

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme
MASTER

Filière : science de la terre et de l'univers

Option : sismique, sismologie et méthode de potentiel

Thème

Acquisition sismique de haute productivité en mode slip-sweep

Présenté par :

Encadreur : MCA. AITOUCH M.Amoukrane

ACHOURI KHEDIDJA

Remerciements

Je remercie tout d'abord notre Dieu pour ce souffle de vie et pour tous les bienfaits dont il nous a fait part. Oh Dieu unique ! Tu es merveilleux, si bon pour moi, j'implore ta bénédiction et que ta lumière guide mes pas Nous qui nous a donné la force et la puissance pour terminer ce modeste travail.

*Je voudrais exprimer mes vifs remerciements à mon promoteur **Mr. Aitouche** pour sa disponibilité, son sérieux et ses conseils judicieux pour réaliser ce travail. Pour ses remarques pertinentes, il a su me laisser progressivement de plus en plus de liberté pour que je puisse avoir la possibilité de développer et mettre en œuvre mes propres idées. Je vous dis merci.*

*Je remercie chaleureusement **Mr. Remichi et Mr. Khelil** pour ses aides et ses encouragements durant toute la période du stage. Pour ses précieux conseils qui forment comme une forteresse au fond de moi. Vous étiez toujours présent à mes côtés pour mes meilleurs moments et pour mes pires. Merci pour la confiance que vous m'avez accordé. Je ne pourrai jamais égaler votre mérite, je vous dis merci, merci, merci et encore merci.*

*Également j'adresse un grand merci à mon encadreur **Mdm Adda Meriem** et tout le groupe du département géophysique **SH-EXPL-DOE-HMD**.*

*Je remercie les ingénieurs géophysicien à **E.NA.GEO**, pour leurs utiles et efficaces collaborations et leurs aides pour la réalisation de ce mémoire.*

*Je n'oublierai pas de remercier mes enseignants du département Géophysique, **Mdm : Alioune et Mrs : Bouguerne, Djeddi, El hadj, Allek, Ferahtia, baouch, maali, Boumaaza** pour les efforts qu'ils ont fournis durant notre cursus afin de me amener jusqu'au bout de la formation.*

Je remercie vivement les membres de jury pour m'avoir fait l'honneur de juger mon travail.

Je profite de l'occasion pour remercier tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

DEDICACE

Avec toute l'ardeur de mes sentiments Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.

A celle qui est la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance.

À ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi. C'est toi qui as guidé mes premiers pas à l'école, Ce que tu as apporté dans ma vie ne peut être compté ou mesuré.

☉ *À mon exemple de vie à mon très cher aimé, à mon papa pour son sacrifice, et encouragement durant toute la période de mes études. Tu étais toujours présent à mes côtés pour mes meilleurs moments et pour mes pires. J'espère qu'en ce moment de moi tu es si fière de moi, de ta fille aînée. Aujourd'hui, ce travail témoigne ma gratitude, tu seras à jamais mon idole.*

☉ *Avec toute ma fidélité et tout mon amour vous Mes trois rayons de soleil, mes chers sœurs : Souad, Amina, Erroumaïssa, Je ne pourrai jamais égaler votre mérite. Merci d'être toujours présents pour moi, d'être ma source d'inspiration et pour la confiance que vous m'avez accordé, Je vous dis merci, merci, merci et encore merci. Vous avez été présente malgré l'éloignement, vous n'avez pas lésiné un seul instant pour moi, pour m'encourager*

☉ *À mon adorable et très proche ami Hanen tu es la personne que j'ai fait mon confiance totale, que j'ai passé des moments inoubliable restes graver dans ma vie. Tu vas rester près de moi et dans mon cœur malgré l'éloignement.*

☉ *À tous mes amis avec qui j'ai partagé les meilleurs moments de ma vie d'étude ; Karim, Asma, Morjana, Ahlem, Latifa, Kenza, Nouara, Amina, Amel, et tous les autres chacun à son nom, Je tiens à vous remercier pour les moments inoubliables et émouvants que nous avons vécus ensemble. Je vous aime.*

