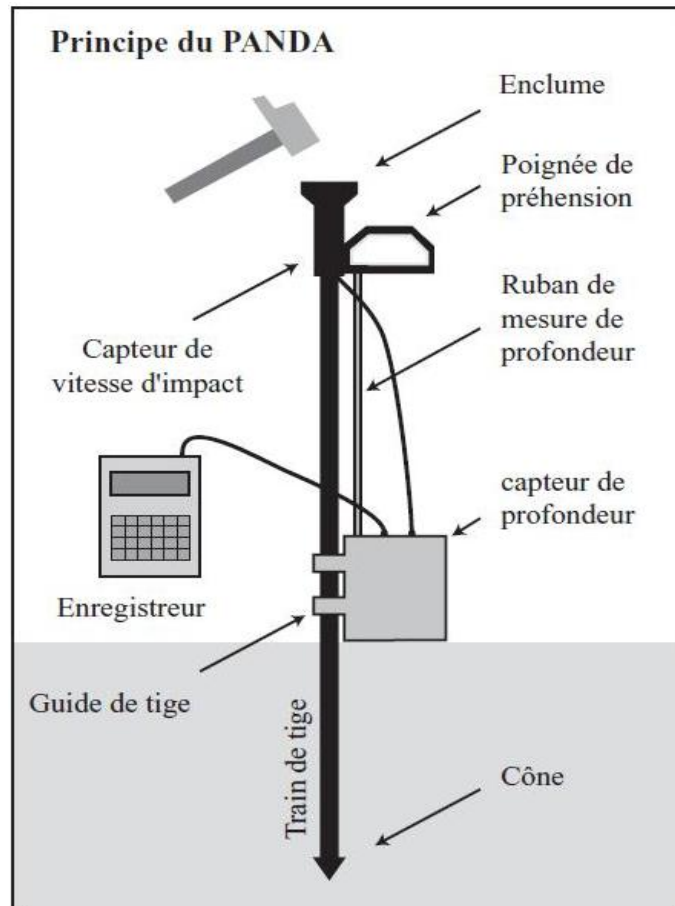


Figure 28: Principe du PANDA

Chapitre II : Analyse et interprétation

Le boîtier enregistreur calcule la résistance de pointe et mémorise pour chaque coup de marteau le couple $(q_p(z), z)$.

Le résultat ainsi obtenu est une courbe de résistance de pointe en fonction de la profondeur : le pénétrogramme. Un exemple de pénétrogramme est donné sur la **Figure 29**.

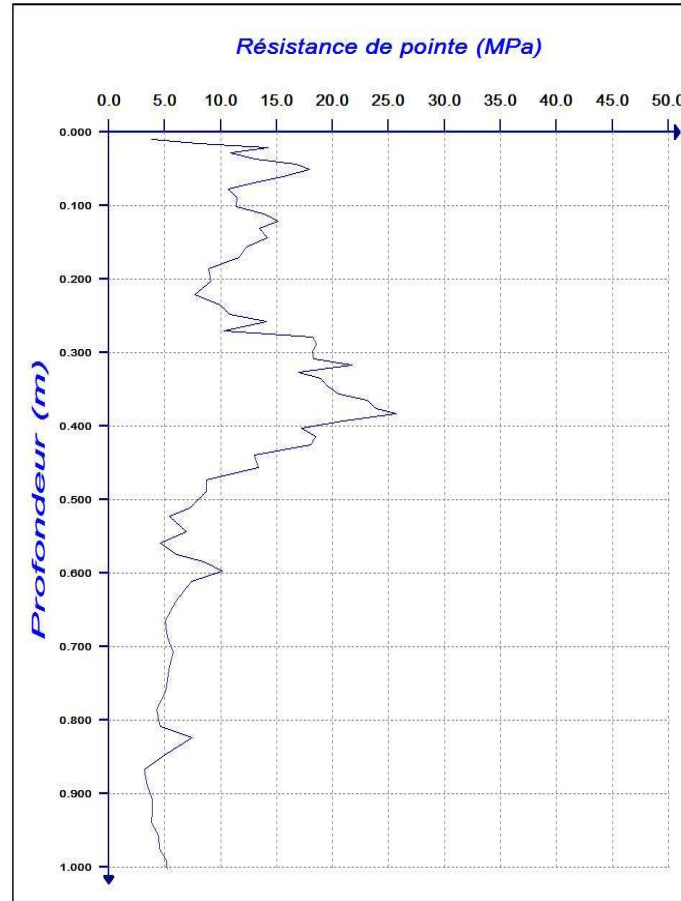


Figure 29 : Exemple de pénétrogramme obtenu avec l'essai PANDA

La courbe va nous permettre de distinguer les différentes couches constituant le terrain pour un sondage donné. La distinction des couches peut se faire soit visuellement ou bien automatiquement [Cha99]. Notre analyse des pénétrogrammes est faite visuellement, un changement brusque dans la relation « résistance de pointe-profondeur » atteste de la présence d'une nouvelle couche de résistance différente.

Un exemple des couches détectées pour le pénétrogramme de la **Figure 29** est donné **Figure 30**.

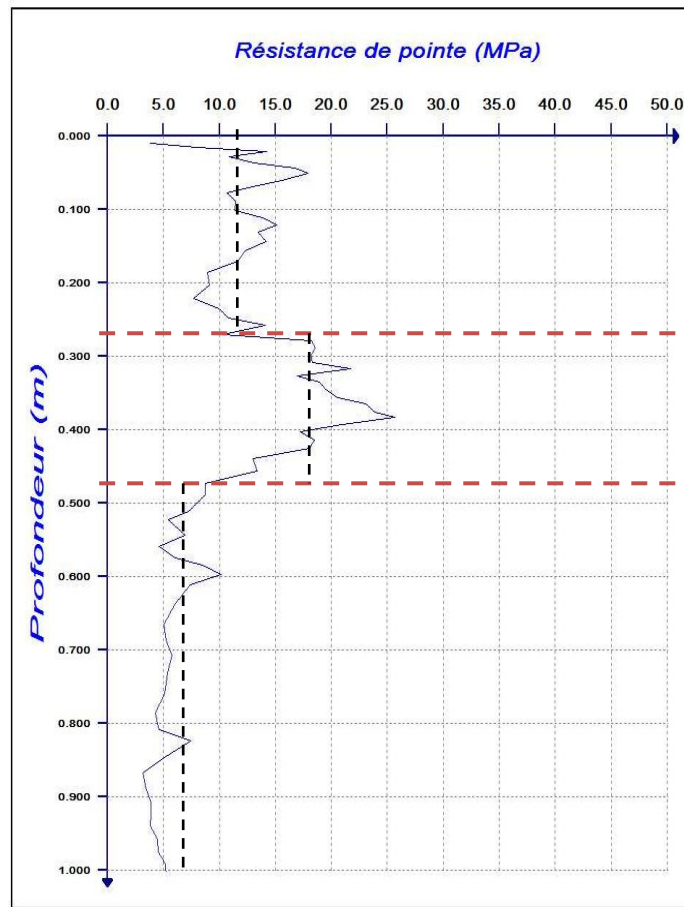


Figure 30 : Exemple de stratigraphie à partir d'un pénétrogramme obtenu par l'essai PANDA

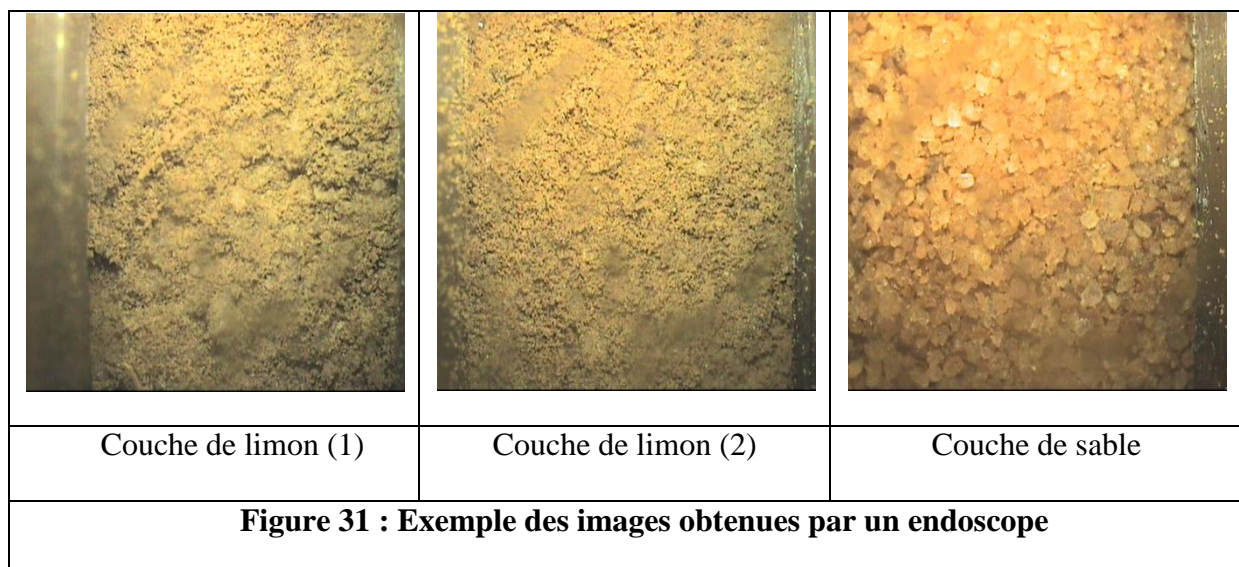
1.1.2. Essai de géoendoscopie

L'endoscope est un appareil optique qui permet de prendre des images dans une cavité. L'essai de géoendoscopie est un essai d'endoscopie couplée au pénétromètre PANDA.

Le principe de l'essai consiste donc à prendre des images de sol à partir de la cavité réalisée par l'essai PANDA et d'analyser les images par le logiciel Aphelion afin de caractériser les milieux traversés.

On reprend l'exemple du sondage précédent traité par l'essai PANDA. Durant l'analyse de pénétrogramme de ce sondage, on a remarqué que l'on distingue trois couches jusqu'à une profondeur de 1 m. En effectuant un essai de géoendoscopie (**Figure 31**) à ce même sondage on a distingué pour :

- La première couche de limon (1)
- La deuxième couche de limon dans un état plus serré (2)
- La troisième couche de sable



Après avoir obtenu les images du sol dans la cavité, on peut les analyser par le logiciel Aphelion pour pouvoir en tirer les informations permettant de caractériser les différentes couches du sondage. Les paramètres obtenus permettent de caractériser :

- La texture
- La colorométrie

1.1.2.1. Caractérisation de la texture

L'analyse de la texture consiste à analyser la rugosité d'une image. Elle permet de séparer les matériaux fins des matériaux grenus.

Trois paramètres permettent de caractériser la texture :

- Le moment normalisé d'ordre 3
- L'écart type
- Le coefficient de variation

1.1.2.1.1. *Moment normalisé d'ordre 3 : M3*

Le moment normalisé d'ordre 3 (M3) est obtenu par l'analyse du spectre de Fourier de l'image donnée par l'endoscope.

Le M3 permet de caractériser les sols très fins au sens du GTR. En effet, l'étude effectuée par [Bre99] a permis de trouver une valeur caractéristique qui différencie un sol très fin des autres sols tout en faisant une analogie avec la classification GTR.

L'étude a consisté à mesurer l'évolution du M3 en fonction du pourcentage des particules de tailles inférieures à 80 μm **Figure 32**.

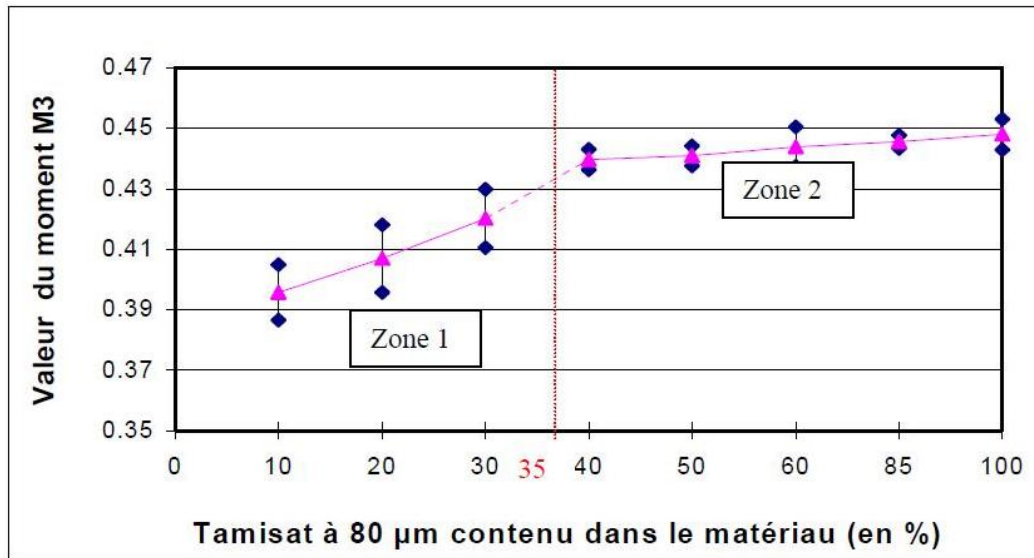


Figure 32 : Valeur du M3 par rapport au tamisât à 80 µm [Bre99]

BREUL [Bre99] a remarqué l'existence de deux zones :

- Une première zone (Zone 1) jusqu'à une valeur de 30% où l'augmentation du pourcentage des particules de 80 µm entraîne une augmentation de la valeur du moment M3 tout en restant inférieure à 0.43.
- Une deuxième zone (Zone 2) pour les valeurs de tamisât à 80 µm supérieur à 40% la variation de la texture est presque nulle et la valeur du M3 reste supérieure à 0.43.

Par ailleurs dans la classification GTR, la limite entre les matériaux très fins « matériaux de classe A » et les autres matériaux est de 35% du tamisât à 80µm.

Ainsi une corrélation a été faite entre le moment d'ordre trois (M3) et la classification GTR. La limite de 0.43 du M3 permet de distinguer les matériaux de classe A ($M3 > 0.43$) et les autres matériaux ($M3 < 0.43$).

Il a été aussi démontré que cette méthode de caractérisation est insensible à la minéralogie ainsi qu'à la teneur en eau dans le cas où on est en dessous du seuil de la saturation. Par contre, l'augmentation de la compacité induit une légère augmentation de la valeur de M3 mais sans grande conséquence sur les conclusions de la méthode.

L'analyse du moment d'ordre trois permet de caractériser partiellement les matériaux. Cependant, le fait qu'il soit sensible à l'homogénéité de l'image implique que dans le cas des matériaux grenus les valeurs du M3 varient beaucoup et ne permettent pas de caractériser ces matériaux.

La caractérisation des matériaux plus grossiers se fait par une autre méthode basée sur deux paramètres statistiques : l'écart type (σ) et la covariance (CV).

1.1.2.1.2. *L'écart type (σ) et la covariance (CV)*

Ces deux paramètres (l'écart type et la covariance) permettent de caractériser la texture des matériaux grossiers. La méthode se base sur l'analyse statistique de l'histogramme en niveaux de gris de l'image : pour les matériaux avec un pourcentage de fine inférieur à 10% la variation des niveaux de gris est importante. En effet, la texture des matériaux grenus, le fait que les contours des grains sont marqués et le manque de matière entre les grains permettent d'expliquer cette forte variation.

Ainsi les valeurs de l'écart type et le coefficient de variation sont plus importants pour les matériaux grenus que pour les matériaux fins. La limite qui permet de caractériser ces deux types de matériaux est de 40 niveaux de gris pour l'écart type et de 28% pour le coefficient de variation.

Ces trois paramètres, le moment normal d'ordre 3, l'écart type et le coefficient de variation sont des paramètres complémentaires pour l'analyse de la texture du matériau.

La **Figure 33** résume la démarche complète de l'analyse de la texture effectuée par [Bre 99].

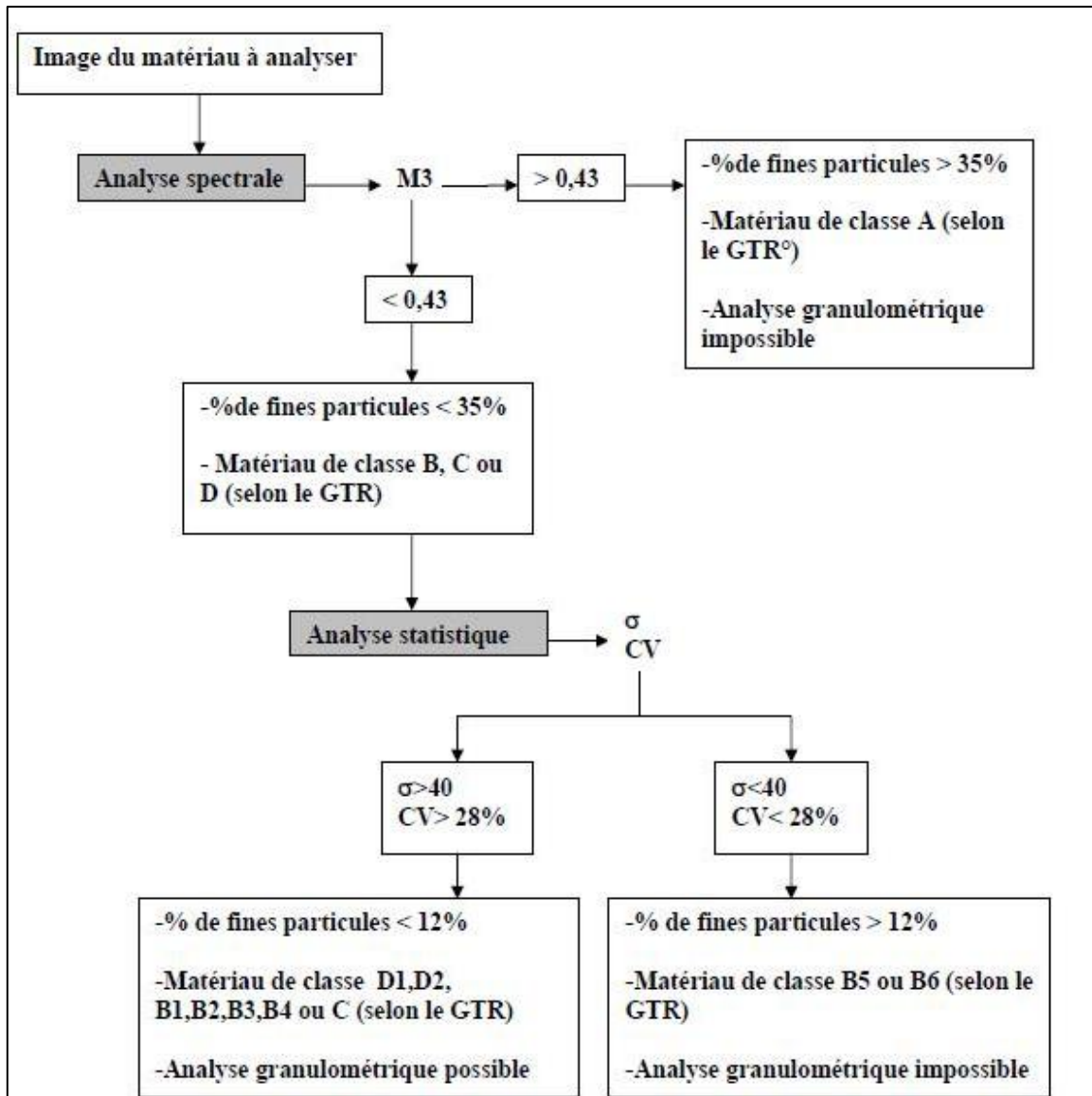


Figure 33 : Démarche complète de l'analyse de la texture [Bre99]

1.1.2.2. Caractérisation de la couleur

Les images enregistrées grâce à l'endoscope sont des images en couleur.

Les paramètres retenus par BREUL [Bre 99] comme paramètres pouvant caractériser un sol sont :

- La teinte : (H) elle permet de définir la nature de la couleur
- La saturation : (S) elle est fonction de la lumière blanche présente dans la couleur. On dit qu'une couleur est pure si elle ne comporte pas de lumière blanche sinon dans le cas contraire on dit qu'elle est saturée.
- L'intensité : (I) elle est définie par la quantité totale d'énergie du spectre de la couleur. Ainsi, plus la couleur est claire et plus son intensité est importante.
- Bleu, Rouge, Vert : (B, R, V)

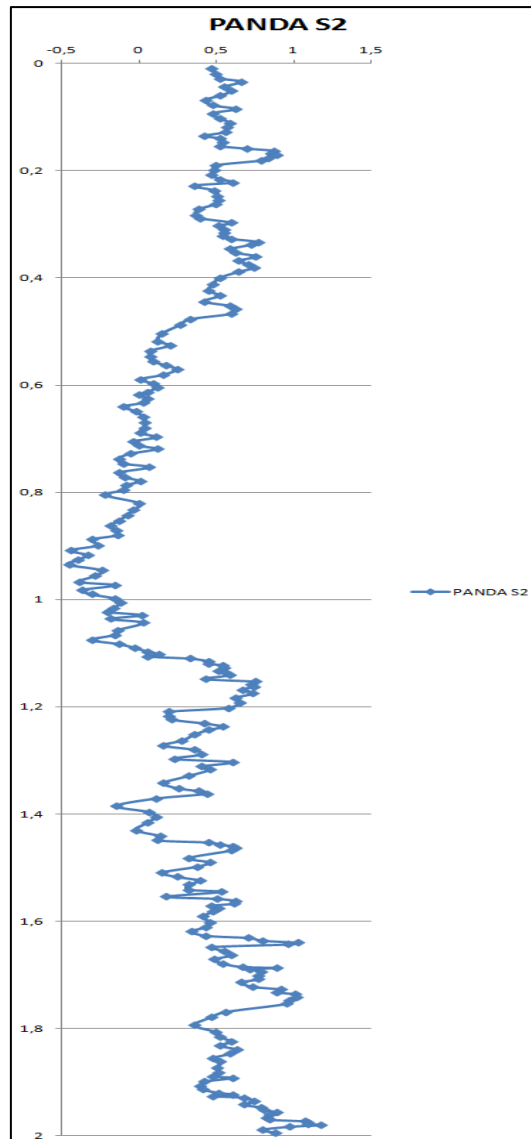
L'évolution des valeurs de ces paramètres permet de donner une stratigraphie du sondage effectué.

1.1.3. Exemple d'application de la méthode d'analyse

L'exemple utilisé pour appliquer la méthode décrite ci-dessous est l'exemple du site Cherry mission 2 sondage 2 (**Tableau 5 et Tableau 6**).

1.1.3.1. Analyse Panda

La courbe obtenue par l'essai pénétromètre Panda est donnée sur la **Figure 34**.



**Figure 34 : Pénétragramme obtenu par l'essai Panda dans le cas du site Cherry
« sondage 2 mission 2 »**

On détecte une nouvelle couche quand on a un changement brusque de la résistance en fonction de la profondeur.

L'analyse de cet essai a donc permis de détecter six couches sur une profondeur de 2 m illustré sur la **Figure 35**.

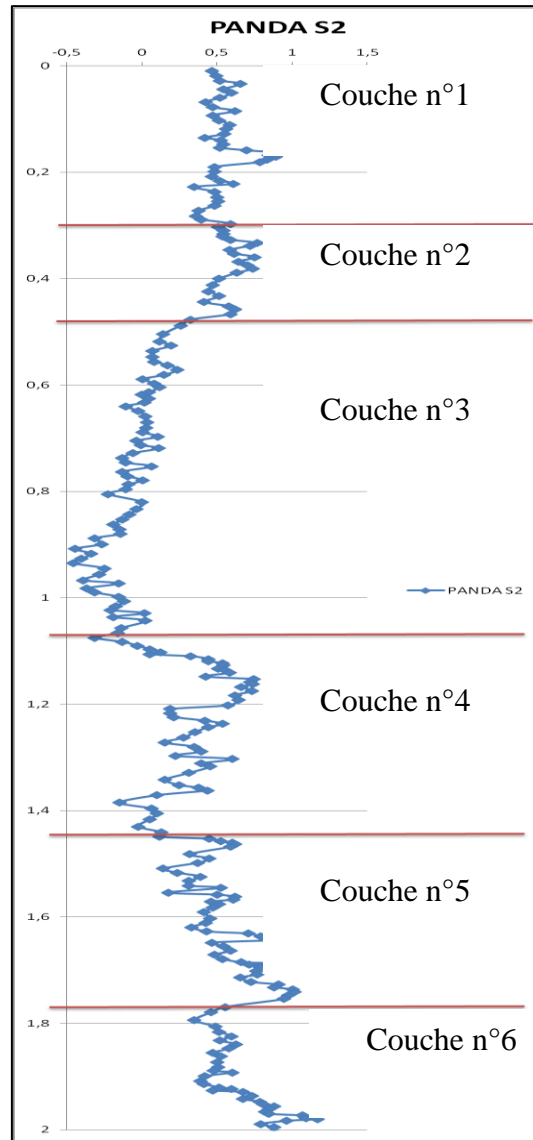


Figure 35 : Stratigraphie obtenue par l'analyse du pénétrogramme dans le cas du site Cherry « sondage 2 mission 2 »

L'analyse du pénétrogramme nous a permis de distinguer les couches suivantes :

- Couche n°1 (de 0 à 0.40 m) : une couche d'épaisseur de 40 cm avec une résistance allant de 3 à 8 Mpa.
- Couche n°2 (de 0.40 à 0.60 m) : une couche d'épaisseur de 20 cm avec une résistance allant de 1 à 5 Mpa.
- Couche n°3 (de 0.60 à 1.10 m) : une couche d'épaisseur de 40 cm avec une résistance allant de 0.3 à 1.3 Mpa.
- Couche n°4 (de 1.10 à 1.50 m) : une couche d'épaisseur de 40 cm avec une résistance allant de 0.5 à 5.6 Mpa.
- Couche n°5 (de 1.50 à 1.80 m) : une couche d'épaisseur de 30 cm avec une résistance allant de 1 à 11 Mpa.
- Couche n°6 (de 1.80 à 2.00 m) : une couche d'épaisseur de 20 cm avec une résistance allant de 3 à 15 Mpa.

Après avoir terminé avec la distinction des couches à partir du pénétrogramme, on va maintenant passer à la stratigraphie à partir des paramètres déduits des images prises par l'endoscope.

L'analyse des images va ainsi compléter l'étude de la distinction des couches par :

- L'analyse des paramètres de texture
- L'analyse des paramètres de couleur

1.1.3.2. Analyse géoendoscopique

1.1.3.2.1. Analyse de la texture

La **Figure 36** montre le schéma de l'analyse de la texture.

