



Année Universitaire : 2015-2016



Master Sciences et Techniques : Géorressources et Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

*Etude d'avant-projet par la méthode géophysique avec
caractérisation géologique et géotechnique : Cas du barrage
Fask (Guelmim, Maroc)*

Présenté par :

KHALIL AZENNOUD

Encadré par :

- Mr A. BAKIZ, LPEE

- Mr A. EL GAROUANI, FST-Fès

Soutenu le 16 Juin 2016 devant le jury composé de :

- | | | |
|----------------------|------------------|-------------------|
| - Mme. N. RAIS | Pr. à la FST-Fès | Président du jury |
| - Mr. R. JABRANE | Pr. à la FST-F | Examineur |
| - Mr. A. EL GAROUANI | Pr. à la FST-Fès | Encadrant |

Stage effectué à : Laboratoire Public Des Essais et Des Etudes (LPEE), Casablanca



REMIRCIEMENT :

*Avant d'exposer les résultats de mes recherches, il m'est très agréable d'exprimer mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont aidé à les mener à bien ou qui me font l'honneur de les juger. Je tiens tout d'abord à remercier mon encadrant de stage Mr **A. BAKIZ**, ingénieur géologue et géophysicien au Laboratoire Public Des Essais et Des Etudes à Casablanca, qui a suivi avec un grand intérêt l'avancement de mes travaux et m'a fait bénéficier de ses directives et ses idées tout au long de ce travail, sans lui je n'aurais jamais pu poursuivre ce stage et accomplir la mission de terrain dans les bonnes conditions, un grand merci adressé à vous cher ingénieur. Je lui adresse ici ma profonde reconnaissance, Mr. **A. EI GAROUANI**, mon encadrant à la faculté des sciences et techniques de Fès, qui a largement contribué à la réalisation de ce travail, en lui formulant mon profond respect et mes sincères remerciements. J'adresse mes vifs remerciements en lui formulant mon profond respect et mes sincères gratitudes **Mdm. N. RAIS**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques, qui m'a honoré en acceptant de présider le Jury de mémoire. Sa présence parmi les membres du Jury me fait un très grand honneur, je le remercie vivement et je lui adresse tous mes respects, Mr. **R. JABRANE**, Professeur à la faculté des Sciences et Techniques, qui a bien voulu examiner ce travail. Mr. **L. BENABIDATE**, Professeur à la Faculté des sciences et techniques à Fès et coordinateur du master GéoRessources et Environnement, je lui adresse mes sincères remerciements et tous mes respects de par ces précieuses efforts qu'ont contribué, au sens propre du terme, à la réussite de ce master, merci professeur. Egalement je tiens à remercier vivement Mr **LAHRACH**, chef de département de la Géologie pour tous ces appréciables efforts, merci professeur.*

*Je remercie aussi Monsieur **KALAI**, Chef de la division géophysique géologie de l'ingénieur et hydrogéologie au LPEE, pour la confiance qu'il a accordée en me proposant ce sujet et pour ses conseils et ses remarques pertinentes qui m'ont beaucoup aidé dans mon travail. Je tiens à remercier vivement **A. BOUBLAL** ingénieur adjoint à LPEE pour son aide et son soutien tout au long de mon stage.*

*Enfin je tiens à remercier tous mes professeurs de Département de la géologie à la Faculté Des Sciences Et Techniques Fès : Mr **Y. GHFIR**, Mr **S. HINAJE**, Mr **M. CHARROUD**, Mr **CHAOUNI**, Mr **D. EI AZZAB**, Mr **M. BENABDELHADI**, pour leurs efforts consentis lors de ma formation en Licence et notamment en Master, j'ai appris tellement de notions grâce à vous mes chers docteurs, j'avais l'honneur d'être votre étudiant. De nombreux collègues et ami(e)s de ma promotion du Master GRE m'ont également apporté leur aide et leur soutien permanent durant toutes ces deux années en Master. Trop nombreux pour être cités ici, je leur adresse mes sincères remerciements. Je tiens également à exprimer mon affectueuse reconnaissance envers ma famille, à l'âme de mon père qui m'a quitté sans voir le fruit de son éducation, lui qui m'a transmis l'amour de vivre, l'amour de sacrifice et celui de continuer à donner sans limite, à ma mère qui me donne en permanence le vrai sens d'amour, mes deux frères, mes oncles, mes tentes, mes cousins et cousines, vous êtes ma fierté.*

A tous ceux avec qui j'ai partagé les plus beaux moments de ma vie. Veuillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon amour et de ma reconnaissance.

I. Table des matières

Introduction Générale

Chapitre 1 : Présentation de la région d'étude

II. Objectif Et Méthodologie :	10
A. Objectif Du Projet :	10
B. Méthodologie Et Base De Données :	10
III. Généralité sur la zone d'étude (plaine de Guelmim):	11
A. Hydroclimatologie :	11
1. Données Climatiques :	11
2. Données hydrologiques :	13
B. Géologie :	15
1. Introduction :	15
2. Structure de la zone d'étude :	15
3. Lithostratigraphie (plaine de Guelmim):	17
C. Hydrogéologie :	20

Chapitre 2 : Travail de terrain et Evaluation des Paramètres Géotechniques

I. Présentation du Programme de l'Etude :	Erreur ! Le signet n'est pas défini.
A. Situation du site d'ouvrage :	23
B. Approche de l'étude :	24
II. Approche Géologique : mesures et appréciation :	27
A. Géomorphologie du site :	27
B. Géologie : mesures et levés structuraux, Cartographie géologique :	28
C. Sondage carottés :	33
III. Approche Géotechnique :	40
A. Intérêt de la géotechnique :	40
1. Essais Au laboratoire : (Essais sur Sols/Roches)	40
2. Essais et mesures in-situ :	41
B. Essai Pressiométrique : Principe et Résultats :	42
1. Principe et Appareillage : Norme : NF P 94-110-1	42
2. Expression des résultats :	45
3. Résultats et discussion:	47

Chapitre 3 : Etude Par Sismique Réfraction : Acquisition, Traitement et Interprétation

I. Théorie de la sismique réfraction:	49
A. Principe de la méthode :	49
B. Théorie et calcul :	52
II. Sismique Réfraction : acquisition :	55
III. Sismique Réfraction : traitement :	58
A. Pickwin : lecture et pointage des enregistrements bruts	58
B. Plotrefa : calcul des dromochroniques et des épaisseurs :	59

IV. Sismique Réfraction : Résultats et Interprétation :	62
A. Profil en long : PS1	63
B. Profils en travers : PS6, PS7 et PS8 :	66
1. Profil sismique PS1	66
2. Profil sismique PS7	69
3. Profil PS8 :	70
Conclusion :	

Liste des figures

Figure 1 : situation géographique de la zone d'étude	8
Figure 2 : Provinces du bassin hydraulique du Guelmim (ABHSMD, 2010)	11
Figure 3 : Pluies moyennes mensuelles du Bassin de Guelmim (PDAIRE, 2010)	12
Figure 4 : Vue générale du bassin de Guelmim (ABHSMD)	14
Figure 5 : carte géologique simplifiée du bassin de Guelmim	16
Figure 6 : Coupe géologique à l'ouest de la zone d'étude (ABHSMD 2010)	16
Figure 7 : Coupe géologique au centre du la zone d'étude (Agence du Sud, 2006)	17
Figure 8 : log litho-stratigraphique schématique du bassin de Guelmim (Oliva ,1972)	19
Figure 9 : carte géologique simplifiée du bassin de Guelmim	20
Figure 10 : les différentes aquifères trouvés sous la plaine de Guelmim avec	21
Figure 11 : Situation des forages et sources des formations d'âge Cambrien	22
Figure 12 : Situation géographique de l'ouvrage	24
Figure 13 : plan de reconnaissances à réaliser	25
Figure 14 : vue satellitaire de la zone du barrage avec l'aspect sinueux du cours d'eau principal	28
Figure 15 : illustration photographique montrant la mesure du pendage du grès quartzeux	29
Figure 16 : illustration photographique montrant la fracturation et la mesure des paramètres structuraux (direction et pendage)	30
Figure 17 : mécanisme d'apparition de fractures de décompression dues à l'érosion	31
Figure 18 : mise en place des fractures de la famille I	31
Figure 19 : carte géologique locale de l'axe du barrage à 1/2500	32
Figure 20 : illustration photographique montrant la sondeuse	33
Figure 21 : principaux types de couronnes	34
Figure 22 : illustration photographique montrant les carottes	35
Figure 23 : colonne stratigraphique correspondant au SV5	36
Figure 24 : colonne stratigraphique correspondant au SV7	37
Figure 25 : colonne stratigraphique correspondant au SV9	38
Figure 26 : corrélation des trois sondages : SV5, SV7 et SV9	39
Figure 27 : schéma simplifié du dispositif "Pressiomètre Ménard"	43
Figure 28 : La sonde se compose de trois partie	44
Figure 29 : illustration photographique de la cellule centrale (cellule de mesure)	44
Figure 30 : Illustration photographique du contrôleur volume pression : CPV	45
Figure 31 : Courbe brute obtenue en reportant les mesures à 30 et 60 sec en fonction du temps	45
Figure 32 : Courbes pressiométriques : J. Costet et al, Cours pratiques de Mécanique des sols	46
Figure 33 : transformation de la courbe corrigée (en haut) en une courbe préssiométrique (au milieu) et une courbe de fluage (montrée en bas) pour déterminer graphiquement la préssion de fluage (pf) et la pression limite (pl)	47
Figure 34 : résultats de l'essai pressiométrique SP2 avec corrélation à la lithologie	48

Figure 35 : différents types des ondes sismique.....	50
Figure 36 : principe de l'acquisition sur terrain	51
Figure 37 : principe de la sismique réfraction.....	51
Figure 38 : différentes sources d'ébranlement.....	52
Figure 39 : capteur sismique, géophone.....	52
Figure 40 : Exemple de répartition des vitesses.....	Erreur ! Le signet n'est pas défini.
Figure 41 : rapport entre les différentes ondes sismiques et leurs hodochrones équivalents.....	53
Figure 42 : cas de deux couches séparées par un réflecteur incliné.....	54
Figure 43 : illustration photographique montrant l'implantation des géophones.....	55
Figure 44 : illustration photographique de l'appareil de mesure.....	56
Figure 45 : illustration des enregistrements correspondants à chaque tir : un exemple d'une base sismique situé sur le profile PS1 (situation sur le plan d'implantations fig.13 et 48) .	57
Figure 46 : illustration des étapes à effectuer lors du pointage via Pickwin.....	59
Figure 47 : illustration des étapes à effectuer via Plotrefa : exemple d'une base sismique située sur le profile PS1	61
Figure 48 : illustration du model final avec 3 couches : cas d'une base sismique située dans le profile PS1	62
Figure 49 : plan de profils réalisés à présent avec ceux choisis pour le traitement : PS6, PS7, PS8 et PS1 qui correspond à l'axe de l'ouvrage.....	63
Figure 50 : coupe géosismique correspondante au profil sismique PS1.....	64
Figure 51 : calage de la coupe géosismique correspondante au PSA avec les sondages carottés SV5, SV7 et SV9 (les sondages sont à l'échelle avec la coupe).....	65
Figure 52 : coupe géosismique finale avec les dromochroniques équivalents.....	67
Figure 53 : calage de la coupe géosismique correspondante au PS6 avec le sondage SV5	68
Figure 54 : coupe géosismique avec les dromochronique équivalents à chaque tir correspondant au PS7.....	69
Figure 55 : calage de la coupe géosismique correspondante au PS7 avec le sondage SV7	70
Figure 56 : coupe géosismique correspondant au PS8.....	71
Figure 57 : calage de la coupe géosismique correspondante au PS8 avec le sondage SV9	72

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Précipitations moyennes mensuelles du bassin de Guelmim (ABHSMD, 2010).....	12
Tableau 2 : Paramètres statistiques des précipitations annuelles (ABHSMD, 2010).....	13
Tableau 3 : Evaluation des apports moyens annuels ; source : plan de direction d'aménagement des eaux des bassins sud atlasique	15
Tableau 4 : coordonnées des sondages carottés à réaliser.....	25
Tableau 5 : coordonnées des sondages pressiométriques à réaliser.....	25
Tableau 6 : coordonnées des profils sismiques	26

Introduction Générale :

Présentation de la problématique :

Afin de combler le déficit en alimentation en eau potable et mobiliser les ressources hydriques nécessaires pour l'irrigation et lutter contre les inondations dans les provinces de Guelmim et Sidi Ifni, 7 nouveaux barrages seront réalisés par le ministère chargé de l'eau. Pour les 2 grands barrages de Fask et Assaka, l'objectif est la mobilisation des eaux superficielles pour renforcer l'adduction d'eau potable de la ville de Guelmim, la recharge artificielle de la nappe et l'irrigation des terres agricoles. Pour les petits et moyens barrages, l'objectif est la protection de la ville de Guelmim contre les inondations et la recharge artificielle de la nappe.

Selon la délégation régionale de l'Agence du bassin hydraulique de Souss-Massa-Drâa à Guelmim, la réalisation de ces ouvrages va permettre de sécuriser l'alimentation en eau potable, d'accompagner les projets de développement lancés dans les différentes provinces de la région, et d'atténuer les impacts liés à l'irrégularité des précipitations. Les coûts estimatifs de ces barrages qui sont en cours d'étude ou actualisation de l'étude sont de 800 millions DH pour le barrage de Fask et plus d'un milliard DH pour Assaka. Pour les autres petits et moyens barrages les coûts varient de 25 à 40 MDH (Ministère Délégué Chargé de l'Eau). La réalisation de ces ouvrages commencera à partir de l'année 2017. Ce présent manuscrit sera consacré pour le barrage Fask.

Localisation du site de l'ouvrage

Le barrage Fask serait situé sur l'oued Seyyad à environ 30 Km vers l'Est de la ville de Guelmim (fig.1). On l'emprunte à partie de la route nationale N°12 via Guelmim-Fask. Il est pour coordonnées Lambert :

- *Rive gauche* : $X = 74\ 000$; $Y = 225\ 000$
- *Rive droite* : $X = 75\ 000$; $Y = 227\ 000$



Figure 1 : situation géographique de la zone d'étude

 **Réponses de l'ouvrage aux ambitions cherchées :**

Etant donné le système d'irrigation par épandage des eaux de crues déjà pratiqué en aval du site de ce barrage, il serait envisagé surtout pour la fonction d'écêtement des crues en vue d'augmenter la durée de dérivation, et par conséquent des volumes dérivés au niveau des périmètres d'épandage des eaux de crue situés à son aval qui totalisent une superficie de 10400 ha.

Le barrage permettra également la protection des agglomérations, infrastructures et ouvrages existants à son aval contre les inondations causées par les crues violentes de l'oued Seyyad, dont **le débit de pointe de la crue centennale est estimé à 2200 m³/s.**

Le projet de barrage Fask permettra de créer une retenue de 30 millions de mètres cubes. Le coût du projet est estimé à 800 millions de dirhams. Malgré un ratio avantages/coûts très faible, ce barrage a été retenu par le plan car il permet d'augmenter substantiellement le volume dérivé dans les périmètres qu'il domine (11,4 Mm³/an en moyenne).

Chapitre I: Présentation de la Région d'Etude

II. Objectif Et Méthodologie :

A. Objectif Du Projet :

L'établissement de tout projet de construction nécessite une étude géophysique et géotechnique approfondie du terrain permettant de définir parfaitement le type de fondation qui assurera la stabilité générale de l'ouvrage et empêchera les tassements différentiels pouvant créer la ruine ou l'effondrement de la construction. Pour cela, il faut déterminer :

- *La nature des couches sur une profondeur suffisante au droit de la zone à construire ;*
- *Les caractéristiques du terrain, soit « in-situ » par les méthodes géophysiques ou essais géotechniques, soit en laboratoire sur des échantillons intacts prélevés par sondages.*

C'est pour cette raison qu'une investigation géophysique a été réalisée afin d'obtenir un profil du rocher enfoui et connaître l'épaisseur des différentes couches de dépôts meubles et la profondeur du substratum sur le quel sera construit l'assise du barrage afin de trancher entre les deux axes possibles du barrage (l'axe amont et l'axe Aval). Elle a été combinée avec une étude géotechnique dont le but est de confirmer les résultats de la reconnaissance géophysique et d'obtenir des paramètres permettant la réutilisation du remblai de la zone d'emprunt dans la construction du barrage.

B. Méthodologie Et Base De Données :

Dans le cadre de ce présent travail une étude scindée en trois parties est réalisée :

Première étape : une étude bibliographique concernant le site de construction qui vise à définir le contexte régional conduisant ainsi à mieux cerner les différents aspects du sujet, et de mieux comprendre la région où se situe notre site.

Deuxième étape : cette étape implique la visite du site et le déclenchement de la prospection géophysique (par sismique réfraction), le levé des différentes structures géologiques aux voisinage du site (cartographie du terrain) en procédant aussi bien à l'observation à l'œil nu qu'à la description des carottes (issus de sondages carottés) ainsi qu'une caractérisation géotechnique détaillée par un essai in-situ typique, Pressiomètre de Ménard.

Troisième étape : en fin, la dernière approche consiste, quant à elle, en une interprétation finale en terme de faisabilité du présent projet. Pour cela, il est jugé opportun de caler les résultats des

essais géotechniques avec celles de la prospection géophysique tout en gardant sur l'image la description géologique détaillée du terrain (résultats de la cartographie géologique).

III. Généralité sur la zone d'étude (plaine de Guelmim):

L'ensemble du bassin versant de Guelmim correspond aux bassins versants des oueds Assaka, Bouissafen et Aoréora. Sa superficie est d'environ 10000 km². Sur le plan administratif, la plus grande partie de l'unité de Guelmim est située dans la province de Guelmim. Seule la frange Nord du bassin Assaka déborde sur la province de Tiznit (fig.2).

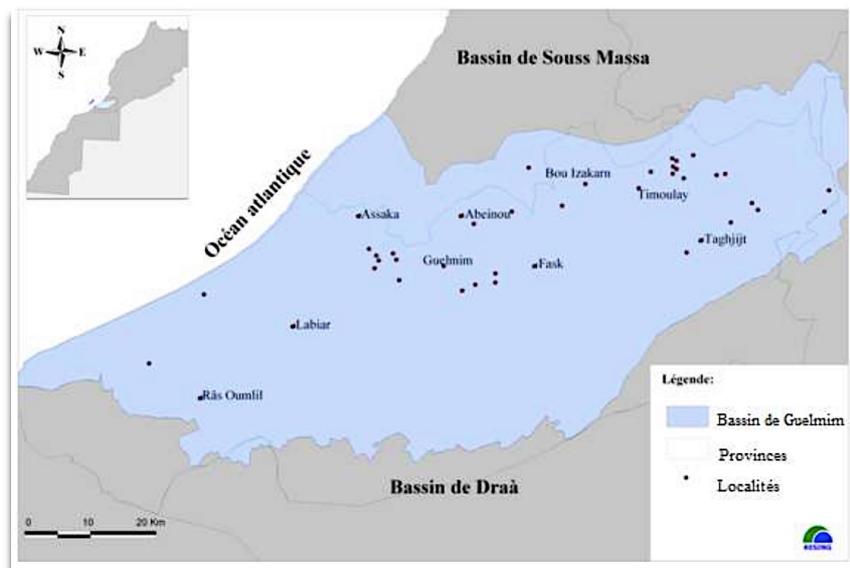


Figure 2 : Provinces du bassin hydraulique du Guelmim (ABHSM, 2010)

La plaine de Guelmim est connue par l'importance de l'épandage des eaux de crues, grâce à plusieurs facteurs naturels favorables (lits des oueds faiblement encaissés, abondance des terres de bonne qualité, topographie plane et régulière). Durant ces dernières années, l'activité agricole a connu un développement important avec l'augmentation des superficies irriguées par pompage, qui dépassent 2 000 ha, ce qui entraîne une hausse de la demande en eau. Les superficies irriguées y compris celles irriguées par les eaux de crue dépassent 35 000 ha dont 12 % irriguées de façon pérenne. L'agriculture et l'élevage constituent la principale ressource économique de la région ; plus de 60% de la population vit grâce à cette activité.

A. Hydroclimatologie :

1. Données Climatiques :

La zone d'étude est caractérisée par une aridité sévère, en raison de la présence de la chaîne du Haut Atlas faisant obstacle aux perturbations pluvieuses en provenance du Nord. Malgré la latitude, la proximité de l'océan atlantique atténue l'effet de la continentalité saharienne pour

la partie proche de l’océan. Les vents sont très fréquents provoquant des accumulations sableuses de différentes formes.

a) Précipitations :

Les moyennes mensuelles montrent que la saison des pluies s’étale d’Octobre jusqu’à Avril en général, elle représente plus de 3/4 des précipitations annuelles, avec une moyenne maximale au mois de Décembre de 25mm (Tab.1). La pluviométrie moyenne annuelle est de l’ordre de 95 mm à Guelmim, mais avec une irrégularité aléatoire très importante, entre 15 mm et 300 mm. Il pleut entre 5 jours et 15 jours par an.

Tableau 1 : Précipitations moyennes mensuelles du bassin de Guelmim (ABHSM, 2010)

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout
Assaka		4.88	11.93	24.32	33.92	37.74	23.74	21.73	8.55	4.28	1.42	0.62
Taghjijt	6.30	9.66	19.47	33.40	14.72	27.14	19.33	4.08	3.11	1.21	2.29	5.87
Ain Errahma	2.17	20.06	7.65	21.89	20.92	13.36	19.22	16.63	6.00	2.50		12.00
Bouizakarne	5.51	10.47	17.74	27.02	30.30	22.35	14.49	8.56	1.35	0.08	0.18	1.67
Guelmim	4.88	10.26	17.32	24.94	16.15	15.15	13.01	6.01	4.08	0.32	0.06	1.32

La saison sèche comporte fréquemment une série de 4 à 5 mois (Mai– Septembre), les mois de Juin et Juillet sont pratiquement secs (fig.3).

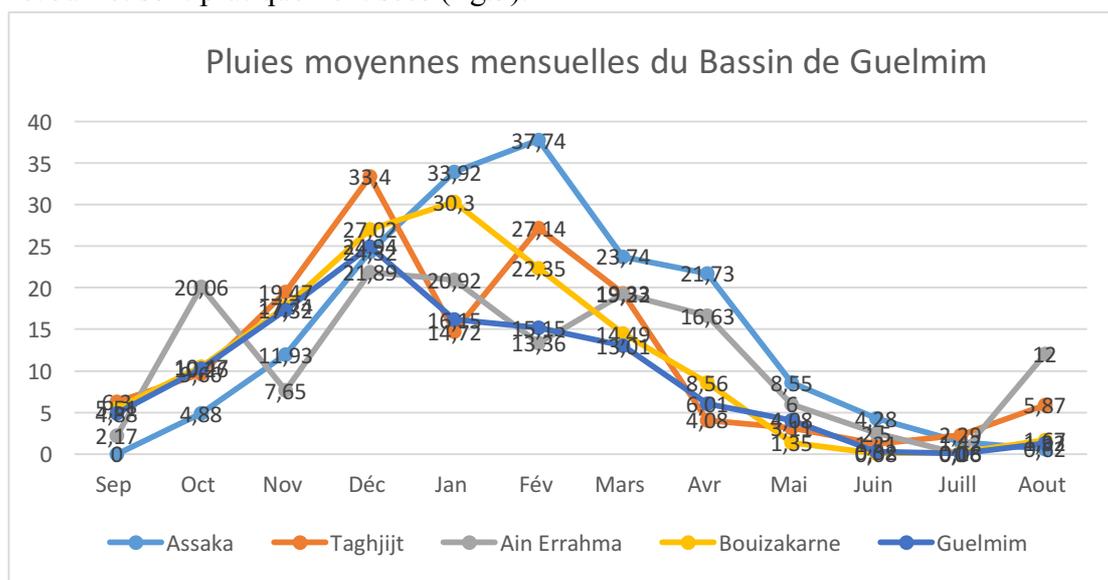


Figure 3 : Pluies moyennes mensuelles du Bassin de Guelmim (PDAIRE, 2010)

A l’échelle interannuelle, le climat du bassin est marqué par la grande amplitude de la variabilité des précipitations. La moyenne des précipitations annuelles varie entre 85 mm pour la station d’Ain Errahma et 139 mm pour celle d’Assaka (Tab.2).

Tableau 2 : Paramètres statistiques des précipitations annuelles (ABHSMD, 2010)

<i>Station</i>	<i>Période</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>E.T</i>
<i>Taghjijt</i>	<i>1985 - 2009</i>	<i>92,49</i>	<i>2,30</i>	<i>238,30</i>	<i>58,24</i>
<i>Guelmim</i>	<i>1936 - 2005</i>	<i>95,18</i>	<i>10,00</i>	<i>230,00</i>	<i>53,94</i>
<i>Assaka</i>	<i>1984 - 2009</i>	<i>139,01</i>	<i>29,00</i>	<i>272,30</i>	<i>71,74</i>
<i>Bouizakarne</i>	<i>1936 - 1989</i>	<i>128,95</i>	<i>9,00</i>	<i>369,00</i>	<i>81,49</i>
<i>Ain Errahma</i>	<i>1992 - 2009</i>	<i>85,26</i>	<i>10,50</i>	<i>320,00</i>	<i>71,25</i>

b) Température :

Selon les résultats de PDAIRE en 2010, la température moyenne mensuelle varie de 15 °C en janvier à 25 °C en Août. Sur les reliefs, les températures peuvent descendre au-dessous de 0°C en hiver, et dépassent les 40°C en été. La température moyenne et l'écart thermique augmentent notablement du Nord-Ouest vers le Sud-ouest, compte tenu de la diminution de l'influence océanique.

La température moyenne annuelle est de l'ordre de 21°C à Guelmim. La moyenne mensuelle maximale atteint 35 à 36°C en Juillet-Août, avec des pointes dépassant 38°C. Les minima descendent à 10° en Janvier-Février, parfois jusqu'à 7°C. La saison chaude pendant laquelle les maxima dépassent 28° dure cinq mois (Juin-Octobre). L'évaporation est très importante dans la région, elle est estimée à 3017 mm /an.