☉ *A toi mon frère Badri tu m'as aidé et forme comme une forteresse au fond de moi et ou je peux réfugier à tout moment, Je te dis merci, merci, merci et encore merci.*

☉ *A Tout ce qui j'ai oublié de citer leurs noms et qu'ils connaissent leur importance dans ma vie.*

Khedidja

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I : Dispositif d'acquisition 3D –Planification-Design

I.1	Introduction.....	3
I.2	Dispositif en sismique 3D.....	3
I.2.1	Dispositif en Grille ou ‘Swath Shooting’.....	3
I.2.2	Dispositif Non Orthogonal (Slant).....	3
I.2.3	Dispositif en Button Patch.....	4
I.2.4	Dispositif en Brique (Brick Wall).....	4
I.2.5	Dispositif en Zigzag.....	5
I.3	Concepts de base d’une planification.....	5
I.3.1	Le pouvoir de résolution.....	5
I.3.1.1	La résolution verticale.....	6
I.3.1.2	La résolution latérale.....	6
I.3.1.3	Choix de La couverture.....	6
I.3.1.4	Le rapport S/B et la couverture.....	8
I.3.1.5	Détermination de la dimension d’un bin.....	9
I.3.1.6	La dimension du BIN et le rapport S/B.....	9
I.3.1.7	Dimension du BIN et couverture.....	10
I.3.1.8	Dimension du bin et la taille de l’objectif.....	11
I.3.1.9	Dimension du bin et résolution latérale.....	11
I.3.1.10	Dimension du bin et le phénomène d’aliasing.....	11

I.3.2	Préservation des pendages.....	11
I.3.2.1	Taille de l'Etude.....	11
I.3.2.2	Choix de la Migration Aperture.....	12
I.3.2.3	Choix du Fold Taper.....	13
I.3.2.4	Influence du pendage sur l'orientation d'une étude.....	13
I.3.3	Détermination des plages d'offsets.....	13
I.3.3.1	Choix de l'offset minimum.....	13
I.3.3.2	Choix de l'offset max.....	14
I.3.3.2.1	Profondeur de l'objectif.....	14
I.3.3.2.2	Interférence des ondes directe.....	14
I.3.3.2.3	Interférence des ondes réfractées.....	15
I.3.3.2.4	Discriminant NMO.....	15
I.3.3.2.5	Temps d'enregistrement.....	16
I.4	Design.....	16
I.4.1	Dimension du Template et Rapport d'Aspect.....	17
I.4.2	La règle des 85 %.....	17
I.4.3	Distribution de la Couverture.....	17
I.4.4	Distribution des Offsets.....	17
I.4.5	Notion de redondance des offsets.....	18
I.4.6	Distribution des Azimuts.....	18

Chapitre II : Généralités sur les impulsions sismiques

II.1	Introduction.....	19
II.2	Définition d'une impulsion sismique.....	19
II.3	Paramètres descriptifs d'une impulsion.....	20

II.4 Etude de différents types d'impulsion.....	20
II.4.1 impulsion idéale de Dirac.....	20
II.4.1.1 modèle mathématique.....	20
II.4.1.2 Spectre de l'impulsion de Dirac.....	21
II.4.1.3 Propriétés de l'impulsion de Dirac.....	21
II.4.1.3.1 Multiplication de $\delta(t)$ par une fonction continue.....	21
II.4.3.1.2 Intégration du produit de $\delta(t)$ par une fonction continue.....	21
II.4.3.1.3 Changement d'origine.....	22
II.4.1.4 Série d'impulsion de Dirac (peigne de Dirac).....	22
II.4.1.5 Spectre d'un peigne de Dirac.....	23
II.4.2 Impulsion créneau (fonction Porte).....	23
II.4.2.1 Fenêtre naturelle.....	23
II.4.2.2 Fenêtre de largeur T.....	24
II.4.2.3 Série d'impulsion créneau de largeur Δt	24
II.4.2.4 Spectre d'amplitude de la fonction porte.....	25
II.4.2.4.1 Calcul de la TF de la fonction porte.....	25
II.4.3 Impulsion sinusoïde amortie.....	25
II.4.3.1 Introduction.....	25
II.4.3.2 Expression analytique d'une impulsion sinusoïdale amortie.....	25
II.4.3.3 Spectre d'une impulsion sinusoïdale amortie.....	26
II.4.3.4 Calcul du spectre d'amplitude.....	26
II.4.4 Impulsion de Berlague.....	27
II.4.4.1 Définition et les propriétés temporelles.....	27
II.4.4.2 Avantages de l'impulsion de Berlague.....	28