Les traits noirs de la **Figure 36** représentent les limites cités dans les paragraphes Moment normalisé d'ordre 3 : M3 et L'écart type (σ) et la covariance (CV) résumé dans la **Figure 33**.

L'analyse des deux graphes de la **Figure 36** permet de distinguer cinq couches sur une profondeur de 1.23 m.

- Couche n°1 (de 0 à 0.03 m) : une épaisseur de 0.03 m qui correspond à une couche d'herbe.
- Couche n°2 (de 0.03 à 0.35 m) :
 - Une couche de 0.32 m d'épaisseur.
 - Elle a un M3 supérieur à 0.43 ce qui correspond à un matériau fin avec un pourcentage $> 35\%$
Cette remarque a été confirmée par la nature du matériau qui est de type limon.
- Couche n°3 (de 0.35 à 0.57 m) :
 - Une couche de 0.22 m d'épaisseur.
 - Elle a un M3 légèrement inférieur à 0.43 ce qui correspond à un matériau avec un pourcentage de fines $< 35\%$

Chapitre II : Analyse et interprétation

- Les valeurs de l'écart type sont > 40 et les valeurs du coefficient de variation est $> 28\%$ ce qui correspond à un matériau avec un pourcentage de fines $< 12\%$.
Ces remarques ont été confirmées par la nature du matériau qui est de type gravier.
- Couche n°4 (de 0.57 à 1.13 m) :
 - Une couche de 0.56 m d'épaisseur.
Cette couche correspond à une couche de sable.
- Couche n°5 (de 1.13 à 1.23 m)
 - Une couche de 0.10 m d'épaisseur.
 - Elle a un M3 légèrement inférieur à 0.43 ce qui correspond à un matériau avec un pourcentage de fines $< 35\%$
 - Les valeurs de l'écart type sont > 40 et les valeurs du coefficient de variation est $> 28\%$ ce qui correspond à un matériau avec un pourcentage de fines $< 12\%$.
Ces remarques ont été confirmées par la nature du matériau qui est de type gravier.

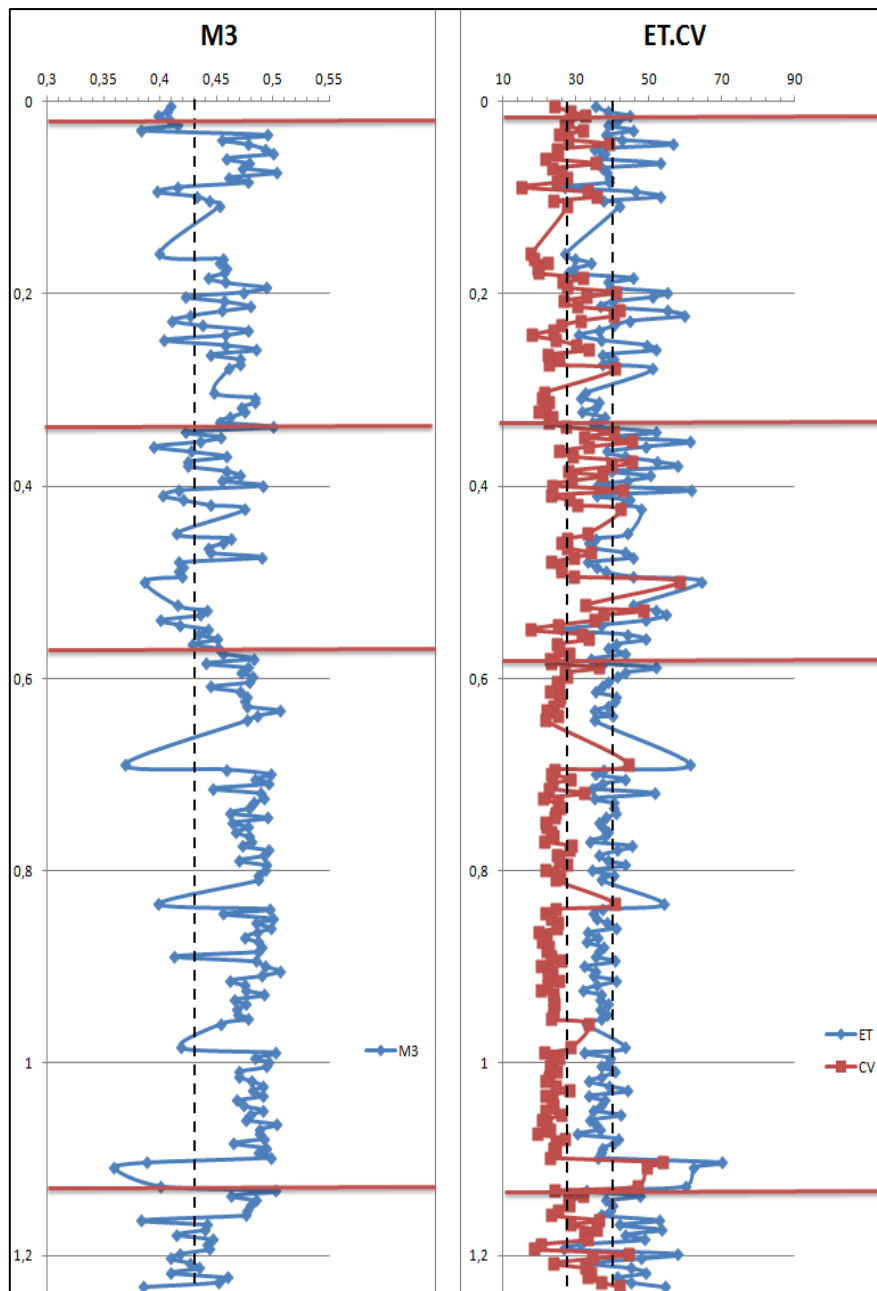


Figure 36 : Analyse de la texture à partir des images obtenues par l'endoscope dans le cas du site Cherry « sondage 2 mission 2 »

1.1.3.2.2. Analyse de la couleur

L'analyse des paramètres de couleur (l'intensité, la saturation, la teinte et la valeur du rouge, bleu et vert) des images de ce sondages a permis de détecter les mêmes couches citées ci-dessus (**Figure 37**).

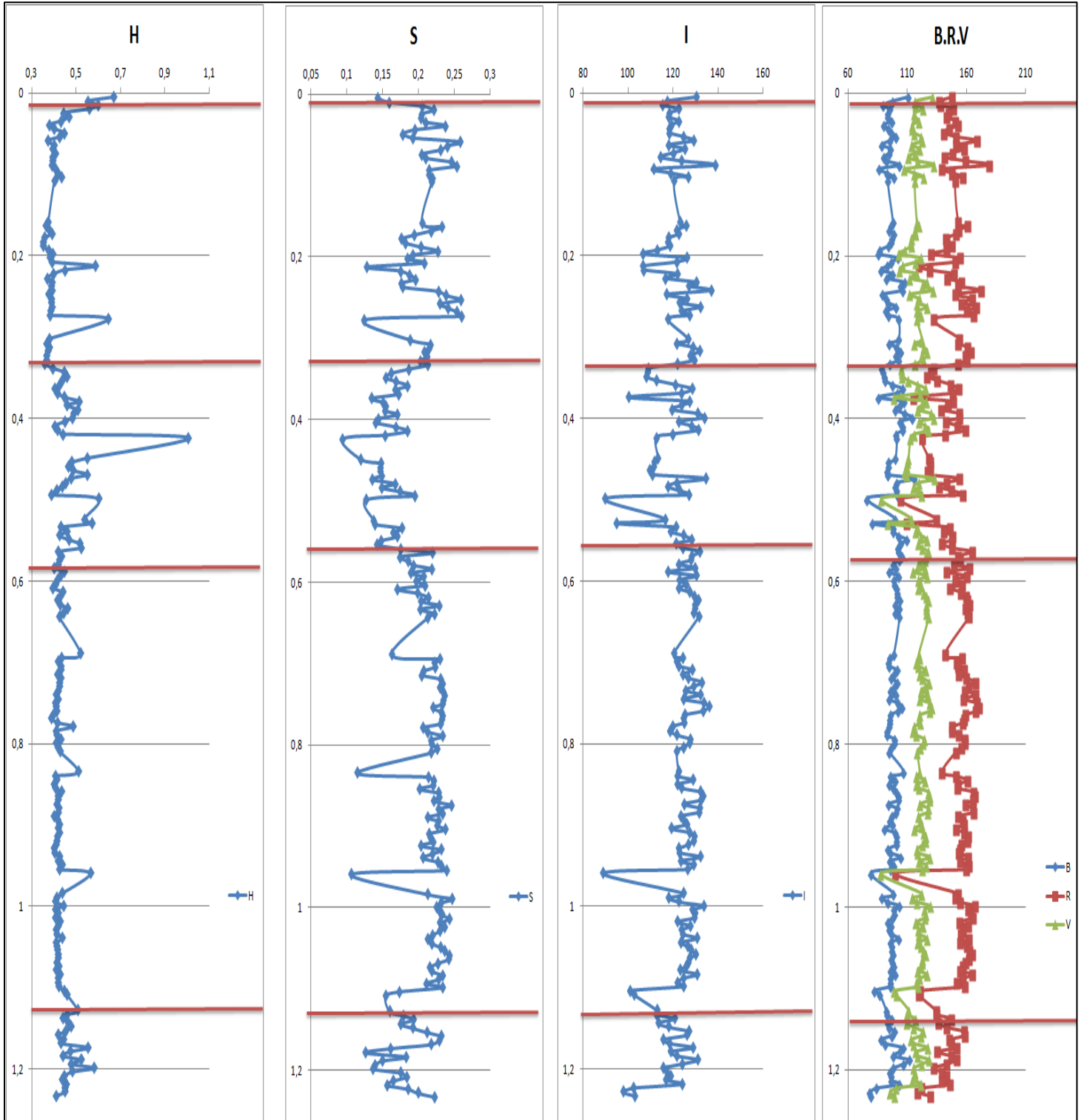


Figure 37 : Analyse colorimétrique à partir des images obtenues par l'endoscope dans le cas du site Cherry « sondage 2 mission 2 »

1.1.3.2.3. Conclusion

L'analyse couplée des deux essais de pénétration Panda et de géoendoscopie a permis de distinguer les couches suivantes pour l'exemple étudié :

- Couche n°1 (de 0.03 à 0.35 m) : une couche de 0.32 m d'épaisseur et qui correspond à une couche de limon.
- Couche n°2 (de 0.35 à 0.57 m) : une couche de 0.22 m d'épaisseur et qui correspond à une couche de gravier.
- Couche n°3 (de 0.57 à 1.13 m) : une couche de 0.56 m d'épaisseur et qui correspond à une couche de sable.
- Couche n°4 qui commence à 1.13 et correspond à une couche de gravier.

L'analyse globale du site Cherry est fournie en annexe.

1.2. Présentation des sites étudiés

Les essais ont été effectués durant deux campagnes d'essais sur treize sites.

- Lors de la première campagne effectuée en mai 2011 six sites ont été visités.
 - La description des sites est fait **Tableau 3**.
 - Le bilan des essais est fait **Tableau 4**.

Nom du site	Date et heure de la visite	Commune	Type d'ANC
SITE SEMENTRON	26 mai 2011 10h	Sementron	filtre à sable non drainé
SITE CHERRY	25 mai 2011 14h	Coulangeron	filtre à sable non drainé
SITE PESTEAU	24 mai 2011 14h	Merry Sec	tranchées filtrantes
SITE EGLENY	23 mai 2011 14h	Egleny	lit d'épandage sur sable naturel
SITE LES ORMES	24 mai 2011 10h	Les Ormes	filtre à sable drainé
SITE LES DOIGTS	25 mai 2011 10h	Parly	filtre à sable drainé

Tableau 3 : Description des sites mission 1

Nom du site	Essai PANDA (P)	Essai géoendoscopie (E)
SITE SEMENTRON	5	2
SITE CHERRY	3	3
SITE PESTEAU	2	2
SITE EGLENY	3	3
SITE LES ORMES	4	4
SITE LES DOIGTS	4	3

Tableau 4 : Bilan des essais mission 1

- Lors de la deuxième campagne effectuée en mars 2012 sept sites ont été visités.
 - La description des sites est fait **Tableau 5**.
 - Le bilan des essais est fait **Tableau 6**.

Nom du site	Date et heure de la visite	Commune	Type d'ANC
SITE USSELOT	28 mars 09h30	Ouane	filtre à sable non drainé
SITE METAIRIE	28 mars 14h30	Lindry	tranchées filtrantes in situ
SITE EGLENY	28 mars 17h	Egleny	lit d'épandage sur sable naturel
SITE CHERRY	29 mars 09h30	Coulangeron	filtre à sable non drainé
SITE LES FOURS	29 mars 14h30	Toucy	filtre à sable vertical drainé
SITE LES CLERCS	29 mars 17h	Fontaines	tranchées filtrantes in situ sur sol sablo-argileux
SITE LES DOIGTS	30 mars 09h30	Parly	filtre à sable drainé

Tableau 5 : Description des sites mission 2

Chapitre II : Analyse et interprétation

Nom du site	Essai PANDA (P)	Essai géoendoscopie (E)
SITE USSELOT	2	2
SITE METAIRIE	4	2
SITE EGLENY	3	4
SITE CHERRY	3	3
SITE LES FOURS	3	3
SITE LES CLERCS	3	3
SITE LES DOIGTS	2	2

Tableau 6 : Bilan des essais mission 2

1.3. Analyse des résultats

La complémentarité des deux essais Panda et géoendoscopie nous permet d'obtenir des stratigraphies ponctuelles pour chaque site.

Cette partie exposera l'ensemble des résultats des sondages réalisés pour chaque site durant les deux campagnes.

Pour la mission 1 :

1.3.1. SITE SEMENTRON



Figure 38 : Photo du site Sementron

Durant cet essai cinq essais PANDA et deux essais géoendoscope ont été effectués.

1.3.1.1. Implantation des sondages

L'emplacement des points de sondage sont présentés dans la **Figure 39**.

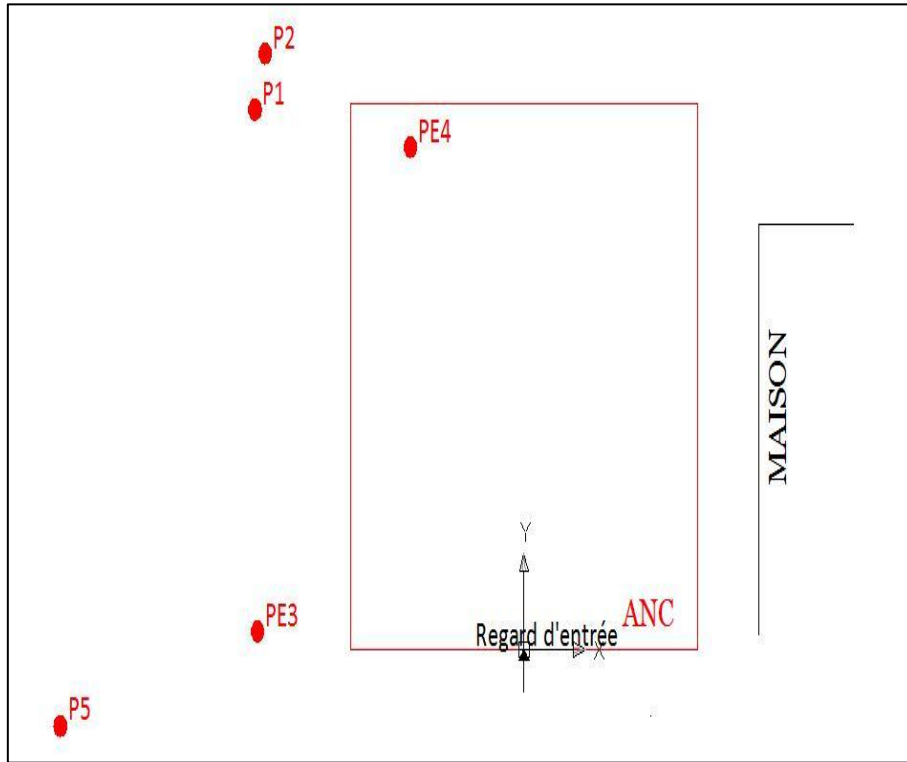


Figure 39 : Emplacement des essais réalisés pour le site Sementron (mission 1)

Avec :

- P : essai pénétromètre PANDA
- E : essai géoendoscopie

1.3.1.2. Tableau récapitulatif

Numéro du sondage	Profondeur du Panda (m)	Profondeur d'endoscope (m)	Emplacement X/Y par rapport au regard d'entrée (m)	Coordonnées GPS X/Y/Z
1	0.6	-	4/6	526908/ 5277288/ 285
2	0.64	-	3.5/7	-
3	1.52	1.03	3/1	526911/5277293/285
4	1.74	1.15	2/5	526906/5277289/285
5	0.3	-	6/-2	-

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des essais pour le site Sementron

1.3.1.3. Analyse des résultats

Quatre essais ont été réalisés à l'extérieur de l'ANC. Un seul essai a donc été réalisé à l'intérieur de l'ANC qui est de type filtre à sable non drainé.

La stratigraphie ponctuelle complète a été obtenue pour les sondages 3 et 4 où les deux essais ont été réalisés.

Les analyses complètes sont fournies en annexe.

1.3.1.3.1. Sondage 1

Le premier sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 0.6 m. Seul l'essai pénétromètre PANDA a été effectué.

Le résultat de cet essai est fourni Figure 40.

La courbe représente le logarithme de la résistance de pointe en fonction de la profondeur.

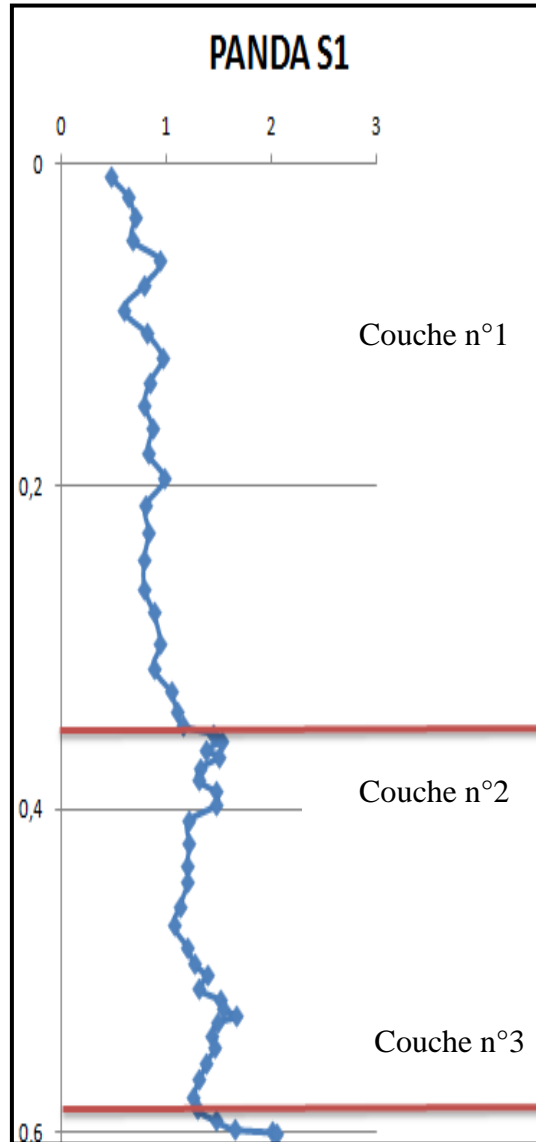


Figure 40 : Analyse du pénétrogramme du site Sementron sondage 1 mission 1

L'analyse de l'essai Panda a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 (de 0 à 0.35 m) : une couche sur une épaisseur de 0.35 m avec une résistance assez faible allant de 2 à 15 Mpa.
- Couche n°2 (de 0.35 à 0.58 m) : une couche sur une épaisseur de 0.23 m. Dans cette couche la résistance augmente nettement avec des valeurs allant de 11 à 50 Mpa.
- Couche n°3 cette couche commence de 0.58 m et elle a une résistance beaucoup plus élevée que le couche n°2.

1.3.1.3.2. Sondage 2

Le deuxième sondage a été également effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 0.64 m. Seul l'essai pénétromètre PANDA a été effectué..

Le résultat de cet essai est fourni Figure 41. La courbe représente le logarithme de la résistance de pointe en fonction de la profondeur.

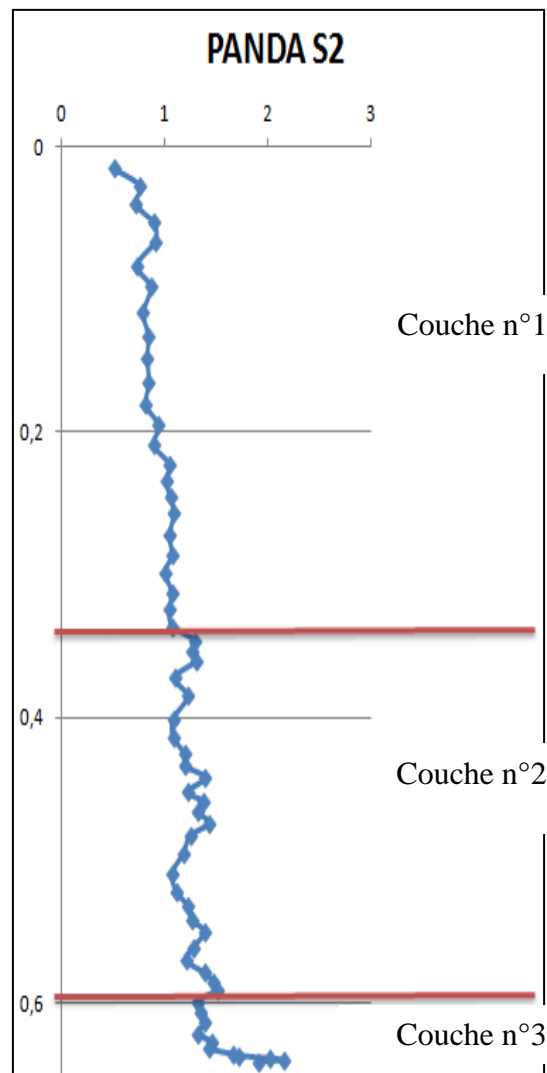


Figure 41 : Analyse du pénétrogramme du site Sementron sondage 2 mission 1

Chapitre II : Analyse et interprétation

L'analyse de l'essai Panda a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 (de 0 à 0.35 m) : une couche sur une épaisseur de 0.35 m avec une résistance assez faible allant de 3 à 20 Mpa.
- Couche n°2 (de 0.35 à 0.59 m) : une couche sur une épaisseur de 0.24 m. Dans cette couche la résistance augmente nettement avec des valeurs allant de 11 à 35 Mpa.
- Couche n°3 cette couche commence de 0.59 m et elle a une résistance beaucoup plus élevée que la couche n°2.

La proximité du sondage 1 et sondage 2 font que l'on retrouve les mêmes couches avec les mêmes épaisseurs (trois couches sur une profondeur de 0.6 m).

1.3.1.3.3. Sondage 3

Le troisième sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.02 m. Dans ce cas les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués. Ce sondage révèle donc la stratigraphie du terrain naturel.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.05 m
- Couche n°2 : Gravier sur une épaisseur de 0.31 m
- Couche n°3 : Limon + Gravier sur une épaisseur de 0.24 m
- Couche n°4 : Limon avec une inclusion rouge sur une épaisseur de 0.24 m
- Couche n°5 : Gravier sur une épaisseur de 0.18 m

Le sondage 3 nous permet de retrouver la stratigraphie du terrain naturel. Les résultats obtenus pour ce sondage sont en accord avec les deux premiers : la couche n°3 du sondage 3 (équivalente à la couche n°2 des deux premiers sondages : même profondeur) à une résistance de pointe supérieure à celle de la couche n°2 du sondage 3 (équivalente à la couche n°1 des deux premiers sondages). En effet le limon mélangé au gravier oppose plus de résistance que le gravier tout seul. Ce qui a été déduit des deux premiers sondages.

1.3.1.3.4. Sondage 4

Le quatrième sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.14 m. Dans ce cas les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués. Ce sondage révèle la stratigraphie de l'ANC qui est un assainissement de type filtre à sable non drainé.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.02 m
- Couche n°2 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.18 m
- Couche n°3 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.17 m
- Couche n°4 : Gravier sur une épaisseur de 0.24 m

Chapitre II : Analyse et interprétation

- Couche n°5 : Gravier sur une épaisseur de 0.19 m
- Couche n°6 : Gravier sur une épaisseur de 0.07 m
- Couche n°7 : Gravier sur une épaisseur de 0.14 m
- Couche n°8 : Gravier mélangé à du sable sur une épaisseur de 0.13 m

La différence entre la couche n°3 et la couche n°2 est l'état de serrage. En effet, le fait que le matériau soit plus serré dans la première couche implique une différence dans la texture. Une deuxième différence entre les couches est la teneur en eau qui se reflète dans le paramètre de saturation (S).

Par contre pour les couches n°4, 5, 6 et 7 c'est la couleur et la nature des graviers qui font que l'on détecte quatre couches différentes.

1.3.1.3.5. Sondage 5

Le cinquième et dernier sondage a été fait sur une profondeur de 0.3 m. Dans ce cas seul l'essai pénétromètre PANDA a été effectué.

Le résultat de cet essai est fourni **Figure 42**. La courbe représente le logarithme de la résistance de pointe en fonction de la profondeur. Et on distingue trois couches.