2. Données hydrologiques :

La région de Guelmim comprend trois bassins versants (fig.4)

- *Le bassin versant de l'oued Assaka (le plus grands des trois sous-bassins) qui s'étend sur une superficie totale de 6500 km², constitué par un réseau d'oueds le long desquels il y a plusieurs périmètres d'épandage des eaux de crue. Le réseau hydrographique est composé par 3 sous-bassins versants des oueds principaux suivants : oued Seyyad (le cours d'eau principal de notre barrage en question, Fask), oued Ouerguennoun et oued Oum Al Achar ;*
- *Le bassin versant de l'oued Bouissafen (situé au centre de la carte fig.4) ;*
- *Le bassin versant de l'oued Aoréora.*

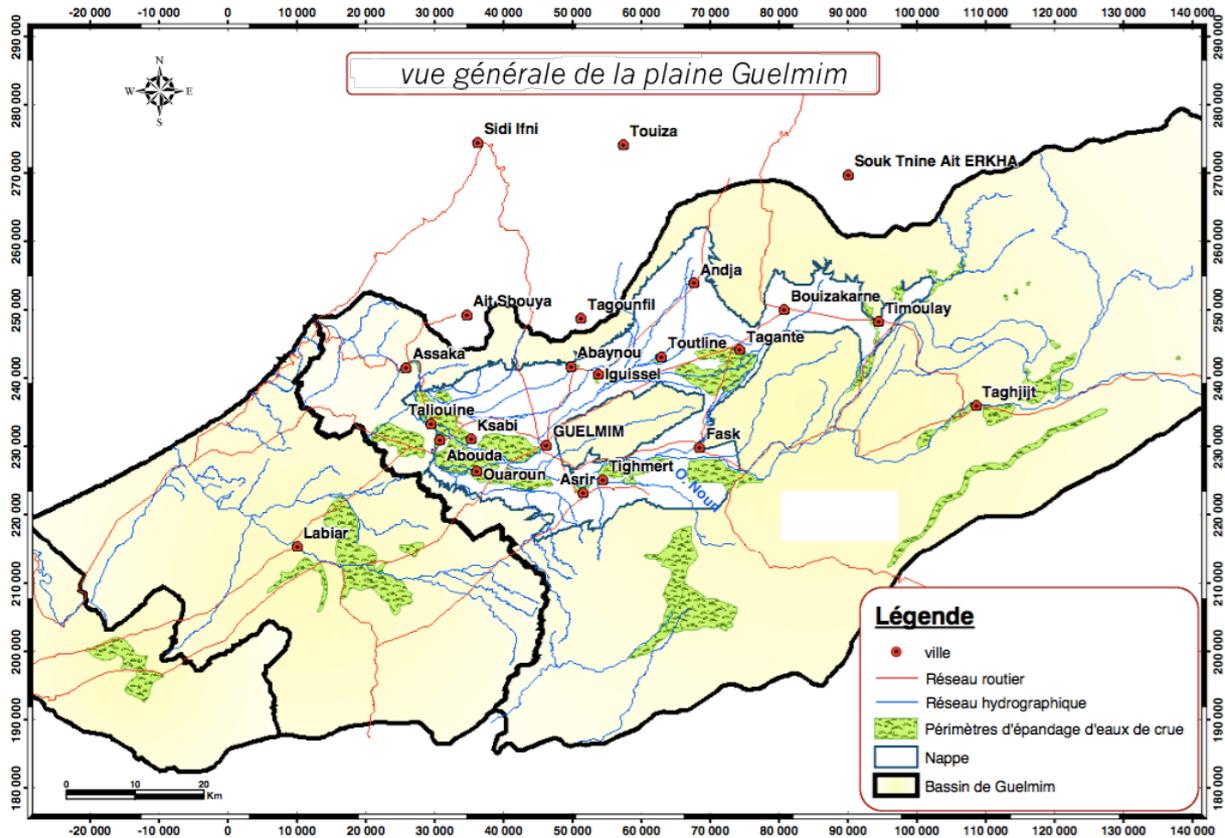


Figure 4 : Vue générale du bassin de Guelmim (ABHSMO)

Vue que l'axe du barrage appartient au bassin d'Assaka, précisément sur l'oued Seyyad, il est jugé opportun alors que la suite ne sera concernée que pour le sous-bassin de l'oued Seyyad (affluent de l'oued d'Assaka).

L'oued Seyyad prend naissance à 1200 m d'altitude sur les versants de l'Anti-Atlas, constitué en majorité de roches imperméables et reçoit de nombreux affluents surtout de rive droite dont les plus importants sont : Kelmt, Tanzizt, Taouimarht, Ben Rhezzou et Oum Laachar. Le bassin Seyyad s'étend sur une superficie de 2920 km² dont 10% en plaine. Il se divise en trois sous-bassins : la partie Nord est drainée par les sous-bassins Kalmt et Ifrane, et la partie Sud est drainée par l'oued Seyyad. L'oued Seyyad et son affluent l'oued drainent un bassin imperméable de faibles précipitations.

A l'exception des écoulements engendrés par les précipitations limitées par le temps et en intensité, les eaux de surface sont rares (tab.3). La qualité des ressources en eau de surface dépend de la nature des terrains traversés et de la durée de contact de l'eau avec les terrains. Ces cours d'eau sont non pérennes et la plupart du temps asséchés pendant la période allant de décembre à mars, leur lit permet le transport des eaux de crues.

Tableau 3 : Evaluation des apports moyens annuels ; source : plan de direction d'aménagement des eaux des bassins sud atlasique

<i>bassin partiel</i>	<i>superficie (Km²)</i>	<i>Ecoulement (Mm³)</i>
<i>de oued Seyyad jusqu'à Taghijjt</i>	<i>1400</i>	<i>14</i>
<i>de Taghijjt à Fask</i>	<i>1060</i>	<i>11</i>
<i>de Fask à Guelmim</i>	<i>460</i>	<i>5</i>
<i>Total</i>	<i>2920</i>	<i>30</i>

D'après les données du tableau ci-dessus, et vue la situation géographique du site du barrage (au voisinage de **Fask**, montrée dans l'introduction du manuscrit), on dirait alors que la somme annuelle qui serait recueillie par le barrage est évaluée à 25 Mm³. C'est une valeur qui est jugée importante vis-à-vis la demande croissante en eau, surtout dans la dernière décennie (suite à la surexploitation de la nappe phréatique que l'on va traiter dans la suite).

B. Géologie :

1. Introduction :

La plaine de Guelmim résulte de l'érosion intense qu'ont subi les formations Anti-Atlasique dans la terminaison sud-ouest de la chaîne, puis du remplissage Plioquaternaire de cette importante dépression.

La chaîne de l'Anti-Atlas est considérée comme des montagnes renfermant des terrains les plus anciens du Maroc. Ils sont constitués d'un matériel ancien d'âge paléozoïque inférieur au Précambrien. Ces formations apparaissent en boutonnières qui correspondent à des bombements du socle cristallin (boutonnières d'Ifni, du bas Darâa, de Kedous etc.).

2. Structure de la zone d'étude :

La structure de la région est sous forme d'un synclinal (fig.6 et7) entouré au Nord, à l'Ouest et au Sud par trois boutonnières anticlinales qui sont Kerdous, Ifni et Jbel Guir. Le cœur du synclinal est représenté par les affleurements de l'Acadien supérieur formé généralement de schistes et dont la partie terminale est constituée de barres quartzitiques qui apparaissent au centre de la plaine au niveau du Jbel Tayert. Les schistes de l'Acadien supérieurs surmontent les calcaires du Géorgien, qui reposent à leur tour sur les terrains anciens du Précambrien. Les schistes qui constituent ainsi, le substratum des dépôts Plioquaternaires, affleurent au niveau des bordures de la plaine de Guelmim où apparaissent aussi les terrains les plus anciens (fig.5). Au niveau de la plaine, les dépôts Plioquaternaire masquent le substratum schisteux de l'Acadien. (GEOATLAS, 1997).

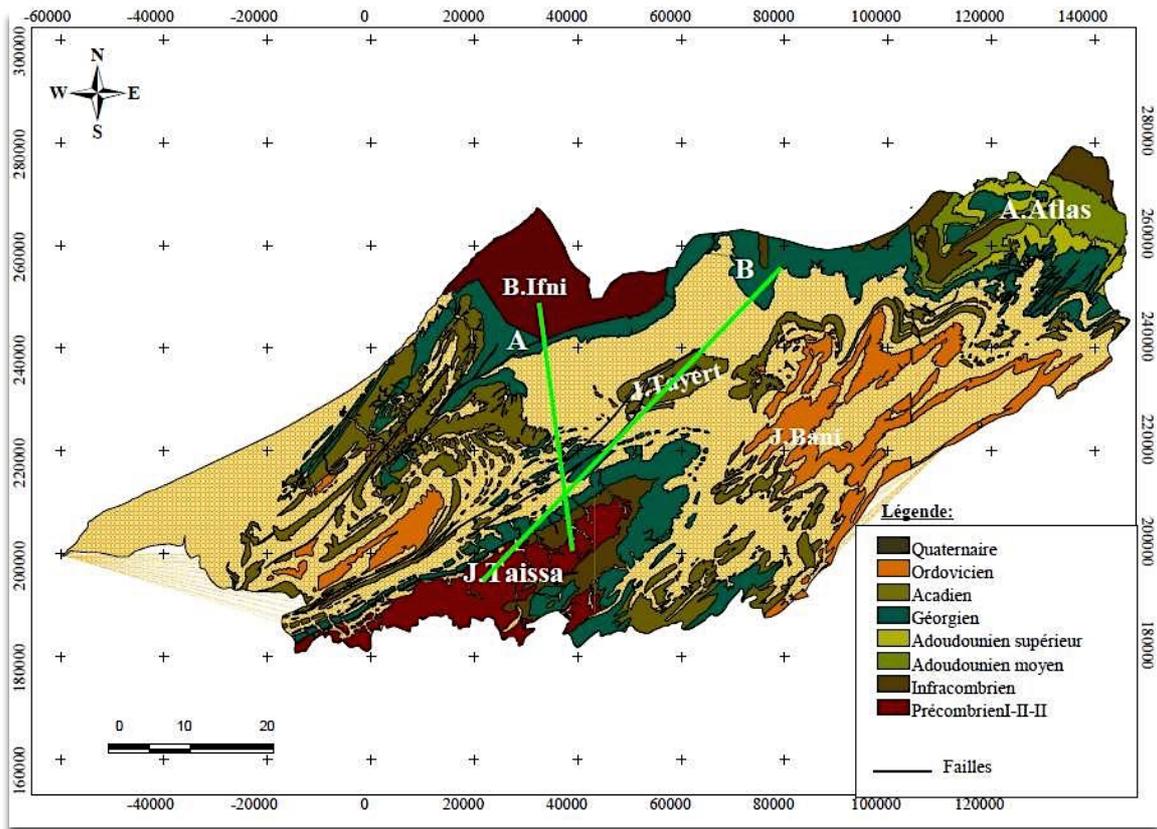


Figure 5 : carte géologique simplifiée du bassin de Guelmim (extraits des : cartes géologiques de Fom El Hassan-Assa et Guelmim-Draa inférieur à 1/200 000, CHOUBERT et al ; 1952)

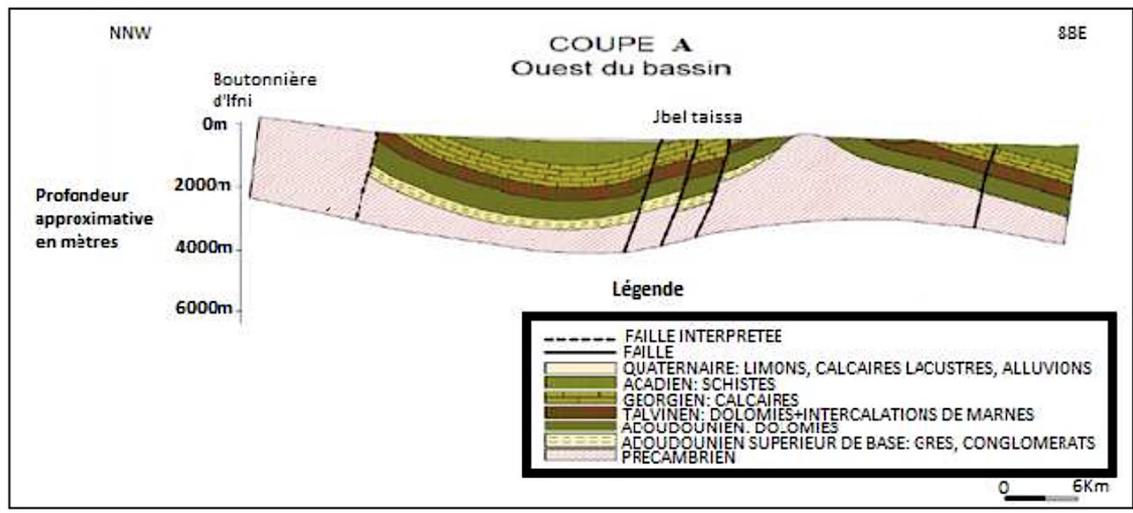


Figure 6 : Coupe géologique à l'ouest de la zone d'étude (ABHSMD 2010), situation sur fig.5

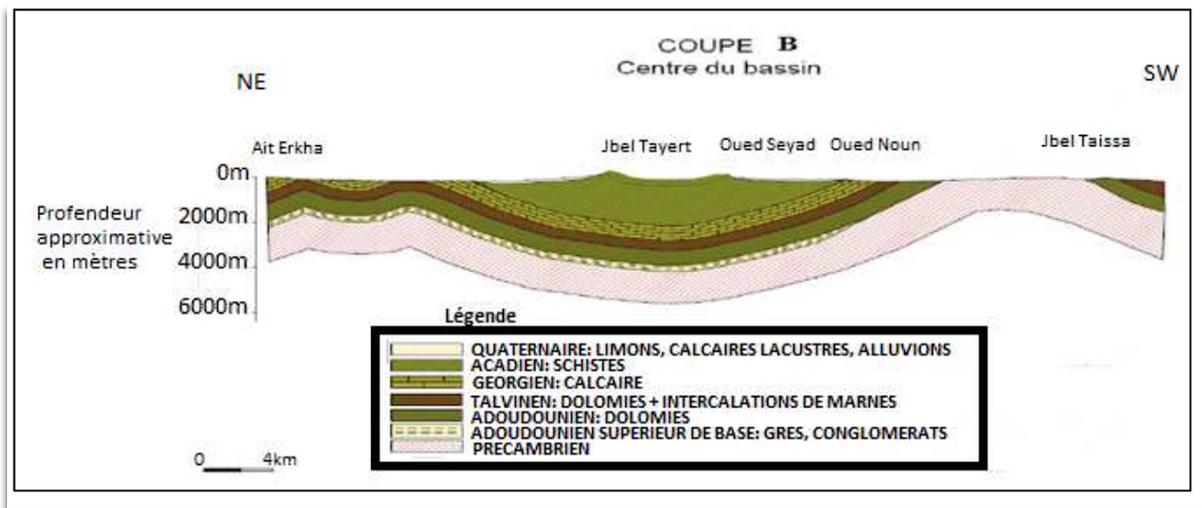


Figure 7 : Coupe géologique au centre du la zone d'étude (Agence du Sud, 2006), situation sur fig.5

3. Lithostratigraphie (plaine de Guelmim, Oliva, 1972) :

Dans la zone d'étude, les formations lithologiques sont orientées suivant une direction NE- SW et présentent une structure synclinale dont le centre est constitué par le Jbel Tayert. Les formations primaires les plus récentes datées de l'Acadien occupent le centre de la plaine (Jbel Tayert) et les plus anciennes d'âge Précambrien affleurent au niveau des bordures (boutonniers d'Ifni, Kerdous, Jbel Taïssa...) (fig.8).

a) Zone de socle :

❖ Précambrien :

Il est constitué de formations rhyolitiques, andésitiques et basaltiques témoignant d'une activité volcanique importante dans le massif d'Ifni. Ces formations sont les plus anciennes et affleurent dans les boutonnières d'Ifni et de Kerdous ainsi qu'au niveau de Jbel Taïssa. Toutes les couches de ces formations sont compactes dans leur masse, mais présentent des fissurations superficielles importantes et des zones d'altération ou d'accumulation détritique.

❖ Infracambrien :

- **Série de base :** Les formations cristallines du Précambrien sont transgressées par des conglomérats grossiers à éléments éruptifs surmontés eux même par la série schisteuse de base épaisse d'une centaine de mètres. Ces conglomérats de base attribués à l'Adoudounien inférieur affleurent particulièrement le long de la route de Guelmim-Ifni et au nord d'Abaynou à l'entrée du village de Tagounfil, où leur épaisseur dépasse 100m.
- **Calcaires « Inférieurs » :** Cette série, d'âge Adoudounien inférieur, est formée essentiellement par des calcaires dolomitiques et dolomies avec quelques

intercalations schisteuses à la base. La puissance de la série varie entre 3000 m aux Akhssas et 1000 m à l'est, où les intercalations schisteuses de base disparaissent. Il s'agit de bancs métriques formant des montagnes à reliefs mous entourant la boutonnière d'Ifni. Ces faciès s'observent bien le long de la piste menant d'Abaynou à Tagounfil.

- **Série lie de vin :** *Elle est de nature calcaire à l'ouest d'Akhssas et schisto-calcaire et argileuse vers l'est et le Sud. La puissance de la série est de 600 m à l'ouest et diminue vers l'Est et le Sud. Cette série est décrite dans cette région comme des dolomies à intercalations schisteuses, attribué au Talwinien et constituant une zone tendre dans la géomorphologie.*
- **Géorgien :** *La série infracambrienne se poursuit sans discontinuité lithologique dans le Cambrien inférieur et la limite stratigraphique est donc difficile à préciser. La série est connue sous le nom de calcaires supérieurs. Dans la partie supérieure, à l'entrée de la gorge empruntée par la route Guelmim-Ifni, on observe des bancs épais de calcaires noirs. La série présenterait au total une épaisseur de 400 à 500 m au sud d'Abaynou. Cette unité se distingue par des reliefs plus accentués, avec une couleur claire caractéristique sur les images satellites. Le Géorgien se termine par une série schisto-calcaire avec des niveaux de schistes (parfois bien développés) et des grès au nord de la plaine de Guelmim et surtout dans la plaine d'Asrir au sud (Jbel Taïssa). Les grès terminaux ou grès d'Asrir, recouvrent cette unité. Ils affleurent bien sur le flanc sud du synclinal de Guelmim.*
- **Acadien :** *La série acadienne comprend deux termes principaux :*
 - *A la base, les schistes verts ou schistes de Fèijas internes constituant le substratum de la plaine. Ce sont les schistes à Paradoxidés qui apparaissent très localement, sur la route menant vers la plage blanche où à la faveur des petites collines jalonnant souvent les accidents tectoniques dans la plaine de Guelmim. La puissance de cette série a été estimée entre 500 et 1000 m Selon l'étude de sismique réflexion (Géoatlas, 1997), cette formation atteint 2500 m d'épaisseur à Guelmim.*
 - *Au sommet, on trouve des grès et quartzites qui affleurent au niveau du Jbel Tayert. Cette unité est dénommée barre de Guelmim.*

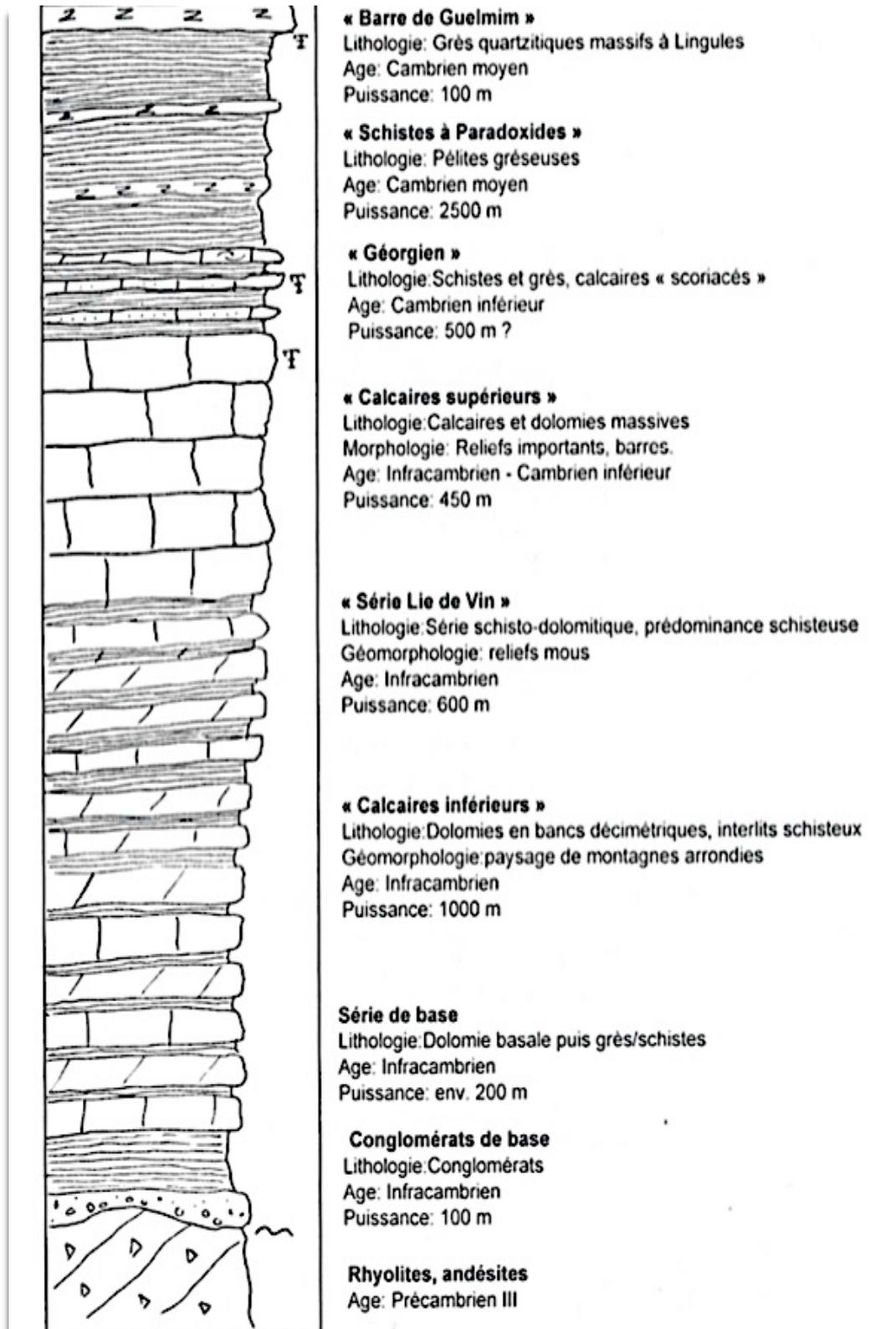


Figure 8 : log litho-stratigraphique schématique du bassin de Guelmim (Oliva ,1972)

b) Terrain Plioquaternaire :

La stratigraphie des formations Plioquaternaires de la plaine de Guelmim est analysée grâce aux résultats des différentes campagnes de forages et de géophysique.

La structure générale du bassin de Guelmim est constituée de la succession lithologique suivante de bas en haut :

- *un niveau argileux et argilo-sableux, comportant parfois des traces d'alluvions très perméables;*
- *deux niveaux se présentent le plus souvent en alternance :*
 - *un niveau calcaire plus ou moins marneux, quelquefois encroûté en surface ;*
 - *un niveau marneux, marno-argileux ou marno-calcaire mais à forte teneur en marnes, remplacé par un horizon de marnes sableuses dans la région de Bouizakarène;*
 - *un niveau constitué de formations récentes peu épaisses comportant des alluvions polygéniques, des limons d'épandage, des galets et des sables hétérogènes.*

Ces différents niveaux lithologiques présentent tous d'importantes variations d'épaisseur qui varie entre 10 et 90 m et sont parfois totalement absents, comme c'est le cas de la bordure N-E de la plaine.

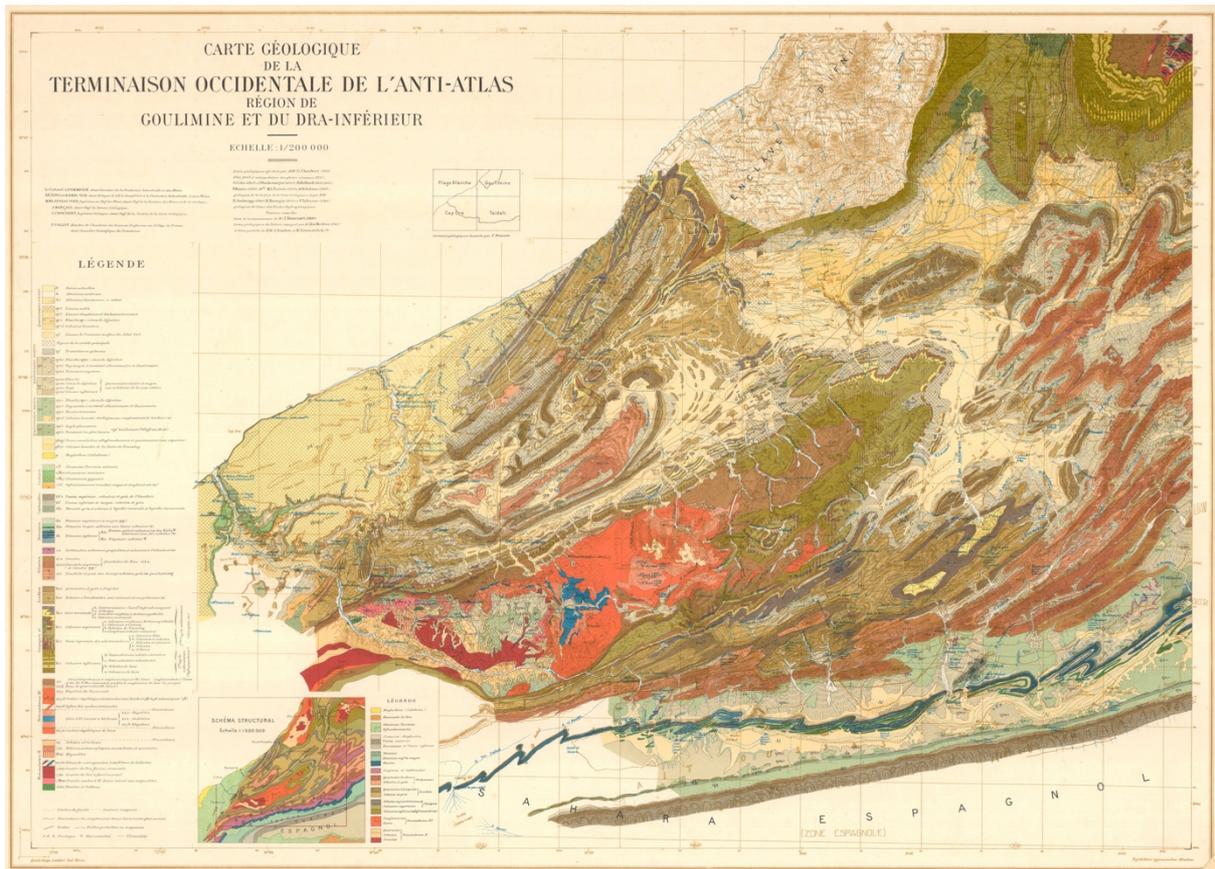


Figure 9 : carte géologique de Guelmim à 1/200 000 (CHOUBERT et al ; 1952)

C. Hydrogéologie :

Deux grands systèmes aquifères s'individualisent dans la plaine de Guelmim : la nappe « profonde » des calcaires adoudouniens et géorgiens de l'Anti-Atlas, et la nappe phréatique contenue dans les formations d'âge Plioquaternaire ou nappe de « **Guelmim** », qui est la plus

exploitée dans la région. En effet, la nappe Plioquaternaire est très largement étudiée et suivie de près par la DRH (forages, suivi de la piézométrie, essais de pompage, mesures hydrochimiques, ...) (fig.10).