II.4.4.3 Le spectre l'impulsion de Berlague.....	28
II.4.4.4 Le spectre d'amplitude de l'impulsion de Berlague.....	28
II.4.5 Impulsion de Ricker.....	28
II.4.5.1 Introduction.....	28
II.4.5.2 Expression de l'ondelette de Ricker.....	29

Chapitre III : La méthode vibrosismique

III.1 Historique.....	31
III.2 Une brève description du système d'exploitation par vibroseis.....	31
III.3 Mise en œuvre.....	32
III.4 Les essais en vibrosismique.....	32
III.4.1 Dimension du dispositif sismographique.....	33
III.4.1.1 Offset minimal.....	33
III.4.1.2 Offset maximal.....	33
III.4.1.3 Longueur de l'inter trace.....	33
III.4.1.4 Géométrie des nappes de géophones.....	34
III.4.1.5 Géométrie du point vibré et énergie émise.....	35
III.4.1.6 Bande de fréquence émise.....	36
III.4.1.7 Sens du balayage.....	36
III.4.1.8 Longueur et nombre de sweeps.....	36
III.5 Instruments et équipements adaptés à la méthode.....	37
III.5.1 Source d'énergie.....	37
III.5.1.1 Partie vibrante.....	37
III.5.1.2 Partie électronique.....	38
III.5.1.2.1 Un boîtier DPG (Digital Pilot Generator).....	38

III.5.1.2.2 Un boîtier DSD (Digital Servo Drive).....	38
III.5.2 Principe de fonctionnement du vibroseis.....	38
III.5.3 Contrôle du vibroseis.....	38
III.5.3.1 Contrôle de base.....	39
III.5.3.2 Rétroaction ou feedback de la masse de réaction et du Servo valve..	39
III.5.3.3 Réponse du vibreur ‘ ‘ Vibrator feedback’ ’.....	39
III.5.4 Le système d’exploitation vibroseis.....	40
III.5.5 Tests de similarité.....	41
III.5.5.1 Similarité par câble ou Wire line.....	41
III.5.5.2 Similarité par radio.....	42
III.5.6 le signal vibrosismique ‘ ‘ le sweep ‘ ‘.....	44
III.5.6.1 Calcul du spectre d’amplitude d’un sweep.....	44
III.5.6.2 Analyse spectrale du sweep.....	45
III.5.7 Types de sweeps.....	45
III.5.7.1 Les sweeps logarithmiques.....	46
III.5.7.2 Les sweeps exponentiels.....	46
III.5.8 Paramètres descriptifs du sweep.....	47
III.5.8.1 Sens du balayage.....	47
III.5.8.2 Longueur (sa durée).....	48
III.5.8.3 Bande fréquentielle.....	49
III.5.8.4 Loi de variation des fréquences.....	50
III.5.8.5 Loi de variation des amplitudes (enveloppe).....	50

Chapitre IV : Technique de haute productivité « slip-sweep »

IV.1 Introduction.....	51
-------------------------------	----

IV.2 méthodes de hautes productivités dans l'acquisition vibrosismique.....	51
IV.2.1 Independent Simultaneous Sweeping (ISS).....	51
IV.2.2 Distance Separated Simultaneous Sweeping (DS ³).....	53
IV.2.3 Sweeps en cascade (Cascade sweep).....	54
V.2.4 Slip sweep.....	55
IV.2.4.1 Principe de la méthode Slip-sweep.....	55
IV.2.4.2 Modifications dans le système d'acquisition.....	57
IV.2.4.3 Problèmes posés par la méthode slip sweep.....	58