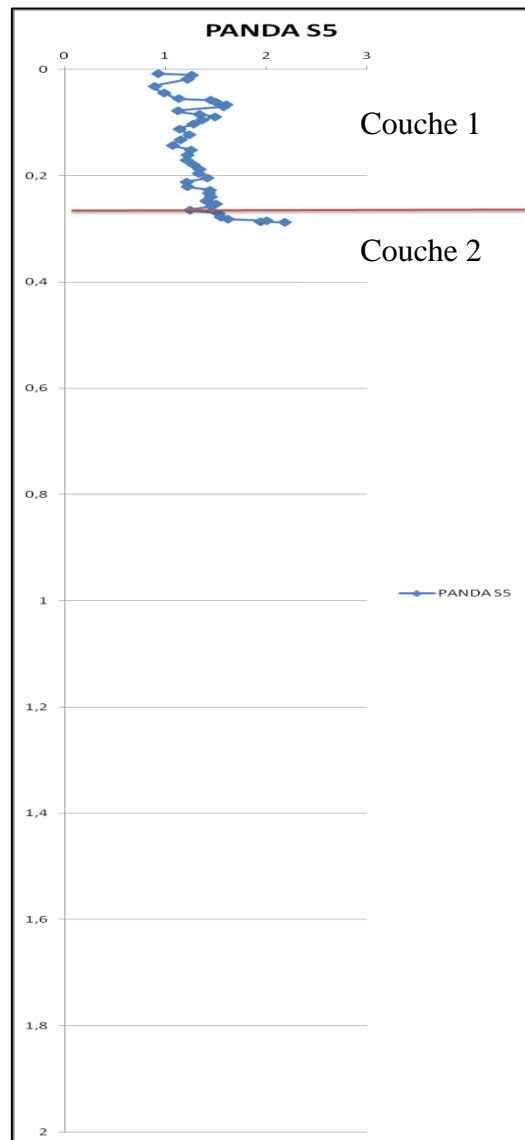


Figure 42 : Analyse du pénétrogramme du site Sementron sondage 5 mission 1

L'analyse du pénétrogramme du sondage 5 du site Sementron sur une profondeur de 0.3 a révélée l'existence de deux couches :

- Couche 1 jusqu'à une profondeur de 0.28 m
- Couche 2 qui commence à partir de 0.28 m

1.3.1.4. Analyse globale

Commençant par analyser les sondages effectués à l'extérieur de l'ANC :

Quatre sondages ont été effectués à l'extérieur de l'ANC (sondage1, sondage2, sondage3 et le sondage 5). Pour les sondages 1,2 et 5 seul l'essai pénétromètre Panda a été réalisé.

L'analyse globale de ces sondages (1,2 et 5) permet de conclure de l'existence d'une interface de couche entre les profondeurs 0.28 et 0.35 selon l'emplacement du sondage (0.28 m pour le sondage 5 et 0.35 m pour le sondage 1 et 2 qui sont proche).

Les sondages 1 et 2 qui ont été fait jusqu'à une profondeur de 0.6 m ont révélé une autre couche vers la profondeur 0.58 m. La résistance de pointe de la couche 2 est plus grande que celle de la couche 1.

Comparant maintenant ces résultats avec les résultats obtenus quand on couple l'essai Panda et géoendoscope (sondage 3).

Pour le sondage 3, on a jusqu'à une profondeur de 0.36 m une couche de gravier qui est suivie d'une couche de limon avec du gravier. La nature de ces couches confirme les résultats obtenus avec l'essai Panda uniquement puisque dans le cas où on a la couche de limon mélangée à du gravier la résistance à l'enfoncement de la pointe sera plus grand (les vides entre les graviers sont remplis par le limon).

Pour conclure, les sondages effectués à l'extérieur de l'ANC ont révélé l'existence d'une couche de gravier qui va jusqu'à une profondeur de 0.35 m puis une couche de limon (pour les couches de trouvant en dessous de la couche de limon voir sondage 3).

Pour les sondages effectués à l'intérieur de l'ANC un seul essai Panda-géoendoscope a été fait (sondage 4). Les résultats obtenus pour ce sondage sont résumés dans le paragraphe « sondage 4 ».

1.3.2. SITE PESTEAU



Figure 43 : Photo du site Pesteau

Durant cette visite deux essais pénétromètres et endoscopies ont été effectués.

1.3.2.1. Implantation des sondages

L'emplacement des points de sondage sont présentés dans la Figure 44.

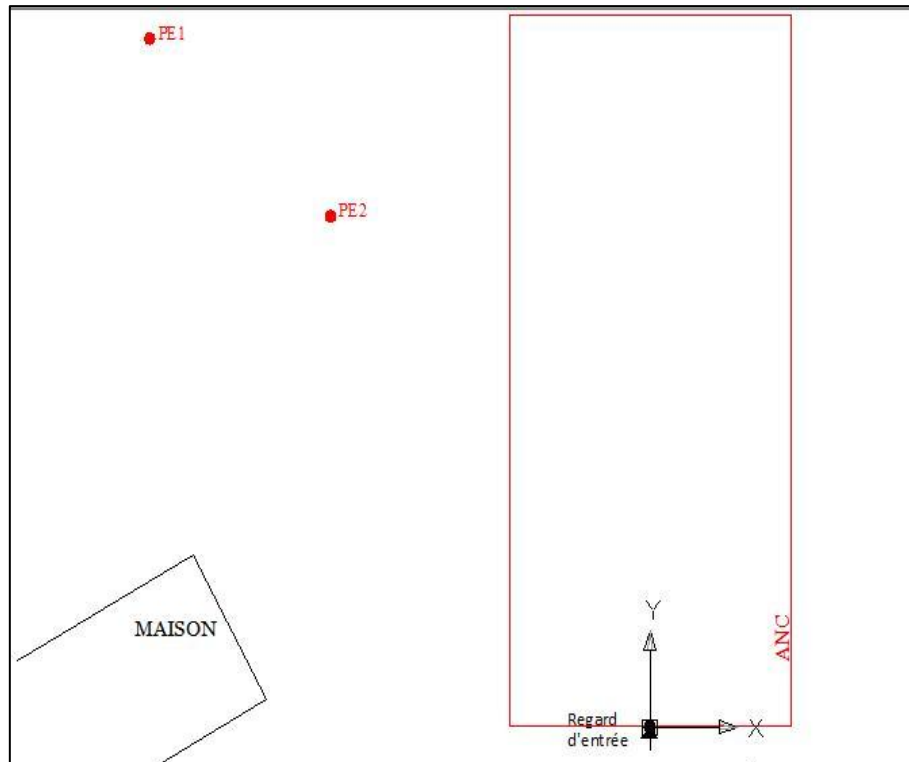


Figure 44 : Emplacement des essais réalisés pour le site Pesteau (mission1)

Avec :

- P : essai pénétromètre PANDA
- E : essai géoendoscopie

1.3.2.2. Tableau récapitulatif

Numéro du sondage	Profondeur du Panda (m)	Profondeur d'endoscope (m)	Emplacement X/Y par rapport au regard d'entrée	Coordonnées GPS X/Y/Z
1	1.06	0.96	10/16	536914/ 5280153/ 235
2	1.11	1.14	6/11	536909/ 5280152/ 235

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des essais site Pesteau

1.3.2.3. Analyse des résultats

Les deux essais ont été réalisés à l'extérieur de l'ANC qui est de type tranchées filtrantes.

1.3.2.3.1. Sondage 1

Le premier sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 0.91 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués. Ce sondage révèle donc la stratigraphie du terrain naturel.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.05 m
- Couche n°2 : Limon sur une épaisseur de 0.17 m
- Couche n°3 : Limon sur une épaisseur de 0.20 m
- Couche n°4 : Gravier sur une épaisseur de 0.12 m
- Couche n°5 : Limon sur une épaisseur de 0.08 m
- Couche n°6 : Limon sur une épaisseur de 0.15 m
- Couche n°7 : Limon sur une épaisseur de 0.14 m

La différence entre la couche n°2 et la couche n°3 de limon est due à la différence de couleur du matériau. On remarque la même chose pour la couche n°6 et la couche n°7. Par contre pour la couche n°5 et la couche n°6 en plus de la différence de couleur c'est l'état de serrage qui fait la différence.

1.3.2.3.2. Sondage 2

Le deuxième sondage a été également effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.14 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués. Ce sondage révèle donc la stratigraphie du terrain naturel.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.07 m
- Couche n°2 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.16 m
- Couche n°3 : Limon sur une épaisseur de 0.35 m
- Couche n°4 : Argile sur une épaisseur de 0.44 m
- Couche n°5 : Limon sur une épaisseur de 0.12 m

1.3.2.4. Analyse globale

Pour le site Pesteau, deux essais Panda-géendoscopie en été réalisés à l'extérieur de l'ANC. Comparant les résultats obtenus dans les deux sondages.

D'après les résultats obtenus, on remarque que les deux premières couches sont les mêmes (terre végétale suivie d'une couche de limon) avec des épaisseurs presque similaires. La différence commence vers une profondeur d'environ 0.48 m où dans le premier sondage on a une couche de gravier sur une épaisseur de 0.12 m suivie d'une couche de limon ; alors que pour le sondage 2 on a une couche d'argile sur une épaisseur de 0.44 m suivie d'une couche de limon.

1.3.3. SITE LES ORMES



Figure 45 : Photo du site Les ormes

Chapitre II : Analyse et interprétation

Durant cette visite quatre essais pénétromètres et endoscopies ont été effectués.

1.3.3.1. Implantation des sondages

L'emplacement des points de sondage sont présentés dans la Figure 46.

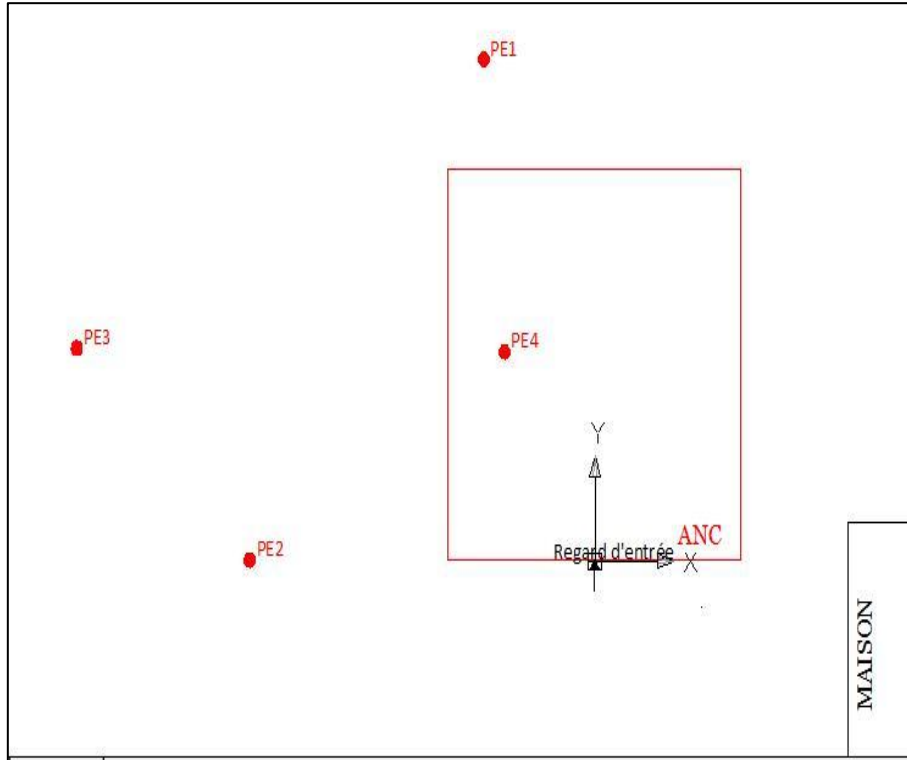


Figure 46 : Emplacement des essais réalisés pour le site Les ormes

Avec :

- P : essai pénétromètre PANDA
- E : essai géoendoscopie

1.3.3.2. Tableau récapitulatif

Numéro du sondage	Profondeur du Panda (m)	Profondeur d'endoscope (m)	Emplacement X/Y par rapport au regard d'entrée	Coordonnées GPS X/Y/Z
1	1.12	1.01	-3/9	519521/5299770/211
2	1.22	1.14	-7/0	519512/5299774/211
3	1.01	0.94	-13/3	519515/5299780/211
4	1.71	1.19	-2/3	519515/5299769/211

Tableau 9 : Tableau récapitulatif des essais site Les ormes

1.3.3.3. Analyse des résultats

1.3.3.3.1. Sondage 1

Le premier sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.00 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.04 m
- Couche n°2 : Limon sur une épaisseur de 0.16 m
- Couche n°3 : Limon sur une épaisseur de 0.19 m
- Couche n°4 : Limon sur une épaisseur de 0.13 m
- Couche n°5 : Argile sur une épaisseur de 0.07 m
- Couche n°6 : Argile sur une épaisseur de 0.12 m
- Couche n°7 : Argile sur une épaisseur de 0.20 m
- Couche n°8 : Argile sur une épaisseur de 0.09 m

La différence entre la couche n°2 et la couche n°3 est due à la différence de leurs résistances de pointes. La différence entre la couche n°3 et la couche n°4 est due à la différence de leurs textures.

Les deux premières couches sont différentes par leurs textures. Pour les trois dernières c'est la différence de couleur de l'argile.

1.3.3.3.2. Sondage 2

Le premier sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.12 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.09 m
- Couche n°2 : Limon sur une épaisseur de 0.16 m
- Couche n°3 : Limon sur une épaisseur de 0.13 m
- Couche n°4 : Argile sur une épaisseur de 0.17 m
- Couche n°5 : Argile sur une épaisseur de 0.27 m
- Couche n°6 : Argile sur une épaisseur de 0.30 m

La différence entre la couche n°2 et la couche n°3 est due à la différence de leurs saturations (pureté) : pour la couche n°2 il y a présence de plus d'éléments fins.

Chapitre II : Analyse et interprétation

La différence entre les trois dernières couches est due à la différence de leurs textures et de leurs états de compactage (résistance de pointe).

1.3.3.3.3. Sondage 3

Le premier sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 0.90 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.04 m
- Couche n°2 : Limon sur une épaisseur de 0.17 m
- Couche n°3 : Limon sur une épaisseur de 0.07 m
- Couche n°4 : Limon sur une épaisseur de 0.08 m
- Couche n°5 : Argile sur une épaisseur de 0.15 m
- Couche n°6 : Argile sur une épaisseur de 0.19 m
- Couche n°7 : Argile sur une épaisseur de 0.09 m

La différence entre les couches de limon est due à la différence de la texture qui est reflétée par les paramètres M3, l'écart type et le coefficient de variation.

La différence entre les couches d'argile est due à la différence de la texture mais aussi des paramètres de couleurs.

La résistance de pointe intervient pour la différenciation entre les deux premières couches de limon et les deux dernières couches d'argile.

1.3.3.3.4. Sondage 4

Le premier sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.18 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

Les résultats de l'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.02 m
- Couche n°2 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.12 m
- Couche n°3 : Gravier sur une épaisseur de 0.32 m
- Couche n°4 : Gravier+Eau sur une épaisseur de 0.34 m
- Couche n°5 : Gravier+Eau sur une épaisseur de 0.15 m
- Couche n°6 : Sable colmaté sur une épaisseur de 0.16 m
- Couche n°7 : Gravier+Eau sur une épaisseur de 0.07 m

La différence entre la couche n°1 et la couche n°2 est due à la différence de leurs textures. Pour la couche n°5 il y'a plus d'eau que dans la couche n°4 ce qui crée des reflets dans l'image.

1.3.3.4. Analyse globale

Les trois premiers sondages ont été réalisés à l'extérieur de l'ANC. Ils révèlent tous une couche de limon suivie d'une couche d'argile. Pour les sondages 2 et 3 les épaisseurs de la couche de limon sont proches (0.29 m pour le sondage 2 et 0.32 m pour le sondage 3) par contre l'épaisseur de la couche de limon pour le sondage 1 est de 0.48 m. Ceci peut être expliqué par le fait que les sondages 2 et 3 sont proches.

Un seul sondage (sondage 4) a été réalisé à l'intérieur de l'ANC. Ce sondage permet de voir l'état du sable qui est colmaté et la présence de l'eau avec le gravier (**Figure 47**).

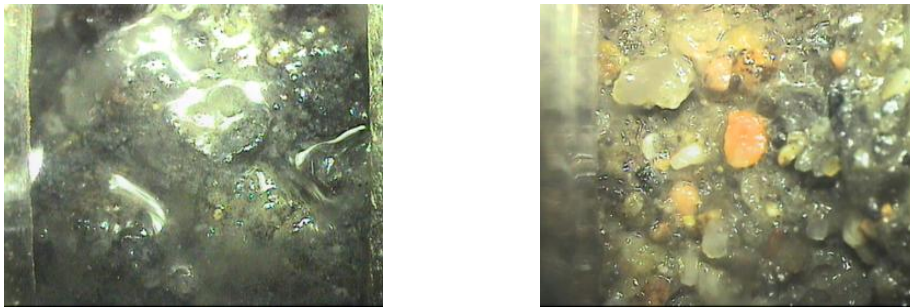


Figure 47 : Etat du sable (colmaté) « à droite » et du gravier (présence d'eau) « à gauche » pour le site « Les ormes sondage 4 »

Pour la mission 2 :

1.3.4. SITE USSELOT



Figure 48 : Photo du site UsseLOT

Durant cet visite deux essais PANDA et géoendoscope ont été effectués.

1.3.4.1. Implantation des sondages

L'emplacement des points de sondage sont présentés dans la **Figure 49**.

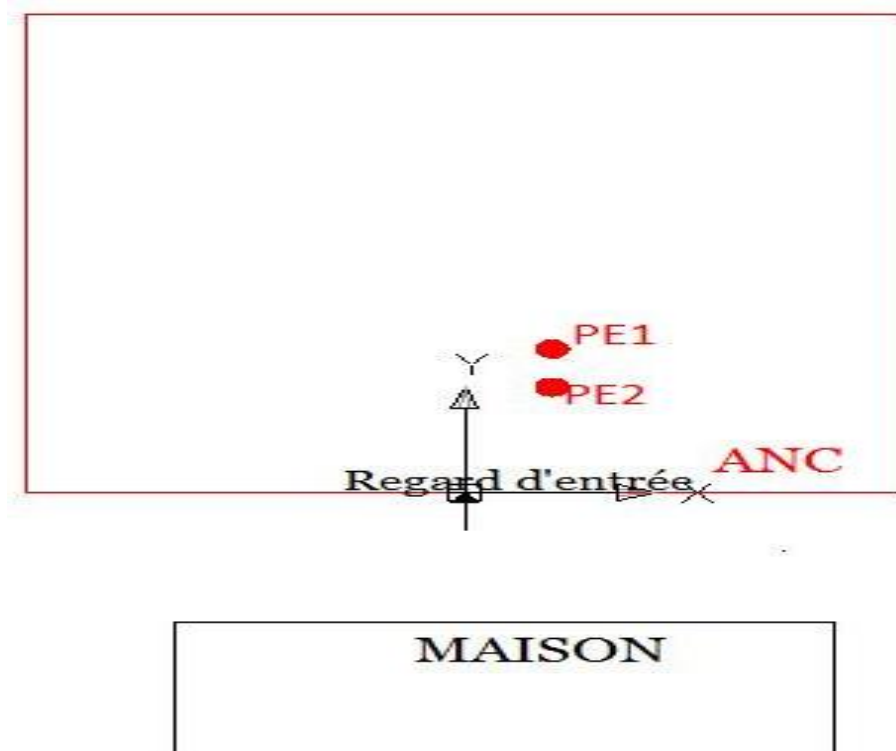


Figure 49 : Emplacement des essais réalisés pour le site Usselot

Avec :

- P : essai pénétromètre PANDA
- E : essai géoendoscopie

1.3.4.2. Tableau récapitulatif

Numéro du sondage	Profondeur du Panda (m)	Profondeur d'endoscope (m)	Emplacement X/Y par rapport au regard d'entrée
1	2	1.96	0.5/1.5
2	2	1.84	0.5/1.1

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des essais pour le site Usselot

1.3.4.3. Analyse des résultats

Les deux essais ont été réalisés à l'intérieur de l'ANC qui est de type filtre à sable non drainé.

1.3.4.3.1. Sondage 1

Le premier sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.95 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.54 m
- Couche n°2 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.17 m
- Couche n°3 : Gravier sur une épaisseur de 0.22 m
- Couche n°4 : Sable propre sur une épaisseur de 0.63 m
- Couche n°5 : Gravier sur une épaisseur de 0.39 m

La différence entre la couche n°1 et la couche n°2 est le degré de saturation du matériau. Le sable est humide mais propre.

1.3.4.3.2. Sondage 2

Le premier sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.84 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.29 m
- Couche n°2 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.15 m
- Couche n°3 : Gravier sur une épaisseur de 0.14 m
- Couche n°4 : Gravier sur une épaisseur de 0.11 m
- Couche n°5 : Gravier sur une épaisseur de 0.15 m
- Couche n°6 : Sable sur une épaisseur de 0.20 m
- Couche n°7 : Sable sur une épaisseur de 0.18 m
- Couche n°8 : Sable colmaté sur une épaisseur de 0.28 m
- Couche n°9 : Gravier sur une épaisseur de 0.34 m

La différence entre la couche n°1 et la couche n°2 est due à la différence de la texture et de la couleur des matériaux.

La différence entre les couches de graviers est due à la différence de la nature du gravier.

Dans la dernière couche de sable on remarque la présence de l'eau.

1.3.4.4. Analyse globale

Pour le site Usselot, les deux sondages ont été réalisés à l'intérieur de l'ANC.

Comparant les résultats obtenus dans les deux cas. On retrouve dans les deux cas bien sur les couches constituant l'ANC de type filtre à sable non drainé à savoir une couche de terre végétale, gravier, du sable et une couche de gravier.

Cependant on remarque une différence entre l'état du sable pour les deux sondages. En effet, on remarque que pour le sondage 1 le sable est propre contrairement au sondage 2 (**Figure 50**).

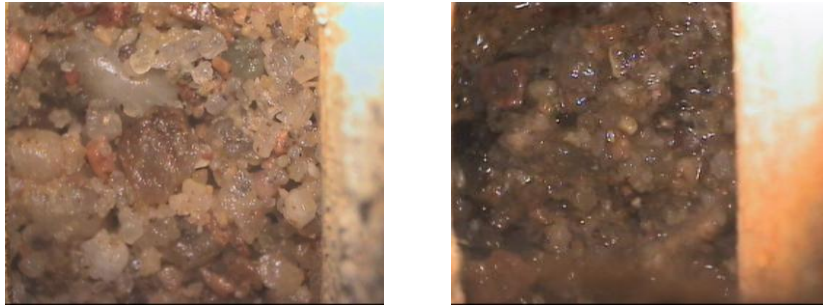


Figure 50 : Comparaison de l'état du sable dans le cas du sondage 2 « à droite » et du sondage 1 « à gauche » pour le site « Usselot »

1.3.5. SITE METAIRIE

Durant cet essai quatre essais PANDA et deux essais de géoendoscopie ont été effectués.

1.3.5.1. Implantation des sondages

L'emplacement des points de sondage sont présentés dans la Figure 51.

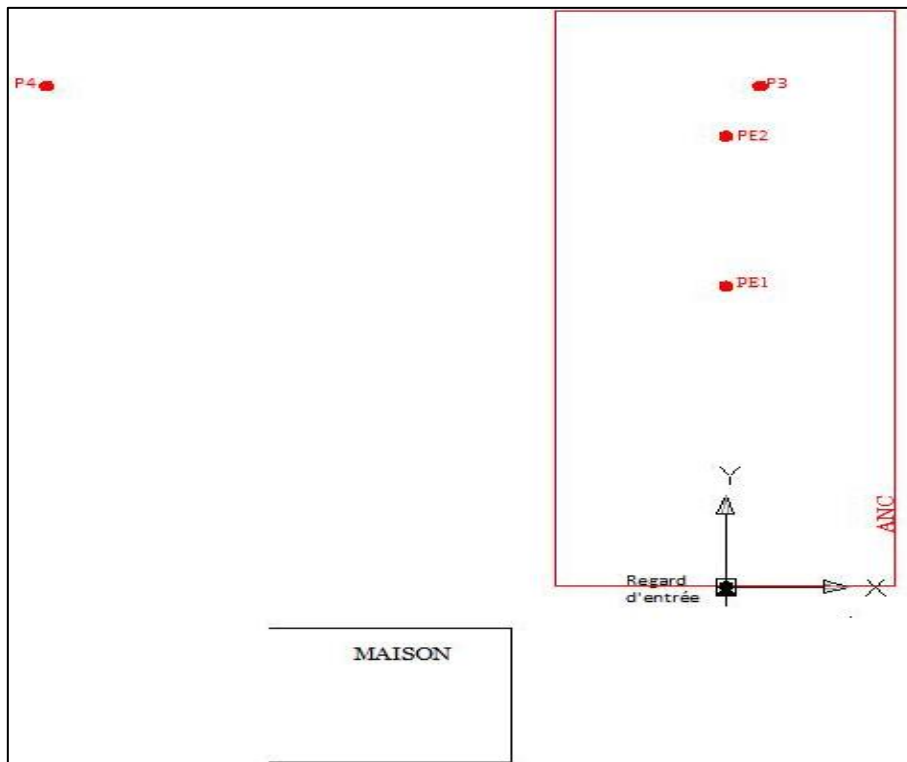


Figure 51 : Emplacement des essais réalisés pour le site Métairie

Avec :

- P : essai pénétromètre PANDA
- E : essai géoendoscopie

1.3.5.2. Tableau récapitulatif

Numéro du sondage	Profondeur du Panda (m)	Profondeur d'endoscope (m)	Emplacement X/Y par rapport au regard d'entrée
1	1.70	1.61	0/6
2	1.80	1.65	0/9
3	1.71	-	0.5/10
4	1.57	-	10/10

Tableau 11 : Tableau récapitulatif des essais site Metairie

1.3.5.3. Analyse des résultats

L'ANC est de type tranchées filtrantes in situ.

1.3.5.3.1. Sondage 1

Le premier sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.60 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Limon sur une épaisseur de 0.46 m
- Couche n°2 : Limon sur une épaisseur de 0.10 m
- Couche n°3 : Limon sur une épaisseur de 0.35 m
- Couche n°4 : Limon sur une épaisseur de 0.69 m

La différence entre les quatre couches est due à la de la texture et à l'état de serrage du matériau.

1.3.5.3.2. Sondage 2

Le premier sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.64 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Limon sur une épaisseur de 0.41 m
- Couche n°2 : Limon sur une épaisseur de 0.50 m
- Couche n°3 : Limon sur une épaisseur de 0.63 m
- Couche n°4 : Limon sur une épaisseur de 0.10 m

La différence entre les quatre couches est due à la de la texture du matériau.

1.3.5.3.3. Sondage 3

Le troisième sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.70 m. Seul l'essai pénétromètre PANDA a été effectués.

Le résultat de cet essai est fourni. La courbe représente le logarithme de la résistance de pointe en fonction de la profondeur.