Par contre, la nappe des calcaires **Géorgiens** et **Adoudouniens** est très peu étudiée en raison des fortes profondeurs de son toit sous la plaine. La plupart des forages exécutés pour explorer dans les horizons profonds étaient sans succès. Seuls les forages de la bordure Nord et Nord-Est de la plaine (fig.11) ont rencontré le socle cambrien. Il s'agit de :

- *L'ancien forage d'Andja (N° IRE 56/88) qui a traversé la série schisto-calcaire sur 136 m, et les calcaires inférieurs sur 427 m. Cependant, le dispositif utilisé lors du pompage d'essai dans ce forage n'a pas permis de déterminer si l'alimentation provenait des couches profondes ou des couches superficielles.*
- *Les forages de la région de Timoulay-Ifrane (N° IRE 652/88, 961/88, 966/88) qui ont aussi exploré la série schisto-calcaire d'âge géorgien.*
- *Les forages N° IRE 578/88, 1330 et 854/88 de la bordure Sud de l'Anti-Atlas qui ont atteint les dolomies d'âge Adoudounien.*

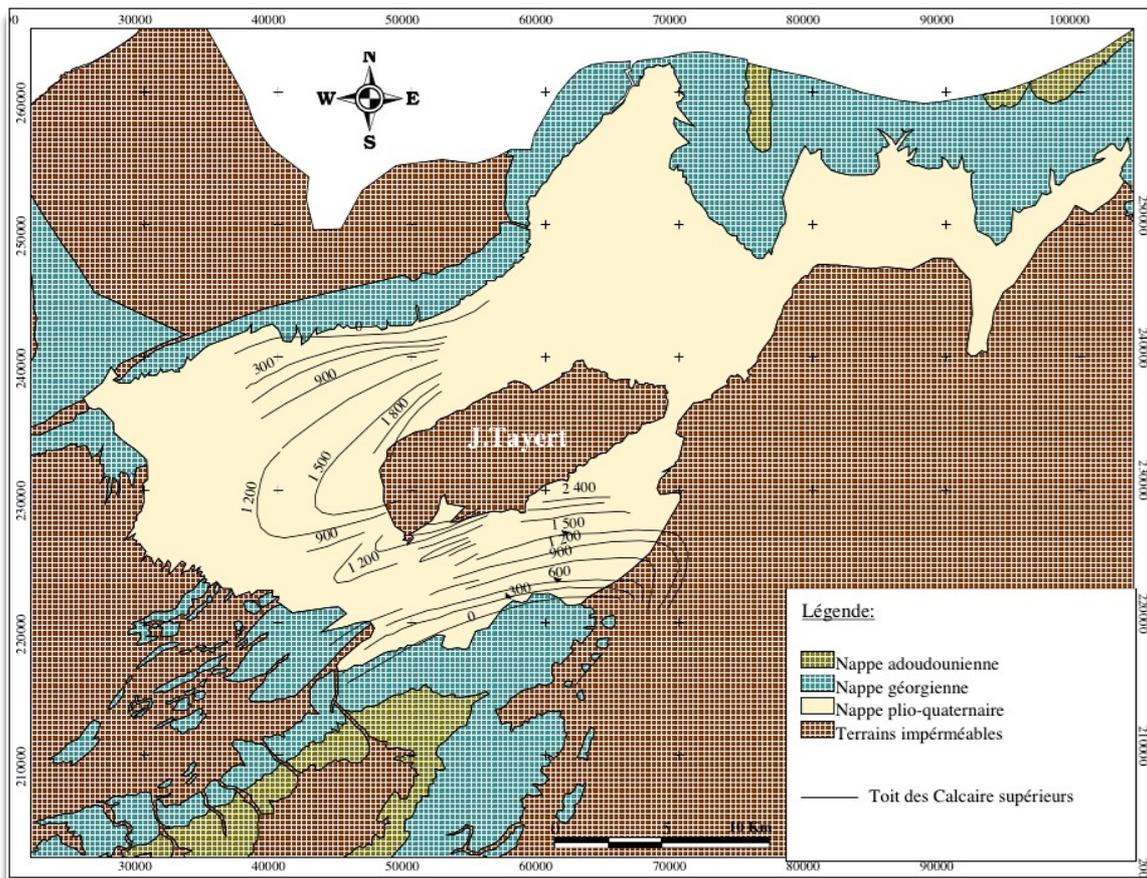


Figure 10 : les différentes aquifères trouvés sous la plaine de Guelmim avec

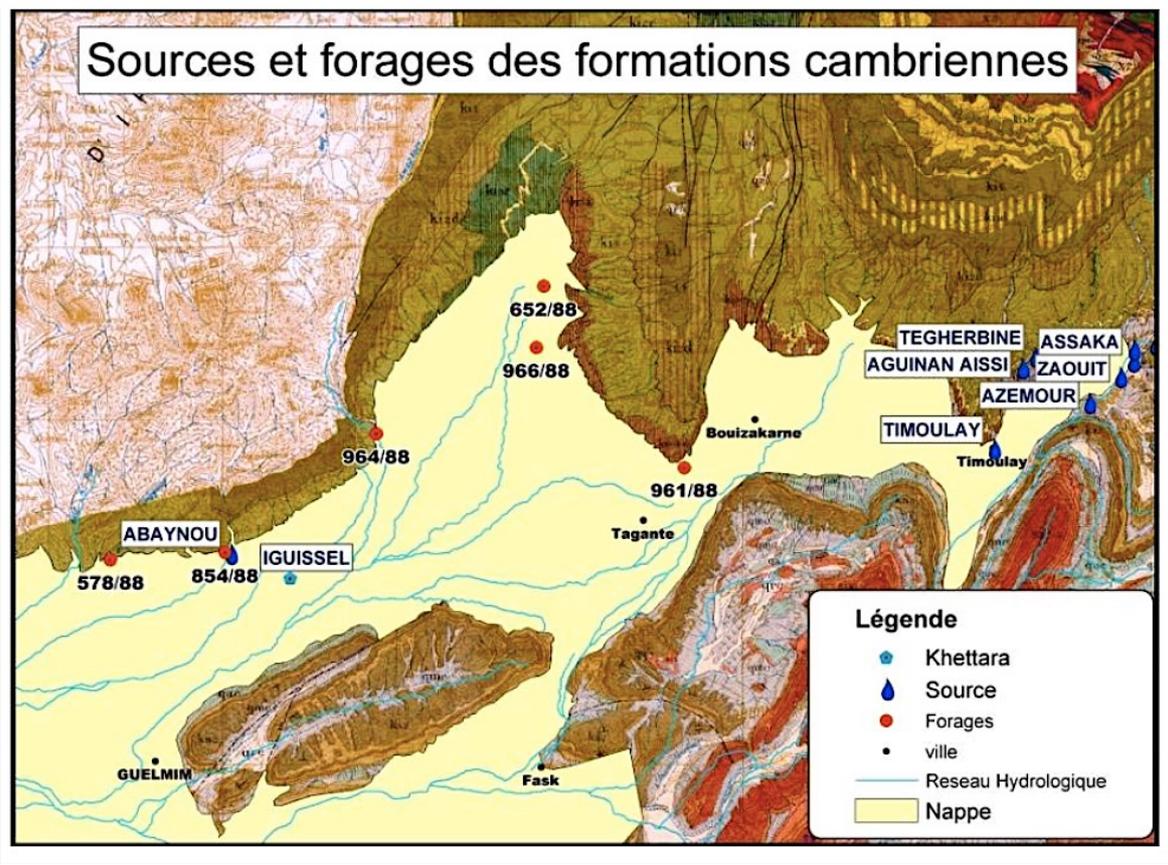


Figure 11 : Situation des forages et sources des formations d'âge Cambrien

Par ailleurs, une importante étude par sismique réflexion haute résolution entreprise en 1997 par la société **Géoatlas** a mis en évidence l'approfondissement des calcaires supérieurs sous le recouvrement d'âge Acadien depuis la bordure Sud de l'Anti-Atlas (à **Abaynou**) vers le Sud où ils se situent à plus de 2000 m sous la ville de Guelmim. En outre, l'analyse du régime de fluctuation des débits des sources de la région de Guelmim montre que les sources peu sensibles aux variations de précipitations, et donc alimentées à partir de l'aquifère profond, sont celles situées au niveau de la bordure Nord-Est de la plaine.

En conclusion, tous les arguments cités ci-dessus confirment qu'une contribution par abouchement souterrain de la série cambrienne à l'alimentation de la nappe superficielle est limitée aux bordures de la plaine. D'autre part, l'aquifère le plus important de point de vue ressource, accessibilité et disponibilité de données hydrogéologiques est celui des formations d'âge Plioquaternaire.

Chapitre II : Travail du Terrain et Evaluation des Paramètres Géotechniques

I. Introduction :

Après avoir présenté les données de la bibliographie disponibles sur la zone concernée de point de vue général et global, il vient maintenant de décortiquer le fond du projet d'une manière plus au moins localement détaillée (en prenant la zone d'emprunt de l'axe du barrage comme cible). Dans ce qui va suivre, on commencera par l'approche géologique, puisque c'est celle qui est la plus accessible et qui donne, généralement, des spéculations et des propositions sur le programme des investigations à envisager depuis l'analyse de la surface (programme pour l'implantation des éventuels sondages et essais in-situ : géotechniques et géophysiques). Dans une deuxième approche on essaiera de citer l'étude géotechnique détaillée par l'essai Pressiomètre de Ménard. Cet essai est envisagé de part son importance pour la mesure de la portance et pour le calcul de dimensionnement de l'ouvrage hydraulique en question, il est jugé opportun de rappeler, tout d'abord, son principe et de donner par la suite les résultats disponibles en leur corrélant avec la coupe lithologique du terrain (la lithologie de terrain sera présentée via les trois sondages carottés faits jusqu'à maintenant).

Dans la fin de ce chapitre, on devrait comprendre la géologie de surface et de sub-surface avec une évaluation estimative des paramètres géotechniques in-situ (notamment la charge admissible, la pression limite et le comportement pseudo-élastique et plastique) de la zone d'emprunt du barrage. Cependant cette première étude donne des informations qu'elles s'avèrent plus au moins ponctuelles. Car, concernant le sous sol, on ne possède que des données issues des sondages carottés distribués le long de l'axe du barrage, donc il s'agit bien de données ponctuelles. Pour sortir de cette problématique de mise au point précise, une prospection géophysique est jugée opportune afin qu'une superficie bien importante soit balayée. Cela aidera à reconstituer et décrire une image bien claire du sous-sol. Cette dernière étude serait détaillée dans le troisième chapitre.

A. Situation du site d'ouvrage :

Suivant la figure 1 (dans l'introduction du manuscrit), le barrage Fask se trouve à 8 Km de l'Ouest de Fask, sur l'Oued Seyyad. La rive gauche située à : $X = 74\ 000$ et $Y = 225\ 000$, celle de droite est située à peu près de : $X = 75\ 000$ et $Y = 227\ 000$ (fig.12)

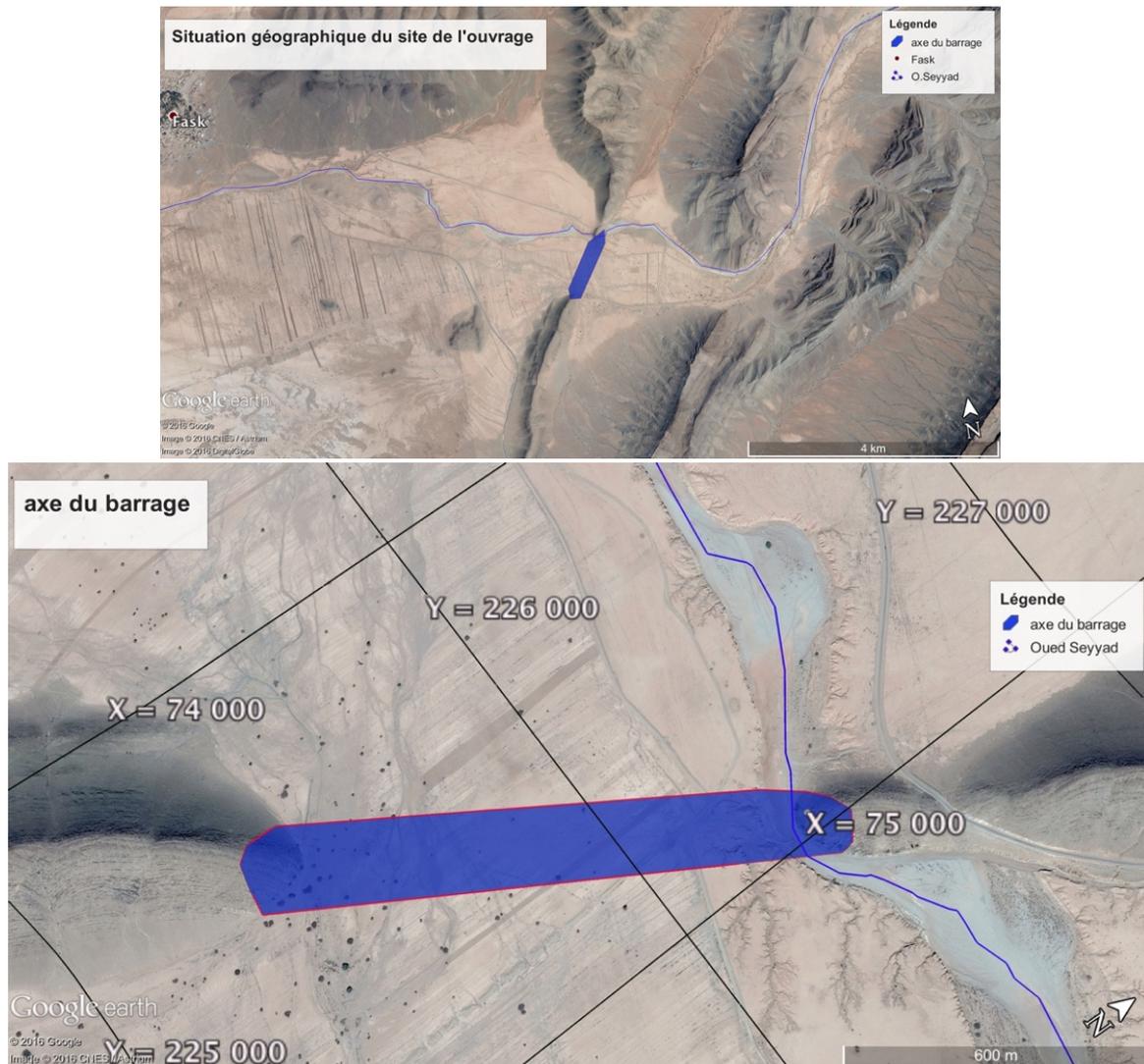


Figure 12 : Situation géographique de l'ouvrage

B. Approche de l'étude :

Le présent projet est subdivisé en trois études de reconnaissance in-situ complémentaires : reconnaissance par sondages carottés, Pressiomètre Ménard et par une prospection géophysique (sismique réfraction). Il est programmé qu'une campagne de sondages carottés doit commencer par trois sondages dans une première phase de l'étude (SV5, SV7 et SV9 dans la fig.13), effectuée par la société SOLROC. Chacun de ces trois sondages est couplé d'un essai géotechnique in-situ, Pressiomètre Ménard. Par rapport aux résultats de ces trois sondages, le maître d'ouvrage (Direction d'Aménagement Hydraulique) prendra la décision en coordination avec le bureau d'étude (NOVEC) sur le point où il y aurait l'abandon du site vers un autre situé à l'amont, ou bien de rester et de continuer les 11 sondages restants. En fin, une campagne de prospection géophysique détaillée par la sismique réfraction est mise en œuvre pour accomplir et élargir la reconnaissance, chargée par le Laboratoire Public d'Essai et d'Etude (LPEE) (fig.13).

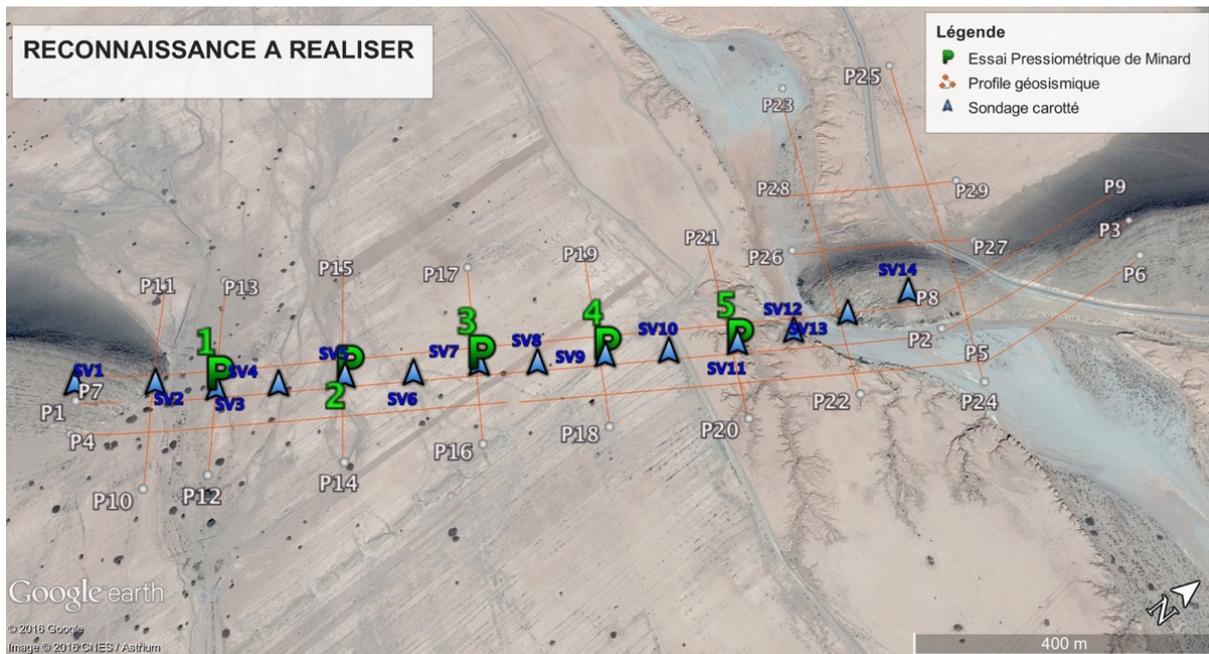


Figure 13 : plan de reconnaissances à réaliser

Les tableau ci-dessous montre les coordonnées métriques (Lambert Sud Maroc) des reconnaissances à réaliser (ces points sont représentés dans fig.13).

Tableau 4 : coordonnées des sondages carottés à réaliser

Sondage	X	Y	Profondeur (m)	Première phase	Deuxième phase
SV1	74 335	225 369	60		*
SV2	74 425	225 440	60		*
SV3	74 493	225 514	60		*
SV4	74 558	225 589	60		*
SV5	74 621	225 667	60	*	
SV6	74 682	225 747	60		*
SV7	74 796	225 829	60	*	
SV8	74 794	225 912	60		*
SV9	74 864	225 998	60	*	
SV10	74 895	226 085	60		*
SV11	74 941	226 173	60		*
SV12	74 984	226 264	60		*
SV13	75 024	226 355	60		*
SV14	75 054	226 422	60		*
		total	840		

Tableau 5 : Coordonnées des sondages pressiométriques à réaliser

Essai Pressiométrique	X	Y	Profondeur (m)
SP1	74 493	225 514	20
SP2	74 621	225 667	20
SP3	74 796	225 829	20
SP4	74 864	225 998	20
SP5	74 941	226 173	20
	Total		100

Tableau 6 : coordonnées des profils sismiques

Profil	X	Y	Longueur (m)
PS-1	P1	74 391	1680
	P2	75 122	
	P3	75 207	
PS-2	P4	74 439	1681
	P5	75 204	
	P6	75 275	
PS-3	P7	74 343	1682
	P8	75 074	
	P9	75 159	
PS-4	P10	74 581	300
	P11	74 326	
PS-5	P12	74 635	300
	P13	74 380	
PS-6	P14	74 744	300
	P15	74 489	
PS-7	P16	74 855	300
	P17	74 600	
PS-8	P18	74 966	300
	P19	74 711	
PS-9	P20	75 076	300
	P21	74 821	
PS-10	P22	75 166	600
	P23	74 656	
PS-11	P24	75 241	500
	P25	74 782	
PS-12	P26	74 887	300
	P27	75 054	

PS-13	P28	74 761	225 679	300
	P29	74 928	226 679	
Total projeté en plan			8580	

II. Approche Géologique : mesures et appréciation :

Avant d'entamer la partie d'acquisition qui fait l'objet du projet (sondage, essai in-situ et prospection), une étude géologique locale détaillée du site est jugée opportune de par son important apport en matière de faisabilité et de sécurité (une mauvaise étude géologique peut conduire à des cas catastrophiques, exemple de malpasset¹ en France). De ce fait, j'ai consacré, comme première approche, une partie pour la description géologique de la surface en procédant à des mesures de certains paramètres structuraux (pendages et directions des affleurements, levé structural de la fracturation : failles et diaclases...), et à la cartographie géologique à l'échelle du site (soit 1/2500).

A. Géomorphologie du site :

Comme il est cité auparavant, l'axe du barrage se situe sur un fleuve (O. Seyyad). Dès lors, il s'agit bien d'un environnement fluvial, qui marque la prédominance des éléments détritiques entre les deux rives de l'axe. On remarque une prédominance des éléments grossiers (cailloux et galets) et sables formant les alluvions des deux lits de la rivière (lit mineur/majeur), ainsi qu'une prédominance des éléments fins : épandage d'argiles limoneuses, et de sables limoneux formant la terrasse alluviale.

Le fleuve présente le caractère méandrique avec des terrasses type emboîtées (fig.14). Cela peut être expliqué par une faible pente et une faible énergie de transport à l'échelle de l'année.

¹ Il s'agit d'un barrage voûte situé dans la vallée du Reyran près de Fréjus en France inauguré en 1954. Le 2 décembre à 21h13 1959 après une phase de pluies torrentielles intenses qui font monter rapidement le niveau de la retenue d'eau, le barrage cède sous la pression laissant passer une vague de 40 m de haut et 50 millions de mètres cube d'eau laissant 423 personnes dont de nombreux enfants trouver la mort. L'enquête ne remet pas en cause la solidité de la voûte mais celle de la roche sur laquelle le barrage était appuyé, l'étude d'avant-projet n'a pas été suffisamment détaillée pour déceler la présence d'une faille dans la zone d'emprunt du barrage.



Figure 14 : vue satellitaire de la zone du barrage avec l'aspect sinueux du cours d'eau principal

B. Géologie : mesures et levés structuraux, Cartographie géologique :

L'analyse microstructurale du socle Acadien indique un substratum fortement fracturé avec un pendage de 60°SE et une direction N25 (fig.15). Hormis les joints stratigraphiques, il y a présence de deux familles de fracturations orthogonales : une famille parallèle à la stratigraphie (les bandes constituant le massif Acadien) et l'autre coupant la première et faisant un angle de 90° avec celle-ci (fig.16 A).

Il est apparu bien évident que les fractures de la famille I sont recoupées par celles de la famille II, ce qui nous permet d'approuver l'ordre chronologique suivant : les fractures de la famille I sont antérieures à celles de la deuxième famille.

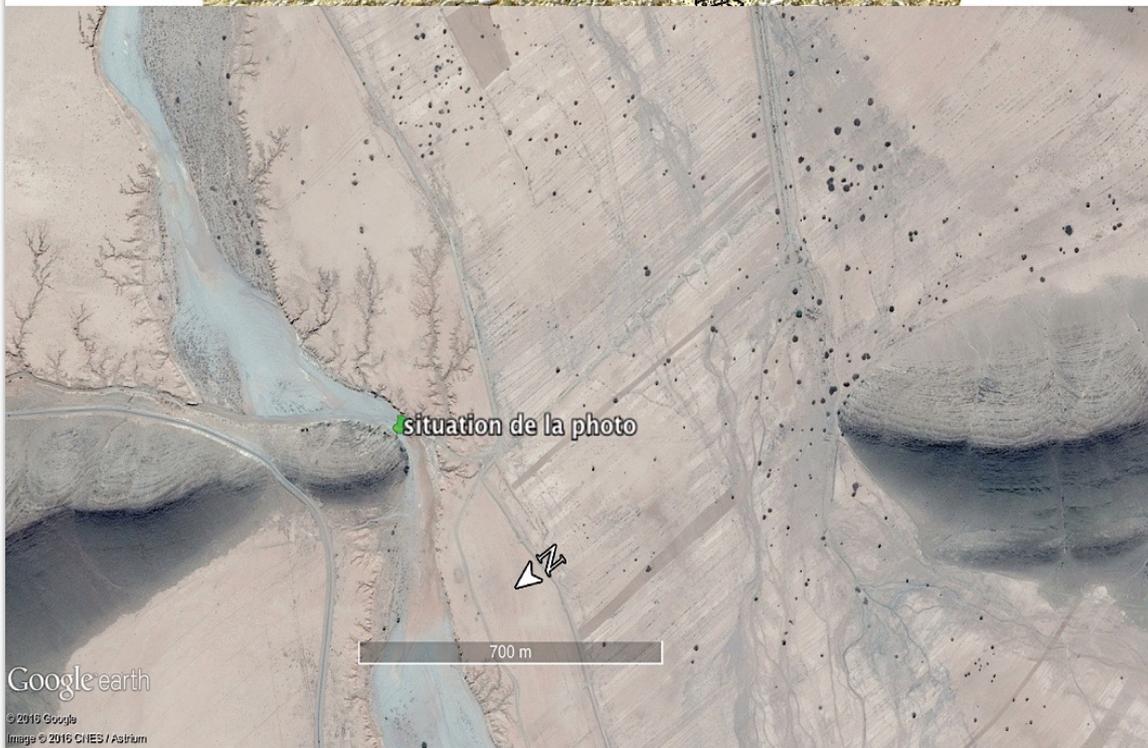


Figure 15 : illustration photographique montrant la mesure du pendage du grès quartzeux

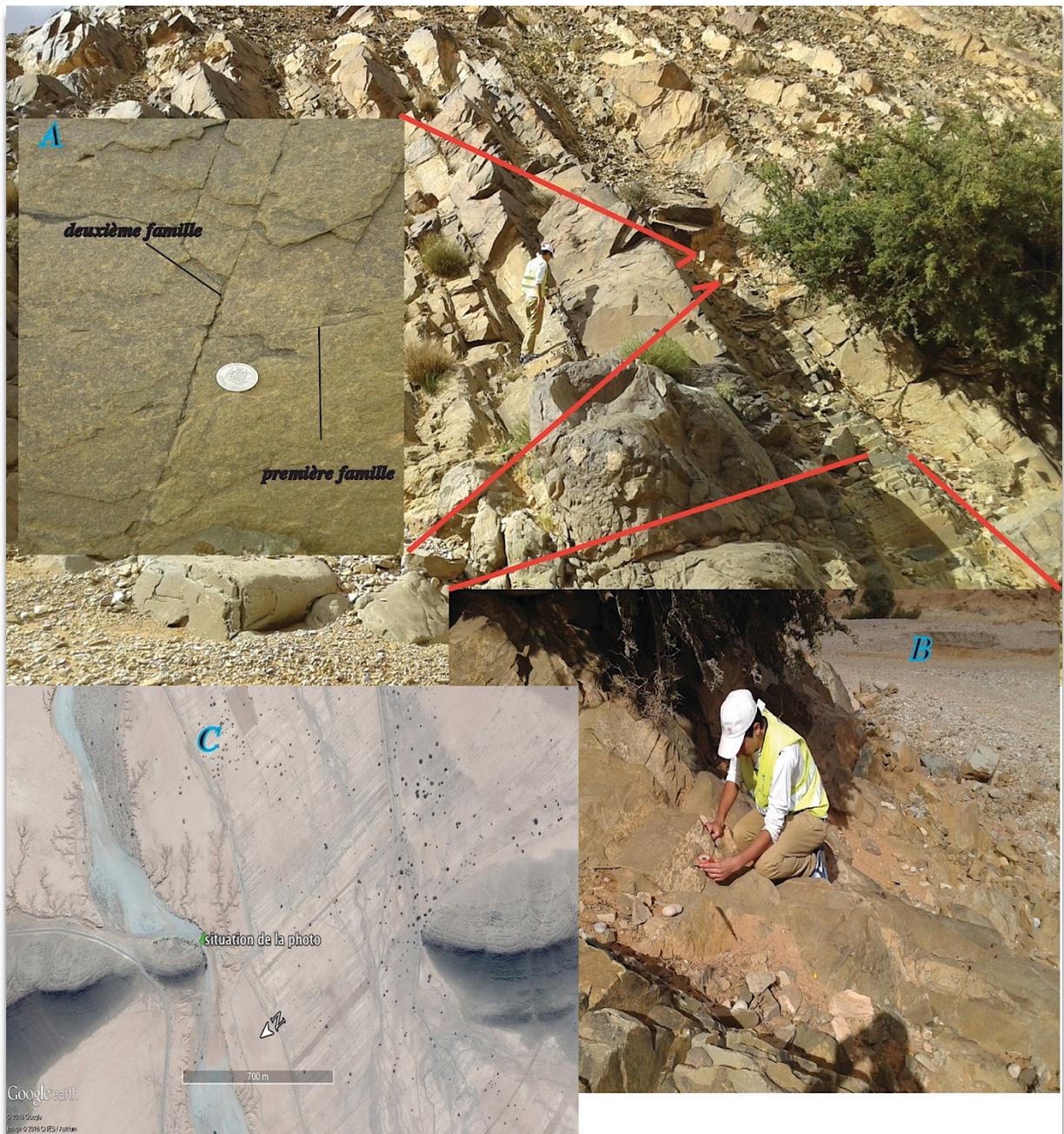


Figure 16 : illustration photographique montrant la fracturation et la mesure des paramètres structuraux (direction et pendage) : A : recoupement de la famille I par la famille II ; B : mesure du pendage d'une fracturation de la deuxième famille ; C : localisation du pont de mesure