Chapitre V: Effet des harmoniques dans la technique slip-sweep

V.1 Introduction.....	60
V.2 comparaison entre la méthode conventionnelle et la méthode slip sweep.....	60
V.2.1 délai du projet.....	60
V.2.2 Le cout.....	60
V.2.3 Qualité.....	60
V.2.4 Conclusion.....	61
V.2.5 Modèle mathématique d'une trace sismique.....	61
V.3 Analyse mathématique des harmoniques dans la méthode slip sweep.....	63
V.4 Technique de réduction des bruits harmoniques.....	65
V.4.1 Slip-time constant.....	65
V.4.2 Slip-time aléatoire (comme proposé par Rozemond).....	65
V.4.3 Sweeps non-linéaires.....	65
V.5 Analyse graphique des harmoniques dans la méthode slip sweep.....	65
V.5.1 Conclusion.....	67
V.6 Technique de réduction des harmoniques dans la méthode slip sweep.....	68

V.6.1	Introduction.....	68
V.6.2	Le filtrage par HPVA (High-Productivité Vibroseis Acquisition).....	68
V.6.2.1	Présentation de la méthode.....	68
V.6.3	filtre temps variant avec référence, filtrage par (ENAGEO-ADVANCE).....	70
V.6.3.1	filtre optimal.....	71
V.6.3.2	Filtre d'estimation du bruit harmonique à partir du modèle de la trace sismique.....	72
V.6.3.3	filtrage par la méthode à entrées/sorties multiples.....	73
V.6.3.4	Méthodologie d'application de la méthode.....	73
V.6.3.4.1	Version globale.....	73
V.6.3.4.2	Version en Cascade.....	73
V.6.3.4.3	Version de multi-référence.....	73
V.6.3.5	Décomposition du GF (Ground Force).....	73
V.6.3.5.1	Décomposition par filtre adaptatif.....	74
V.6.3.5.2	Décomposition dans le domaine temps-fréquence.....	75
V.7	Application sur des données réelles.....	77
V.7.1	Présentation de la région.....	77
V.7.1.1	Généralités : Projet GUERNE ECHIKH.....	77
V.7.1.2	Nature et topographie du terrain.....	78
V.7.1.3	Situation géographique.....	78
V.7.1.4	Stratigraphie et cadre géologique.....	78
V.7.1.4.1	L'évolution Tectonique.....	79
V.7.1.4.2	L'aspect stratigraphique.....	80
V.7.1.5	Intérêt pétrolier.....	83
V.7.1.5.1	Les roches mères.....	83

V.7.1.5.2 Les roches réservoirs.....	83
V.7.1.5.3 Les roches couvertures.....	83
V.7.1.6 Travaux antérieurs réalisés dans la zone d'étude.....	84
V.7.1.6.1 Définition des objectifs.....	85
V.7.1.6.2 Documents utilisés.....	85
V.7.1.7 Les paramètres d'acquisition.....	86
V.7.2 Les paramètres d'acquisition.....	86
V.7.2.1 Analyse des résultats.....	87
V.7.2.1.1 Effet du nombre du sweep.....	88
V.7.2.1.2 Effet de la longueur du sweep.....	91
V.7.3 Fonctionnalité du logiciel ENAGEO-ADVANCE.....	91
V.7.3.1 Application de l'algorithme ENAGEO-ADVANCE sur des données réelles.....	92
V.7.3.2 Procédure de réduction du bruit harmonique par le filtrage d'ADVANCE-ENAGEO.....	96
V.7.4 Conclusion.....	103