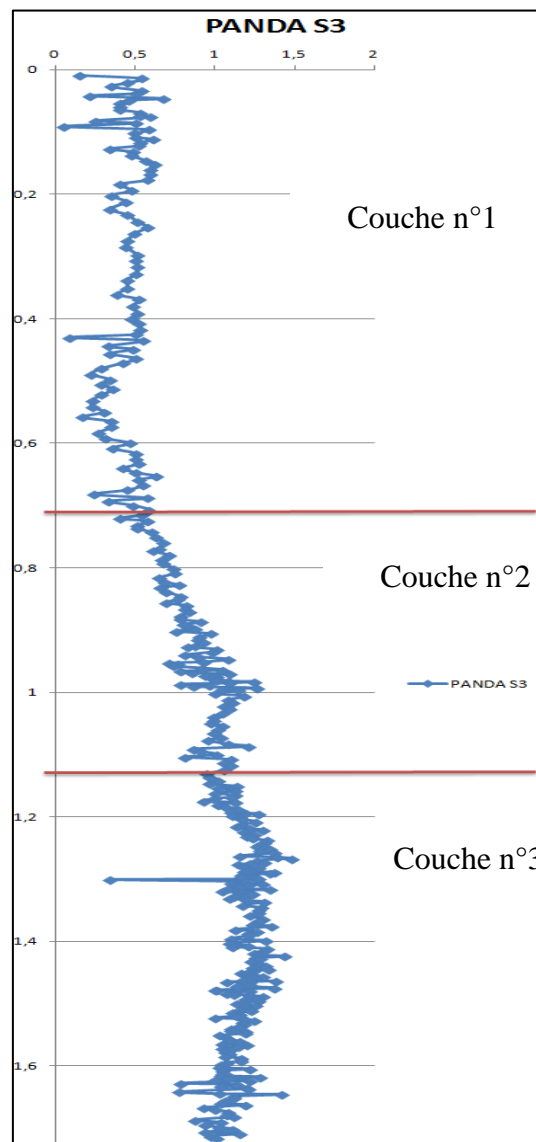


Figure 52 : Analyse du pénétrogramme du site Métairie sondage 3 mission 2

L'analyse de l'essai Panda a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 (de 0 à 0.70 m) : une couche sur une épaisseur de 0.70 m avec une résistance assez faible allant de 1 à 4 Mpa.
- Couche n°2 (de 0.70 à 1.10 m) : une couche sur une épaisseur de 0.40 m. Dans cette couche la résistance augmente avec des valeurs allant de 1 à 12 Mpa.
- Couche n°3 cette couche commence de 1.10 m et elle a une résistance beaucoup plus élevée que le couche n°2.

1.3.5.3.4. Sondage 4

Le quatrième sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.70 m. Seul l'essai pénétromètre PANDA a été effectué.

Le résultat de cet essai est fourni **Figure 53**. La courbe représente le logarithme de la résistance de pointe en fonction de la profondeur.

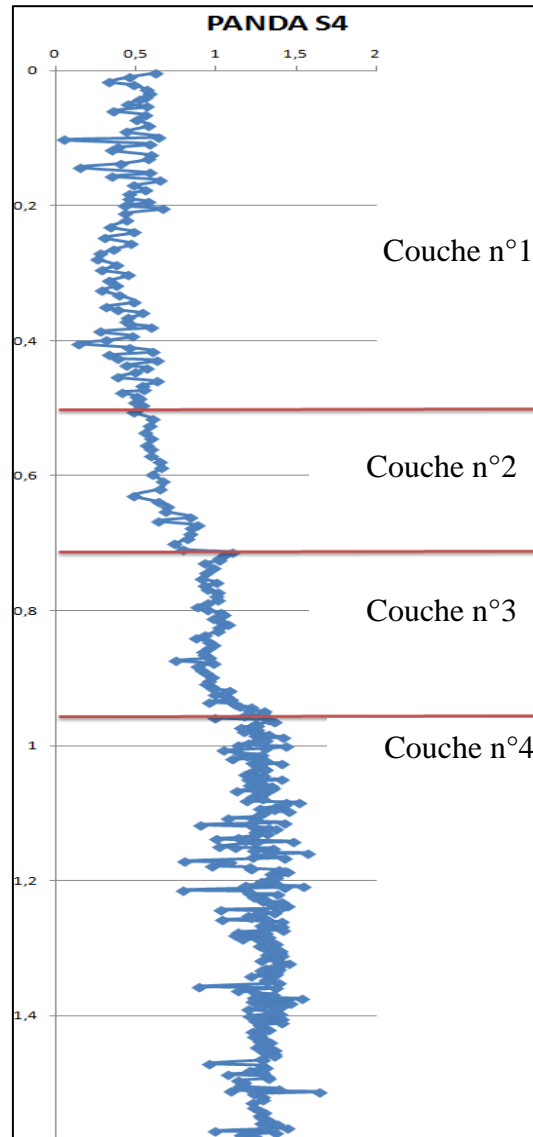


Figure 53 : Analyse du pénétrogramme du site Métairie sondage 4 mission 2

L'analyse de l'essai Panda a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 (de 0 à 0.50 m) : une couche sur une épaisseur de 0.50 m avec une résistance assez faible allant de 1 à 5 Mpa.
- Couche n°2 (de 0.50 à 0.70 m) : une couche sur une épaisseur de 0.20 m. Dans cette couche la résistance augmente avec des valeurs allant de 2 à 7 Mpa.

Chapitre II : Analyse et interprétation

- Couche n°3 (de 0.70 à 1.00 m) : une couche sur une épaisseur de 0.30 m avec une résistance plus grande allant de 5 à 14 Mpa.
- Couche n°4 cette couche commence de 1.00 m et elle a une résistance beaucoup plus élevée que le couche n°3.

1.3.5.4. Analyse globale

Trois essais ont été réalisés à l'intérieur de l'ANC. Pour les sondages 1 et 2 les essais Panda –géoendoscope ont été réalisés, par contre pour le sondage 3 seul l'essai Panda a été réalisé.

Les deux premiers sondages ont révélé une couche de même nature « limon » jusqu'à une profondeur de 1.6 m mais qui est divisée en sous couches selon l'état de serrage du limon. Cette dernière remarque a été confirmée par le sondage 3 où l'essai Panda révèle trois couches de différent état de compactage.

Un seul sondage a été réalisé à l'extérieur de l'ANC, les résultats sont résumés dans le paragraphe « sondage 4 ».

1.3.6. SITE EGLENY



Figure 54 : Photo du site Eglény

Chapitre II : Analyse et interprétation

Ce site a la particularité d'avoir été visité durant les deux missions

1.3.6.1. Implantation des sondages

L'emplacement des points de sondage sont présentés dans la Figure 55.

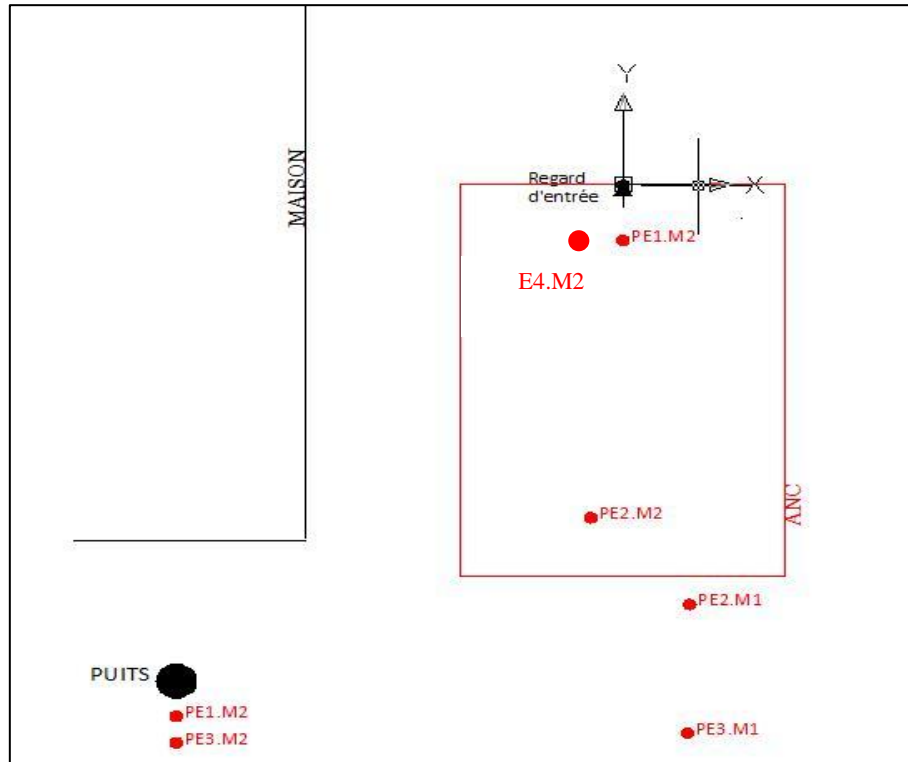


Figure 55 : Emplacement des essais réalisés pour les sites Eglény pour la mission 1 et la mission 2

Avec :

- P : essai pénétromètre PANDA
- E : essai géoendoscopie

1.3.6.2. Tableau récapitulatif

Numéro du sondage	Profondeur du Panda (m)	Profondeur d'endoscope (m)	Emplacement X/Y par rapport au regard d'entrée
1/M1	1.18	0.58	-13/-6
2/M1	1.76	1.01	1/0
3/M1	1.20	1.05	1/-7
1/M2	1.71	0.86	0/-1
2/M2	1.71	0.97	-0.5/-6
3/M2	1.70	1.03	-13/-7
4/M2	-	0.70	-0.5/-1

Tableau 12 : Tableau récapitulatif des essais site Eglény

1.3.6.3. Analyse des résultats

Pour la mission 1 on obtient les stratigraphies suivantes :

1.3.6.3.1. Sondage 1

Le premier sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 0.59 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués. Ce sondage révèle donc la stratigraphie du terrain naturel.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.02 m
- Couche n°2 : Limon sur une épaisseur de 0.52 m
- Couche n°3 : Sable colmaté sur une épaisseur de 0.05 m

1.3.6.3.2. Sondage 2

Le deuxième sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.51 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués. Ce sondage révèle donc la stratigraphie du terrain naturel.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.04 m
- Couche n°2 : Limon sur une épaisseur de 0.97 m
- Couche n°3 : Sable colmaté sur une épaisseur de 0.50 m

1.3.6.3.3. Sondage 3

Le premier sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.05 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués. Ce sondage révèle donc la stratigraphie du terrain naturel.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.03 m
- Couche n°2 : Limon sur une épaisseur de 0.60 m
- Couche n°3 : Sable colmaté sur une épaisseur de 0.42 m

Durant la mission 2, quatre essais PANDA et deux essais de géoendoscopie ont été effectués.

1.3.6.3.4. Sondage 1

Le premier sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 0.86 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.01 m
- Couche n°2 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.64 m
- Couche n°3 : Gravier sur une épaisseur de 0.21 m

1.3.6.3.5. Sondage 2

Le deuxième sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 0.97 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.73 m
- Couche n°2 : Gravier sur une épaisseur de 0.24 m

1.3.6.3.6. Sondage 3

Le troisième sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.02 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.01 m
- Couche n°2 : Limon sur une épaisseur de 0.50 m
- Couche n°3 : Sable sur une épaisseur de 0.51 m

1.3.6.3.7. Sondage 4

Le quatrième sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 0.71 m. L'essai de géoendoscopie a été effectué dans un carottage.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Limon sur une épaisseur de 0.66 m
- Couche n°2 : Gravier sur une épaisseur de 0.05 m

1.3.6.4. Analyse globale

Commençons tout d'abord par comparer les résultats obtenus lors de la mission 1.

Pour la mission 1, les trois sondages sont réalisés à l'extérieur de l'ANC. Tous révèlent une couche de limon suivie d'une couche de sable. Dans les trois cas le sable commence à se colmater (**Figure 56**).



Figure 56 : l'état du sable dans le cas du site Egleny mission 1 pour le sondage 1 « à gauche » le sondage 2 « au milieu » et le sondage 3 « à droite »

On passe à la mission 2, trois essais de géoendoscopie ont été réalisés à l'intérieur de l'ANC (sondage 1,2 et 4). On a remarqué et cela jusqu'à la profondeur atteinte une couche de terre végétale suivie de gravier.

Le sondage 3 de la mission 2 a été réalisé près du sondage 1 de la mission 1. L'état du sable dans la mission 2 est beaucoup plus colmaté que lors de la mission 1 (**Figure 57**).



Figure 57 : Comparaison entre l'état du sable pour la mission 1 « à gauche » et pour la mission 2 « à droite » pour le site Egleny

1.3.7. SITE CHERRY



Figure 58 : Photo du site Cherry

Le site Cherry est un site qui a été visité lors des deux missions :

- Pour la première mission trois essais ont été effectués
- Pour la deuxième mission également trois missions ont été effectués

1.3.7.1. Implantation des sondages

L'emplacement des points de sondage sont présentés dans la **Figure 59**.

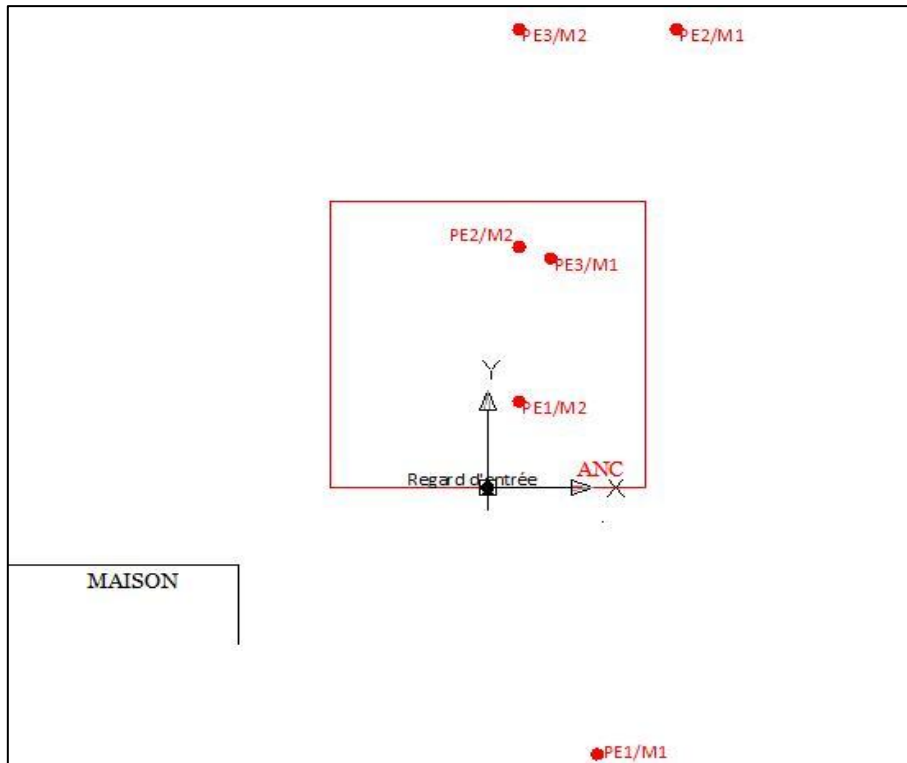


Figure 59 : Emplacement des essais réalisés

Avec :

- P : essai pénétromètre PANDA
- E : essai géoendoscopie

1.3.7.2. Tableau récapitulatif

Numéro du sondage	Profondeur du Panda (m)	Profondeur d'endoscope (m)	Emplacement X/Y par rapport au regard d'entrée
1/M1	1.71	1.70	4/-10
2/M1	0.95	0.78	3/8
3/M1	1.71	1.09	1/4
1/M2	2	1.03	0.5/1.5
2/M2	2	1.23	0.5/4.2
3/M2	2	1	0.5/8

Tableau 13 : Tableau récapitulatif des essais site Cherry

1.3.7.3. Analyse des résultats

Les analyses complètes sont fournies en annexe.

Pour la mission 1 on a trouvé les résultats suivants :

1.3.7.3.1. Sondage 1

Le premier sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.72 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués. Ce sondage révèle donc la stratigraphie du terrain naturel.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.04 m
- Couche n°2 : Limon+inclusion blanche sur une épaisseur de 0.35 m
- Couche n°3 : Argile sur une épaisseur de 0.52 m
- Couche n°4 : Calcaire sur une épaisseur de 0.29 m
- Couche n°5 : Argile sur une épaisseur de 0.23 m
- Couche n°6 : Gravier sur une épaisseur de 0.29 m

1.3.7.3.2. Sondage 2

Le deuxième sondage a été également effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 0.77 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués. Ce sondage révèle donc la stratigraphie du terrain naturel.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.02 m
- Couche n°2 : Limon sur une épaisseur de 0.43 m
- Couche n°3 : Argile sur une épaisseur de 0.12 m
- Couche n°4 : Gravier avec une inclusion rouge sur une épaisseur de 0.14 m
- Couche n°5 : Calcaire sur une épaisseur de 0.06 m

1.3.7.3.3. Sondage 3

Le troisième sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.08 m. Dans ce cas, les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués. Ce sondage révèle la stratigraphie de l'ANC qui est un assainissement de type filtre à sable non drainé.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.07 m
- Couche n°2 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.27 m

Chapitre II : Analyse et interprétation

- Couche n°3 : Gravier sur une épaisseur de 0.29 m
- Couche n°5 : Sable sur une épaisseur de 0.45 m

On retrouve d'après les deux essais le schéma des couches type d'un filtre à sable non drainé. Le sable est propre dans cette mission contrairement à la deuxième mission où il commence à se colmater.

Pour la mission 2 on a trouvé les résultats suivants :

1.3.7.3.4. Sondage 1

Le premier sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.02 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.02 m
- Couche n°2 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.31 m
- Couche n°3 : Gravier sur une épaisseur de 0.20 m
- Couche n°4 : Sable colmaté sur une épaisseur de 0.49 m

1.3.7.3.5. Sondage 2

Le deuxième sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.11 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.01 m
- Couche n°2 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.32 m
- Couche n°3 : Gravier sur une épaisseur de 0.24 m
- Couche n°4 : Sable sur une épaisseur de 0.59 m
- Couche n°5 : Gravier sur une épaisseur de 0.06 m

1.3.7.3.6. Sondage 3

Le troisième sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 0.99 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Limon sur une épaisseur de 0.46 m
- Couche n°2 : Argile sur une épaisseur de 0.21 m
- Couche n°3 : Calcaire sur une épaisseur de 0.09 m
- Couche n°4 : Argile sur une épaisseur de 0.23 m

1.3.7.4. Analyse globale

Comparant l'état du sable pour le sondage 3 de la mission 1 et les sondages 1 et 2 de la mission 2.

On remarque que le sable de la mission 1 est propre contrairement à celui de la mission 2. On remarque aussi que dans le sable du sondage 2 est moins colmaté que celui du sondage 1 (**Figure 60**).



Figure 60 : Comparaison entre l'état du sable du sondage 3 de la mission 1 « à gauche » et du sondage 1 « au milieu » et sondage 2 « à droite » pour la mission 2 pour le site Cherry

1.3.8. SITE LES FOURS

Durant cette visite trois essais PANDA et essais géoendoscopies ont été effectués.

1.3.8.1. Implantation des sondages

L'emplacement des points de sondage sont présentés dans la **Figure 61**.

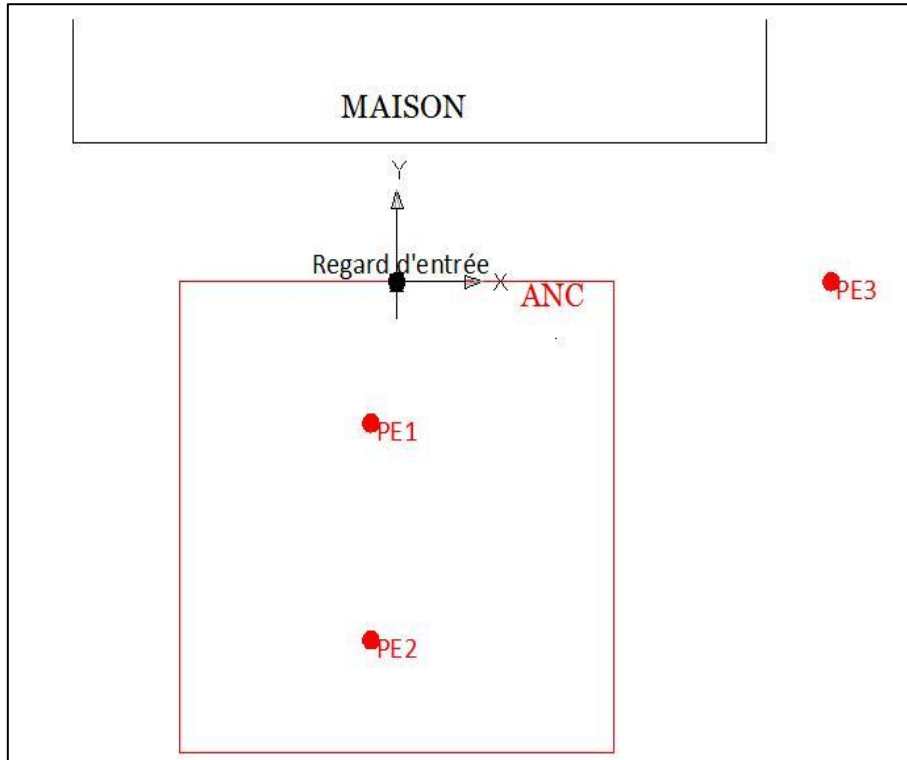


Figure 61 : Emplacement des essais réalisés pour le site Les fours

Avec :

- P : essai pénétromètre PANDA
- E : essai géoendoscopie

1.3.8.2. Tableau récapitulatif

Numéro du sondage	Profondeur du Panda (m)	Profondeur d'endoscope (m)	Emplacement X/Y par rapport au regard d'entrée
1	2	1.32	0.3/1.5
2	2	1.07	0.3/3.8
3	2	1.2	5/0

Tableau 14 : Tableau récapitulatif des essais site Les fours

1.3.8.3. Analyse des résultats

L'ANC est de type filtre à sable vertical drainé

1.3.8.3.1. Sondage 1

Le premier sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.30 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.03 m
- Couche n°2 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.34 m
- Couche n°3 : Gravier sur une épaisseur de 0.27 m
- Couche n°4 : Sable sur une épaisseur de 0.53 m
- Couche n°5 : Gravier sur une épaisseur de 0.13 m

1.3.8.3.2. Sondage 2

Le deuxième sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.07 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.01 m
- Couche n°2 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.27 m
- Couche n°3 : Gravier sur une épaisseur de 0.24 m
- Couche n°4 : Sable sur une épaisseur de 0.55 m

1.3.8.3.3. Sondage 3

Le troisième sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.20 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Argile sur une épaisseur de 0.15 m
- Couche n°2 : Argile sur une épaisseur de 0.17 m
- Couche n°3 : Argile sur une épaisseur de 0.22 m
- Couche n°4 : Argile sur une épaisseur de 0.28 m
- Couche n°5 : Argile sur une épaisseur de 0.19 m
- Couche n°6 : Argile sur une épaisseur de 0.19 m

Chapitre II : Analyse et interprétation

La différence entre les couches d'argiles est due à la différence de l'état de serrage et la couleur du matériau.

1.3.8.4. Analyse globale

Pour le site Les fours :

Un sondage (sondage 3) a été réalisé à l'extérieur de l'ANC, il montre l'existence d'une couche d'argile.

Les deux autres sondages sont réalisés à l'intérieur de l'ANC. L'état du sable dans les deux sondages commence à se colmater, il est de même pour la dernière couche de gravier du sondage 1 (**Figure 62**).



Figure 62 : Etat du sable pour le sondage 1 « à gauche » et le sondage 2 « à droite » ainsi que l'état du gravier du sondage 1 « au milieu » pour le site Les fours

1.3.9. SITE LES CLERCS

Durant cette visite trois essais PANDA et essais géoendoscopies ont été effectués.

1.3.9.1. Implantation des sondages

L'emplacement des points de sondage sont présentés dans la **Figure 63**.

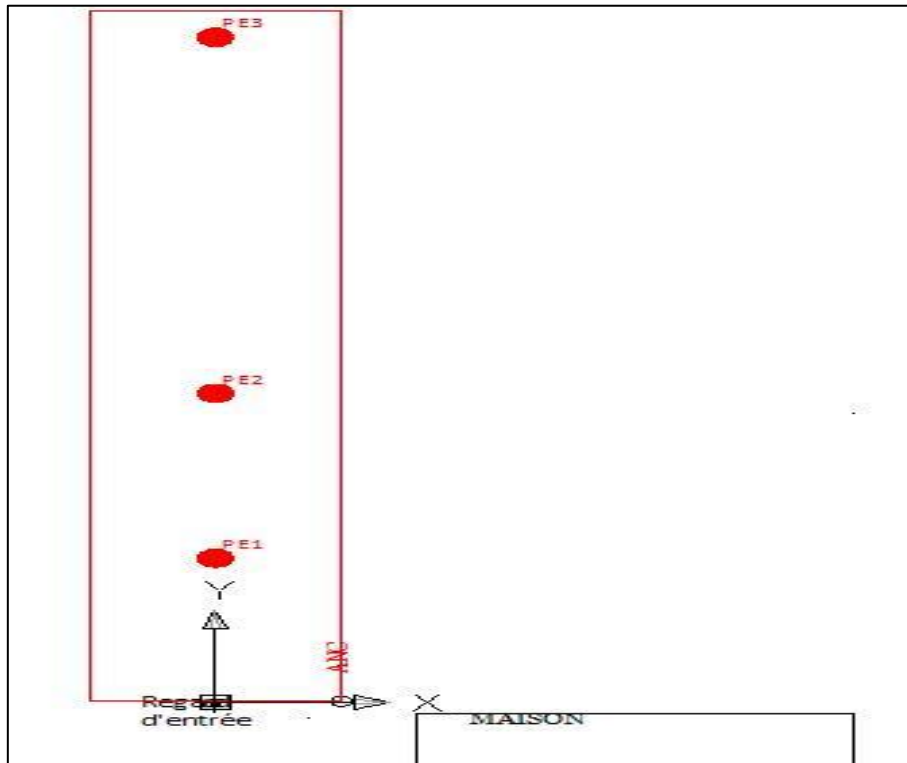


Figure 63 : Emplacement des essais réalisés pour le site Les clercs

Avec :

- P : essai pénétromètre PANDA
- E : essai géoendoscopie

1.3.9.2. Tableau récapitulatif

Numéro du sondage	Profondeur du Panda (m)	Profondeur d'endoscope (m)	Emplacement X/Y par rapport au regard d'entrée
1	2	1.6	0/5.4
2	2	1.65	0/11.6
3	2	1.53	0/25

Tableau 15 : Tableau récapitulatif des essais site Les clercs

1.3.9.3. Analyse des résultats

L'ANC est de type tranchées filtrantes in situ sur sol sablo-argileux.