En ce qui concerne les conditions de mise en place de chaque fracture on cite :

- *famille I : ces fractures sont le résultat d'une décompression superficielle induite par la diminution de la charge lithostatique. Cette diminution, causée par l'érosion, est brusque à l'échelle des temps géologiques et par rapport aux modifications du champ de contraintes d'une région (inversion tectonique). Le processus théorique est schématisé par Feuga, 1984 (fig.17) ;*

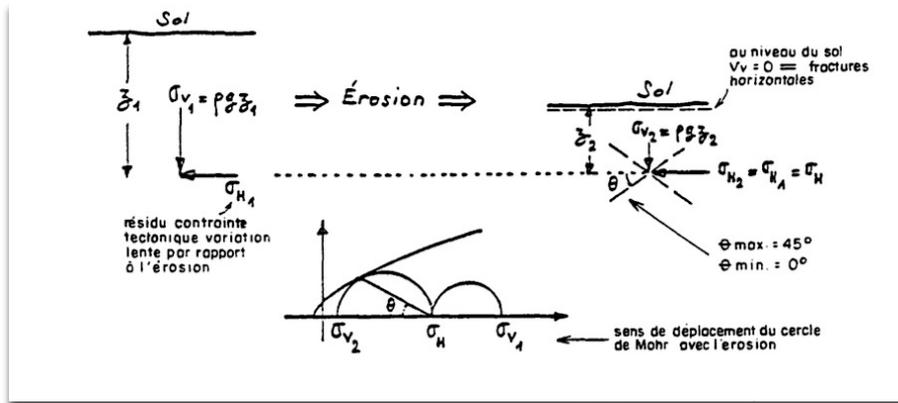


Figure 17 : mécanisme d'apparition de fractures de décompression dues à l'érosion

- famille 2 : ces fractures sont dues à l'inclinaison de la couche lors d'une tectonique régionale (fort probablement, l'orogénèse hercynienne). Notons que ces fractures sont perpendiculaires à S_0 . Le processus théorique est schématisé par la fig.18. Certaines fractures sont remplies du quartz qui vient du matériau quartzitique du socle. Ces fractures présentent un pendage de $60^\circ SW$ et une direction $N310^\circ$.*

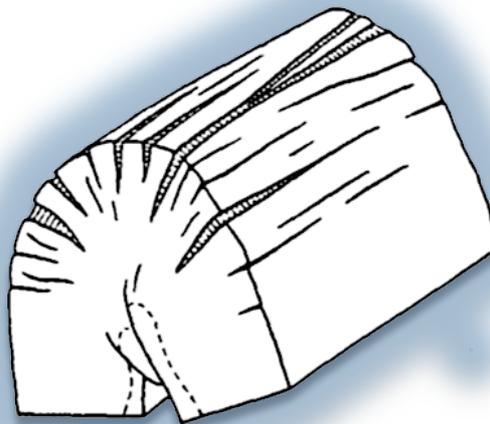
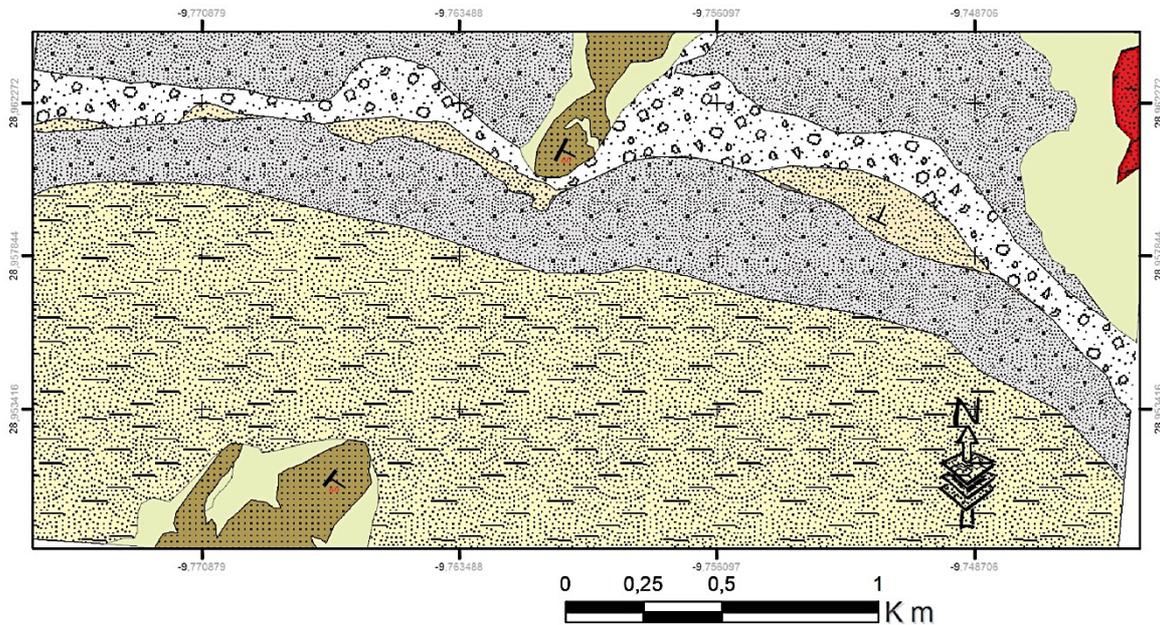


Figure 18 : mise en place des fractures de la famille I

Un travail de cartographie géologique a été réalisé à l'échelle de site (1/2500) pour une meilleure représentation de l'approche géologique (fig.19)

Carte géologique de site du barrage à 1/2500



Legend

-  alluvions grossiers (lit mineur) : Quaternaire récent
-  lentille sableuse (lit majeur) : Quaternaire récent
-  Epandages sablo-limoneux des basses plaines : Quaternaire récent
-  Epandage limono-argileux des hautes plaines (terrasse alluviale) : Quaternaire récent
-  Eboulis, cônes de déjection, glacis de piémont (hautes terrasses) : Quaternaire récent
-  quartzites : Ordovicien, LLandélo
-  grès quartzeux : Acadien

Figure 19 : carte géologique locale de l'axe du barrage à 1/2500

Cette première démarche nous a permis d'identifier, du point de vue géologique, la lithologie de terrain à l'échelle du site, le degré de fracturation observée sur le socle Acadien (rives du barrage) ainsi que d'avoir une idée assez claire sur l'étude de faisabilité en rapport avec la stabilité et la sécurité du futur barrage (le matériau, constituant la rive droite et gauche du barrage, présente une consistance d'aussi poussée qu'il permettra d'entretenir l'ouvrage contre les futures sollicitations qui seront exercées sur son mur amont).

C. Sondage carottés :

Au sens de la norme XP P94-202, un échantillon non remanié doit être prélevé dans des conditions modifiant le moins possible la nature et l'état de terrain, qui, au laboratoire, sous un chemin de contrainte approprié, fournit des résultats applicables à la prévision de la résistance en place, de l'amplitude et de la vitesse de la déformation.

Selon les propriétés à déterminer sur l'échantillon, un remaniement plus ou moins important peut-être accepté s'il n'affecte pas les résultats recherchés.

Le carottage permet d'obtenir un échantillon continu de sol faiblement ou pas remanié, prélevé à l'aide d'un outil appelé carottier. On distingue deux grandes familles :

- *les carottiers poinçonneurs ;*
- *les carottiers rotatifs.*

Dans notre cas de figure, le carottier utilisé est celui par rotation. Il s'agit, en fait, d'un carottage qui est adapté à tous les types de terrains présentant une certaine cohésion (fig.20). Il nécessite l'utilisation d'un fluide de terrain qui circule par un train de tiges creuses et qui permet le refroidissement de l'outil (généralement la Bentonite), l'évacuation de matériaux détruits et, éventuellement, le maintien des parois du forage.

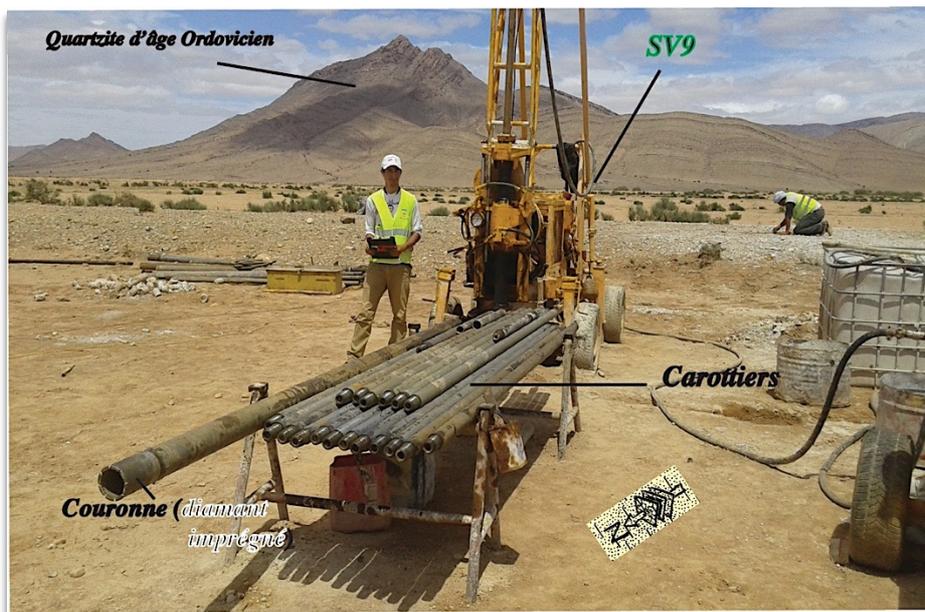


Figure 20 : illustration photographique montrant la sondeuse à carottier rotatif avec une couronne type diamant imprégné, SV9

Il existe de nombreux types de couronne, on pourra citer principalement (fig. 21) :

- *couronne imprégnée : couche métallique imprégnée de diamant. De fins cristaux de diamant sont intimement mélangés à la poudre métallique appelée matrice. Cet ensemble est traité par la suite thermiquement ;*
- *couronne sertie : les diamants sont serties dans une matrice, l'ensemble est traité thermiquement ;*
- *couronne à outil carbure : prismes orthogonaux de carbure, éclats de carbure,*

plaquettes de métal dur ...



Figure 21 : principaux types de couronnes

Le choix du type de couronne est guidé par la dureté du sol à carotter (tendre, moyen, moyen dur, dur, très dur, extrêmement dur) en liaison avec l'origine géologique de la roche et son état de l'altération. Les paramètres d'utilisation du type de couronne dépendent de : la vitesse de rotation ; le débit de l'eau ; pression sur outil.

Les carottes ainsi obtenus, avant qu'ils soient transférés au laboratoire pour les essais d'identification et mécaniques, doivent être identifiés avant en terme de géologie par un géologue.

L'étude géotechnique au laboratoire n'est pas encore déclenchée. Par contre, la description lithologique des carottes a été réalisé sur site (fig.22).



Figure 22 : illustration photographique montrant les carottes

Des exemples de carottes sont montrés dans l'annexe sous forme d'illustrations photographiques tandis que la description des faciès est présentée dans la suite (fig.23,24 et 25). La RQD (Rock quality designation) est déterminée en mesurant le pourcentage de récupération de morceaux de carotte de forage dont la longueur est supérieure à 10 cm.

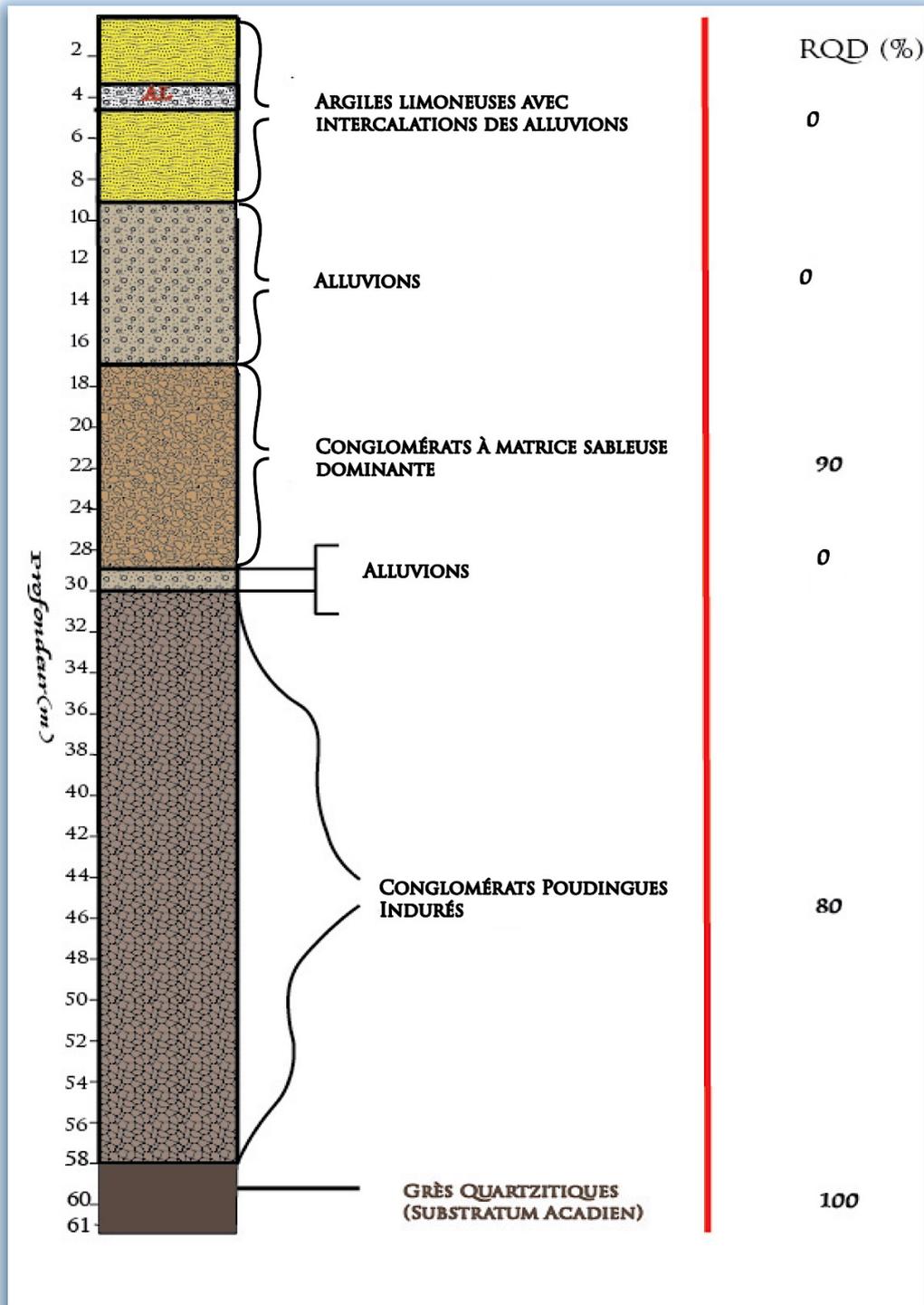


Figure 23 : colonne stratigraphique correspondant au SV5

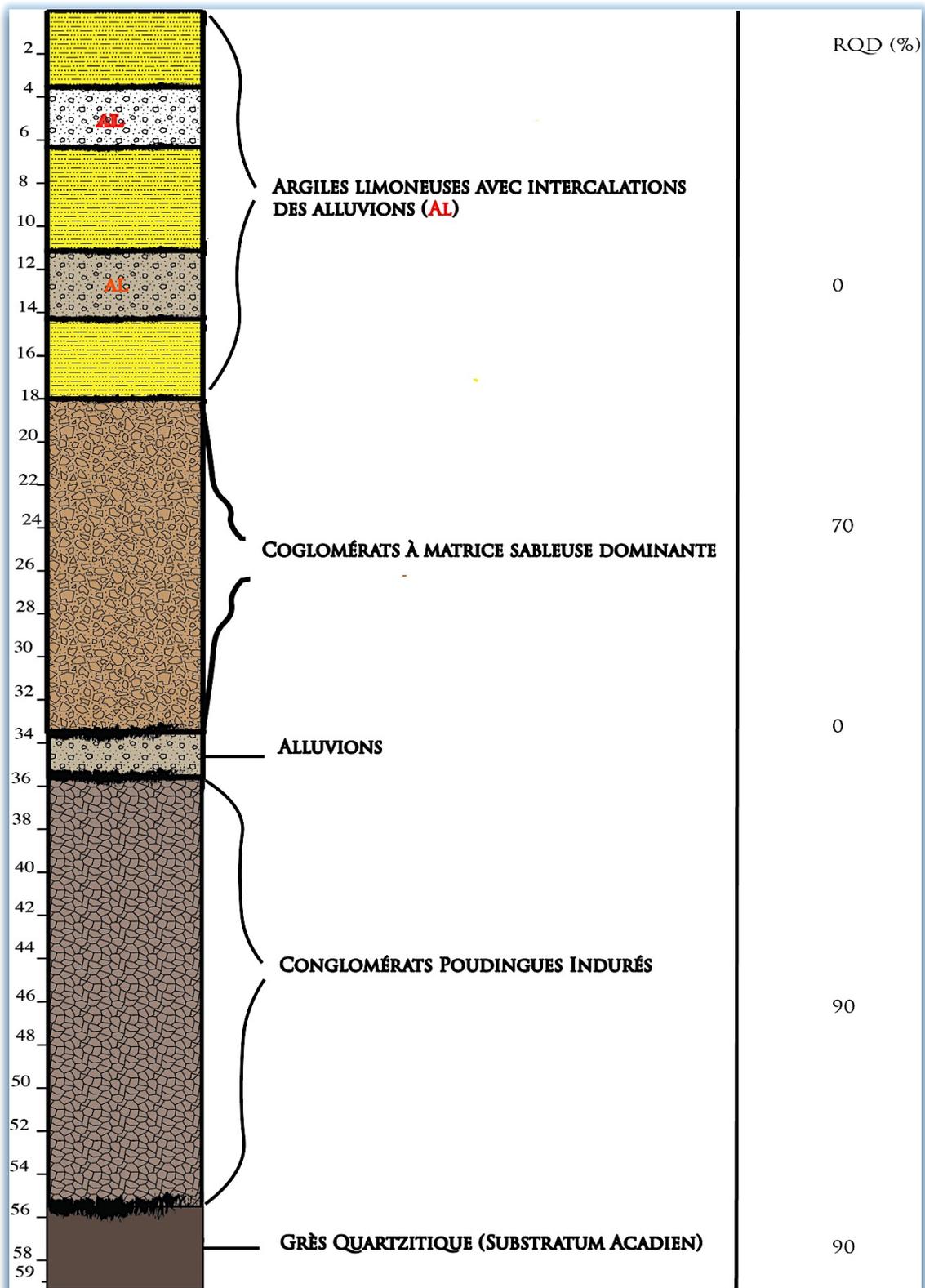


Figure 24 : colonne stratigraphique correspondant au SV7

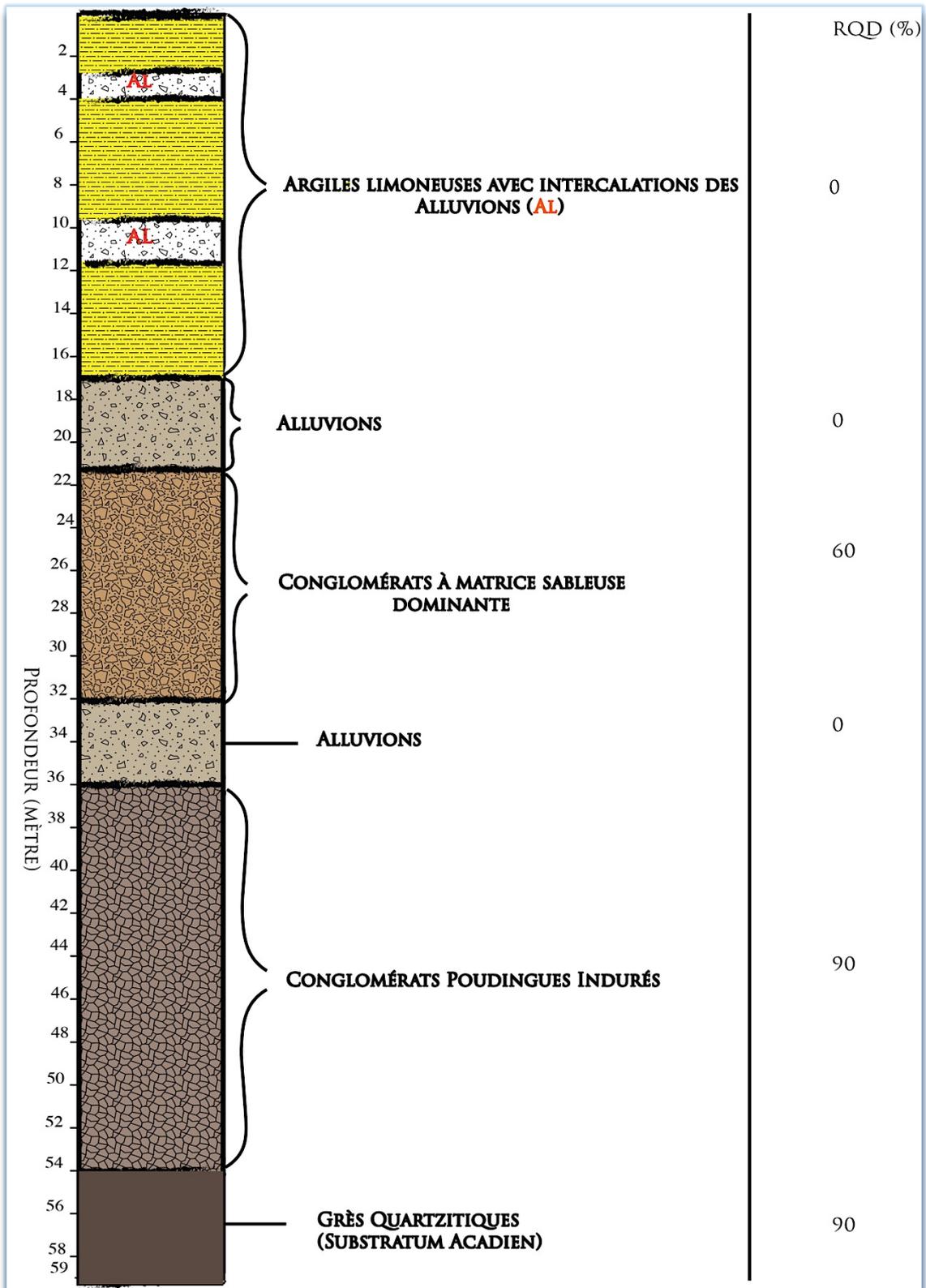


Figure 25 : colonne stratigraphique correspondant au SV9

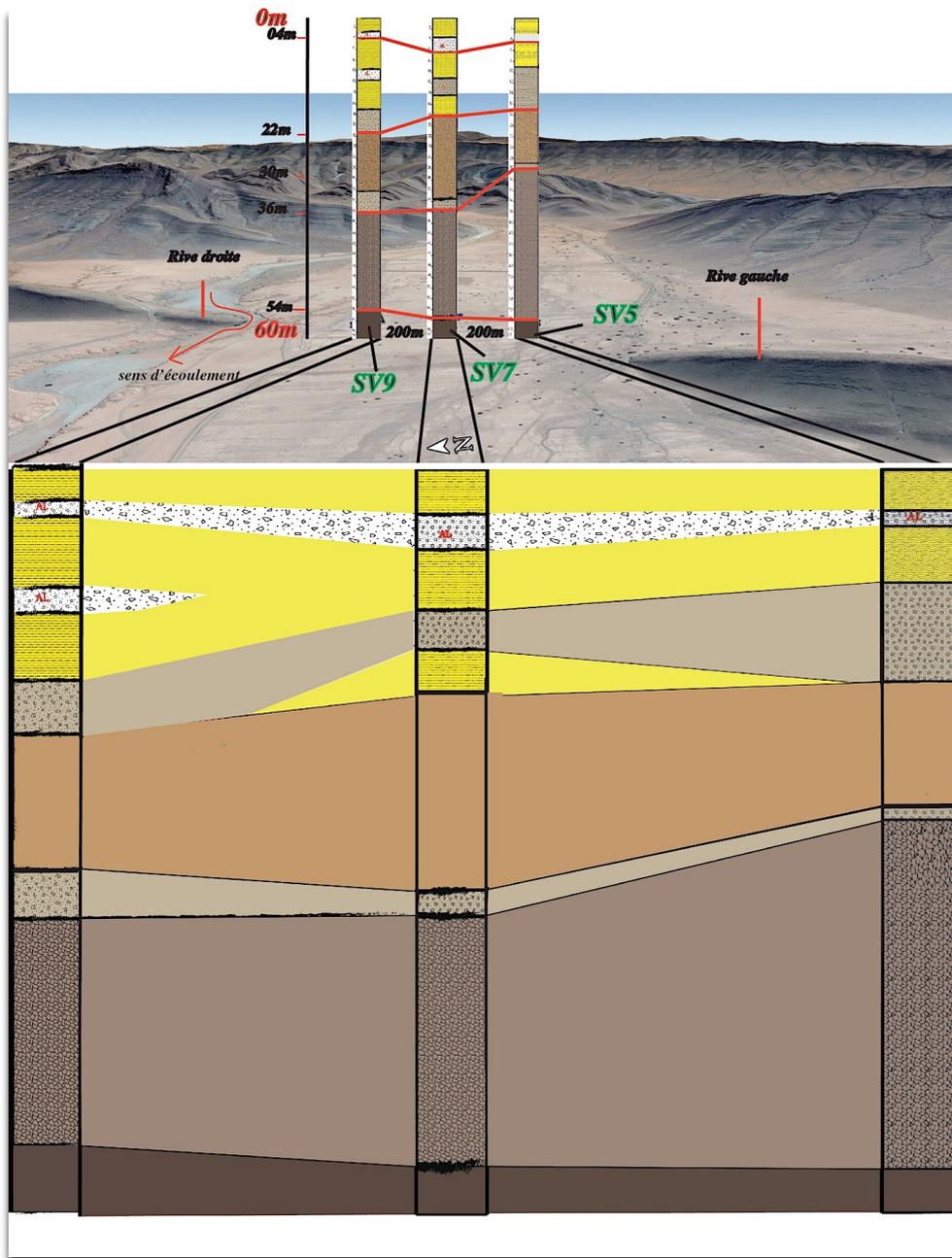


Figure 26 : corrélation des trois sondages : SV5, SV7 et SV9

A partir de ces résultats, le bureau d'étude (NOVEC dans ce présent cas) peut tirer profit des précieuses informations suivantes pour la prise des décisions :

- *la couverture sédimentaire est constituée par des matériaux détritiques transportés et déposés via un fleuve, avec une puissance de 54m environ (cf. corrélation des sondages) ;*
- *de point de vue géotechnique/rhéologique, il est apparu bien clairement que la cohésion et la résistance des matériaux soit plus importante proportionnellement à la profondeur (Argiles et alluvions plus friables en surface, conglomérats moins dures puis poudingues indurés jusqu'au socle Cambrien le plus consistant), cela est à confirmer via les essais de laboratoire (essais mécaniques sur sols et roches) ;*

- *le socle Acadien, Grès Quartzeux, apparaissant sur les deux rives du futur barrage, est enfoui sous la couverture jusqu'à une profondeur qui varie entre 54 et 56m (cf. corrélation des sondages) ;*
- *les Poudingues présente une consistance tellement remarquable que l'on peut la classifier comme étant une roche très dure (cf. exemple de SV9 sur annexe). De ce fait, on prévoit que la réponse de ces poudingues vis-à-vis les ondes sismiques serait plus proche de celle du socle Acadien (à confirmer dans la section qui concerne la prospection géophysique).*

III. Approche Géotechnique :

A. Intérêt de la géotechnique :

La connaissance des caractéristiques physiques et du comportement mécanique et hydraulique des matériaux constituant la fondation de l'ouvrage étudié, et de ceux dont on envisage l'utilisation pour sa construction (matériaux de construction), est nécessaire au projeteur pour concevoir le barrage le mieux adapté à son contexte géotechnique.