1.3.9.3.1. Sondage 1

Le premier sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.60 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

Chapitre II : Analyse et interprétation

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Argile sur une épaisseur de 0.04 m
- Couche n°2 : Argile sur une épaisseur de 0.23 m
- Couche n°3 : Argile sur une épaisseur de 0.26 m
- Couche n°4 : Argile sur une épaisseur de 0.14 m
- Couche n°5 : Limon sur une épaisseur de 0.12 m
- Couche n°6 : Limon sur une épaisseur de 0.20 m
- Couche n°7 : Limon sur une épaisseur de 0.34 m
- Couche n°8 : Limon sur une épaisseur de 0.19 m
- Couche n°9 : Eau sur une épaisseur de 0.08 m

La différence entre les couches de même nature est due à la différence de la texture est à l'état de serrage.

1.3.9.3.2. Sondage 2

Le deuxième sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.65 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Limon sur une épaisseur de 0.27 m
- Couche n°2 : Argile sur une épaisseur de 0.30 m
- Couche n°3 : Argile saturée sur une épaisseur de 0.20 m
- Couche n°4 : Argile saturée sur une épaisseur de 0.12 m
- Couche n°5 : Argile sur une épaisseur de 0.18 m
- Couche n°6 : Argile sur une épaisseur de 0.14 m
- Couche n°7 : Limon sur une épaisseur de 0.17 m
- Couche n°8 : Matériau blanc sur une épaisseur de 0.10 m
- Couche n°9 : Argile sur une épaisseur de 0.15 m

1.3.9.3.3. Sondage 3

Le troisième sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.54 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Limon sur une épaisseur de 0.05 m
- Couche n°2 : Matériau blanc sur une épaisseur de 0.15 m
- Couche n°3 : Argile sur une épaisseur de 0.15 m
- Couche n°4 : Argile sur une épaisseur de 0.33 m
- Couche n°5 : Limon saturé sur une épaisseur de 0.31 m
- Couche n°6 : Limon sur une épaisseur de 0.26 m
- Couche n°7 : Matériau blanc sur une épaisseur de 0.29 m

1.3.9.4. Analyse globale

Les trois sondages révèlent un terrain limoneux argileux. On remarque cependant la présence d'eau dans le cas du sondage 1 sur une profondeur de 1.52 m.

1.3.10. SITE LES DOIGTS



Figure 64 : Photo du site Les doigts

Le site les doigts a été visité dans les deux missions.

1.3.10.1. Implantation des sondages

L'emplacement des points de sondage sont présentés dans la Figure 65.

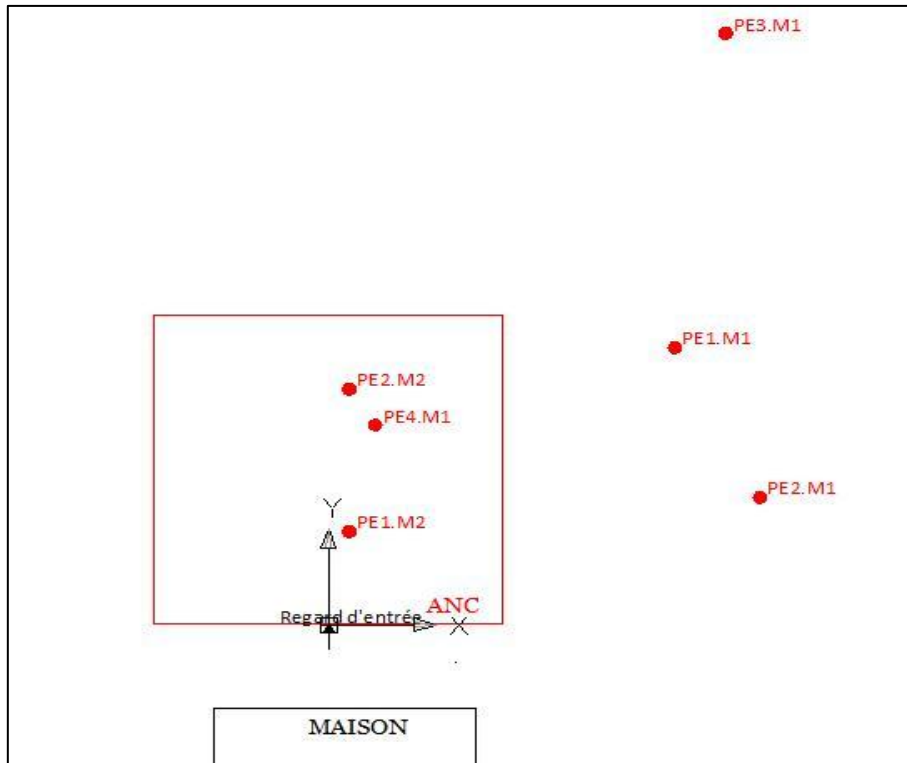


Figure 65 : Emplacement des essais réalisés pour le site Les doigts

Avec :

- P : essai pénétromètre PANDA
- E : essai géoendoscopie

1.3.10.2. Tableau récapitulatif

Numéro du sondage	du	Profondeur Panda (m)	du	Profondeur d'endoscope (m)	Emplacement X/Y par rapport au regard d'entrée
1/M1		1.87		1.6	9/4
2/M1		1.9		-	12/2
3/M1		1.71		1.7	10/11
4/M1		1.71		1.4	1/3
1/M2		1.82		1.12	0.3/1.5
2/M2		2		2	0.3/3.8

Tableau 16 : Tableau récapitulatif des essais site Les doigts

1.3.10.3. Analyse des résultats

Pour la mission 1, les deux essais ont été réalisés à l'extérieur de l'ANC qui est de type tranchées filtrantes.

1.3.10.3.1. Sondage 1

Le premier sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.60 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués. Ce sondage révèle donc la stratigraphie du terrain naturel.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.03 m
- Couche n°2 : Limon sur une épaisseur de 0.22 m
- Couche n°3 : Limon sur une épaisseur de 0.22 m
- Couche n°4 : Limon sur une épaisseur de 0.20 m
- Couche n°5 : Limon sur une épaisseur de 0.30 m
- Couche n°6 : Sable sur une épaisseur de 0.36 m
- Couche n°7 : Sable colmaté sur une épaisseur de 0.14 m
- Couche n°8 : Matériau colmaté sur une épaisseur de 0.13 m

La différence entre la couche n°2 et la couche n°3 est due à la différence de la propriété du matériau qui se reflète sur les paramètres S et H.

La différence entre la couche n°4 et la couche n°3 est due à la différence de la texture. La différence entre la couche n°2 et la couche n°3 est due à la différence de la texture.

La différence entre la couche n°4 et la couche n°5 est due à la différence de la couleur du matériau.

1.3.10.3.2. Sondage 2

Le deuxième sondage a été également effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.9 m. Seul l'essai pénétromètre PANDA a été effectué.

La Figure 66 représente le logarithme de la résistance de pointe en fonction de la profondeur.

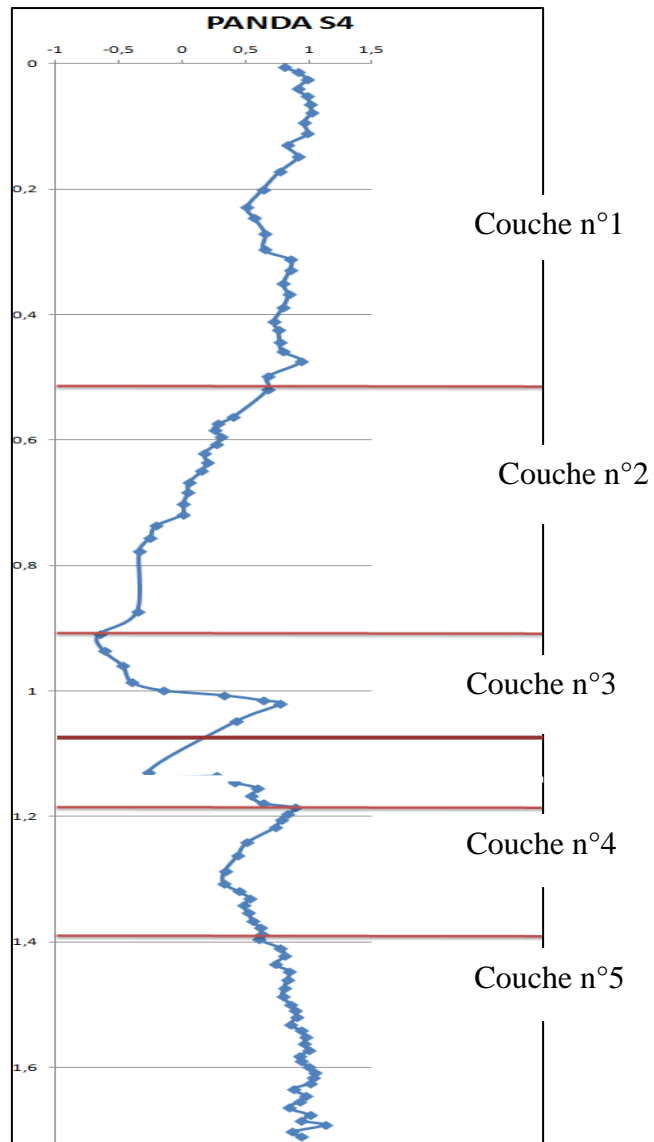


Figure 66 : Essai Panda site Les doigts sondage 2 mission 1

L'analyse de l'essai Panda a permis d'identifier cinq couches Figure 66 .

1.3.10.3.3. Sondage 3

Le premier sondage a été effectué à l'extérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.71 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués. Ce sondage révèle donc la stratigraphie du terrain naturel.

Chapitre II : Analyse et interprétation

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Limon sur une épaisseur de 0.06 m
- Couche n°2 : Limon sur une épaisseur de 0.30 m
- Couche n°3 : Limon sur une épaisseur de 0.18 m
- Couche n°4 : Sable colmaté sur une épaisseur de 0.23 m
- Couche n°5 : Sable colmaté sur une épaisseur de 0.17 m
- Couche n°6 : Matériau colmaté sur une épaisseur de 0.20 m
- Couche n°7 : Matériau colmaté sur une épaisseur de 0.15 m
- Couche n°8 : Matériau colmaté sur une épaisseur de 0.22 m
- Couche n°9 : Matériau colmaté sur une épaisseur de 0.11 m
- Couche n°10 : Matière visqueuse jaune sur une épaisseur de 0.09 m

La différence entre les trois premières couches est due à la différence de texture. Pour les sables colmatés c'est le degré de colmatage qui fait la différence. De même pour la couche n°6, 7, 8 et 9.

1.3.10.3.4. Sondage 4

Le premier sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.38 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.04 m
- Couche n°2 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.23 m
- Couche n°3 : Gravier sur une épaisseur de 0.24 m
- Couche n°4 : Sable sur une épaisseur de 0.29 m
- Couche n°5 : Sable sur une épaisseur de 0.27 m
- Couche n°6 : Gravier sur une épaisseur de 0.18 m
- Couche n°7 : Gravier+Eau sur une épaisseur de 0.14 m

Pour la mission 2 :

1.3.10.3.5. Sondage 1

Le premier sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 1.30 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.01 m
- Couche n°2 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.18 m
- Couche n°3 : Terre végétale sur une épaisseur de 0.07 m
- Couche n°4 : Gravier sur une épaisseur de 0.27 m
- Couche n°5 : Sable colmaté sur une épaisseur de 0.42 m
- Couche n°6 : Gravier sur une épaisseur de 0.16 m

Chapitre II : Analyse et interprétation

La différence entre les couches de terre végétale vient du fait de la différence de texture.

1.3.10.3.6. Sondage 2

Le deuxième sondage a été effectué à l'intérieur des limites de l'ANC sur une profondeur de 2.02 m. Les deux essais pénétromètre PANDA et endoscopie ont été effectués.

L'analyse couplée des deux essais a permis d'identifier les couches suivantes :

- Couche n°1 : Herbe sur une épaisseur de 0.01 m
- Couche n°2 : Sable colmaté sur une épaisseur de 0.14 m
- Couche n°3 : Limon sur une épaisseur de 0.18 m
- Couche n°4 : Limon sur une épaisseur de 0.38 m
- Couche n°5 : Sable colmaté sur une épaisseur de 0.50 m
- Couche n°6 : Sable colmaté sur une épaisseur de 0.19 m
- Couche n°6 : Limon sur une épaisseur de 0.31 m
- Couche n°6 : Sable sur une épaisseur de 0.21 m
- Couche n°6 : Limon sur une épaisseur de 0.10 m

La différence entre les deux premières couches de limon est due à la différence de couleur. Pour les couches de sable colmaté c'est l'état de saturation de sable qui fait la différence.

1.3.10.4. Analyse globale

Trois sondages se trouvent à l'extérieur de l'ANC, seulement pour deux d'entre eux (sondage 1 et 3 de la mission 1) on a réalisé les deux essais Panda-géoendoscope. Ces deux essais permettent de comparer l'état du sable.

On remarque dans les deux cas que le sable est colmaté (**Figure 67**).



Figure 67 : Comparaison du sable pour le cas du sondage 1 « à gauche » et le sondage 2 « à droite » pour le site Les doigts

Chapitre II : Analyse et interprétation

Pour les sondages à l'intérieur de l'ANC, on a deux sondages effectués lors de la mission 2 et un seul lors de la mission 1. Le sable pour la mission 1 était propre alors que pour la mission 2 il est colmaté (Figure 68).



Figure 68 : Comparaison entre les sables du sondage 4 mission 1 « à gauche » et le sable du sondage 1 « au milieu » et du sondage 2 « à droite » mission 2 pour le site les doigts

2. Spatialisation des données

Après avoir obtenu les stratigraphies ponctuelles, cette deuxième partie a pour objectif d'interpoler les données ponctuelles afin d'obtenir des modèles de terrain en 2D et 3D. La spatialisation a été faite par le logiciel Rockworks. Pour comparer les méthodes d'interpolation, on utilisera les données issues de l'analyse du site Egleny.

Rockworks est un logiciel qui permet l'interpolation des données entrées selon le type de ces données et selon la méthode choisie par l'utilisateur.

Dans ce mémoire deux types de données sont interpolés :

- Les épaisseurs des couches : obtenues par la première étape décrite ci-dessus
- Les résistances de pointe obtenue par les essais de pénétration Panda

2.1. Interpolation des stratigraphies

On commencera notre analyse par l'interpolation des données stratigraphiques. Le logiciel va nous permettre d'avoir des modèles 2D et 3D de la stratigraphie du terrain en se basant sur les stratigraphies ponctuelles obtenues en analysant les essais Panda et de géoendoscopie.

Dans un premier temps on va choisir parmi les méthodes disponibles dans le logiciel la méthode qui nous paraît la plus adaptée à notre cas d'étude. Dans un deuxième temps on va étudier l'influence de l'ajout d'un sondage et des paramètres spécifiques à la méthode sur le résultat de l'interpolation.

2.1.1. Choix de la méthode

Avant de commencer l'analyse, on rappelle les données issues de l'analyse des essais du site Egleny. Notre objectif étant de reproduire la stratigraphie du terrain naturel, les données utilisées pour l'interpolation concerneront les sondages effectués à l'extérieur de la zone de l'assainissement non collectif. Dans le cas du site Egleny, quatre sondages ont été effectués à l'extérieur de l'ANC (trois durant la mission 1 et un seul durant la mission 2).

La première étape de l'interpolation consiste à faire entrer les données dans le logiciel. On rappelle les stratigraphies obtenues pour les quatre sondages (Figure 70, Figure 71, Figure 72 et Figure 73).

L'implantation des sondages est faite **Figure 69**.

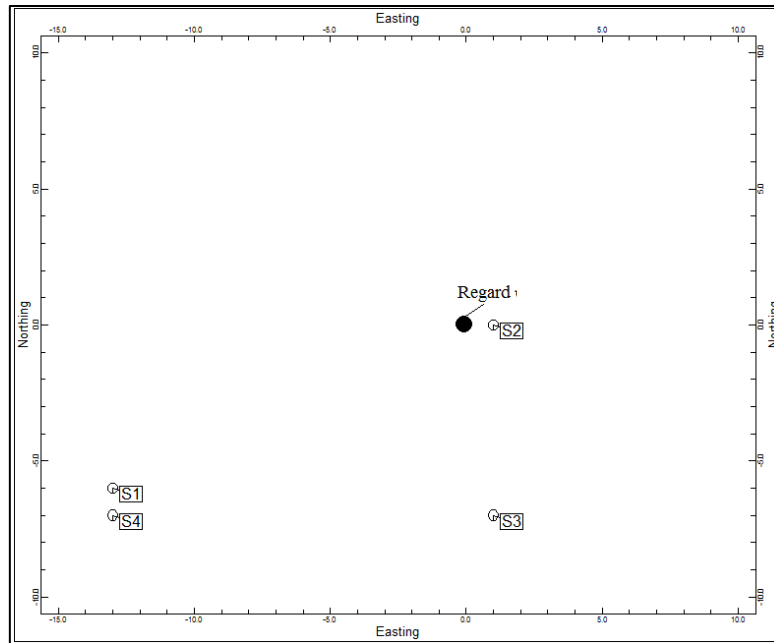


Figure 69 : Emplacement des sondages qui se trouve à l'extérieur de l'ANC pour le site Eglény

Sondage 1

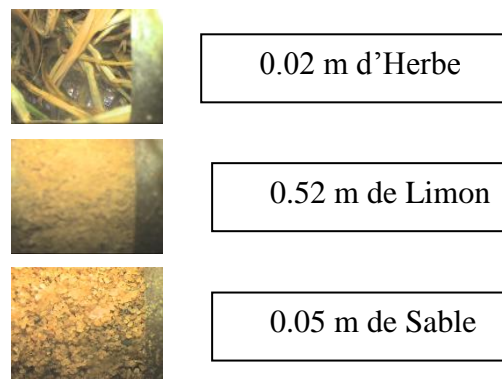


Figure 70 : Stratigraphie ponctuelle du sondage 1 du site Eglény mission 1

Sondage 2

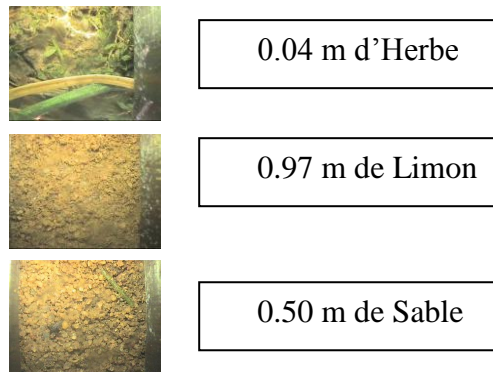


Figure 71 : Stratigraphie ponctuelle du sondage 2 du site Egleny mission 1

Sondage 3

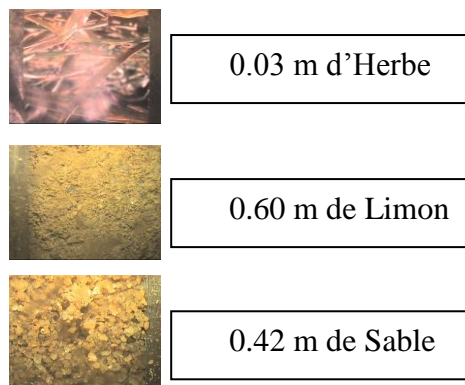


Figure 72 : Stratigraphie ponctuelle du sondage 3 du site Egleny mission 1

Sondage 4

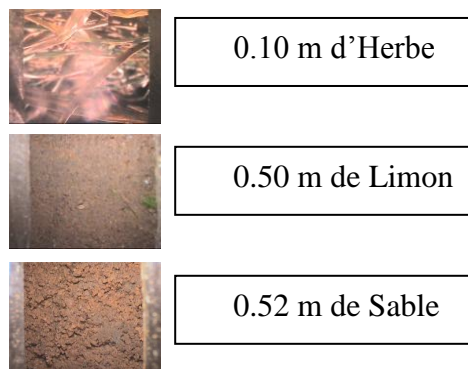


Figure 73 : Stratigraphie ponctuelle du sondage 3 du site Egleny mission 2

On va maintenant passer au choix de la méthode d'interpolation qui va être analysée par la suite. La spatialisation a été faite par le logiciel Rockwords qui nous donne la possibilité d'interpoler les données stratigraphiques par diverses méthodes, parmi elles :

- Closest Point : plus proche voisin
- Inverse-Distance (dans la partie bibliographie cette méthode est nommée IDWA)
- Triangulation
- Krigeage

La méthode de krigeage est une méthode qui est basée sur les lois statistiques. C'est une méthode qui pour être efficace demande un nombre assez important de données ce qui n'est pas notre cas. Donc la méthode de krigeage ne sera pas utilisée par la suite puisqu'elle n'est pas en adéquation avec notre cas d'étude.

La méthode de closest point également ne sera pas utilisée pour l'interpolation des données. En effet, cette méthode ne donne pas des résultats très satisfaisants. L'interpolation par cette méthode consiste à assigner au nœud la valeur du point d'observation le plus proche. L'inconvénient majeur est que l'interpolation par cette méthode engendre des problèmes de discontinuité, des discontinuités qui ne reflètent pas toujours la réalité. On obtient donc des changements brusques entre les valeurs des nœuds.

La Figure 74 permet d'illustrer cette remarque. Elle montre l'interpolation de l'épaisseur de la couche de limon obtenue par la méthode « closest point ». On remarque bien la discontinuité entre deux valeurs proches, c'est pour cette raison que cette méthode ne sera pas traitée.

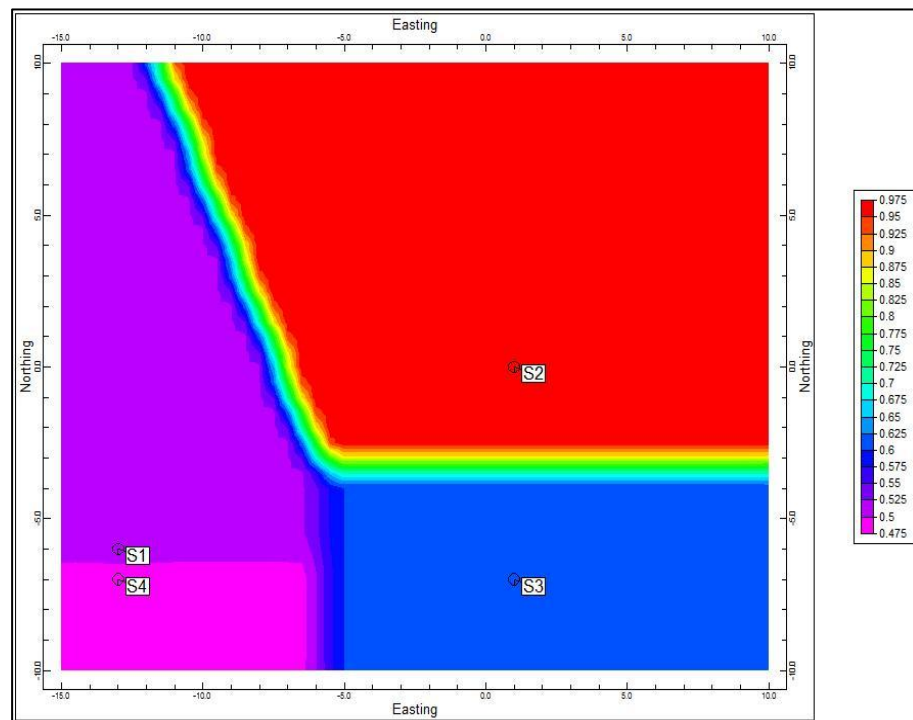


Figure 74 : Interpolation de l'épaisseur de la couche de limon du site Egleny par la méthode « closest point »

Dans le logiciel Rockwords, pour le cas de la méthode de triangulation c'est la triangulation de Delaunay qui est utilisée. Les points à l'intérieur des triangles sont interpolés par la méthode décrite dans la bibliographie, pour les points à l'extérieur des triangles deux options sont disponibles :

- Interpolate Edge Points : dans ce cas le programme insert des points sur les bords de la surface à interpoler : cinq points placés à égale distance sur chaque bord. Les valeurs de ces points sont calculées par la méthode « inverse distance », ensuite une interpolation par la méthode « triangulation » est effectuée sur ces points.
- No Edge Interpolation : si cette option est choisie, alors le logiciel nous permet
 - Soit d'attribuer une valeur nulle aux nœuds se trouvant à l'extérieur des triangles (Default Z = Null (Undefined))
 - Soit d'attribuer une valeur choisie par les utilisateurs à ces mêmes nœuds (Default Z = User Defined)

La **Figure 75** permet d'illustrer les deux options dans le cas de l'interpolation de la couche de limon du site Egleny.

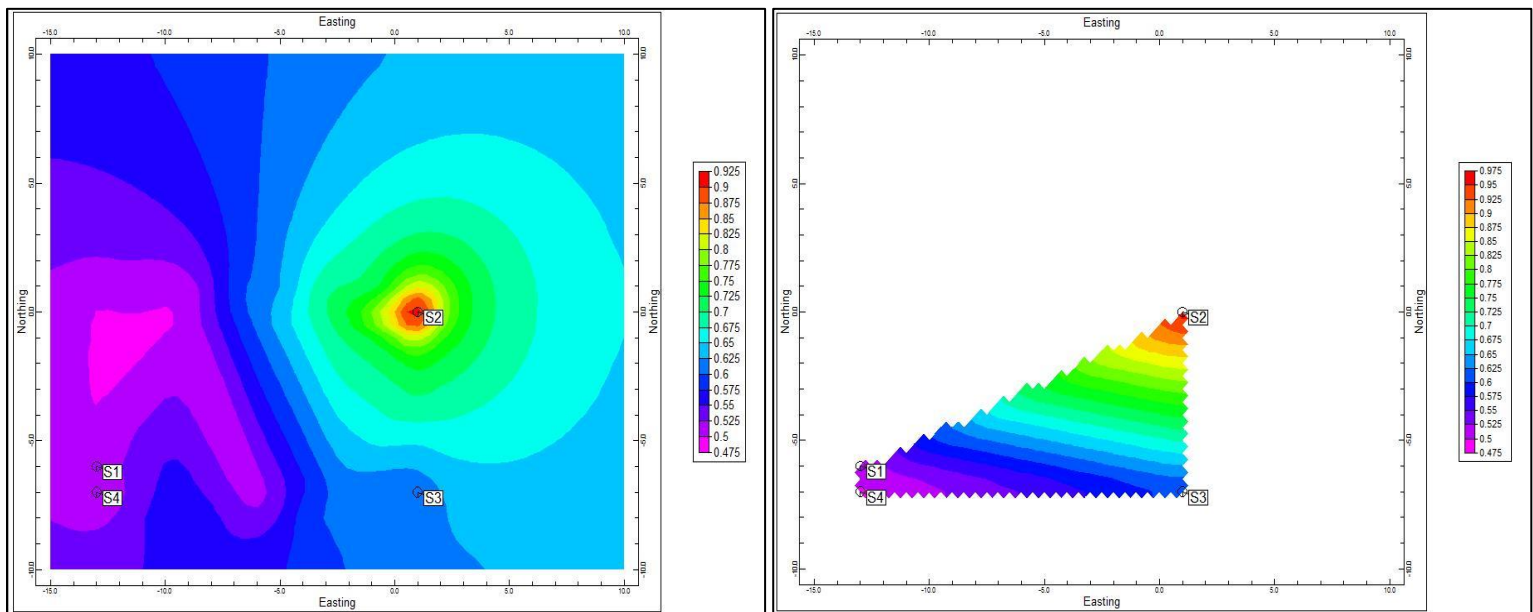


Figure 75 : Interpolation de la couche de limon du site Egleny par la méthode triangulation avec l'option « Interpolate Edge Points » à gauche et l'option « No Edge Interpolation » à droite

Il paraît donc évident que si on veut utiliser la méthode de triangulation l'option « Interpolate Edge Points » est la plus adaptée. Cette option elle-même utilise la méthode inverse distance pour l'extrapolation des données en dehors de la zone des triangles. Vu que le nombre de données que l'on a est restreint et donc le nombre de triangles sera de même, la

méthode de triangulation n'interviendra que dans une petite zone. De plus cette méthode a un autre inconvénient, les contours ont tendance à être angulaires (comme on peut le remarquer sur la **Figure 75** à gauche). C'est pour ces raisons que la méthode de triangulation ne va pas être utilisée par la suite.

La méthode qui va être analysée dans ce rapport est la méthode de l'inverse distance. Rappelons le principe de cette méthode.

La méthode de l'interpolation par inverse distance (IDWA) se base sur le principe que plus le point de donnée est loin du point à estimer et plus son influence diminue.

La variable à estimer est une combinaison linéaire des valeurs des points d'observations pondérées par l'inverse de la distance.

$$\hat{Z}(S_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z(S_i)}{\|S_i - S_0\|^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\|S_i - S_0\|^p}}$$

Deux paramètres peuvent être modifiés dans le logiciel afin de mieux rendre compte des phénomènes étudiés :

- La puissance « p » : ce paramètre permet de contrôler l'importance de l'influence des points connus sur les nœuds à interpoler.
Si la puissance est élevée, on privilégie les points à proximité. On obtient une surface moins lisse (on tient compte de plus de détail).
Sinon si la puissance est moins élevée alors on donne d'avantage d'importance aux points éloignés et on obtient une surface plus lisse.
Par défaut la valeur de la puissance est de 2 dans le logiciel.
- Nombre de voisins : ce paramètre caractérise le nombre de points à prendre en considération dans le calcul.
Par défaut la valeur du nombre de voisins est de 8 dans le logiciel.

L'influence de ces paramètres sur le résultat sera étudiée dans les parties suivantes.

Les dimensions du terrain que l'on va interpoler sont de (-15,10) dans la direction X (Northing) et de (-10, 10) dans la direction Y (Easting). L'origine du repère est la position du regard d'entrée.

La méthode de l'interpolation choisie est donc l'inverse distance. On va maintenant étudier l'impact de trois paramètres sur le résultat de l'interpolation afin de choisir les paramètres les plus en adéquation avec notre cas d'étude:

- Le paramètre de puissance « p »
- Le nombre de voisin « n »
- Le nombre de sondages

L'étude de l'influence de ces paramètres sera effectuée sur l'épaisseur de la couche de limon en 2D. Ce qui n'est pas une restriction mais juste un choix fait pour une meilleure présentation, puisqu'on obtient les mêmes résultats pour les autres épaisseurs.

2.1.2. Influence du paramètre de puissance « p »

Le paramètre de puissance « p » conditionne le degré d'influence des valeurs des points de données. En effet, si on a une valeur de « p » grande alors l'impact des points éloignés sera plus petit et celui des points proches plus grand que dans le cas où « p » est plus petite. Dans ce cas on donne plus d'importance aux points de données avoisinant le nœud.

Pour la comparaison de l'influence de ce paramètre dans notre cas d'étude et choisir le « p » le plus adéquat on va étudier cinq cas de figure :

- Cas 1 : l'interpolation sera effectuée par la méthode « inverse distance » avec p=1
- Cas 2 : l'interpolation sera effectuée par la méthode « inverse distance » avec p=2
- Cas 3 : l'interpolation sera effectuée par la méthode « inverse distance » avec p=3
- Cas 4 : l'interpolation sera effectuée par la méthode « inverse distance » avec p=4
- Cas 5 : l'interpolation sera effectuée par la méthode « inverse distance » avec p=5

Pour chaque cas on va estimer la valeur de l'épaisseur de la couche de limon en enlevant à tour de rôle un sondage. Cette démarche a pour objectif de mesurer les valeurs des points de sondages quand ils ne sont pas présent. Ces valeurs estimées vont être ainsi comparer aux valeurs réelles obtenues par l'analyse des essais Panda et géoendoscopie pour mesurer l'écart entre eux et obtenir ainsi l'erreur commise par la méthode d'interpolation.

On obtient les valeurs estimées de l'épaisseur de la couche de limon suivantes : **Tableau 17**

	S1	S2	S3	S4
Cas 1	0.5334	0.55726	0.7401	0.5543
Cas 2	0.5025	0.57385	0.8169	0.5222
Cas 3	0.5002	0.58592	0.8783	0.5201
Cas 4	0.5	0.59302	0.9191	0.52
Cas 5	0.5	0.5967	0.9431	0.52

Tableau 17 : Valeurs estimées de l'épaisseur de la couche de limon du site Egleny suivant les cinq cas

Pour expliquer la démarche effectuée on prend un exemple au hasard. La valeur en rouge (0.52) est la valeur qu'aura l'épaisseur de la couche de limon pour le sondage S4 dans le cas où l'interpolation par la méthode « inverse distance » avec p=4 (Cas 4) et comme données les sondages S1, S2 et S3.

Maintenant que l'on a les valeurs estimées de l'épaisseur de la couche de limon dans les cinq cas, on va comparer les méthodes en calculant l'erreur quadratique moyenne (EQM).

La formule qui permet de calculer l'EQM est:

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}_i - Z_i)^2} \quad \text{Équation 103}$$

Avec :

\hat{Z}_i : la valeur estimée du sondage i et Z_i : la valeur réelle du sondage i

On rappelle les valeurs réelles (VR) de l'épaisseur de la couche de limon pour les quatre sondages dans le **Tableau 18**.

	S1	S2	S3	S4
VR	0.52	0.97	0.60	0.50

Tableau 18: Valeurs réelles de l'épaisseur de la couche de limon pour le site Egleny

Le calcul de l'erreur quadratique moyenne est résumé dans le Tableau 19.

	EQM
Cas 1	0.097
Cas 2	0.102
Cas 3	0.113
Cas 4	0.122
Cas 5	0.129

Tableau 19 : Valeur de l'EQM dans les cinq cas pour le site Egleny

Dans notre cas d'étude, on remarque que plus la valeur de la puissance « p » augmente et plus l'erreur « EQM » augmente. Les cas 3,4 et 5 seront éliminés. On retient donc les cas 1 ou $p=1$ et le cas 2 ou $p=2$ qui ont l'erreur EQM le plus bas.

Maintenant avec ces deux cas on va tester l'impact du nombre de voisins « n » sur le résultat de l'interpolation.

2.1.3. Influence du nombre de voisins « n »

Ce paramètre permet de choisir le nombre de points de données pour le calcul. Comme pour le paramètre « p » l'influence de « n » va être mesurée par le calcul de EQM en enlevant à tour de rôle un des sondages. On obtiendra ainsi des valeurs estimées de l'épaisseur de la couche de limon pour chaque sondage.

Nous avons comme données quatre sondages et comme à chaque fois on enlève un sondage, le nombre maximum de voisins est donc « 3 ». Le nombre minimum de voisin est « 1 ».

Le cas de $n=1$ ne va pas être traité. En effet, ce cas donne les résultats de la méthode « closest point » que nous avons éliminée au début.

On a au total quatre cas :

- Cas 12 : l'interpolation sera effectuée par la méthode « inverse distance » avec $p=1$ et $n=2$
- Cas 22 : l'interpolation sera effectuée par la méthode « inverse distance » avec $p=2$ et $n=2$
- Cas 13 : l'interpolation sera effectuée par la méthode « inverse distance » avec $p=1$ et $n=3$

- Cas 23 : l'interpolation sera effectuée par la méthode « inverse distance » avec $p=2$ et $n=3$

Les valeurs estimées de l'épaisseur de la couche de limon pour les quatre cas et les quatre sondages sont résumées dans **Tableau 20**:

	S1	S2	S3	S4
Cas 12	0.5067	0.57384	0.8133	0.5253
Cas 22	0.5005	0.58605	0.876	0.5204
Cas 13	0.5334	0.55726	0.7401	0.5504
Cas 23	0.5025	0.57385	0.8169	0.5222

Tableau 20 : Valeurs estimées de l'épaisseur de la couche de limon du site Egleny

Les valeurs de EQM sont résumées dans **Tableau 21**.

	EQM
Cas 12	0.102
Cas 22	0.112
Cas 13	0.096
Cas 23	0.102

Tableau 21 : Valeur de l'erreur quadratique moyenne

La première remarque est que pour chaque « n » fixé la valeur la plus petite de EQM est pour $p=1$. La pondération dans ce cas se fait uniquement par l'inverse de la distance.

Si on compare maintenant les valeurs de EQM pour « n » différent, on remarque que la valeur la plus petite est pour le cas où $n=3$. C'est le cas où on prend en considération tous les points de données.

Pour résumer les résultats obtenus, dans le cas où on a un nombre petit de points on prend le nombre de voisins maximum que l'on a. Pour le paramètre de puissance on a remarqué que le cas de $p=1$ ou 2 sont les plus adéquats avec une légère différence entre les valeurs de l'EQM dans les deux cas.

On a choisi le cas où $p=2$, dans ce cas la surface est plus lisse : le changement des valeurs avoisinantes les points de données est moins brusque contrairement au cas $p=1$. Les Figure 76 et Figure 77 permettent de voir cette différence autour du sondage S2 que l'on a pris comme exemple.

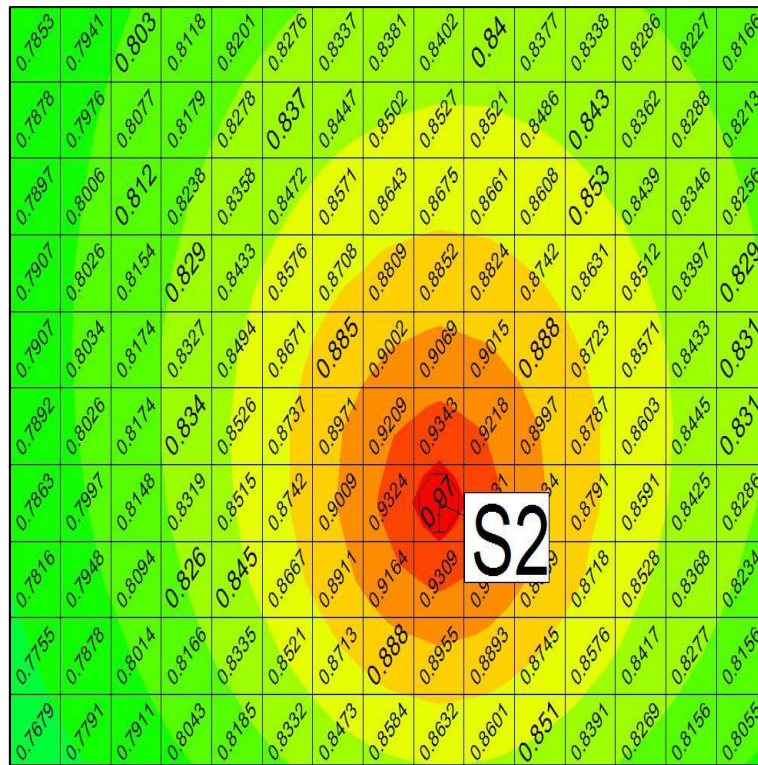


Figure 76 : Valeurs estimées avoisinant le sondage S2 dans le cas de l'interpolation de la couche de limon avec la méthode inverse distance et $p=1$

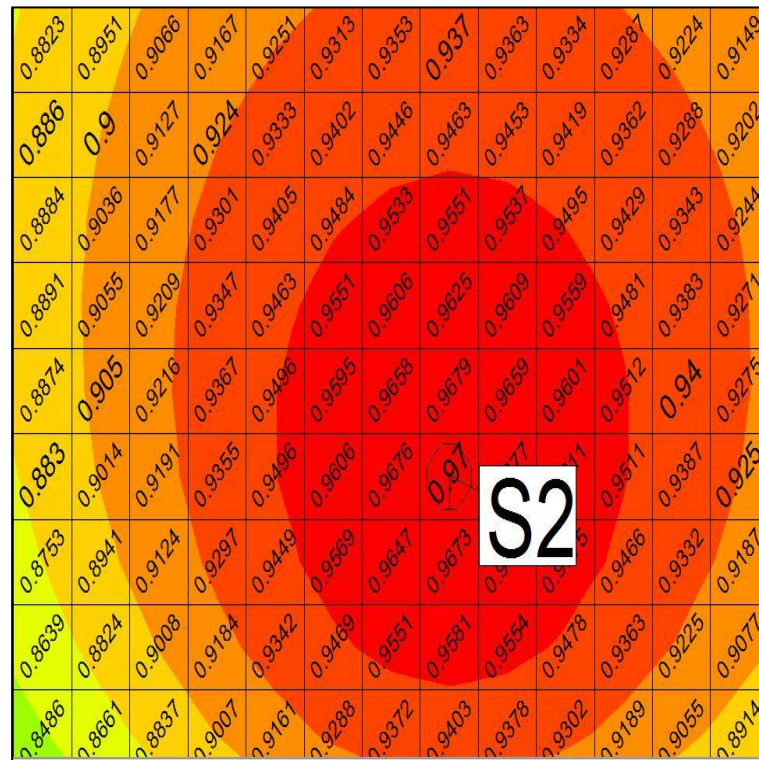


Figure 77 : Valeurs estimées avoisinant le sondage S2 dans le cas de l'interpolation de la couche de limon avec la méthode inverse distance et $p=2$

Donc la méthode choisie est la méthode inverse distance avec $p=2$ et $n=3$.

Avant de passer à l'analyse de l'impact de l'emplacement des sondages et de leurs valeurs sur les résultats de l'interpolation on va modéliser en 3D et 2D l'interpolation du terrain naturel obtenue par la méthode choisie.

Modélisation 3D

La modélisation en 3D du terrain naturel par la méthode inverse distance avec $p=2$ et $n=3$ est donnée à la Figure 78.

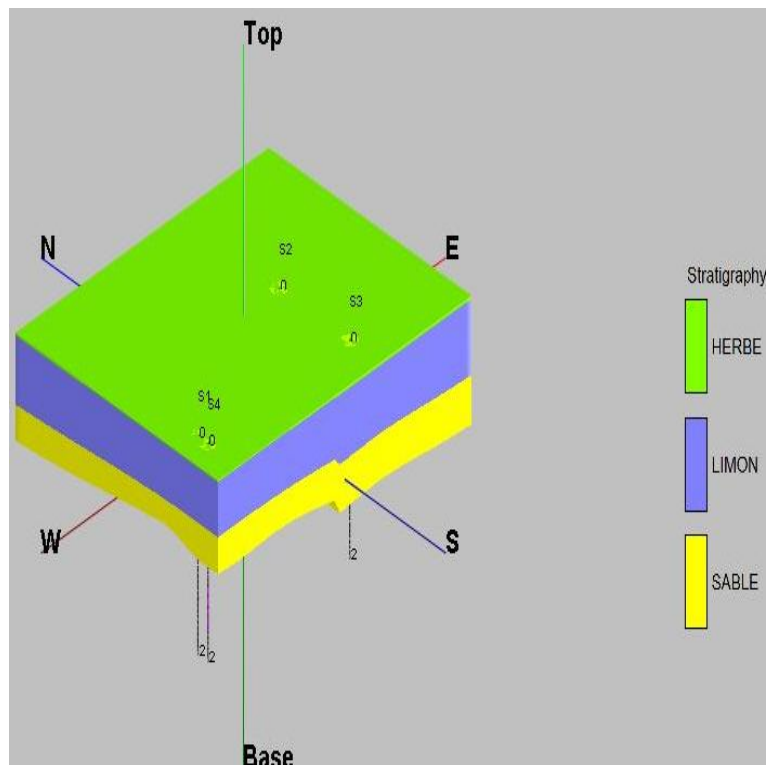


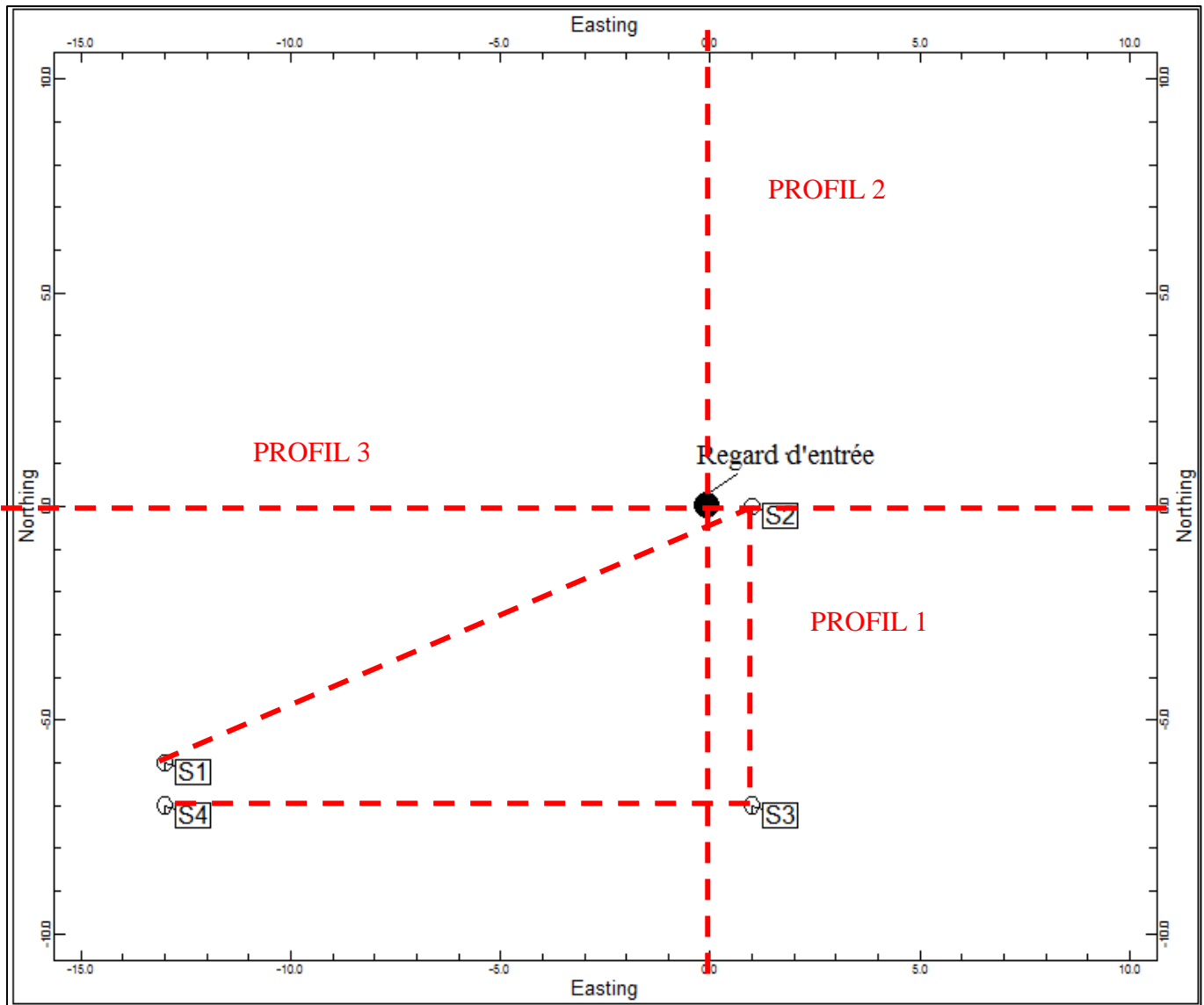
Figure 78 : Modélisation en 3D du terrain naturel du site Eglény par la méthode « inverse distance » avec $p=2$ et $n=3$

Modélisation 2D

Pour la modélisation en deux dimensions on a choisi les profils suivants (**Figure 79**):

- PROFIL 1 : entre les sondages S1, S2, S3 et S4
- PROFIL 2 : parallèle à la direction Est-Ouest et passant par $X=0$
- PROFIL 3 : parallèle à la direction Nord-Sud et passant par $Y=0$

Figure 79 : Emplacement des profils pour site Egleny



L'interpolation des données a donné les résultats suivant illustrer dans les Figure 80, Figure 81 et Figure 82.

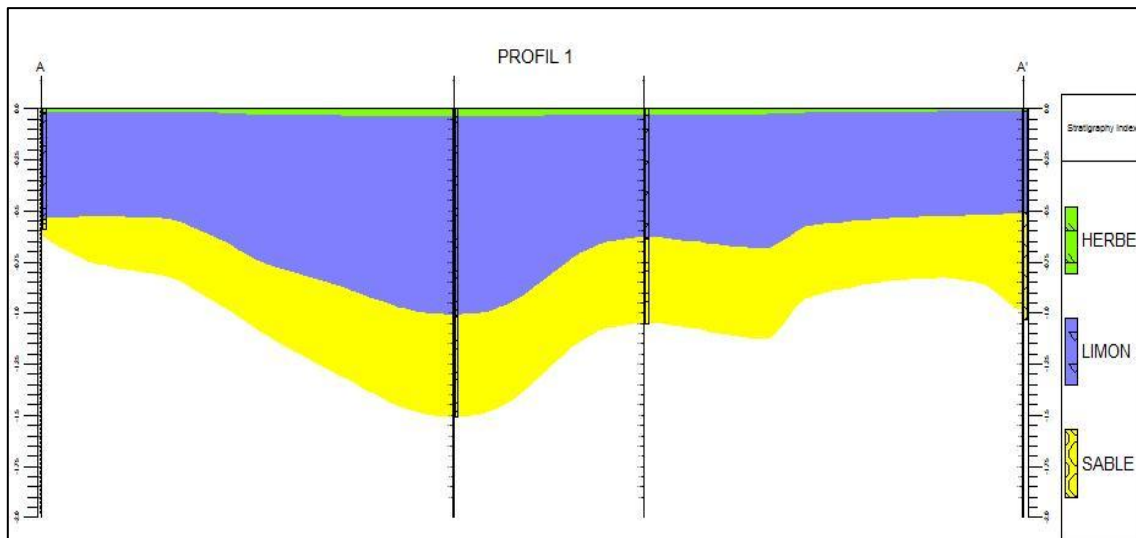


Figure 80 : Profil 1 du terrain naturel du site Egleny interpolé par la méthode inverse distance $p=2$ et $n=3$

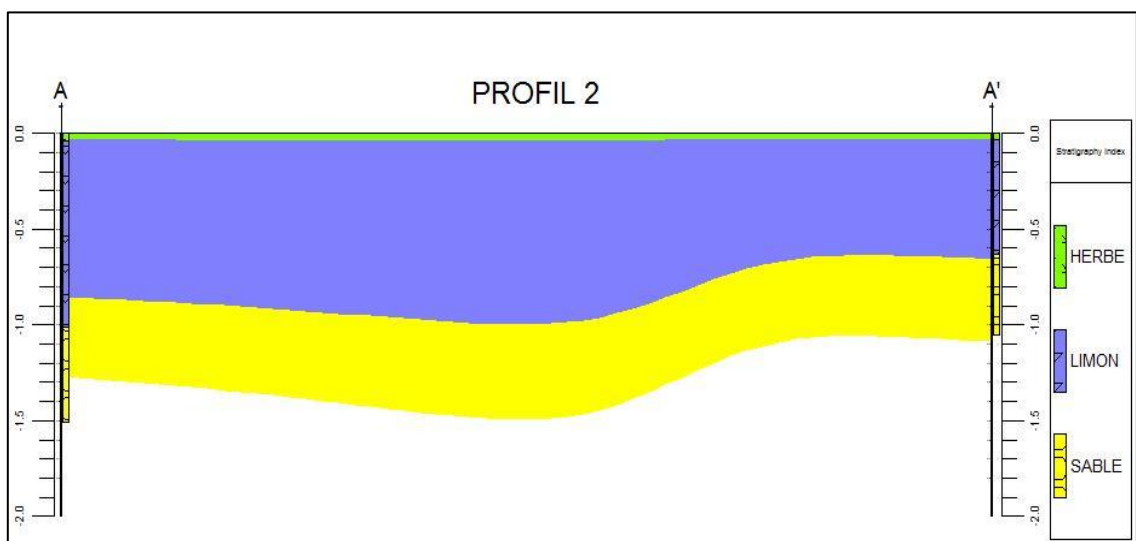


Figure 81 : Profil 2 du terrain naturel du site Egleny interpolé par la méthode inverse distance $p=2$ et $n=3$

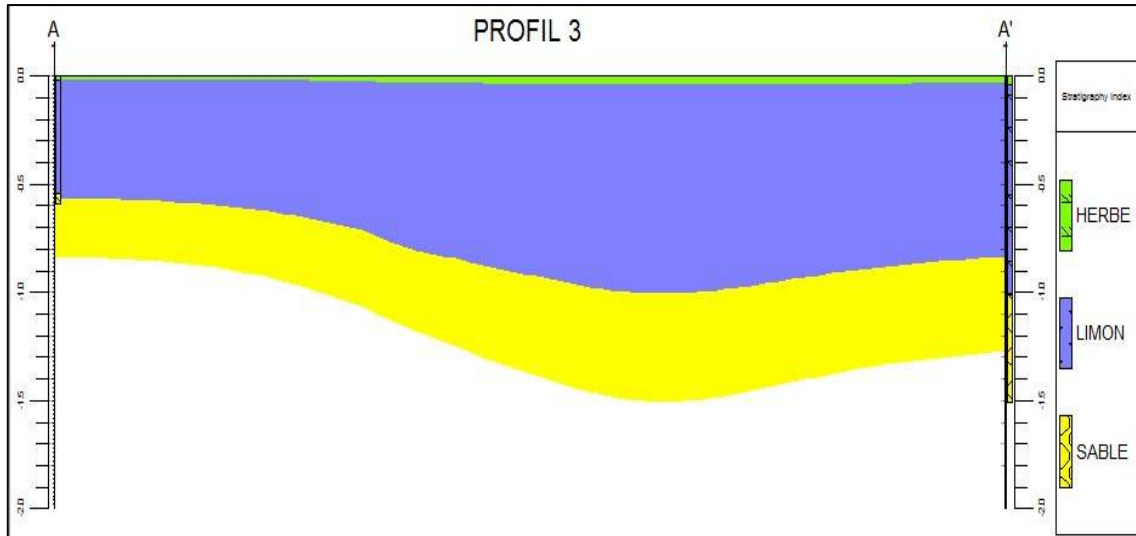


Figure 82 : Profil 3 du terrain naturel du site Eglény interpolé par la méthode inverse distance $p=2$ et $n=3$

Remarque

On remarque que la profondeur des sondages n'est pas la même. Dans ce cas le logiciel nous permet d'étendre la couche la plus basse (dans notre cas le sable) à la profondeur fixée par l'utilisateur.