Cette connaissance est acquise pour partie grâce à la réalisation d'essais géotechniques en laboratoire, en d'autre partie par des essais réalisés in-situ.

1. Essais Au laboratoire : (Essais sur Sols/Roches)

La réalisation de ces essais requiert la mise en œuvre de procédures normalisées et de matériels spécifiques. Elle ne peut être confiée qu'à des Laboratoires de Mécanique des Sols et des Roches expérimentés et parfaitement équipés dont le LPEE fait partie.

a) Matériaux et fondation meubles :

Pour ce type de matériaux, globalement qualifié de sol, les essais sont réalisés sur des échantillons prélevés sur le terrain (intacts ou remaniés dans les sondages carottés et dans les tranchées à la pelle). Ces essais se répartissent en :

- *essais d'identification : teneur en eau naturelle, granulométrie et sédimentométrie, limites d'Atterberg, essai au bleu de méthylène, poids spécifique des grains, poids volumique apparent... ;*
- *essais de compactage des matériaux des zones d'emprunt : essai Proctor Normal ;*
- *essais mécaniques et hydrauliques : mesure de la résistance à la compression simple, résistance au cisaillement (à l'appareil triaxial), compressibilité à l'œdomètre, mesure de la perméabilité à l'œdomètre ou au perméamètre.*

Le nombre d'essais de chaque type est à adapter au volume probable du remblai, à sa hauteur, au nombre de matériaux de différents types utilisés et à la variabilité naturelle des matériaux étudiés.

À titre indicatif, le programme minimal d'essais recommandés pour les matériaux d'emprunt de barrages en terre ne présentant pas de difficulté particulière est déterminé en fonction du volume de matériau à reconnaître² :

- *série d'essais d'identification (teneur en eau naturelle, granulométrie, sédimentométrie, limites d'Atterberg) : un pour 5 000 à 10 000 m³ de matériaux à mettre en œuvre avec un minimum de cinq essais ;*
- *essais de compactage (Proctor Normal et mesure du poids spécifique des grains) : un pour 15 000 à 25 000 m³ avec un minimum de cinq essais ;*
- *essais de comportement mécanique et hydraulique (cisaillement triaxial, compressibilité à l'œdomètre, mesure de la perméabilité) : un pour 30 000 à 50 000 m³ avec un minimum de trois essais.*

Pour la fondation, le nombre d'essais à entreprendre peut-être du même ordre de grandeur si l'épaisseur meuble est importante (les essais de compactage étant inutiles).

b) Enrochement :

Pour les matériaux de type agrégats et enrochements, les essais à réaliser en laboratoire sont:

- *mesure des caractéristiques intrinsèques : densité apparente, étude minéralogique (examen de lames minces au microscope) ;*
- *mesure des caractéristiques d'état : teneur en eau, granulométrie-blocométrie, coefficients de forme (allongement, aplatissement), porosité, degré de fissuration, indice de continuité ;*
- *mesure des caractéristiques de comportement : résistance aux chocs (essai Los Angeles, ou L.A.), à l'abrasion (essai Micro-Deval), à la compression simple R_c (sur carottes cylindriques), à l'alternance de cycles gel-dégel (essai de gélivité).*

2. Essais et mesures in-situ :

Plusieurs types d'essais et mesures in situ peuvent être réalisés à différents stades d'étude des sites de barrage, en fonction de critères variés (nature des terrains de fondation, problèmes géotechniques rencontrés, taille de l'ouvrage envisagé...).

Ils permettent de mesurer des caractéristiques mécaniques en grand de la fondation, en intégrant l'effet des discontinuités du massif.

Les essais réalisés dépendent de la nature de la fondation. En terrains meubles, citons :

- *le Pénétrömètre statique ou dynamique : il permet surtout de distinguer les horizons de consistance différente, sans qu'il soit possible de relier directement et de manière fiable la résistance de pointe à leurs caractéristiques mécaniques ;*
- *le Pressiomètre : il permet d'obtenir une relation contrainte-déformation du sol (détermination d'un module de déformation, de la pression de fluage et de la pression limite), il s'agit du seul essai de reconnaissance in-situ qu'a été envisagé dans cette*

² Le volume à reconnaître doit être 1,5 à 2 fois supérieur au volume géométrique du barrage.

étude ;

- *le Scissomètre : il permet de mesurer la cohésion non drainée du sol, lorsque celle-ci est inférieure à 0,1 MPa. Il n'est pas possible de mesurer la cohésion de couches dont l'épaisseur est inférieure à la hauteur des pales du scissomètre ;*
- *le Phicomètre : il permet une mesure approximative directe, en forage, de la résistance au cisaillement des sols hétérogènes ou grossiers.*

Ces différents essais in situ ne sont pas couramment utilisés pour étudier un barrage (sauf dans le cas de fondation très médiocre, vases par exemple).

En terrains rocheux, les essais classiques sont les suivants, les deux premiers concernant la fondation, les deux suivants la connaissance des matériaux :

- *essai de déformabilité au dilatométrique en forage au vérin à plaque de charge ou au vérin plat : mesure de modules de déformation du rocher selon différentes directions (ces essais sont délicats à réaliser, exigent une main d'œuvre très qualifiée et coûtent fort cher, ce qui en réserve généralement l'usage aux ouvrages les plus importants) ;*
- *mesure de vitesses sismiques dans le massif de fondation : donne une valeur globale de la qualité du massif ;*
- *essai de sautage d'embrochements à l'explosif : différents dispositifs de tir et charges sont à tester, avec détermination des caractéristiques de l'embrochement obtenu (blocométrie, formes, abondance des stériles...) ;*
- *planches d'essai de compactage d'embrochements en vraie grandeur.*

Après cette brève présentation de l'approche géotechnique, on se contente de traiter, dans ce qui va suivre, l'essai in-situ qu'a été implanté dans le programme de l'étude, Pressiomètre Ménard. En ce qui concerne les essais au laboratoire, l'étude n'est pas encore commencé. Dès lors, pour avoir une idée sur le principe, modes opératoires et la théorie de calcul de chaque essai, veuillez consulter les ouvrages appropriés et spécialisés en mécanique des sols et des roches.

B. Essai Pressiométrique : Principe et Résultats :

1. Principe et Appareillage : Norme : NF P 94-110-1.

L'essai consiste à mesurer la déformation radiale moyenne d'un forage en fonction de la pression d'eau. C'est un essai de chargement rapide du sol en place par expansion d'une cellule cylindrique. On dilate radialement une sonde par injection d'un fluide suivant un programme de chargement prédéfini (par palier). On sollicite ainsi le sol qui travaille et se déforme comme à proximité immédiate d'une fondation.

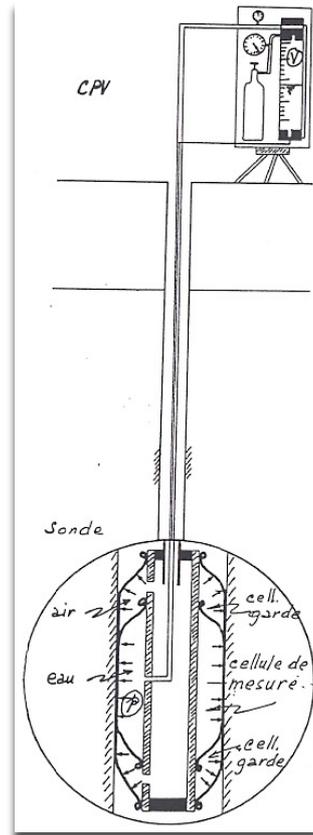


Figure 27 : schéma simplifié du dispositif "Pressiomètre Ménard"

L'injection se réalise à une profondeur déterminée avec des paliers de charge de durées constantes égales à 60 (ou 120) secondes. Une mesure intermédiaire est faite à 30 (ou 60) sec. Le volume total d'eau injecté dans la sonde est donc mesuré après 30 et 60 sec ; il est noté : V30 et V60 (ou : V60 et V120).

Il peut s'appliquer dans tout type de sols naturels saturés ou non, dans les remblais ou tous autres matériaux artificiels utilisés en géotechnique. En revanche son utilisation dans les rochers s'accompagne d'une plus grande incertitude sur les caractéristiques mesurées en raison de la déformabilité limitée du terrain dans ce cas.

L'appareille est constituée de :

- **Une sonde cylindrique** mise dans un avant trou de même diamètre. Cette sonde, recouverte d'une membrane à lamelles métalliques, est constituée de trois cellules juxtaposées et indépendantes (fig.28) : une cellule de mesure centrale dilatable (fig.29) et deux cellules de garde assurant l'uniformité du champ de contrainte (horizontal et non incliné) et facilitant le retour de l'eau dans le circuit d'injection. Ces dernières sont gonflées avec une pression inférieure d'un bar à la pression de la cellule de mesures qui est mise en pression interne croissante par injection d'eau suivant une progression par paliers.



Figure 28 : La sonde se compose de trois parties: (1) corps de la sonde métallique avec orifices d'injection d'eau et gaz; (2) La membrane en caoutchouc de la cellule de mesures;(3) la gaine de protection à lamelle métallique.



Figure 29 : illustration photographique de la cellule centrale (cellule de mesure)

- **Deux tubulures** assurant la circulation des fluides eau et azote. Un premier raccord injecte l'azote depuis la bouteille où il est comprimé dans l'appareil ce qui permet de connaître la pression. Deux autres raccords assurent la jonction jusqu'à la sonde placée dans le trou.
- **Un contrôleur volume pression** (CPV) relié à la sonde par un tube flexible unique regroupant les deux tubulures. Il permet de suivre depuis la surface les déformations volumiques en fonction des pressions exprimées en bars (fig.30). Il comporte un système de mise en pression et de dilatation de la sonde. Il se situe dans un coffret en fibre de verre.

Plusieurs manomètres y figurent :

- un manomètre indiquant la pression à la sortie de la réserve de gaz ;
- un manomètre indiquant la pression dans la tubulure reliée à la sonde de mesure (Manomètre du bas) ;
- un dernier manomètre indiquant la pression dans la tubulure reliée aux cellules de garde.

Le volume est contrôlé par une réglette graduée (fig.30)

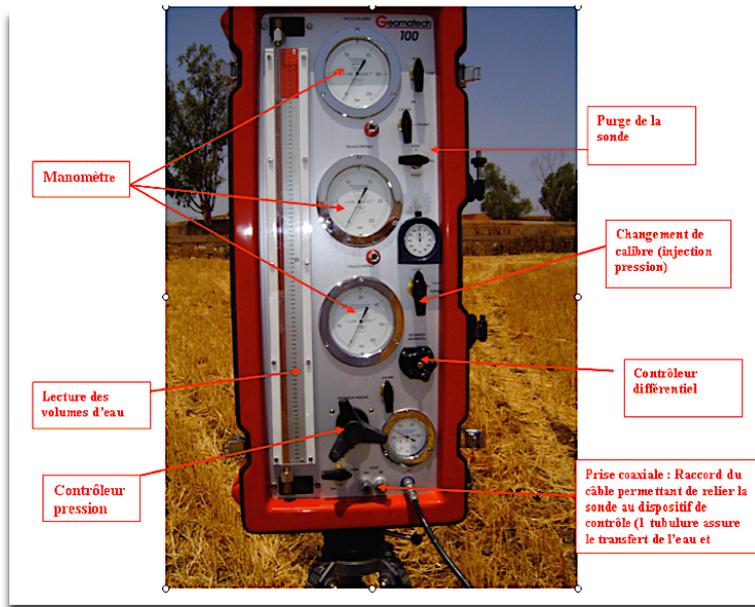


Figure 30 : Illustration photographique du contrôleur volume pression : CPV

2. Expression des résultats :

Les résultats pressiométriques sont présentés sous forme d'une courbe appelée « courbe pressiométrique » obtenue en reportant les mesures à 30 et 60 sec en fonction de la pression (fig.31).

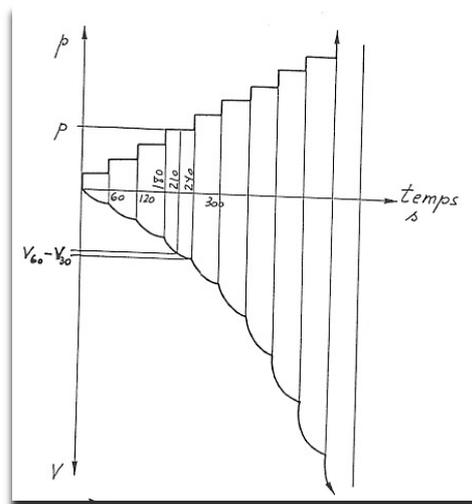


Figure 31 : Courbe brute obtenue en reportant les mesures à 30 et 60 sec en fonction du temps.

Après correction de la part de la pression due à la charge hydraulique et à la résistance propre de la sonde, la courbe pressiométrique corrigée nous elle permet de distinguer cinq domaines décrivant des comportements différents (fig.32) :

- *une phase initiale de mise en équilibre où le volume de la cellule centrale passe de V_i (sous la pression atmosphérique) à V_o (correspondant à la pression P_o du sol au repos). Lorsque la pression augmente dans la sonde, le terrain qui s'était décomprimé lors du forage, se retrouve comprimé. Cette phase s'achève lorsque le terrain retrouve son état*

initial.

- une phase élastique dans laquelle le volume varie linéairement en fonction de la pression appliquée.
- une phase pseudo élastique. La pente de la droite moyenne associée aux phases élastique et pseudo élastique permet de calculer le module pressiométrique de Ménard. Au terme de cette phase on a atteint une pression voisine de la pression de fluage Pf.
- une phase plastique où les déformations augmentent rapidement. Lorsque la pression devient supérieure à Pf il se développe autour du trou des surfaces de rupture.
- la phase des grandes déformations ou d'équilibre limite dans laquelle les déformations deviennent infinies pour une valeur asymptotique de P appelée pression limite et notée Pl (caractéristique de rupture).

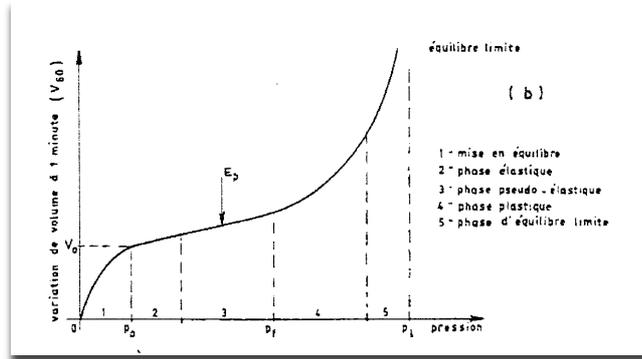


Figure 32 : Courbes pressiométriques : J. Costet et al, Cours pratiques de Mécanique des sols

A partir de la courbe pressiométrique on peut déduire les paramètres géotechniques suivants :

- **G** : le module de cisaillement qui définit le comportement pseudo-élastique du sol
- **Em** : module pressiométrique Ménard (dans la partie pseudo-élastique) :

$$E_m = 2(1 + \nu) \cdot V \cdot \frac{\Delta p}{\Delta V}$$

avec $V = \pi \cdot L \cdot r^2$ L= longueur sonde, r= rayon sonde

ν étant le coefficient de poisson égal à 0,33 selon Ménard

- **p0** : pression naturelle. Elle est considérée, en terrain normalement consolidé, égale à :
 $p_0 = k_0 \cdot \sigma_{v0}$

avec : **k0**: coefficient de poussée au repos ($1 - \sin \varphi$)

σ_{v0} : contrainte sur une facette horizontale = $(\gamma - \gamma_w) \cdot z$

- **pf** : pression de fluage qui définit la limite entre l'état pseudo-élastique et l'état plastique :

$$p_f = p_0 \cdot (1 + \sin \varphi) + c \cdot \cos \varphi$$

avec : φ et c étant l'angle de frottement entre les grains et la cohésion interne respectivement

- **p_L** : pression limite qui caractérise la résistance de rupture du sol. Déterminé parfois par la courbe inverse ($1/v$. fig.43), mais souvent prise conventionnellement égale à la pression qui conduit à doubler le volume initial de la sonde.

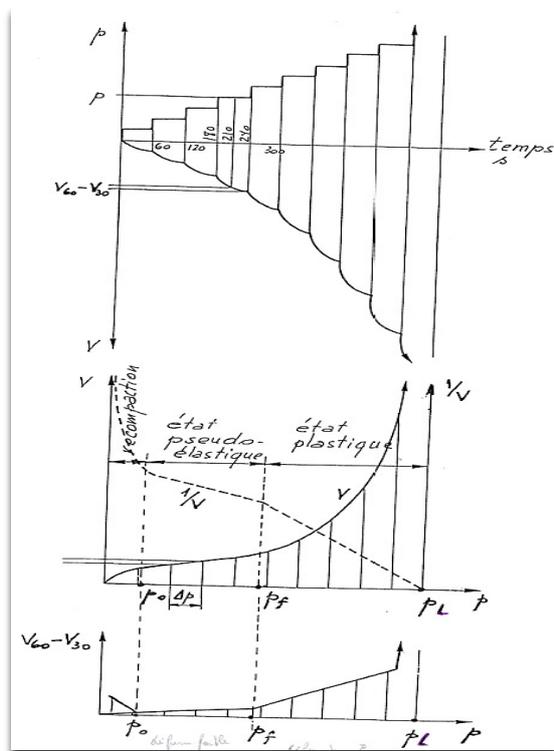


Figure 33 : transformation de la courbe corrigée (en haut) en une courbe préssiométrique (au milieu) et une courbe de fluage (montrée en bas) pour déterminer graphiquement la prèssion de fluage (p_f) et la pression limite (p_l)

La courbe de fluage (fig.33) traduit les variations de volume mesurées entre 30 et 60 secondes pour chaque palier de pression. Cette courbe permet de définir la pression de fluage P_f (plus aisément sur la courbe) proche de la pression définissant la fin de la réponse pseudo élastique du sol.

3. Résultats et discussion:

Comme il est montré dans le programme, le projet recommande cinq essais pressiométriques de Ménard (cf. programme de l'étude plus haut). En relation avec l'exécution des sondages de reconnaissance, il est devenu inéluctable de commencer par les points de reconnaissance qui correspondent aux sondages carottés déjà réalisés, il s'agit en effet de **SP2**, **SP3** et **SP4** (fig.13). Toutefois, les résultats qui sont, à présent, à notre disposition, sont ceux correspondant au SP2. Les mesures ont été effectuées sur chaque mètre en commençant les mesures par le premier mètre jusqu'au point où la profondeur indiquera 20m (selon la recommandation du maître d'ouvrage sur le programme d'étude).

Après l'acquisition, une étape de traitement doit être réalisée pour déterminer à la fin : la pression de fluage, la pression limite et le module pressiométrique.

Dans la suite, on montre les résultats de l'essai pressiométrique correspondant au PS2 avec corrélation aux faciès lithologique pour chaque profondeur (fig.34).

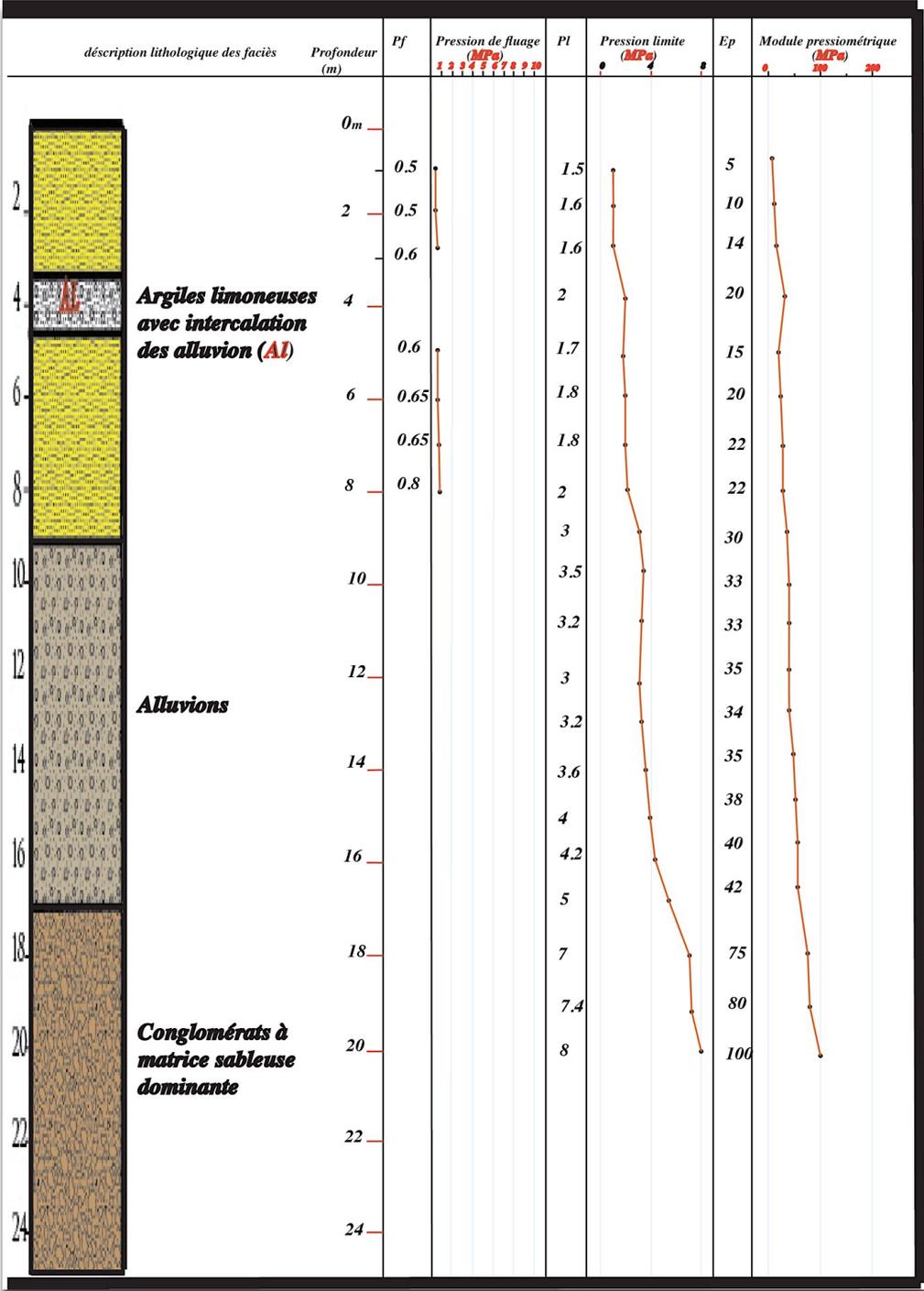


Figure 34 : résultats de l'essai pressiométrique SP2 avec corrélation à la lithologie

Ces résultats sont ensuite employés dans des formules mathématiques spécifiques, par le bureau d'étude, pour : le calcul de dimensionnement de fondations superficielles et profonde, le calcul de tassement, la détermination de la contrainte admissible, capacité portante d'une fondation superficielle/profonde...

Chapitre III : Etude Par Sismique

Réfraction : Acquisition, Traitement et

Interprétation

Parmi les méthodes d'exploration du sous sol, la sismique réfraction a pour vocation principale la reconnaissance des massifs rocheux dans le cadre des projets d'implantation d'ouvrages d'art (le barrage Fask pour notre cas), et ceci sous deux aspects fondamentaux :

- a) la recherche et le suivi de l'évolution de la position du substratum sous une couverture meuble ;
- b) la caractérisation de l'état physique des diverses zones du massif rocheux par la connaissance des vitesses sismiques de chacune de ces zones.

L'application la plus courante est l'analyse des propriétés mécaniques des massifs préalablement à l'édification des grands ouvrages de travaux publics (barrages, grands travaux ...). Cette méthode peut aussi être utilisée en association avec d'autres techniques dans le cadre de la reconnaissance d'aquifères, de la caractérisation des terrains ou de recherche indirecte de matériaux. Il est important de ne pas confondre la sismique réfraction, méthode adaptée aux reconnaissances à faible et moyenne profondeur (200 m maximum), avec la sismique réflexion, méthode sismique de base pour les reconnaissances à très grande profondeur, qui met en jeu des moyens et des investissements incomparablement plus importants. Cette différence est celle qui existe entre la grande production industrielle et l'artisanat. Il en résulte qu'en sismique réfraction le nombre très réduit d'intervenants impose à ceux-ci des connaissances très étendues en physique et en géologie. Dans la chaîne de production d'une mission de géophysique réfraction il n'existe quelquefois qu'un seul échelon qui assure la collecte des données et leur interprétation. L'ingénieur géophysicien peut ainsi être amené à prendre en charge les mesures, le traitement et l'interprétation géophysique des données, et enfin la traduction géologique ou géotechnique de cette interprétation, ceci fait l'objet du présent chapitre.