Pour illustrer cette remarque, on a pris l'exemple du profil 1 **Figure 83**.

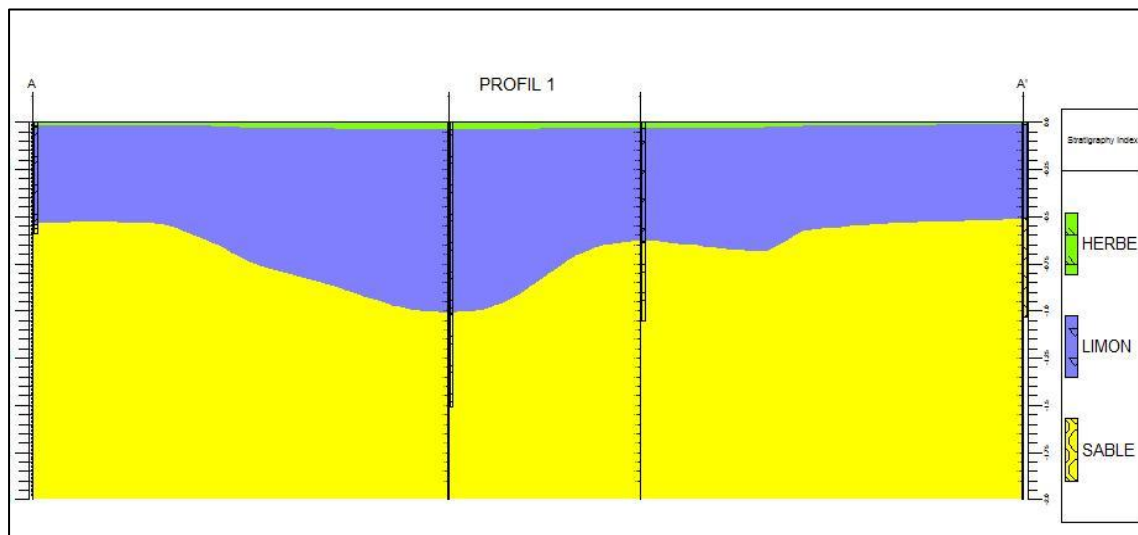


Figure 83 : Profil 1 du terrain naturel du site Eglény, interpolation par la méthode « inverse distance $p=2$ et $n=3$ » avec couche basse étendue

2.1.4. Influence des sondages

Pour mesurer l'influence des sondages on va faire comme pour les autres paramètres. On va à tour de rôle enlever un sondage et voir l'impact de ce sondage sur la valeur de l'EQM. Comme la méthode d'interpolation inverse distance est une méthode exacte (la valeur réelle des points de données est égale à la valeur estimée), cette démarche va nous permettre de mesurer l'influence de chaque sondage sur le résultat et ainsi déduire l'impact de l'emplacement et la valeur du sondage sur le résultat.

Le Tableau 22 résume les valeurs estimées et les valeurs réelles de l'épaisseur de la couche de limon pour chaque sondage ainsi que la valeur absolue de la différence entre les deux valeurs dans le cas de l'interpolation avec la méthode inverse distance $p=2$ et $n=3$.

	S1	S2	S3	S4
VR	0.52	0.97	0.60	0.5
VE	0.5025	0.57385	0.8169	0.5222
 VR-VE 	0.0175	0.3961	0.2169	0.0222

Tableau 22 : Valeurs réelles et valeurs estimées de l'épaisseur de la couche de limon dans le cas du site Egleny et la valeur absolue de la différence entre les deux valeurs

On remarque que les valeurs estimées des sondages S1 et S4 sont proches des valeurs réelles. Ceci peut être expliquer par le fait que les deux sondages ont des emplacements rapprochés mais aussi par le fait que la valeur de l'épaisseur de la couche de limon dans les deux cas est presque similaire.

Ce n'est pas le cas des sondages S2 et S3 qui ont des valeurs estimées loin de leurs valeurs réelles. On prend l'exemple du sondage S2 (c'est pareil pour S3) la différence entre la valeur estimée et la valeur réelle est due à l'emplacement du site mais aussi à la valeur de l'épaisseur, cette valeur étant une valeur limite elle ne peut pas être reproduite par la méthode d'interpolation. En effet, les valeurs estimées par la méthode inverse distance se trouvent toujours dans l'intervalle des valeurs de données et ne peuvent pas les dépassées.

L'ajout du sondage S4 (ou S1) a un impact négligeable sur le résultat, alors que l'ajout du sondage S2 (ou S3) modifie le résultat.

On en déduit que l'ajout d'un sondage a une influence différente selon son emplacement et sa valeur.

2.1.5. Conclusion

La méthode choisie pour l'interpolation des données est la méthode « inverse distance ». Pour cette méthode deux paramètres peuvent être modifiés pour mieux rendre compte du phénomène étudié.

On a tout d'abord le paramètre de puissance « p ». Ce paramètre permet de modifier l'importance accordée aux valeurs des points de données : plus il est grand plus on donne de l'importance au point proche du nœuds qu'aux points qui se trouvent plus loin. Pour tester l'influence de ce paramètre, cinq cas ont été analysés ($p=1,5$). L'étude nous a permis de retenir comme valeur de « p » la valeur 2. Cette valeur permet d'avoir une erreur minimal et une surface plus lisse.

Le deuxième paramètre est le nombre de voisin « n ». Ce paramètre permet de choisir le nombre de points de données à prendre en considération. Dans notre cas deux valeurs ont été étudiées « $n=2,3$ ». L'analyse nous a permis de conclure que dans notre cas il faut prendre le nombre maximum de voisins ceci est dû au petit nombre de points de données que l'on a.

Une troisième analyse a été effectuée. Cette démarche a pour objectif d'étudier l'influence de l'emplacement du sondage et de sa valeur sur le résultat de l'interpolation.

Cette analyse nous a permis donc de conclure que l'ajout d'un sondage a un impact différent selon :

- L'emplacement du sondage ajouté : il doit être loin des autres sondages déjà existants sinon son ajout aura un impact négligeable. Si on ajoute un sondage à un endroit où la densité de données est faible alors la répartition du zonage sera changée.
- La valeur de la variable étudiée du sondage ajouté : il faut faire attention si cette valeur est une valeur limite maximal ou minimal) son impact sur le résultat final de l'interpolation sera grand.

Il est à noter que pour de prochaines campagnes d'essai il faudra faire un zonage (répartir le terrain en quatre zones par exemple) et faire au moins un essai dans chaque zone. Ceci nous permettra de balayer tout le terrain. Si dans une zone on obtient une valeur de la variable étudiée plus grande que les autres, un autre essai sera utile dans la même zone pour voir si c'est une valeur commune à la zone. La méthode inverse distance est sensible aux valeurs limites, cette démarche nous permettra d'éliminer des valeurs aberrantes dues à la mauvaise manipulation des essais ou à d'autres perturbations.

Maintenant on va passer à l'interpolation d'un autre type de données qui est l'interpolation des résistances de pointe.

2.2. Interpolation de la résistance de pointe

Contrairement à l'interpolation de la stratigraphie qui se fait par interpolation sur un maillage (modélisation par surface), l'interpolation de la résistance de pointe se fait par un modèle solide : l'interpolation de la résistance diffère de celle de la stratigraphie. En effet, pour la résistance de pointe on a pour chaque (X,Y) plusieurs valeurs de la résistance de pointe pour chaque Z.

Le modèle solide permet l'interpolation en 3D. Pour cela il crée une grille de nœuds régulièrement espacés par rapport aux points de données irrégulièrement espacés (**Figure 84**).

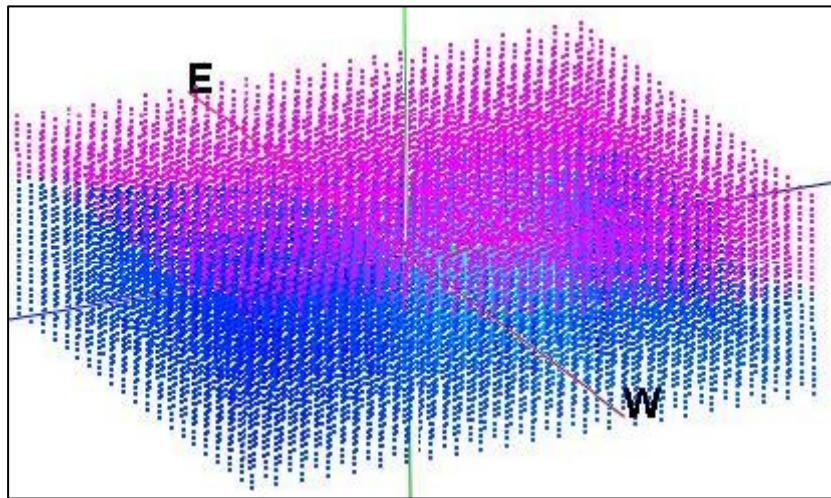


Figure 84 : Grille du modèle solide

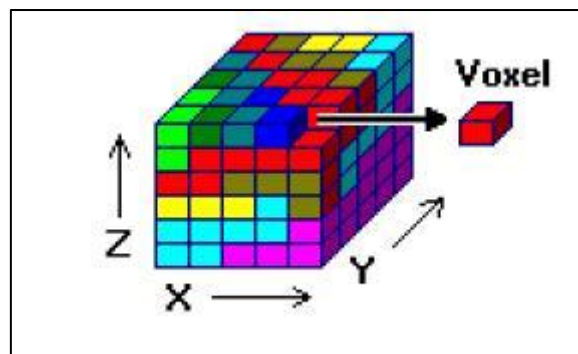


Figure 85 : Représentation du voxel

Chaque nœud de la grille est appelé voxel (**Figure 85**). Et chaque voxel a une valeur notée « G ». Cette valeur « G » est déduite des valeurs « G » de chaque point de données.

2.2.1. Choix de la méthode

Les méthodes d'interpolation du modèle solide diffèrent un peu de celles présentées dans la partie stratigraphie. Parmi ces méthodes on a choisi de comparer deux parmi elles :

- Méthode « inverse distance isotropique » dans ce cas la méthode utilise tous les points pour l'interpolation
- Méthode « inverse distance anisotropique » au lieu d'utiliser tous les points pour l'interpolation, le programme va chercher les points les plus proches dans chaque secteur de 90 degrés autour du nœud.

Pour comparer les résultats issus de l'interpolation des deux méthodes, On va comparer les résultats à une profondeur de 0.5 m en 2D.

Les résultats de l'interpolation des données des quatre sondages sont illustrés par la **Figure 86**.

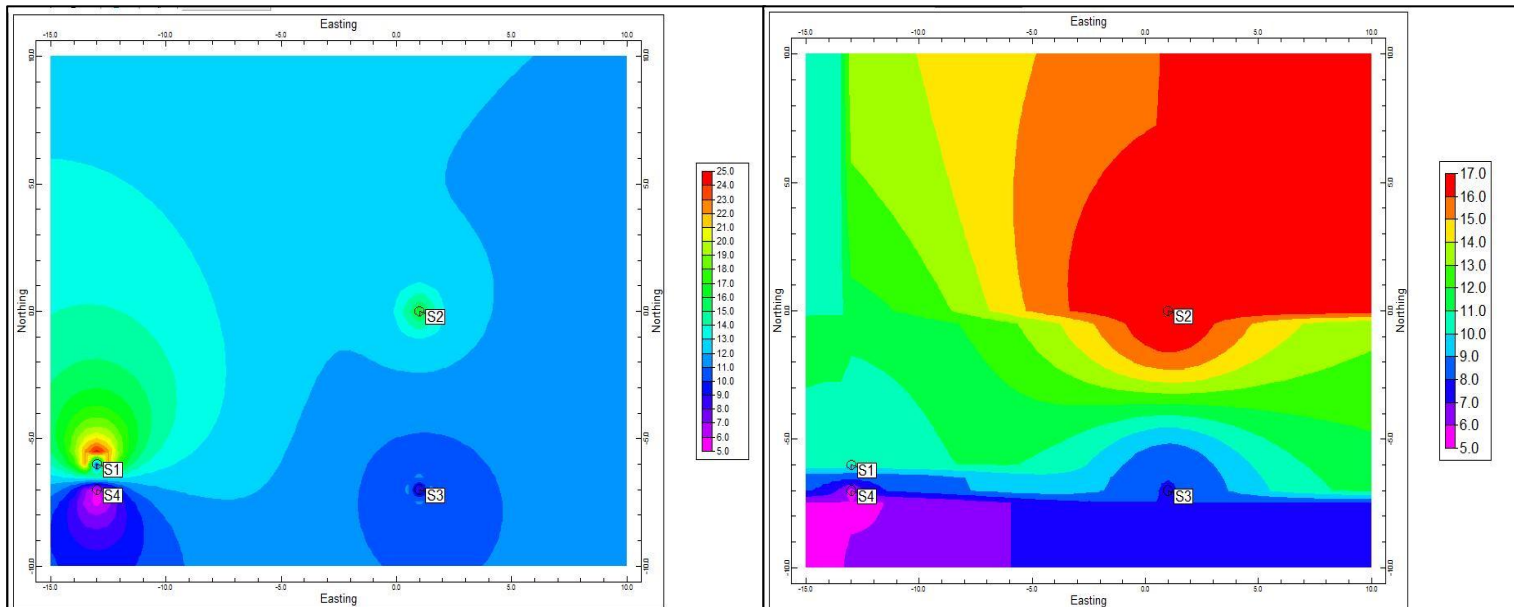


Figure 86 : Comparaison entre l'interpolation de Q_p par les méthodes inverse distance isotropique (gauche) et anisotropique (droite)

La première chose que l'on remarque est la différence entre le zonage de la surface. Pour la méthode anisotropique on a des zones parallèles contrairement au cas isotropique où la répartition est plus homogène. Cette différence est due au fait que dans le cas de la méthode anisotropique on a une sélection des données basée sur des secteurs à 90 degrés.

La deuxième remarque est la grande différence des valeurs avoisinantes les sondages. Pour le cas isotropique ces valeurs sont très éloignées des valeurs du sondage. Pour illustrer cette remarque on a pris l'exemple des valeurs autour du sondage S1 interpolé avec la méthode isotropique et anisotropique **Figure 87**.

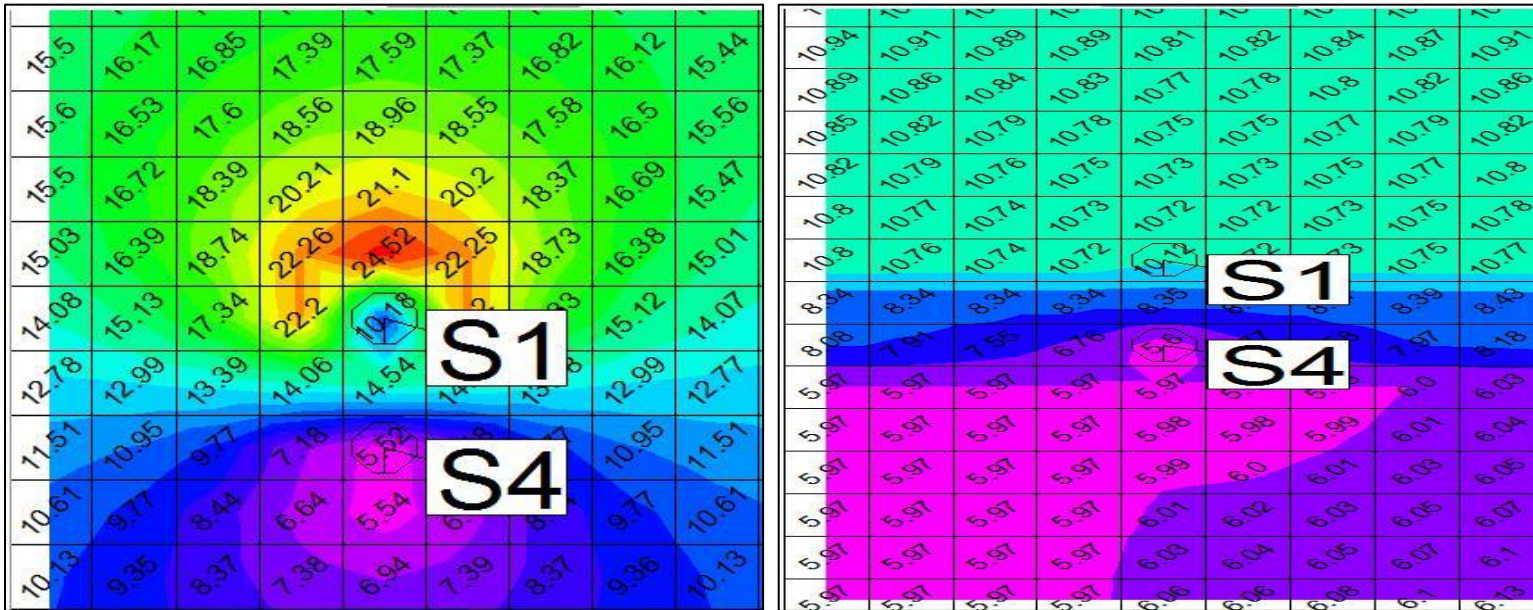


Figure 87 : Comparaison des valeurs autour du sondage S1 du site Egleny avec l'interpolation par la méthode « inverse distance » isotropique (gauche) et anisotropique (droite)

Pour palier à ce problème il faut des données régulièrement espacées et un nombre assez important pour l'interpolation par la méthode isotropique. Si par exemple on enlève le sondage S4 alors les valeurs seront beaucoup plus grandes que dans le cas où on a laissé S4. **Figure 88.**

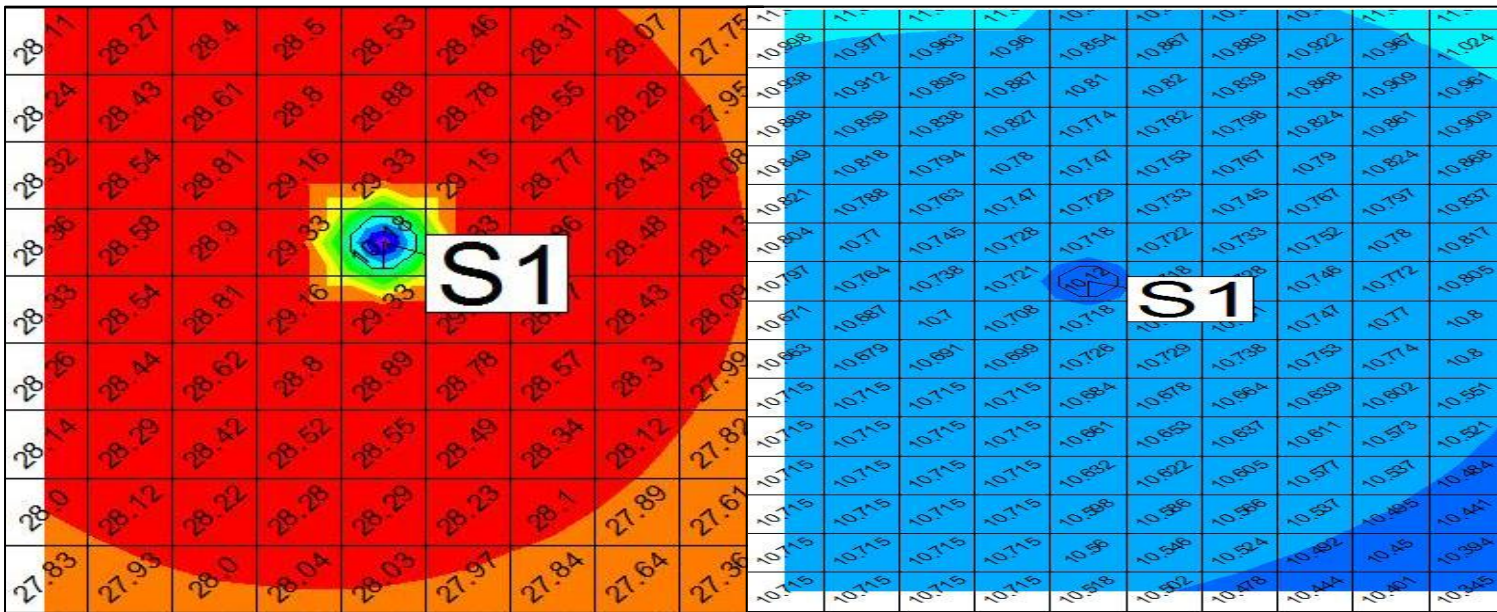


Figure 88 : Comparaison des valeurs autour du sondage S1 du site Egleny avec l'interpolation par la méthode « inverse distance » isotropique (gauche) et anisotropique (droite) sans le sondage S4

Comme dans notre cas d'étude on n'a pas des données régulièrement espacées et avec un nombre assez important de sondage donc notre choix pour interpoler les données de résistance de pointe est la méthode inverse distance anisotropique.

On va maintenant étudier l'influence du nombre de sondage ainsi que la régulation des données sur le résultat de l'interpolation par la méthode inverse distance anisotropique.

2.2.2. Influence des sondages

La méthode d'interpolation choisie pour ce type de données est la méthode inverse distance anisotropique.

Pour étudier l'influence des sondages sur le résultat de l'interpolation on va suivre la même démarche présentée pour les données stratigraphique. On va à tour de rôle enlever un sondage et voir son impact sur le résultat.

La comparaison va être effectuée sur la surface à une profondeur de 0.5 m. Ce choix a été fait pour simplifier l'analyse. Les mêmes remarques peuvent être déduites pour d'autres profondeurs.

Le **Tableau 23** résume les valeurs réelles ainsi que les valeurs estimées de la résistance de pointe interpolées par la méthode de l'inverse distance anisotropique pour une profondeur égale à 0.5.

	S1	S2	S3	S4
VR	10.12	16.66	7.79	5.6
VE	6.03	7.995	14.61	10.726
VR-VE	4.09	8.665	6.82	5.126

Tableau 23 : Les valeurs réelles et les valeurs estimées de la résistance de pointe interpoler par la méthode de l'inverse distance anisotropique pour une profondeur égale à 0.5

De même que pour le cas de l'interpolation de la stratigraphie les sondages qui ont la plus grande influence sont les sondages S2 et S3. Pour diminuer l'écart entre les valeurs réelles et valeurs estimées avec cette méthode il faut au moins deux sondages par ligne perpendiculaire et espacés.

Mainetenant on va voir l'influence de la régularisation des données de la résistance de pointe sur le résultat.

2.2.3. Influence de la régularisation des données

L'essai de pénétration Panda est basé sur une énergie variable. Dans ce cas pour chaque coup de marteau on a un enfoncement différent. Le principe de régulation est d'avoir des enfoncements constants.

Pour cela il faut calculer une valeur de q_p moyenne sur une fenêtre mobile de hauteur L constante en pondérant les valeurs de résistance de pointe contenues dans la fenêtre par leurs enfoncements élémentaires respectifs [Dep91].

La formule de la q_p moyen est :

$$q_{p \text{ fen\^etre}} = \frac{\sum_i q_{p,i} \times e_i}{\sum_i e_i} \quad \text{Équation 104}$$

Avec

- $q_{p \text{ fen\^etre}}$: Valeur moyenne de la résistance de pointe sur le fen\^etre de largeur L
- $q_{p,i}$: La i\^eme valeur de la résistance de pointe dans la fen\^etre de largeur L
- e_i : L'enfoncement correspondant à la résistance de pointe $q_{p,i}$

La largeur de la fen\^etre qu'on va utiliser dans notre cas est L=0.03 m. On a choisi cette largeur par rapport aux enfoncements moyens qu'on a effectué.

Comparant les résultats de l'interpolation dans le cas des quatre sondages avec et sans régulation des données **Figure 89**.

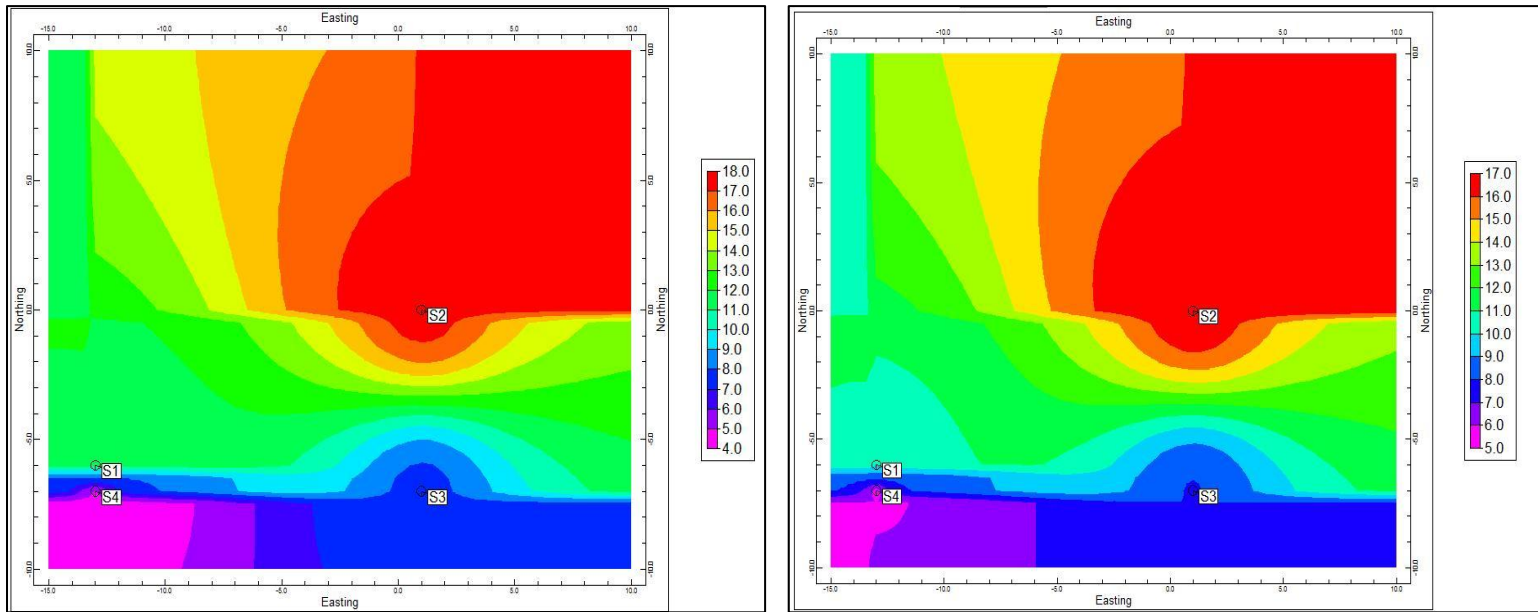


Figure 89 : Comparaison entre l'interpolation des résistances de pointe à une profondeur de 0.5 m par l'inverse distance anisotropique avant (figure de droite) et après (figure de gauche) régularisation des données

A première vue, on obtient presque la même répartition en zone de la surface donc les mêmes résultats avec une légère variation des valeurs ce qui est tout à fait normal puisqu'on a procédé à une nouvelle répartition de la résistance de pointe.