I. Théorie de la sismique réfraction :

A. Principe de la méthode :

En sismique réfraction, une source d'énergie est utilisée pour transmettre à un instant précis (T_0) des ondes acoustiques qui se propagent dans le sol et le roc sous-jacent. Ces ondes acoustiques se divisent en quatre catégories principales ("P", "S", Love et Rayleigh, fig.35) en fonction de leurs modes de propagation. Les ondes "P" et "S" sont principalement mises à profit dans le calcul des profondeurs et des propriétés élastiques des matériaux. L'onde "P", aussi appelée onde de compression ou onde longitudinale, se propage à une vitesse double de celle de l'onde

"S", aussi nommée onde de cisaillement ou onde transversale. Les ondes "P" et "S" se propagent dans le sol, en se conformant aux lois de la propagation des ondes, en particulier à la loi de Snell-Descartes. De ce fait, dans un terrain constitué de couches horizontales dont la vitesse de propagation pour chaque couche augmente avec la profondeur, une partie des ondes est réfléchiée, et une partie est réfractée à l'interface entre chaque couche. Certaines de ces ondes sont réfractées critiqueusement, c'est-à-dire qu'elles se propagent dans un plan parallèle à la surface du réfracteur. C'est cette propriété qui est mise à profit en sismique réfraction.

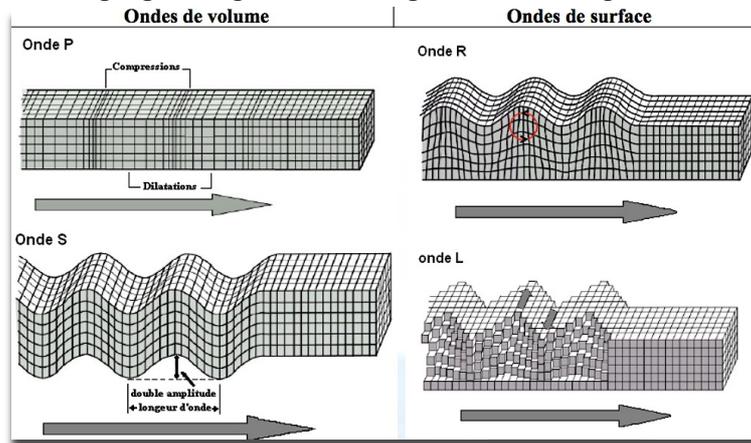


Figure 35 : différents types des ondes sismique

La technique consiste donc à mesurer le temps écoulé entre l'instant T_0 et l'arrivée des ondes en surface à des distances connues de la source d'énergie. Lorsque l'on est près de la source, les premières ondes enregistrées sont celles qui se sont propagées dans la première couche ; à mesure qu'on s'éloignera de la source, les premières arrivées seront les ondes qui auront voyagé à la surface de chacune des couches puisque la vitesse de propagation dans ces couches étant plus grande, le temps de parcours est plus court.

Dans la pratique, on utilise un dispositif similaire à celui représenté schématiquement (fig.36 et 37). Une série de vingt-quatre géophones sont couplés mécaniquement au sol à intervalle régulier (5 mètres dans le cas qui nous occupe). Ces géophones transforment l'onde acoustique reçue en une onde électrique qui est transmise à un enregistreur numérique à 24 canaux qui amplifie, filtre et mémorise la forme de l'onde pour chacun des géophones. Par la suite, ces résultats seront imprimés ou enregistrés sur support magnétique pour être interprétés.

En général, cinq (5) tirs seront effectués à des endroits stratégiques de manière à résoudre les incertitudes dues à la géométrie des couches et à la non-homogénéité du milieu (fig. 36).

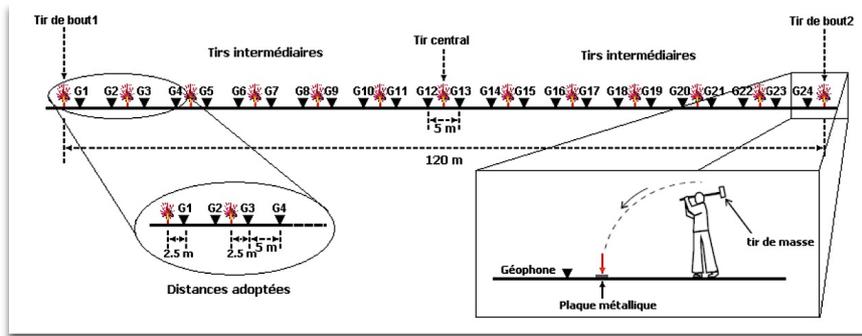


Figure 36 : principe de l'acquisition sur terrain : l'équidistance, généralement, est de l'ordre de 5m entre 24 géophone, les tirs sont répartis d'une manière symétrique sur le dispositif de 120m, avec 2 tirs au bout, deux tirs intermédiaire et un tir

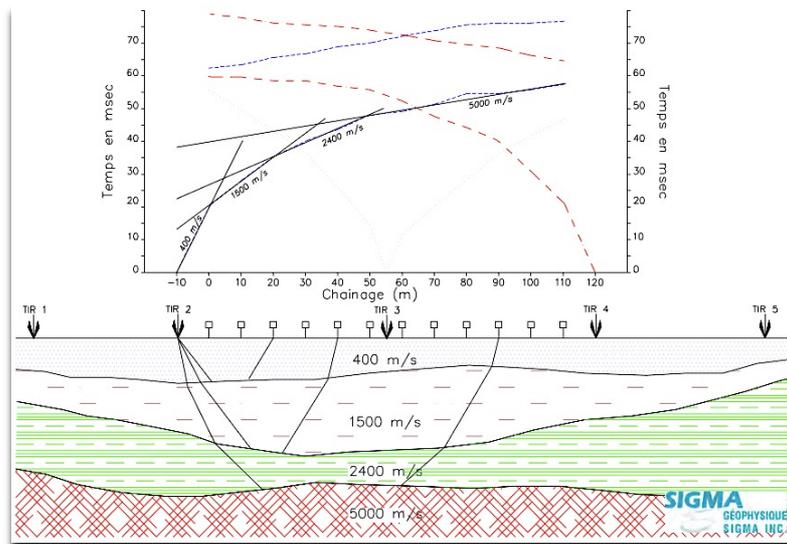


Figure 37 : principe de la sismique réfraction

La sismique réfraction, comme il est connu, étudie les variations de la vitesse sismique des ondes réfractées du sous-sol, variations qui sont en relation avec la dureté, le degré de consolidation et de (fig.38) la saturation. Avec cette méthode on peut distinguer la roche compacte du terrain meuble, la roche saine et la roche altérée, les zones fracturées dans une roche saine et le niveau de la nappe phréatique.

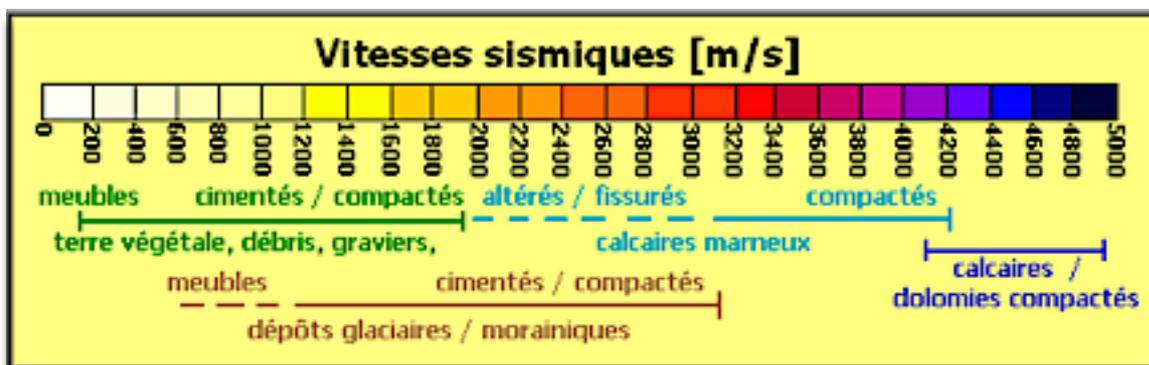


Figure 38 : Exemple de répartition des vitesses sismiques à différentes couches lithologiques

En ce qui concerne les sources utilisées en sismique, on trouve généralement des sources créées soit par un coup de masse sur une plaque métallique, ou bien par l'explosion de dynamite, si les conditions leur permettent (surtout celles liées au côté financier), on peut envisager les vibrations cohérentes d'un camion vibreur, (fig.39) etc...



Figure 39 : différentes sources d'ébranlement

La source produit une onde de choc qui se propage dans le sous-sol à des vitesses différentes et selon des trajets qui suivent des lois analogues à celles de l'optique ondulatoire (loi de Snell-Descartes et de Fermat). Il se produit alors des réflexions de réfraction et des guidage d'onde. Les vibrations sont enregistrées à la surface du sol par des capteurs sensibles à la vitesse de déplacement du sol, les géophones (fig.40). En fonction du dispositif de terrain utilisé, l'analyse des temps d'arrivée des ondes directes, réfléchies, ou réfractées permet de calculer les vitesses sismiques et les épaisseurs des terrains (dans la phase du traitement).

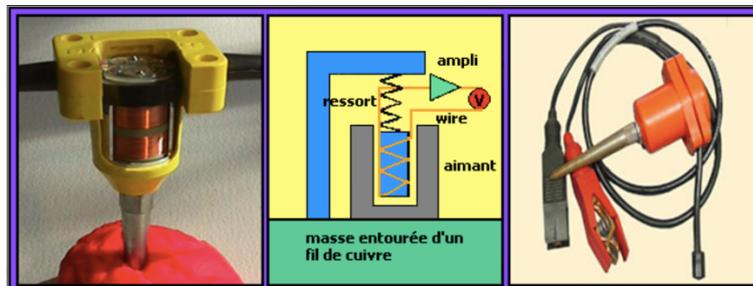


Figure 40 : capteur sismique, géophone

B. Théorie et calcul :

Le traitement des signaux reçus par les géophones, nous il permet de tracer la courbe caractéristique des temps d'arrivée des ondes sismiques en fonction des distances séparant les géophones, le dromochronique (fig.41). Dans le dromochronique, le comportement des ondes de réfraction vis-à-vis les temps d'arrivés par rapport à celles de réflexion est différentes (fig.41), cela est dû sûrement aux différences de vitesses dans les diverses couches (on admet que les vitesses sismiques augmentent proportionnellement à la profondeur).

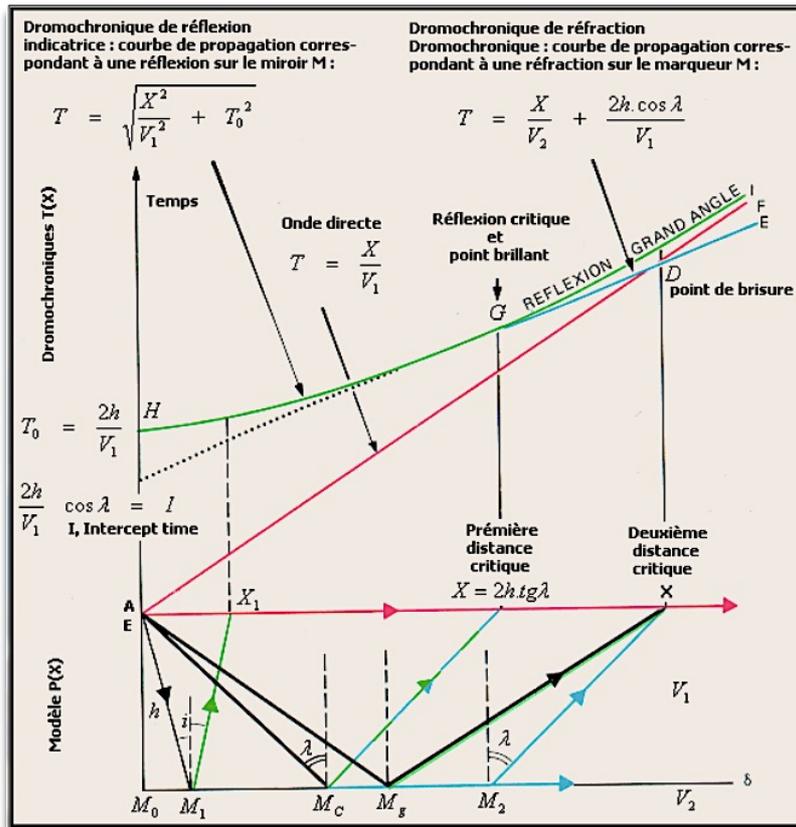


Figure 41 : rapport entre les différentes ondes sismiques et leurs hodochrones équivalents

Dans un milieu homogène la mesure de la vitesse consiste simplement à mesurer le temps d'arrivée, t_d de l'onde P directe. A une distance x du point d'ébranlement on a :

$$v_p = \frac{x}{t_d}$$

S'il existe dans le sol un interface séparant un premier milieu de vitesse V_1 d'un deuxième de vitesse V_2 , deux phénomènes peuvent provoquer une remontée de l'onde vers la surface et permettre l'observation de l'arrivée d'une onde : **une réflexion** et, si $V_2 > V_1$ et que l'on est à une distance suffisante du point source appelée distance critique x_c , **une réfraction**. Chacun de ces deux phénomènes a donné naissance à une technique de prospection, il existe une sismique réflexion et une sismique réfraction.

L'imagerie par réfraction est basée sur la mesure des temps d'arrivée des ondes premières qui sont les ondes directes et réfractées. Cette imagerie est donc basée sur l'analyse des hodochrones des ondes directes et réfractées. L'hodochrone d'une onde directe ou réfractée est appelée dromochronie $t = f(x)$, la manipulation de ce dernier permet d'évaluer la vitesse et l'épaisseur des terrains.

S'il l'on prend deux couches avec un réflecteur incliné comme cas de figure, nous aurons alors affaire à déterminer l'épaisseur de la première couche (l'épaisseur de la deuxième couche est considérée infini) et son angle d'inclinaison (pendage de la couche, φ).

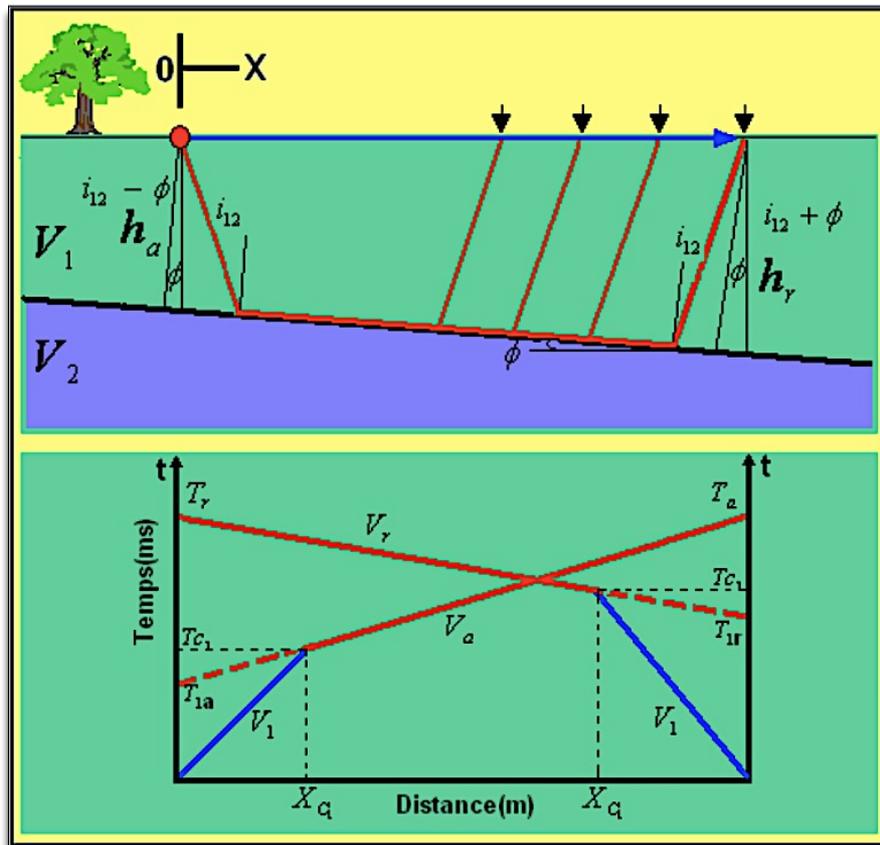


Figure 42 : cas de deux couches séparées par un réflecteur incliné

Le calcul fait appelle aux lois de la physique optique, lois de Snell-Décarte :

$$\text{on a : } V_a = \frac{V_1}{\sin(i_{1,2} + \varphi)} = \frac{V_2}{\sin(i_{1,2} - \varphi)}$$

$$V_r = \frac{V_1}{\sin(i_{1,2} - \varphi)} = \frac{V_2}{\sin(i_{1,2} + \varphi)}$$

$$\text{d'où : } \varphi = \frac{1}{2} \left(\sin^{-1} \frac{V_1}{V_a} - \sin^{-1} \frac{V_1}{V_r} \right)$$

$$i_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\sin^{-1} \frac{V_1}{V_a} + \sin^{-1} \frac{V_1}{V_r} \right)$$

pour les épaisseurs, on a :

$$h_a = \frac{V_1 T_{1a}}{2 \cos i_{1,2}}$$

$$h_r = \frac{V_1 T_{1r}}{2 \cos i_{1,2}}$$

Ainsi, la mesure des vitesses apparentes des différentes branches des dromochroniques de réfraction pour les tirs amont (directs, aller) et aval (inverses, retour) permet de déterminer les vitesses et les pentages des différents réfracteurs composant le sous-sol ainsi que les valeurs des angles d'incidences et les angles d'émergences.

Après avoir donnée la base théorique de la méthode à envisager, on va concrétiser cette théorie dans la pratique en suivant la démarche de l'ingénieur géophysicien : acquisition, traitement et interprétation (en terme de géologie). Puis une synthèse générale à partir des deux derniers chapitres.

II. Sismique Réfraction : Acquisition :

Dans une première approche, il s'avère bien claire que plus les enregistrements bruts sont nets et propres, plus la deuxième étape, leur traitement, serait moins pénible. Dès lors, pour éviter l'atténuation de l'onde par la couche superficielle de matériaux lâches, les capteurs utilisés étaient des géophones fermement plantés dans le sol (ou dans les fractures rencontrées dans l'affleurement rocheux) (fig.43). De même, le bruit causé par le vent et par le passage des véhicules devrait être compensé par une forte chute de massette sur une plaque métallique (utilisé comme source d'énergie dans notre cas).



Figure 43 : illustration photographique montrant l'implantation des géophones

Le matériel d'acquisition est composé de :

- *Un enregistreur sismique ABEM Mark 6 à 24 canaux permettant l'acquisition, la visualisation le traitement du signal et son stockage sur un support magnétique (fig.44).*



Figure 44 : illustration photographique de l'appareil de mesure

- *Un ensemble de 24 géophones de 10Hz de fréquences propre, sensible au déplacement des particules du sol.*
- *Quatre flûtes à 12 voies permettant l'acheminement du signal depuis les récepteurs jusqu'à l'enregistreur.*
- *Un marteau de 15Kg pour la génération d'ondes*
- *Un véhicule utilitaire pour le déplacement du personnel et du matériel.*

Pour l'ensemble de ces dispositifs, les distances sont à considérer selon la pente naturelle du terrain et non l'horizontale.

Les dispositifs de mesure étaient constitués de 24 géophones espacés de 5m. Pour obtenir un profilage continu, 5 tirs par dispositif étaient effectués, avec de la chute de masse comme source d'énergie :

- *un tir au bout distant à -2.5 mètre du premier géophone (étant donné que la distance entre deux géophones est d'ordre 5 mètres, le dispositif sera espacé alors de 115 mètres depuis le premier géophone jusqu'à le dernier) ;*
- *un tir intermédiaire situé entre le géophone 6 et 7 (distant de 27,5 mètre du premier géophone) ;*
- *un tir au centre entre le géophone 12 et 13 (distant de 57,5 du premier géophone) ;*
- *un deuxième tir intermédiaire entre le géophone 18 et 19 (distant de 87,5 du premier*

géophone) ;

- *un deuxième tir au bout situé à +2,5 du dernier géophone, le 24 (distant de 117,5 du premier géophone)*

La longueur du dispositif depuis le premier tir jusqu'à le dernier est équivalent à 120 mètres. Il faut noter qu'à côté de chaque tir un géophone de sensibilité doit être implanté pour bien préciser le temps zéro (le déclenchement de l'enregistrement alors). Ce géophone est connecté directement avec le centre par un câble électrique.

Les ondes sismique P de nature élastique sont capté par les 24 géophones et transformées via ces derniers en signaux électriques qui vont se transmettre à leur tour à un enregistreur numérique à 24 canaux (le centre) qui amplifie, filtre et mémorise la forme de l'onde pour chacun des géophones. L'aspect de chaque enregistrement est dépendu du positionnement du tir en question (fig.45).

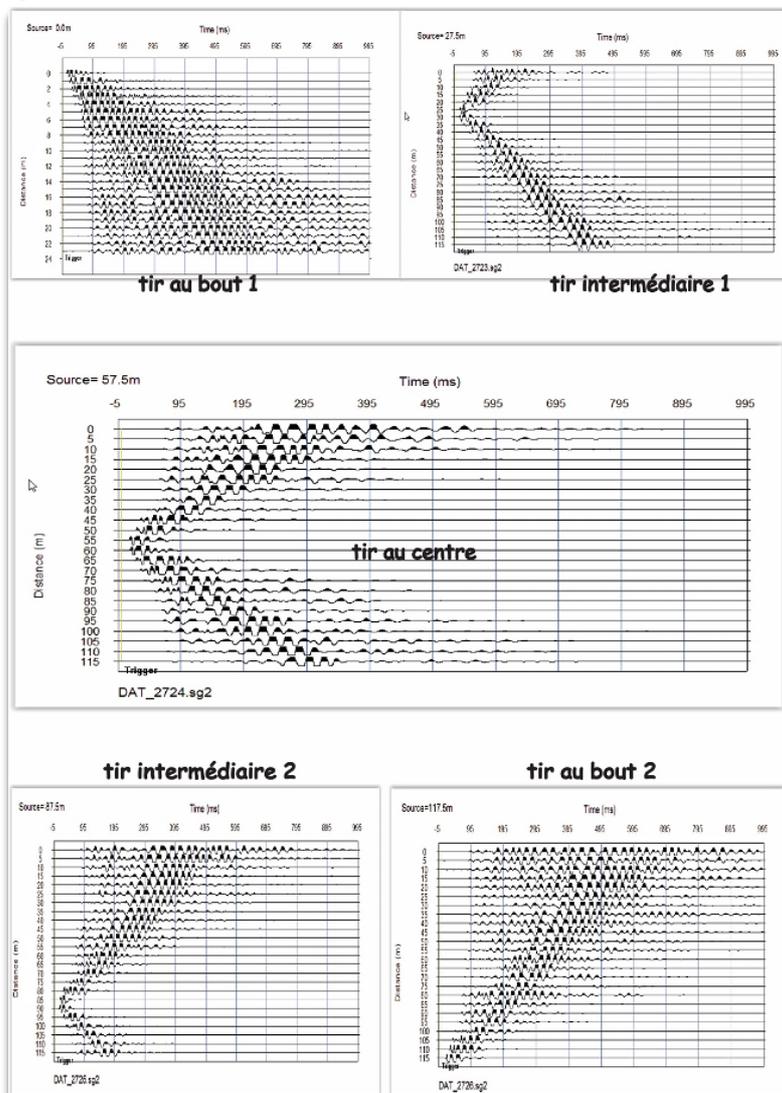


Figure 45 : illustration des enregistrements correspondants à chaque tir : un exemple d'une base sismique situé sur le profil PS1 (situation sur le plan d'implantations fig.13 et 48)

III. Sismique Réfraction : Traitement :

Les enregistrements captés lors de l'acquisition doivent ensuite être analysés via un logiciel spécifique, SeisImager. On va essayer de citer, grosso modo, les étapes de traitement nécessaires dans la suite de la présente section afin d'aboutir à une meilleure interprétation.

Le logiciel de traitement, SeisImager, est constitué d'une suite d'applications intégrées, chacune est spécifique à un traitement donné (Pickwin, Plotrefa, PSLog, GeoPlot, Wave Eq). Cependant vue l'objectif simple de notre projet : la modélisation, en terme de bathymétrie, du toit de substratum rocheux (en prenant en considération le paramètre physique décelé, la vitesse sismique, et non pas la nature de la roche proprement dit, il s'agit alors de modéliser le toit de la roche dure que ce soit les conglomérats indurés ou bien le grès quartzeux du socle acadien selon la localisation de la coupe géosismique et de la profondeur d'investigation atteinte), on n'aura besoin que de Pickwin pour le pointage des arrivées des ondes P et Plotrefa pour définir les hodochrones correspondants à chaque pointage et calculer le model final en terme d'épaisseur des couches pour aboutir au final à des coupes géosismique qui vont faciliter l'interprétation en terme de géologie (corrélation aux sondages carottés).

A. Pickwin : lecture et pointage des enregistrements bruts

Cette application consiste à pointer, comme il est déjà cité, les arrivées des ondes sismiques P pour chaque géophone. On aura alors, pour chaque géophone, la distance qui sépare le géophone en question du point de référence, géophone 1 (là où la base sismique commence) et le temps d'arrivée (ainsi défini par le pointage sur l'enregistrement) de l'onde sismique primaire (fig.46). Dès lors, les vitesses sismiques correspondantes sont prêtes à calculer, puisque l'on a déjà les distances et les temps correspondants, selon la théorie classique des ondes élastiques sous-tendue par la loi de Snell-Décarte, ce calcul permettra de définir les dromochronique correspondants. Cette opération est réalisée par l'application Plotrefa.

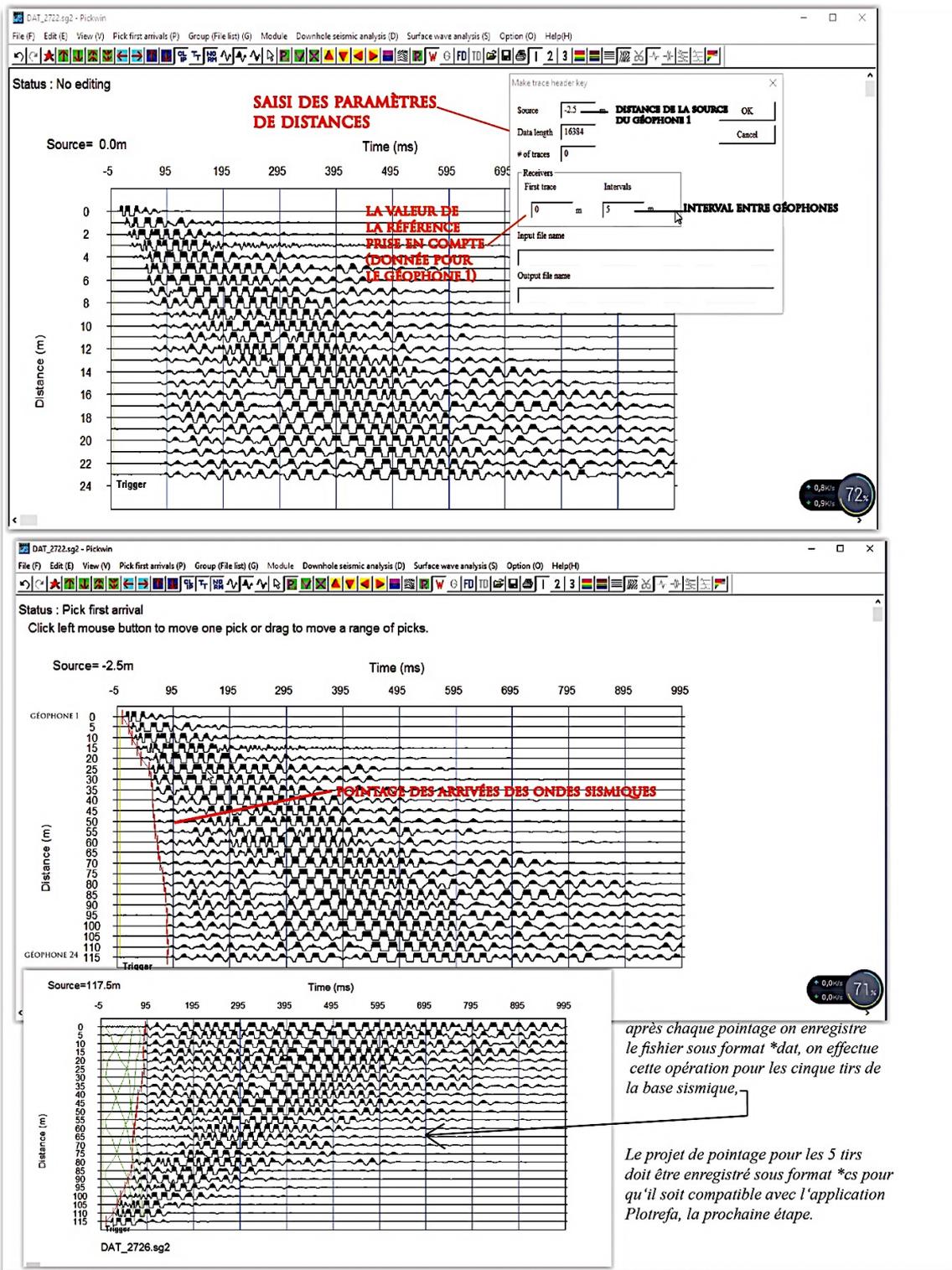


Figure 46 : illustration des étapes à effectuer lors du pointage via Pickwin

B. Plotrefa : calcul des dromochroniques et des épaisseurs :

A la base du travail réalisé via Pickwin, le calcul des vitesses sismiques et celui des épaisseurs est désormais possible. Pour ce faire, on fait appel à l'application intégrée à SeisImager, Plotrefa. Le traitement consiste, après importation du fichier *.vs réalisé depuis Pickwin, à avoir

une idée, en premier lieu, sur le nombre des éventuelles couches en comptant le nombre de brisures (points de flexion sur les dromochroniques), le nombre de couche est généralement égal au nombre de brisures plus 1. Après, on génère le model initial : cela consiste à introduire les paramètres théoriques que l'on définit au logiciel au dépend des caractéristiques métriques du dispositif mises en jeu (nombre de géophone, équidistance entre géophone et longueur du dispositif qui en dépend) il est considéré comme une préparation pour le model final. En fin le model final est calculé après modification de certains paramètres physique (le nombre de couches vue depuis le model initial ainsi que les vitesses sismiques données pour chaque couche (fig.47). Il faut noter qu'après chaque saisi de paramétrage il faut envisager une inversion pour prendre en considération les paramètres introduits depuis le manipulateur dans le calcul du model.

Un fichier *.txt comprenant des données d'élévation doit être importé, avec le fichier *.vs, au logiciel pour prendre en considération la topographie lors de l'interprétation³.

³ Cela peut être généré par Global Mapper à l'aide d'un fichier DEM et en introduisant le trait de la base sismique, exporté depuis Google Earth sous format *.kmz, dans Global Mapper. Puis on effectue, à l'aide de l'outil « coupe topographique » () , un trait de coupe superposé au trait de la base sismique à traiter. Après ceci on exporte notre fichier sous format *.txt. Le fichier ainsi exporté doit être modifié de telle sorte qu'il doive être présenté les valeurs de distances de chaque géophone (0,5,10...,115) dans la première colonne ainsi que celles des altitudes correspondantes dans la deuxième colonnes (ces deux colonnes doivent être séparées par un espace)

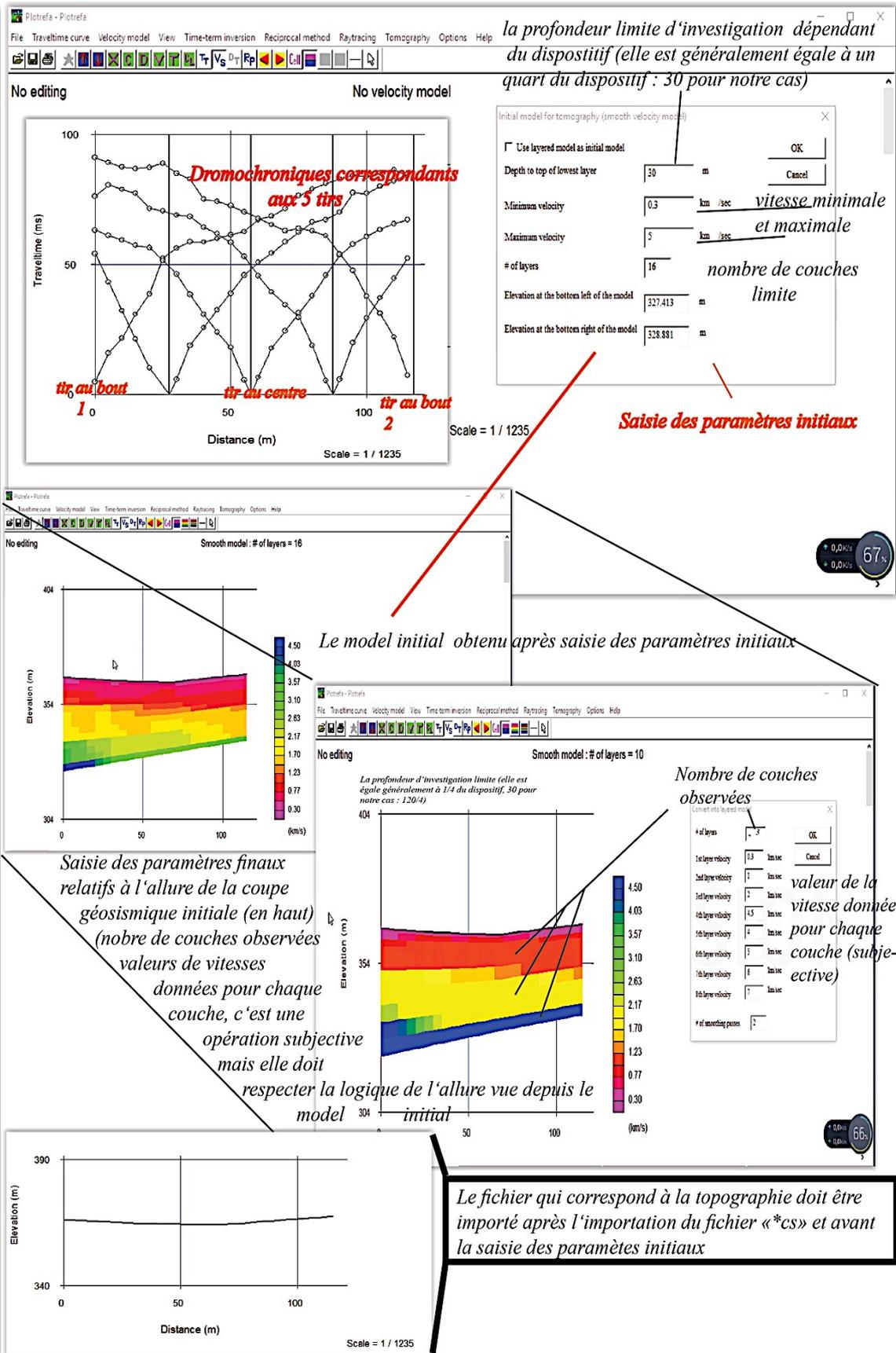


Figure 47 : illustration des étapes à effectuer via Plotrefa : exemple d'une base sismique située sur le profile PS1

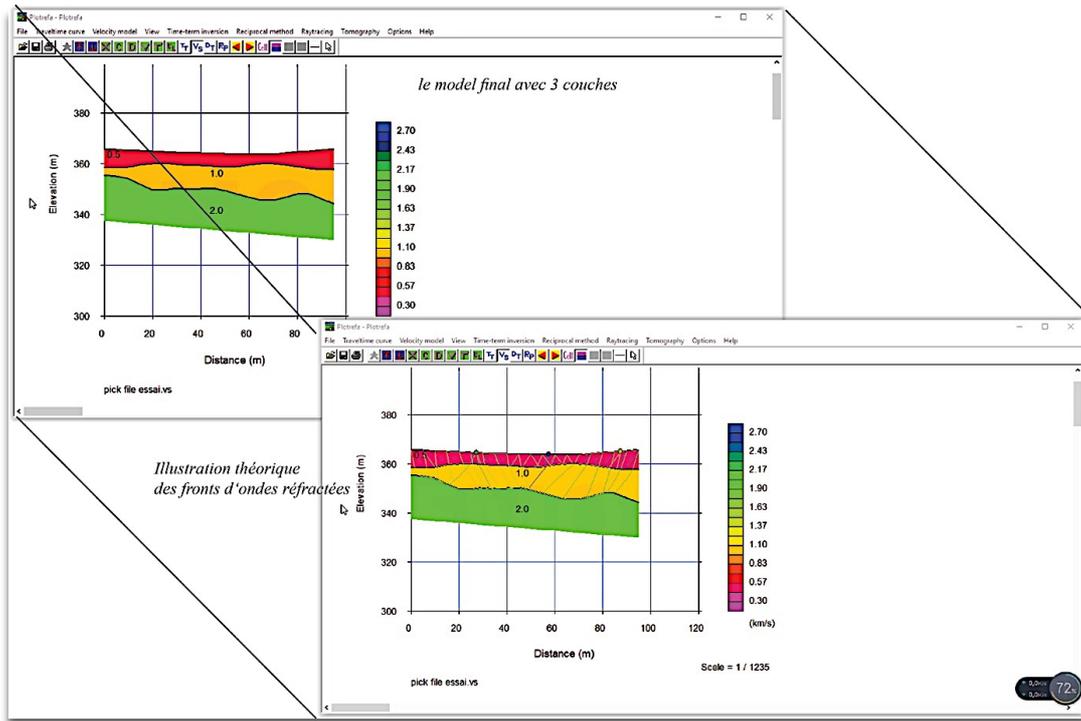


Figure 48 : illustration du model final avec 3 couches : cas d'une base sismique située dans le profile PS1

IV. Sismique Réfraction : Résultats et Interprétation :

En rapport avec le programme de l'acquisition, les profils sismiques qui sont à notre disposition jusqu'à maintenant sont les suivants : tous les profils transversaux, de PS4 jusqu'à PS11(perpendiculaires à l'axe du barrage fig.49) ; PS12, PS13 et une grande partie du PS1 comme profils longitudinaux (traversent parallèlement l'axe du barrage) (fig.49). Pour ne pas surcharger le traitement, j'ai opté pour 3 profils transversaux, vue les sondages carottés qu'en traversent (facilitant ainsi l'interprétation en terme de géologie par calage) ainsi que celui passant sur l'axe du barrage puisque ce dernier est le plus important dans tout le travail (cartographie du toit du roc depuis les deux rives du barrage).

On commence tout d'abord par le profil en long PS1 puis on entamera, par la suite, les trois en travers PS6, PS7 et PS8. Les résultats seront montrés sous forme de coupes géosismiques décelant les diverses couches (de point de vue géophysique) sous-jacentes à la surface ainsi que le substratum rocheux dure (avec une vitesse sismique généralement supérieur à 3000 m/s).

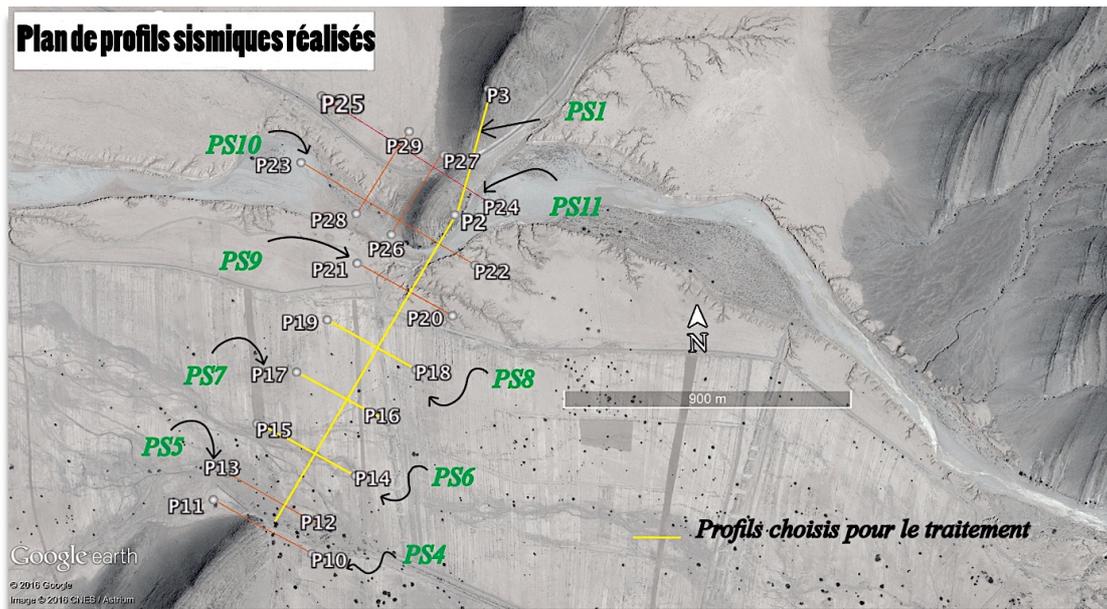


Figure 49 : plan de profils réalisés à présent avec ceux choisis pour le traitement : PS6, PS7, PS8 et PS1 qui correspond à l'axe de l'ouvrage

A. Profil en long : PS1

Ce profil, traversant parallèlement l'axe du barrage, est tellement important qu'il pourrait, tout seul, être à la base de la décision sur le potentiel du site vis-à-vis la construction d'un tel barrage ainsi qu'au choix du type puisqu'il renseigne directement sur la zone d'emprunt du barrage. Dès lors, le pointage des arrivées ainsi que le choix des paramètres à introduire dans le logiciel de traitement doivent être choisis avec plein de précision et de pertinence. Qui plus est, le produit final doit être présenté clairement et d'une manière instructive en montrant sur un même dessin la coupe géosismique, le/les sondage(s) carotté(s) correspondant(s) qui coupe(nt) le profil sismique et son/leur position(s) exacte(s) sur la coupe géosismique (ceci doit être présenté à l'échelle) ainsi que l'image satellitaire qui montre la localisation du profil et du/des sondage(s) qui lui/leur est/sont associé(s).

Avec une longueur de 1400m, le profil comporte 11 bases sismiques (plus trois bases manquantes qui ne sont pas à notre disposition à présent dont deux traversant la rive gauche et une base coupe la terrasse alluviale). Après pointage et sauvegarde sous format *vs sur Pickwin, le model initial après inversion et introduction des données de la topographie sur Plotrefa recèle 4 couches bien discernées (de point de vue géophysique et non pas géologique), le choix de vitesses correspondantes a été pour : 0.3Km/s donnée à la couche superficielle en violet ; 1km/s pour la deuxième en rouge ; 2km/s pour la troisième couche montrée en jaune ; la dernière supérieure ou égale à 4km/s en bleu (fig.50) (ce choix de vitesses est opté pour tous les autres profils sismiques).

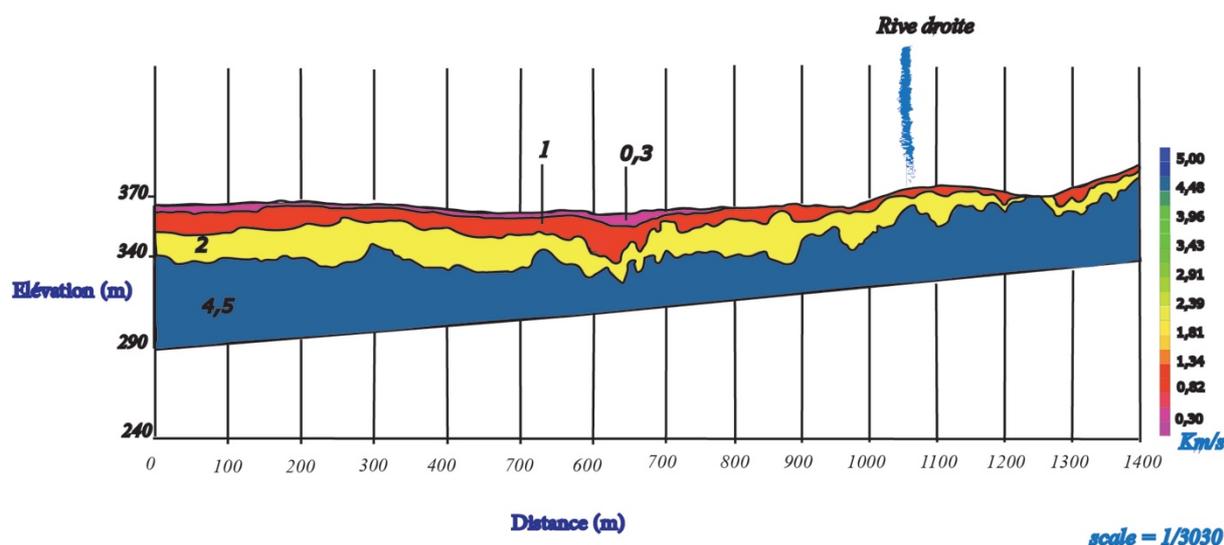


Figure 50 : coupe géosismique correspondante au profil sismique PS1

Les figurés de la coupe géosismique (fig.50) présentés sous forme de niveaux de vitesses sismiques croissantes du haut en bas, correspondent généralement à des niveaux géologiques distingués par leurs caractéristiques rhéologiques (consistance, continuité/discontinuité du matériel rocheux...). De ce fait, il se peut qu'il y en ait sur une même formation géologique deux vitesses distinctes ou plus, cela pourrait être lié au degrés d'altération, si l'on est dans le cas d'une formation près de la surface, ou bien présence de fracturations d'origine tectonique ou lithostatique affectant une partie locale du massif (cas d'une décompression liée à une érosion intense d'un paléorelief affectant forcément la partie supérieur du massif en engendrant des fractures horizontales, ou bien une surrection d'un diapir magmatique ou salifère au sein d'un massif engendrant des fractures concentriques sur le point de gravité des force ascendantes liées à la surrection). Tout cela, avec d'autre cas limitant l'interprétation en terme de géologie, constitue un vrai défi pour l'ingénieur géophysicien, l'interprétation serait, inéluctablement, sous formes de spéculations et prédictions sauf ou cas où l'on introduit dans l'interprétation des éventuels sondages de reconnaissances déjà faits. Dans notre cas, heureusement une compagnie de sondage carottés a été implantée sur le site, la société « SOLROC », au même temps que l'acquisition sismique. Comme il est évoqué dans la section qui concerne le programme du projet, trois sondages carottés doivent être au préalable envisagés dans une première phase pour la décision finale du choix de site : étant donné qu'une étude par sismique réfraction a été déjà faite sur le site amont en 1994, la comparaison entre les deux potentiels sites serait alors basée sur les résultats de sondages et ceux de la sismique disponibles (pour le site aval) avec ces données archivées (pour le site amont).

Le calage de la coupe géosismique avec les trois sondages qu'en traverse, montre bien une cohérence entre le niveau portant une vitesse de l'ordre de 4.5 km/s (c'est une valeur qui correspond, généralement, à un substratum dure) avec les Poudingues indurés (36m, 30m et 36m de profondeur pour les sondages SV5, SV7 et SV9 respectivement, fig 51). Dès lors, on peut tirer profit de la nature du rocher qui constituera le futur appui du barrage, il s'agit en fait de Poudingue indurés montrés en bleu sur la coupe géosismique (fig.50).

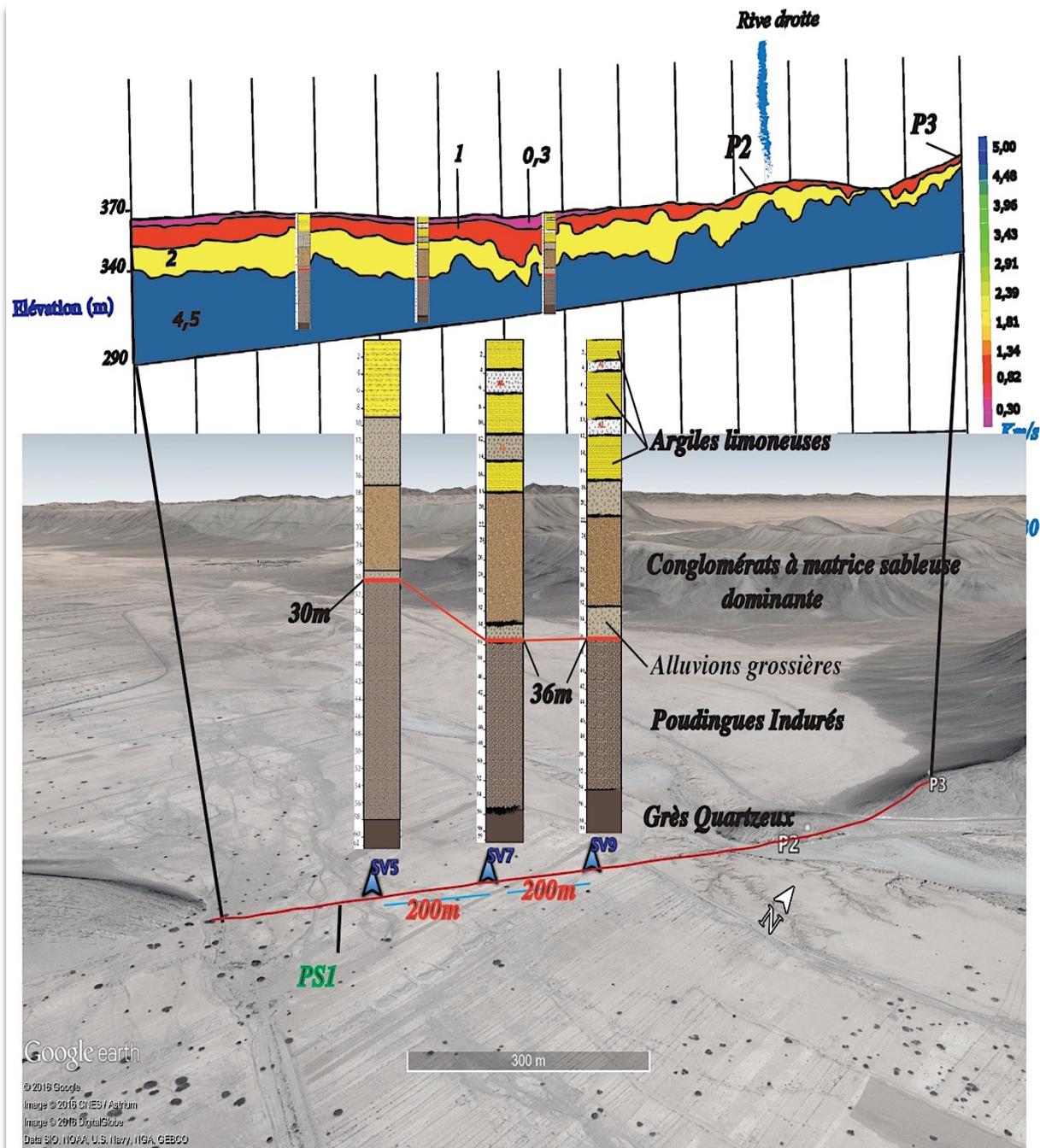


Figure 51 : calage de la coupe géosismique correspondante au PSA avec les sondages carottés SV5, SV7 et SV9 (les sondages sont à l'échelle avec la coupe)

L'analyse de la coupe géosismique montre la succession de quatre niveaux que, en rapport avec les sondages de reconnaissances, l'on peut décrire comme suit :

- Un niveau de surface, montré en violet sur la coupe, constitue la partie altérée des argiles limoneuses à peu près de 5m. ce niveau se biseaute près du fleuve, cela est dû au changement de faciès (cf. carte géologique locale) ;
- Un niveau, montré en rouge sur la coupe, lié fort probablement, pour l'extension qui couvre la terrasse alluviale et les deux lits de la rivière, à la partie moins altérée des argiles limoneuses (montre une consistance remarquable sur les caisses à carottes). Sur

la rive droite, ce niveau doit inévitablement être lié à la partie du socle Acadien la plus altérée puisque la carte géologique locale (réalisée lors de l'étude de terrain) recèle l'affleurement du Grès quartzeux constituant ainsi la rive droite. De même l'analyse microstructurale de la rive montre, comme il évoqué dans la partie de la reconnaissance géologique, l'existence de trois familles de fractures, ce qui favorise d'avantage l'altération chimique du massif via ces plans de discontinuité.

- *Un niveau montré en jaune sur la coupe, lié fort probablement aux conglomérats à matrice sableuse dominante (moins indurés) en ce qui concerne la partie couvrant la terrasse et les deux lits. Ce niveau à vitesses des ondes P égale à 2km/s correspond à la partie moins altérée du massif Acadien sur la rive droite.*
- *Un dernier niveau en bleu constituant, en quelque sorte, le substratum rocheux en terme géotechnique. Avec une vitesse de l'ordre de 4.5km/s, ce niveau recèle une consistance tellement importante que l'on lui donne le terme niveau d'assise du barrage. Dans la partie couvrant la terrasse et les deux lits, ce niveau renferme les poudingues indurés plus une partie basale du substratum Acadien. Quant à la rive droite, ce niveau en bleu est obligatoirement lié à la roche saine du substratum Acadien.*

A partir de cette analyse et interprétation en terme géologique, le bureau d'étude pourrait déclencher une étude de faisabilité en calculant le tonnage des terres à arracher dans la plaine alluviale pour atteindre le niveau d'assise, et celui pour la rive droite pour atteindre la roche saine (sans oubliant la rive gauche).

B. Profils en travers : PS6, PS7 et PS8 :

En suivant la même approche que celle du précédent, on essaiera de déterminer l'extension du substrat rocheux (ou niveau d'assise) en travers l'axe du barrage sur une distance de 360m pour chacun des trois profils.

1. Profil sismique PS1

Le premier profil choisi traverse perpendiculairement l'axe du barrage avec une longueur de 360m. il traverse également le sondage carotté SV5, ce qui permet son calage avec la coupe géosismique finale. La coupe géosismique montre, comme le cas du PS1, la succession de quatre niveaux avec des vitesses croissantes du haut en bas (0.3, 1, 2, 4) (fig.52).