La différence entre les valeurs des sondages à une profondeur de 0.5 m obtenue par la méthode inverse distance anisotropique avant et après régularisation des données sont résumées dans le **Tableau 24**.

	S1	S2	S3	S4
SANS RELUGATION	10.12	16.66	7.79	5.6
AVEC REGULATION	11.01	17.06	6.99	4.93

Tableau 24 : Valeurs des sondages à une profondeur de 0.5 m obtenues par la méthode inverse distance anisotropique avant et après régularisation des données

On remarque qu'il existe une différence entre les deux cas. Cette différence a un impact direct sur les valeurs des points à interpolés. Les Figure 90, **Figure 91** et Figure 92 montrent cet impact sur les points avoisinants les sondages.

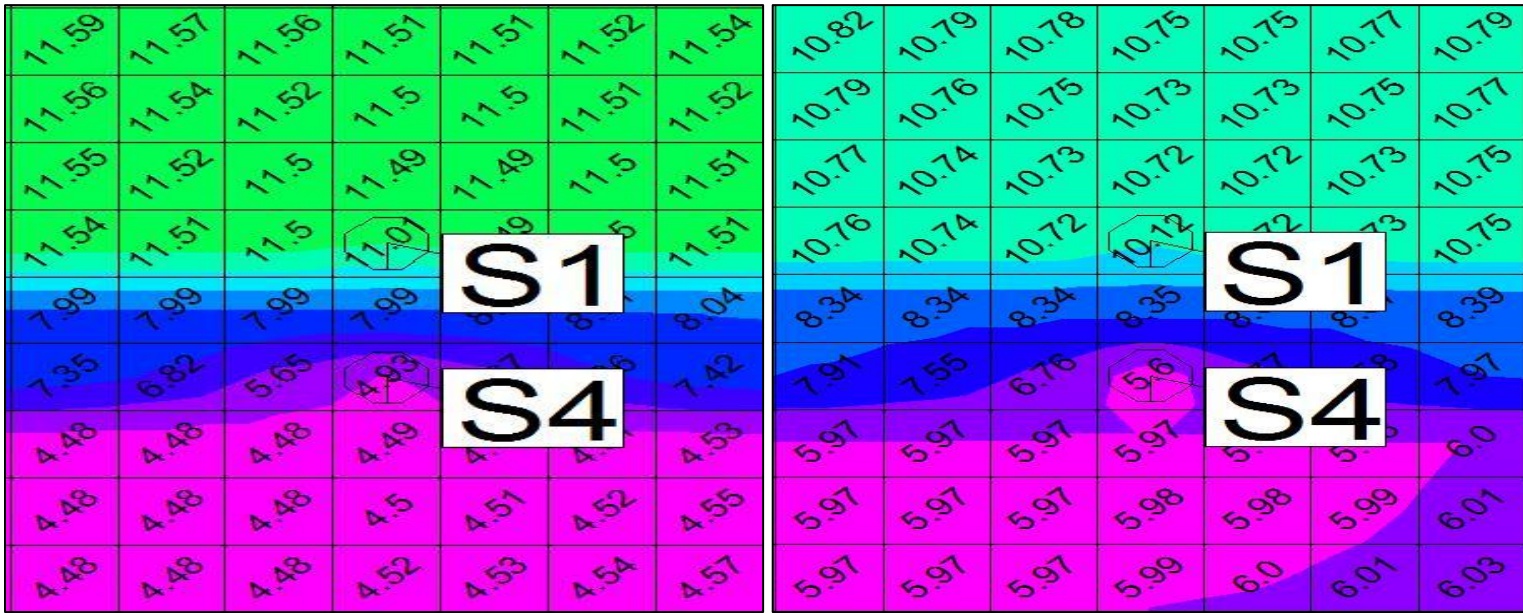


Figure 90 : Comparaison des valeurs voisinant le sondage S1 et S4 interpolées par la méthode inverse distance anisotropique dans le cas avant (droite) et après (gauche) régularisation des données

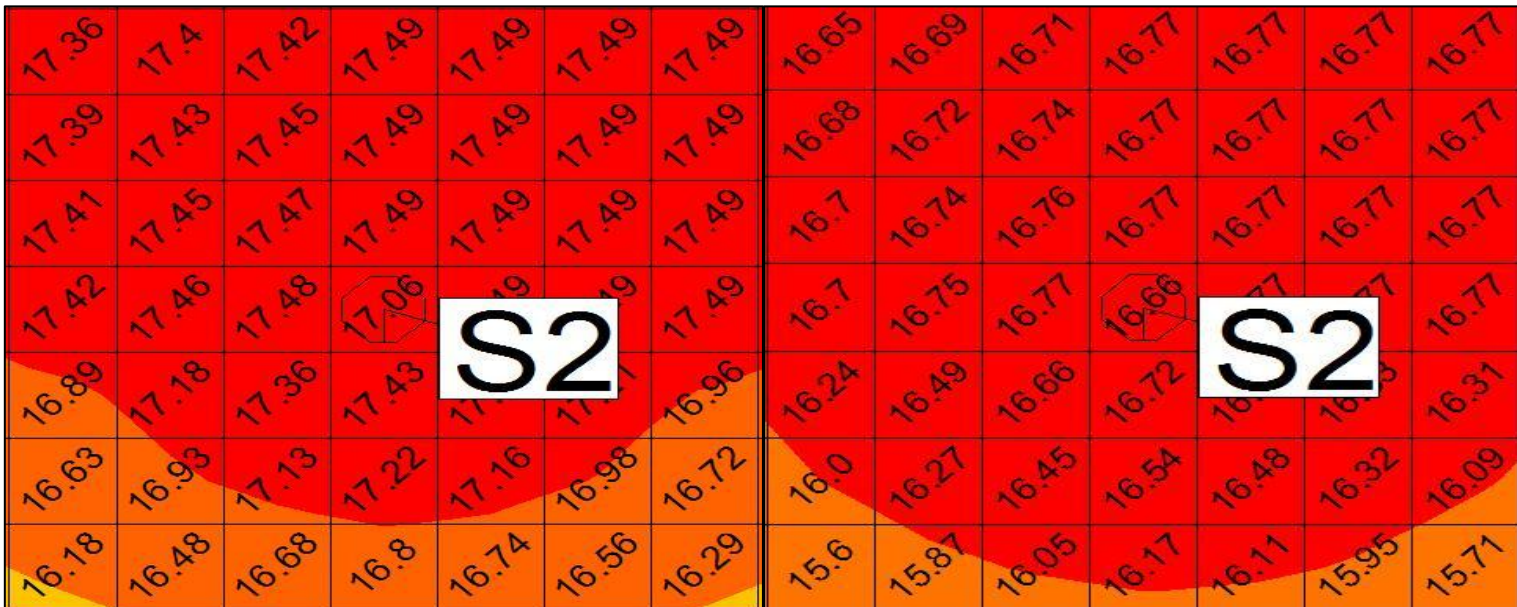


Figure 91 : Comparaison des valeurs voisinant le sondage S2 interpolées par la méthode inverse distance anisotropique dans le cas avant (droite) et après (gauche) régularisation des données

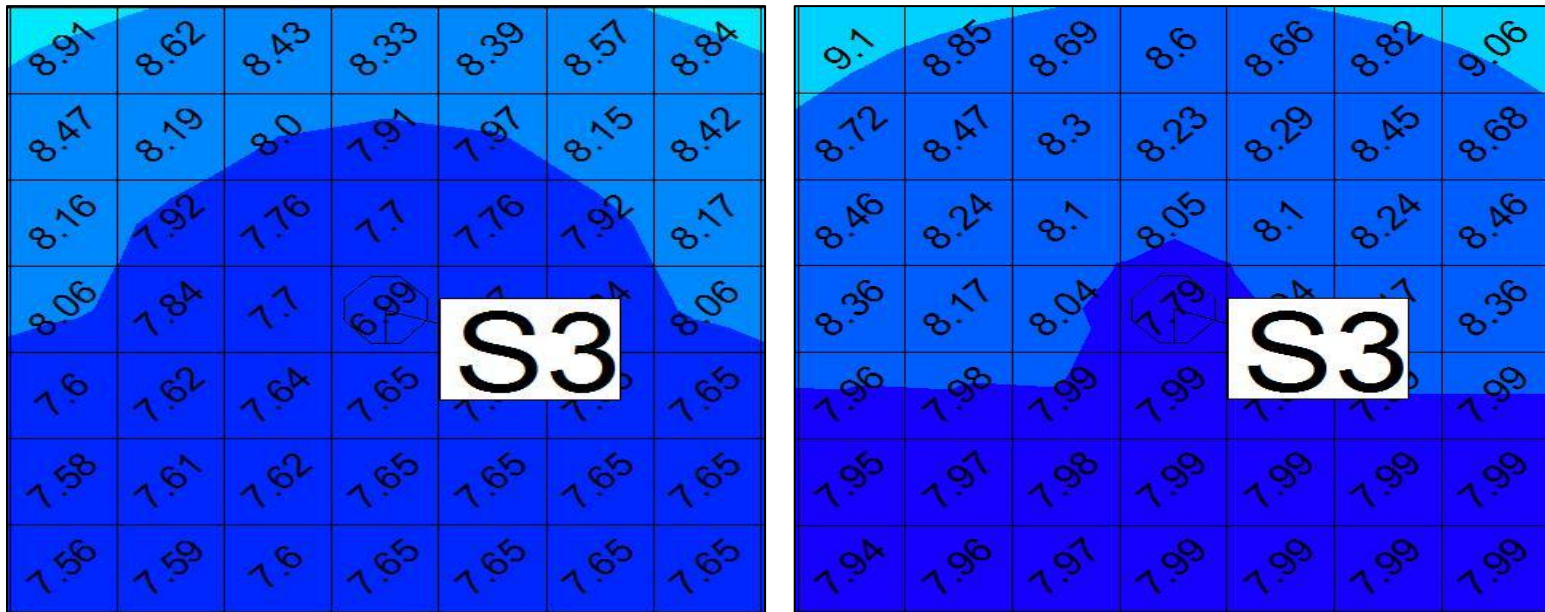


Figure 92 : Comparaison des valeurs voisinant le sondage S4 interpolées par la méthode inverse distance anisotropique dans le cas avant (droite) et après (gauche) régularisation des données

On remarque qu'il y a une différence de valeurs avoisinantes les sondages dans le cas avant et après régularisation des données. Cette différence est due à la différence des valeurs au niveau des sondages dans les deux cas. Vu que cette différence n'est pas très grande on a donc un impact négligeable sur les autres valeurs.

On peut conclure au niveau des sondages que la différence entre la valeur réelle et la valeur après régulation est négligeable.

Regardant maintenant si la régularisation des données permet de diminuer ou augmenter l'erreur sur la valeur d'un sondage quand on l'enlève.

	S1	S2	S3	S4
VR	10.12	16.66	7.79	5.6
VE	4.56	7.646	14.89	11.50
VR-VE	5.56	9.01	7.1	5.9

Tableau 25: Les valeurs réelles et les valeurs estimées de la résistance de pointe interpolé par la méthode de l'inverse distance anisotropique pour une profondeur égale à 0.5 après régulation des données

Comparant le pourcentage d'erreur entre les deux cas avec et sans régulation des données
Tableau 26.

	S1	S2	S3	S4
Avant régulation	40	52	87	91
Après régulation	55	54	91	105

Tableau 26 : Pourcentage d'erreur entre les deux cas avec et sans régulation des données interpolé par l'inverse distance anisotropique

Dans les quatre cas de sondage, la valeur du pourcentage d'erreur est plus petite pour le cas avant régularisation des données. La cause est peut être les nouvelles valeurs attribuées aux points de données qui font que cette erreur deviennent plus grande.

Notre choix final dans le cas de l'interpolation de la résistance de pointe est la méthode de l'inverse distance anisotropique sans régularisation des données.

La modélisation en 3D de la résistance de pointe avec la méthode inverse distance anisotropique sans la régularisation des données est affichée dans la **Figure 93**.

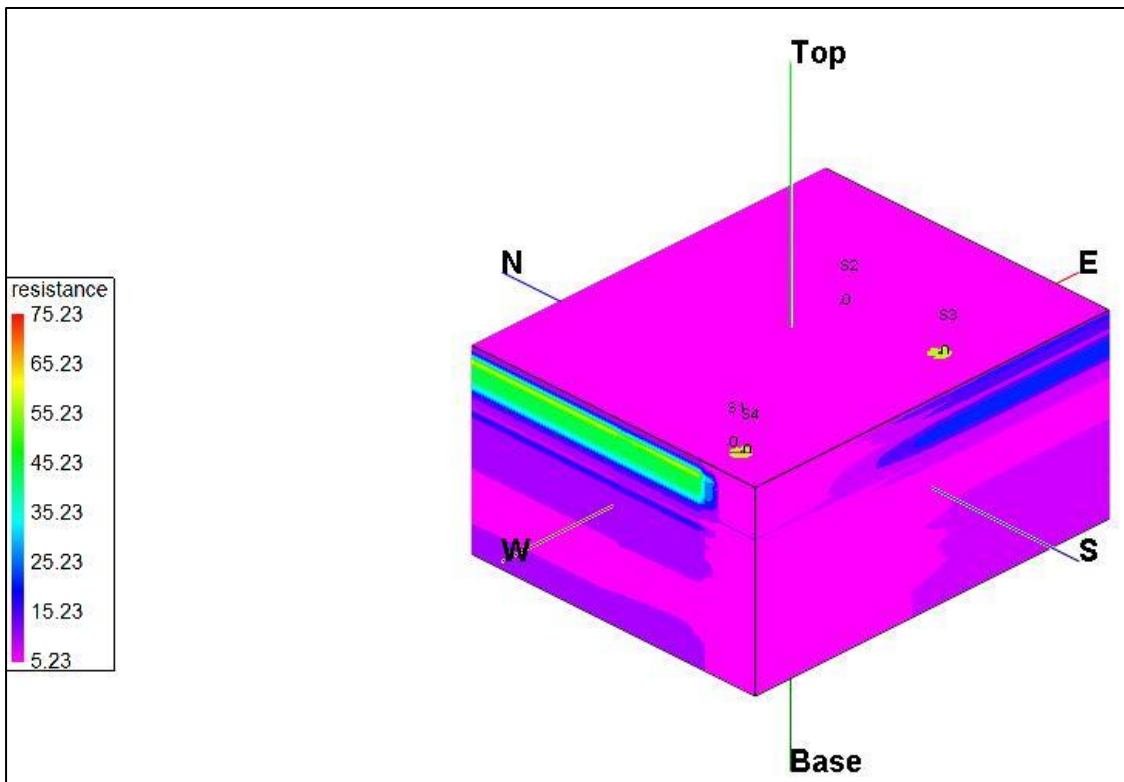


Figure 93 : Modélisation en 3D de la résistance de pointe avec la méthode inverse distance anisotropique sans la régularisation des données

2.2.4. Conclusion

Dans les deux méthodes on remarque l'existence de l'effet œil de bœuf induit par la méthode inverse distance. Mais dans le cas isotropique les valeurs prises par les cercles concentriques sont beaucoup plus grandes que celle de la méthode anisotropique. Ce qui fait que l'erreur entre les valeurs estimées et les valeurs réelles par la méthode isotropique est inférieur à celle commise par la méthode isotropique.

L'ajout d'un sondage a un impact considérable sur la valeur de l'erreur. Dans le cas de l'interpolation anisotropique, il faut avoir au moins deux sondages par ligne perpendiculaire. Ceci permettra d'avoir une bonne répartition de la surface. Pour la méthode isotropique les valeurs aberrantes se trouvent dans les cercles autour des points de données. Un nombre assez élevés et une répartition uniforme des données permettront de régler le problème.

Dans notre cas, comme on a un nombre très limité de sondages on va opter pour la méthode d'interpolation par inverse distance anisotropique. Pour que la méthode soit performante on veillera à choisir au moins deux points par ligne perpendiculaire du terrain.

Il est à noter également que l'analyse des résultats avec la régularisation des données nous a permis de conclure que cette méthode donne des erreurs beaucoup plus grandes que sans la régularisation. Cette étude nous a permis de conclure que dans ce cas de figure la régularisation n'est pas recommandée.

Conclusion générale

Ce rapport permet de faire un bilan des travaux effectués au cours de ce stage. Il présente les résultats du modèle de terrain à partir des essais effectués et les orientations vers de prochaine étude.

Les deux essais utilisés sont les essais Panda et géoendoscope. Ce sont des essais in situ qui ont la caractéristique d'être peu encombrant, léger, facile à emporter et à réaliser.

Les résultats obtenus à partir de ces deux essais nous ont permis par interpolation d'obtenir la stratigraphie du terrain naturel. L'essai pénétromètre Panda nous a également permis d'avoir un modèle de la résistance de pointe. L'analyse et l'interprétation des résultats ont mené à l'utilisation de la méthode « inverse distance » pour interpoler les sondages.

Cette méthode a l'avantage de convenir aux cas où le nombre de données est limité. Son inconvénient principal est l'influence des valeurs limites (maximales ou minimales) sur les résultats. Il faut dans le cas de la présence de valeurs limites s'assurer par un autre essai de ces valeurs afin d'éviter de fausser les résultats.

Les modèles de stratigraphie et de résistance de pointe ainsi obtenus vont permettre en faisant une analogie avec la perméabilité des couches (obtenue par les modèles de stratigraphie) et degré de compactage (obtenue par les modèles de résistance de pointe) d'avoir un modèle de la perméabilité du terrain naturel.

Cette méthodologie de travail permettra de palier aux problèmes rencontrés lors de l'utilisation des méthodes d'estimation de la conductivité hydraulique (présentées dans la bibliographie) à savoir le caractère local de la mesure, la difficulté de réalisation de l'essai, le temps. On pourra ainsi grâce aux deux essais avoir un modèle 3D du terrain.

Les perspectives futures seront :

- De pouvoir avoir une base de données informatisée incluant pour chaque type de sol la conductivité hydraulique correspondante.
- D'informatiser l'impact de la résistance de pointe sur la conductivité hydraulique.

Ainsi si on entre les données des stratigraphies ponctuelles et les résistances de pointe on pourra avoir un modèle de la conductivité hydraulique du terrain.

Références bibliographiques

[A]

[Amr96]

Etude de l'infiltration dans les sols fins non saturés. Thèse de doctorat à l'institut national polytechnique de lorraine présentée par Nadia Amraoui en 1996.

[Aus02]

Intermittent filtration of wastewater-removal of fecal coliform and fecal streptococci. Water Research 36. Ausland, G., T. K. Stevik, J. F. Hanssen, J. C. Kohler et P. D. Jenssen. 2002.

[B]

[Bea05]

"Temporal changes in hydraulic conductivity of sand porous media biofilters during wastewater infiltration due to biomat formation." Journal of Hydrology. Beach, D. N. H., J. E. McCray, et al. (2005).

[Bom03]

Removal of fish pathogenic bacteria in biological sand filters. Water Research 37. Bomo, A. M., A. Husby, T. K. Stevik et J. F. Hanssen. 2003.

[Bos11]

Cours à l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques Département Positionnement Terrestre et Spatial Année Scolaire 2011-2012 Pierre Bosser.

[Bou09]

Diagnostic en place et prévision de l'évolution d'un système d'assainissement non collectif. Thèse de doctorat à l'Université Blaise Pascal – Clermont II présentée par Fathe Bouteldja.

[Bre99]

Caractérisation endoscopique des milieux granulaires couplée à l'essai de pénétration. Thèse de doctorat à l'Université Blaise Pascal – Clermont II Pierre BREUL en 1999.

[C]

[Cam76]

Soil bacterial changes as affected by growing season weather conditions: a field and laboratory study. Canadian Journal of Soil Science 56. Campbell, C. A. et V. O. Beiderbeck. 1976.

[Cha99]

Références bibliographiques

Reconnaissance automatique de couches et caractérisation des matériaux de remblais à partir du signal PANDA, rapport interne LERMES Clermont-Ferrand, juin 1999. Chaigneau L.

[Cha07]

Chaubaud S. 2007. Influence du biofilm sur les performances d'un système de traitement par infiltration dans le sol : application sur l'assainissement non collectif. Thèse de doctorat. Université de Nantes, faculté des sciences et techniques.

[Cho97]

Chocat B. 1997. Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Edition Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

[D]

[Dul92]

Dullien F.A.L., Porous media, fluid transport and pore structure, 2nd edition, Academic Press, 1992.

[G]

[Ger84]

Microbial pollutants: their survival and transport pattern to groundwater. In B. a. G. Editors (ed.), Groundwater Pollution Microbiology. Wiley, New York. Gerba, C. P. et G. Bitton. 1984

[Ger75]

Fate of waste water bacteria and virus in soil. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE 101. Gerba, C. P., G. Wallis et J. L. Melnick. 1975.

[Gou82]

Gougoussis, C. 1982. Assainissement individuel et aptitude des sols à l'élimination et à l'épuration des effluents domestiques Document du BRGM.

[Gui08]

Interpolations, courbes de Bezier et B-Splines Travail de Maturité réalisée au Lycée Blaise-Cendrars sous la direction de Jean-Bernard Mathey par Thomas Guillod 34, Janvier 2008

[H]

[Hil71]

Hillel D. 1971. Soil and Water: Physical Principles and Processes. Edité par Kozlowski T. T. University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, Academic Press. Inc., NewYork .

[Hor89]

K. HORNIK, M. STINCHCOMBE, H. WHITE, "Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators", Neural Networks Vol. 2,1989

Références bibliographiques

[J]

[Jew95]

Bacterial transport in laboratory columns and filters: influence of ionic strength and pH collision efficiency. Jewet, D. C., T. A. Hilbert, B. E. Logan, R. G. Arnold et R. C. Bales. 1995.

[L]

[Le Bih00]

Monitoring biofilter clogging: biochemical characteristics of the biomass. Le Bihan, Y. et P. Lessard. 2000.

[M]

[Mur95]

Murray E.J. 1995. Prediction of permeability of granular materials. Unbound aggregates in roads 4, University of Nottingham.

[Mus91]

Musy A., Soutter M. 1991. Physique du sol, CH-1015 Lausanne, collection META.

[N]

[Nas01]

Contribution of microbial activity to virus reduction in saturated soil. Water Research 36. Nasser, A. M., R. Glozman et Y. Nitzan. 2001.

[NF X 30-418]

Détermination de la perméabilité d'une formation géologique en place, de matériaux rapportés, ou artificiellement reconstitués : infiltromètre à anneau, de type ouvert. 1998

[NF X 30-420]

Détermination de la perméabilité d'une formation géologique en place, de matériaux rapportés, ou artificiellement reconstitués : infiltromètre à anneau de type fermé. 1999

[NF X 30-423]

Détermination du coefficient de perméabilité d'un terrain par essai à charge variable, en chambre ouverte (« slug test »). 2001

[NF X 30-424]

Détermination du coefficient de perméabilité d'un terrain par essai d'infiltration à charge constante en forage fermé. 2002

Références bibliographiques

[NF X 30-425]

Détermination du coefficient de perméabilité d'un terrain par essai à charge variable, en chambre fermée (« pulse test »). 2001

[NF X 30-442]

Détermination au laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau : essais de perméabilité à charge hydraulique constante ou variable. 2002

[NF X 94-105]

Contrôle de la qualité du compactage Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable, Principe et méthode d'étalonnage du pénétromètre, Exploitation des résultats, Interprétation. 2000

[P]

[Pai93]

Comparison of three methods for assessing soil hydraulic properties. Soil Society.

[Pun01]

Seasonal pathogen removal by alternative on-site wastewater treatment systems. Water of Environmental Research 73. Pundsack, J., R. Axler, R. Hicks, J. Henneck, D. Nordman et B. McCarthy. 2001.

[R]

[Re93a]

Reynolds, W. D. 1993a. Saturated Hydraulic Conductivity: Laboratory Measurement. Soil Sampling and Methods of Analyses. Canadian Society of Soil Science.

[Re93b]

Reynolds, W. D. 1993b. Saturated Hydraulic Conductivity: Field Measurement. Soil Sampling and Methods of Analyses. Canadian Society of Soil Science.

[Ren89]

Reneau, R. B., C. Hagedorn et M. J. Degen. 1989. Fate and transport of biological and inorganic contaminants from on-site disposal of domestic wastewater. Journal of Environmental Quality.

[S]

[Sed11]

Caractérisation de la perméabilité des matériaux à l'écrasement » présenté par Sedik Rezika en novembre 2011. Thèse de doctorat à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Références bibliographiques

[Sél02]

Elimination des micro-organismes par filtration en écoulement insaturé dans le cadre de l'assainissement autonome. Thèse de doctorat. Université de Nantes. Sélas, B. 2002.

[Ste04]

Retention and removal of pathogenic bacteria in wastewater percolating through porous media: a review. Water Research 2004. Stevik, T. K., K. Aa, G. Ausland et J. F. Hanssen. 2004.

[Y]

[Yat88]

Modeling microbial fate in subsurface environment. Critical Reviews Environmental Controls 17. Yates, M. V. et S. R. Yates. 1988.