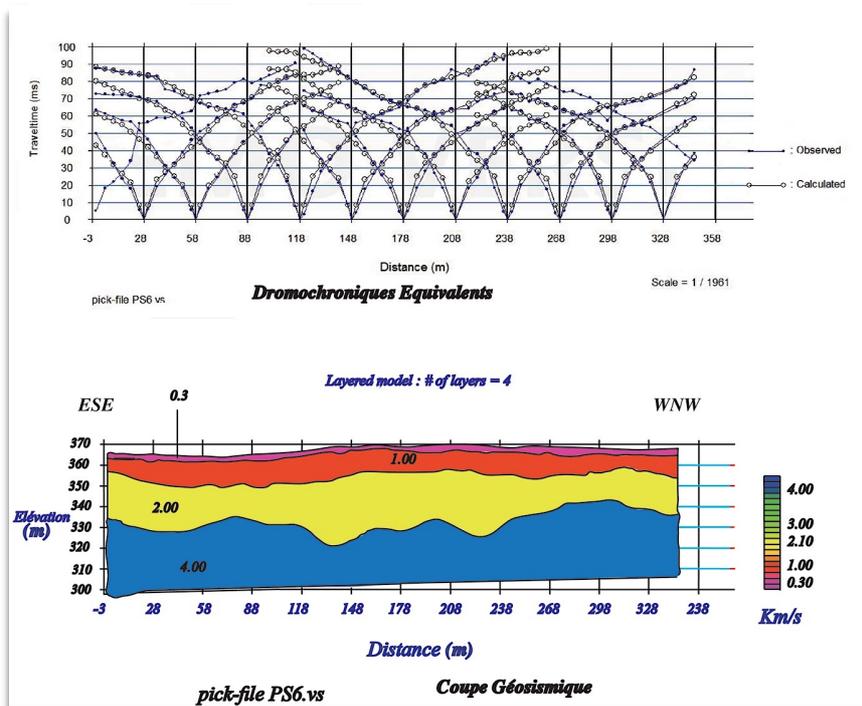


Figure 52 : coupe géosismique finale avec les dromochroniques équivalents à chaque tir pour le profil sismique PS6

L'analyse de la coupe géosismique ne montre pas une grande variation du niveau d'assise. Les niveaux sont en fait parallèles et subhorizontaux, cela est dû, probablement, à son reculement de la rivière dont il n'y avait pas un grand apport qui devrait modifier par endroit la puissance de la couverture sédimentaire. Il nous faut maintenant lier chaque niveau à son terme géologique qui lui est associé, cela peut être effectué directement par un calage avec le sondage de reconnaissance correspondant, PS5 (fig.53).

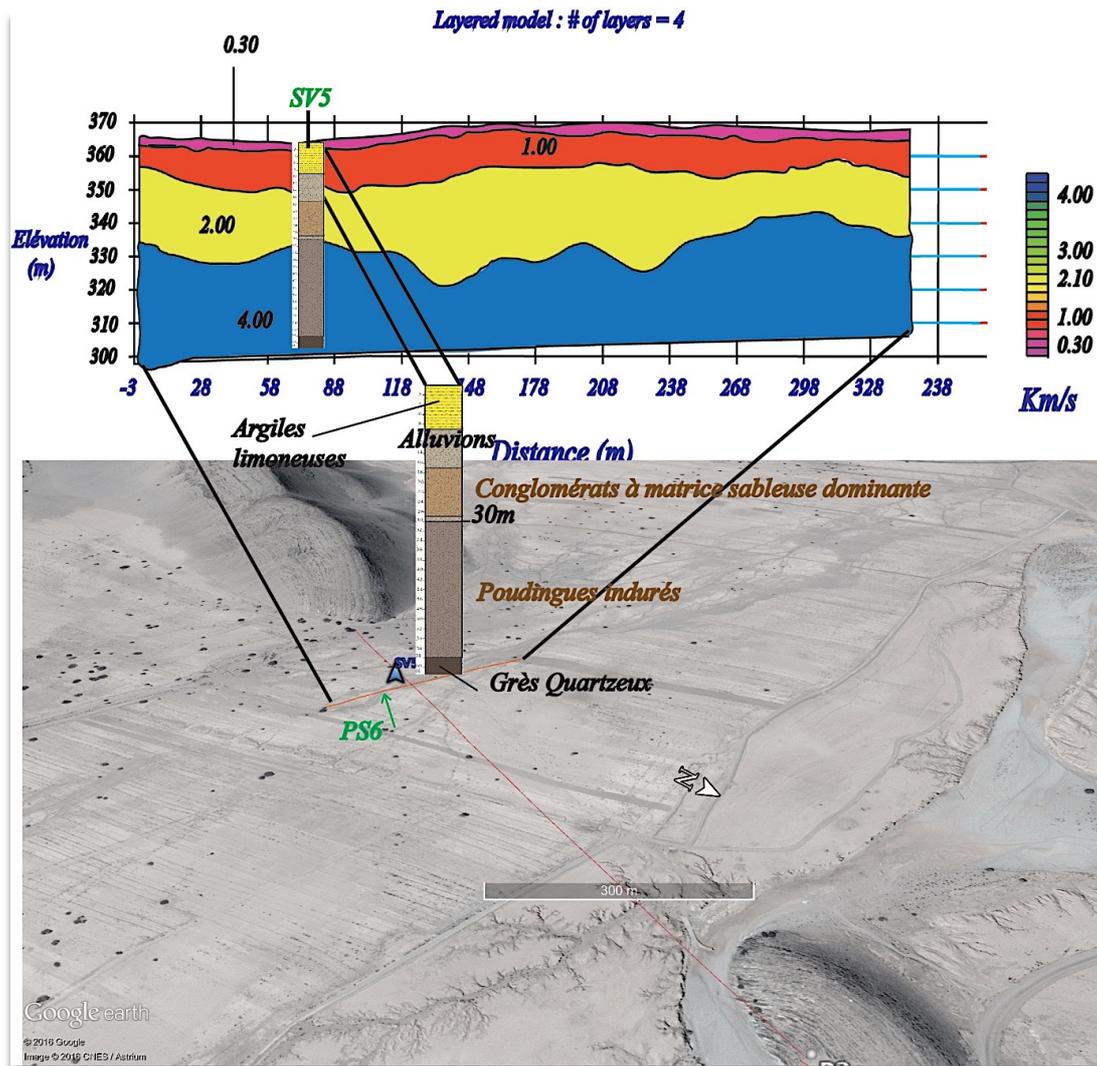


Figure 53 : calage de la coupe géosismique correspondante au PS6 avec le sondage carotté SV5 (le sondage est à l'échelle avec la coupe)

La corrélation de la coupe avec le sondage (fig.53) montre les termes géologique suivants :

- un niveau de surface, montré en violet sur la coupe, est fort probablement relié à la partie la plus altérée des Argiles limoneuses avec une puissance de 2m à 3m environ ;
- un deuxième niveau présente une vitesse de l'ordre de 1000m/s correspondrait à la partie moins affectée par les conditions climatiques (altération) et aux alluvions. Il est figuré en rouge sur la coupe géosismique et présentant une épaisseur d'environ 10m ;
- un troisième niveau, portant une vitesse de 2000m/s, correspondrait fort probablement aux Conglomérats à matrice sableuse dominante (moins indurés). Il est présenté en jaune sur la coupe géosismique et recèle une puissance d'à peu près 20m ;
- un quatrième niveau portant la valeur plus élevée des vitesses sismiques, 4000m/s. ce niveau se rapporte aux Poudingues indurés plus une partie du socle Cambrien. Il est montré en bleu sur la coupe est présentant une épaisseur infinie

(terminologie utilisée pour une telle modélisation).

2. Profil sismique PS7

En parallèle et distant de 100m du précédent (PS6), le profil PS7 traverse perpendiculairement l'axe du barrage (fig.49) avec une longueur supérieure à 300m. De même comme auparavant, la coupe géosismique montre la succession de quatre niveaux de vitesses sismiques croissantes du haut en bas (c'est normal puisque le calcul du model l'exige) : 0.3, 1, 2, 4.5km/s (fig.54).

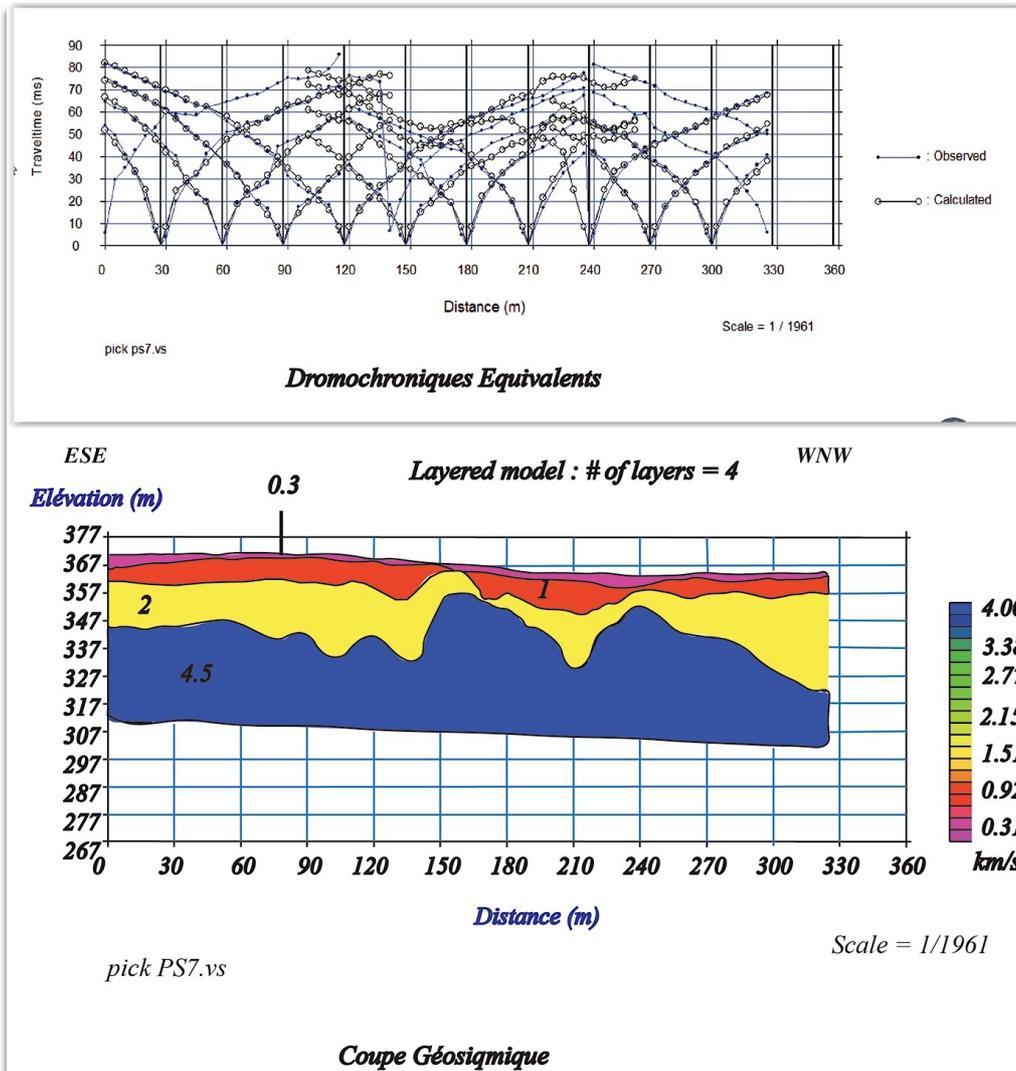


Figure 54 : coupe géosismique avec les dromochroniques équivalentes à chaque tir correspondant au PS7

La coupe géosismique montre bien une variation bien distinctive du toit de substratum/roche d'assise. Il est apparu bien claire que l'épaisseur des niveaux sus-jacents se rétrécit en milieu du profil au profit d'un plongement vers les extrémités (fig.54). Les termes géologiques associés à chaque niveau sont obtenus par une simple corrélation de la coupe avec le sondage qui lui est approprié, SV7 (fig.55).

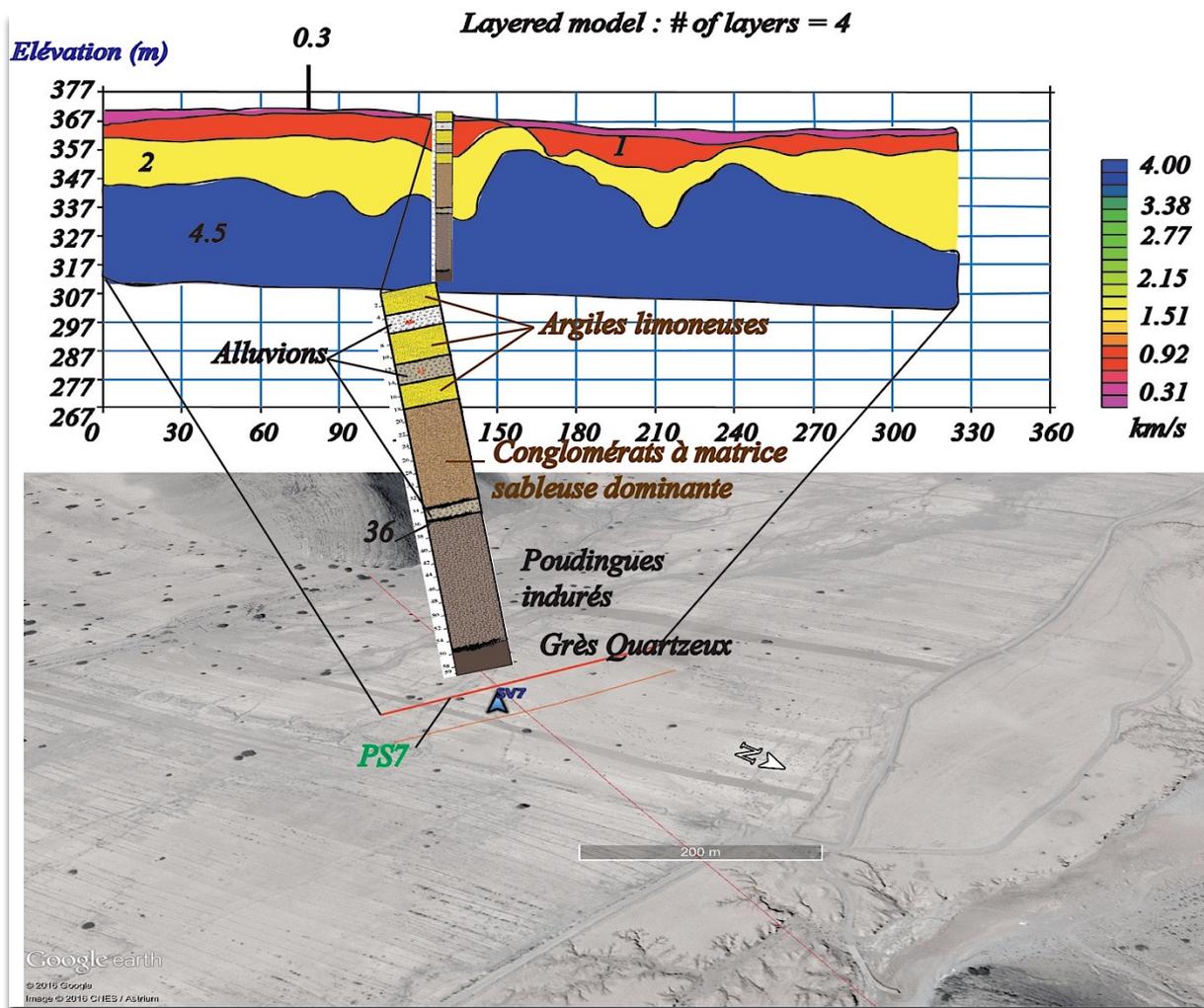


Figure 55 : calage de la coupe géosismique correspondante au PS7 avec le sondage carotté SV7 (le sondage est à l'échelle avec la coupe)

L'interprétation de la coupe géosismique, correspondante au PS7, en terme de géologie est la même montrée auparavant (cf. PS6). Il faut ajouter ici, en l'occurrence, le plongement de la couverture sédimentaire vers l'WNW, ce qui marque le début de l'enfoncement du socle Cambrien au profit de la couverture Plioquaternaire à Quaternaire dans le bassin de Guelmim (cf. Bibliographie), ce plongement (sous l'allure d'une subduction continentale) commence exactement sous le point métrique 240m du premier tir (l'extrémité ENE du profil).

3. Profil PS8 :

Le troisième profil en travers choisi, PS8, est de même parallèle et distant de 100m du précédent (PS7) et traversant perpendiculairement l'axe du barrage. La coupe géosismique correspondante montre, elle aussi, la succession de quatre niveaux à vitesses croissantes du haut en bas : 0.3, 1, 2, 4.5 (fig.56).

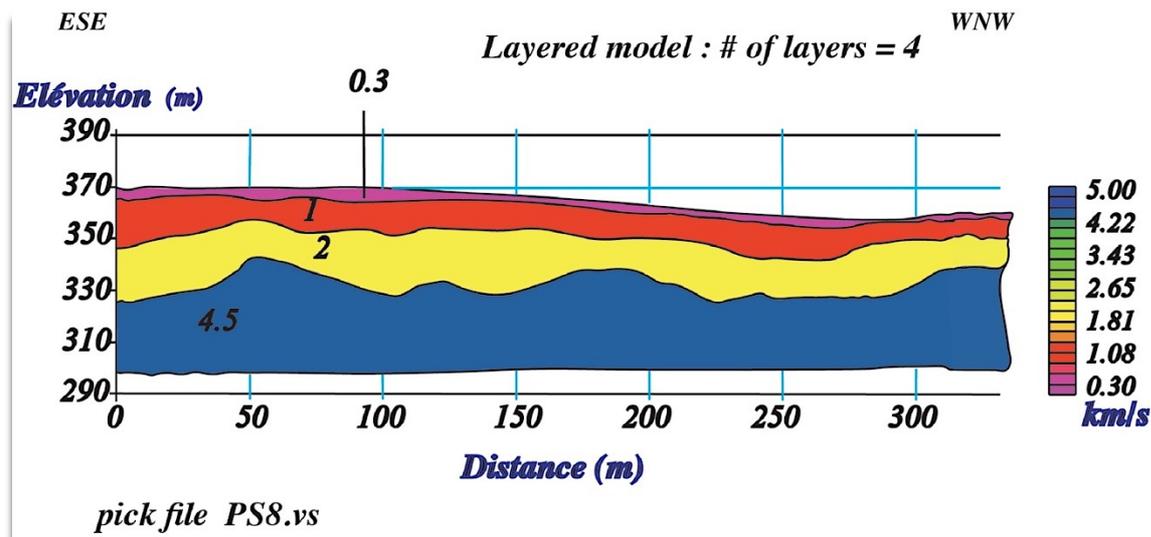


Figure 56 : coupe géosismique correspondant au PS8

La coupe géosismique révèle une diminution des épaisseurs de la couverture sédimentaire (hormis les Poudingues qui font partie du niveau d'assise montré en bleu sur la coupe). Cette diminution est en relation avec la topographie de la surface (causée par l'érosion ou bien les conditions de dépôt initiales) : on voit très clairement que le niveau métrique de la surface diminue progressivement en allant d'ESE vers le WNW (avec une différence de nivellement égale à 12m. cette diminution est due aussi à la variation du toit de niveau d'assise (Poudingues et socle Acadien). Cependant nous avons vu dans le précédent profil, PS7, que le niveau d'assise a plongé vers le WNW de la coupe, et dans ce présent profil, on voit le contraire (la profondeur du toit de ce niveau d'assise devient plus faible à l'environ de cette extrémité WNW). Est-ce que cela est dû alors à une erreur sur le model (causée par un mauvais traitement) ou bien il est tout à fait normal et pourrait être expliqué géologiquement ? c'est la deuxième hypothèse qui est la plus proche de la logique (le traitement et le choix des paramètres sont effectués avec plein de conscience et de concentration), et est expliquée en analysant, de point de vue géologique l'emplacement du profil (fig.57)

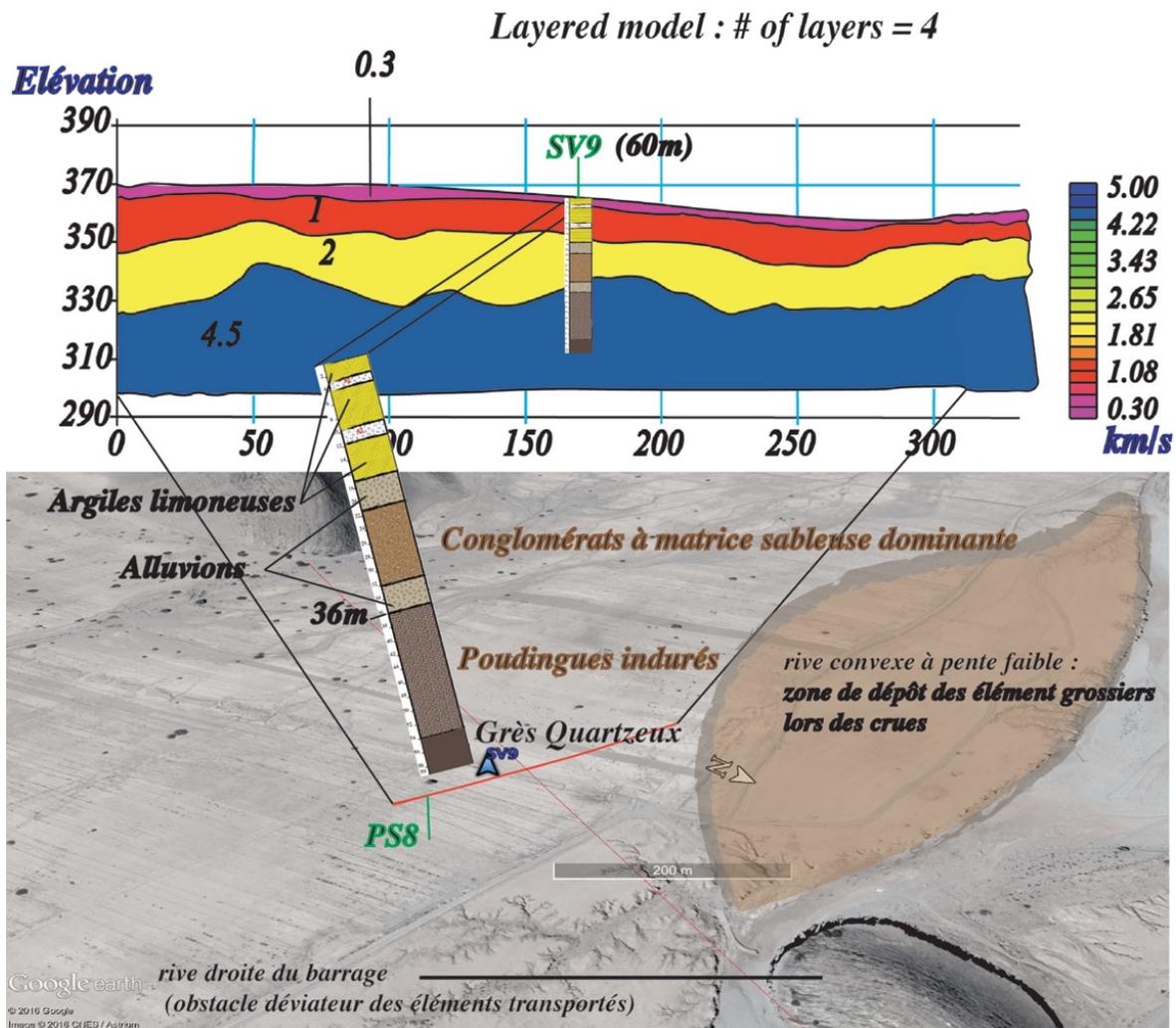


Figure 57 : calage de la coupe géosismique correspondante au PS8 avec le sondage carotté SV9 (le sondage est à l'échelle avec la coupe)

L'interprétation de la coupe en terme de géologie de ce présent profil est la même que celle des deux derniers (cf. PS6 et PS7). Cependant ce que devrait être interprété autrement, est l'anomalie rencontrée dans l'extrémité ENE de la coupe géosismique. Normalement on doit avoir l'allure du PS7 (un niveau d'assise qui plonge sous la couverture), mais ce n'est pas le cas. Cela pourrait être expliqué comme suit : on voit bien en premier coup d'œil la situation de cette extrémité WNW au voisinage de la rivière, exactement près de la rive convexe à pente faible d'un méandre (fig.57), à l'aval un obstacle qui force la déviation des éléments transportés lors de la crue (la rive droite du barrage). Les éléments grossiers transportés lors de la crue ont franchi l'obstacle en se déviant et est déposés par la suite sur la rive convexe du méandre. Avec le temps, ces alluvions grossières ont subi une diagenèse précoce et donnant par la suite des conglomérats à éléments grossiers arrondis, Poudingue indurés. Dès lors, cette vision de l'ensemble, n'empêche pas l'hypothèse du plongement du socle Acadien supérieur sous la couverture Plioquaternaire/Quaternaire évoquée auparavant (cf. profil PS7), puisqu'une grande partie des Poudingues est formée au voisinage de l'extrémité WNW (le niveau d'assise en bleu correspondrait, en grande partie, aux Poudingues).

Conclusion Générale :

L'étude d'avant-projet détaillée par la sismique réfraction, géologie (observation de terrain et sondage carottés) et géotechnique (essai pressiométrique de Ménard) nous a permis de retenir les résultats suivants :

- *les deux rives du futur barrage sont formées de grès quartzitique constituant le socle Acadien. Elles présentent un degré de fracturation très important, ce qui exige un traitement d'étanchéité durant la phase de construction, ou bien un creusement jusqu'à la roche saine (moins altérée) en profitant à des résultats de la sismique réfraction ;*
- *entre les deux rives du barrage, les trois sondages carottés montrent une couverture sédimentaire, formée de matériaux détritiques transportés par la rivière, d'une puissance d'environ 55m, le socle est gagné entre 54m et 56m ;*
- *l'essai pressiométrique de Ménard indique une augmentation du module pressiométrique et de la pression limite (le fluage est absent pour les alluvions et les conglomérats), cela va aider le bureau d'étude pour savoir la nature rhéologique des premiers vingt mètres (calcul de la charge admissible, calcul de tassement...).*
- *les résultats de la prospection géophysique indique que les poudingues indurés présentent une réponse, vis-à-vis la propagation des ondes sismiques, presque identique, ce qui nous permet de considérer les poudingues comme niveau d'assise.*

D'après ces résultats (et d'autres résultats qui ne sont pas détaillés dans ce manuscrit) le bureau d'étude va devoir identifier le choix du barrage et le calcul de dimensionnement de l'ouvrage, après confirmation sur le choix du site...

Références Bibliographiques :

- ABHSMD (2010) - Etude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intègre des ressources en eau du bassin hydraulique de Guelmim. Rapport interne, 56 p.
- AGENCE de SUD (2006) - Etude pilote sur les potentialités de développement durable. Groupe d'étude et de recherche des écologistes Sahariens.
- CHOUBERT G. (1952) - Congrès géologique international n°10 XIX session. Algérie- livret guide de l'excursion A36, Anti-Atlas occidental.
- COSTET J, SANGLERAT G (1981) - Cours pratique de Mécanique des sols 599 p, 16 x 25 cm, Dunod éd. PARIS FILLIAT G.
- Dijon R. (1966) - Reconnaissance hydrogéologique et ressources en eau du bassin des oueds Seyad - Ouarg-Noun.
- Géoatlas. (1997) - Etude par sismique réflexion haute résolution de la plaine de Guelmim.
- Michard A., (1976) - éléments de géologie marocaine, Notes et mémoires service géologiques n°252.
- NF P94-110-1 (1999) - norme homologuée par décision du Directeur Général d'AFNOR le 5 décembre 1999 relative à l'essai pressiométrique de Ménard. 44 p.
- OLIVA P. (1972) - Aspest et problèmes géomorphologiques de l'Anti-Atlas occidental. Revue de Géomorphologie du Maroc n°21. pp34-77.
- PDAIRE (2010) - Etude du Plan Directeur d'aménagement Intègre des ressources en eau du bassin hydraulique de Guelmim. Rapport.40 p.
- XP P94-202 : publiée par l'AFNOR en décembre 1995 relative aux prélèvements des sols et roches, 44 p.

Annexe
Exemples de carottes

SV5 :



SV7 :



SV9 :