Conclusions et recommandations

Bibliographies

Liste des figures

Fig I-1 Schéma du dispositif swath shooting (d'après A. Cordsen et al.).....	3
Fig I-2 Schéma du dispositif Non Orthogonal (d'après A. Cordsen et al.).....	3
Fig I-3 Schéma du dispositif Button Patch (d'après A. Cordsen et al.).....	4
Fig I-4 Schéma du dispositif en Brique (d'après A. Cordsen et al.).....	4
Fig I-5 Attributs du dispositif en briques, (a) Distribution des azimutes et (b) Distribution des offsets.....	4
Fig I-6 Schéma du dispositif en Zigzag (d'après A. Cordsen et al.).....	5
Fig I-7 : Schéma présentant le dispositif en double ZigZag (d'après A. Cordsen et al.).....	5
Fig I-8 Couverture en 2D et couverture en 3D.....	7
Fig I-9 La couverture totale.....	7
Fig I-10 Couverture In line d'un patch de dimension (10× 72)	8
Fig I-11 Couverture transversale.....	8
Fig I-12 Variation de la couverture en fonction du S/B.....	9
Fig I-13 Dimension du bin contient des points CMP.....	9
Fig I-14 Influence de la dimension du bin sur le rapport S/B.....	10
Fig I-15 Influence de la dimension du bin sur la couverture.....	10
Fig I-16 Migration aperture. (a) : 95 % de l'énergie de migration sismique est obtenue en prenant $\theta = 30^\circ$. (b) : La valeur de la migration est $M_a = z * \tan$ (d'après A. Chaouch et J. L. Marie).....	12
Fig I-17 Cas d'un réflecteur penté. XX_{max} : Frange de la migration aperture ; P : La profondeur à l'aplomb du point A, α : Le pendage.....	12
Fig I-18 Définition des plages d'offsets (document ENAGEO).....	13
Fig I-19-1 X_{min} avec récepteur-source confondus et Fig I-19-2 X_{min} avec ligne de réception décalée d'une dimension du bin.....	14
Fig I-20 Interférence des ondes réfractées et directes avec les ondes réfléchies.....	15
Fig I-21 Correction NMO dans un Shot Gather (d'après A. Cordsen et al).....	16
Fig I-22 Schéma présentant les dimensions du Patch en fonction de X_{mute} (d'après A. Cordsen et al.).....	17
Fig I-23 Spider diagram (D'après A. Cordsen et al.), (c) : Distribution azimutale large, (d) : distributions azimutale étroite. Rose diagramme, (e) : Distribution azimutale large, (f) : distributions azimutale étroite.....	18
Fig II-1 trace sismique et impulsion.....	19

Fig II-2 représentation symbolique de l'impulsion de Dirac.....	21
Fig II-3 Spectre d'amplitude de Dirac.....	21
Fig II-4 Peigne de Dirac (a), spectre de peigne de Dirac (b).....	23
Fig II-5 Représentation simplifiées d'une fonction Porte de largeur unité.....	24
Fig II-6 Représentation simplifiées d'une fonction Porte de largeur T.....	24
Fig II-7 Sinus amorti et le module de sa densité spectrale d'amplitude, (Christian Juttin. Théorie du signal).....	27
Fig II-8 (a) impulsion de Rickert $r(\tau)$ et son spectre τ : le temps, $2\tau b$ la largeur de l'impulsion (b) la fréquence du spectre, $R(w)$: la fréquence angulaire de l'impulsion $r(\tau)$, W_c : la fréquence centrale, $2W_b$: la bande passante.....	30
Fig III-1 Vibrateur d'acquisition.....	31
Fig III-2 Schéma représente la mise en œuvre sur terrain.....	32
Fig III-3 représentation d'une acquisition vibrosismique sur terrain.....	32
Fig III-4 schémas représente la dimension du dispositif sismographique de la méthode vibrosismique.....	34
Fig III-5 Point vibré.....	35
Fig III-6 test d'énergie.....	36
Fig III-7 camion vibrateur.....	37
Fig III-8 partie vibrante.....	37
Fig III-9 schéma du principe de contrôle de vibrateur.....	40
Fig III-10 Différence entre le GF du premier vibrateur et le signal pilote.....	43
Fig III-11 Différence entre le GF du deuxième vibrateur et le signal pilote.....	43
Fig III-12 Différence entre le GF du troisième vibrateur et le signal pilote.....	43
Fig III-13 (a) phase instantanée d'un sweep linéaire, (b) fréquence instantanée d'un sweep linéaire.....	45
Fig III-14 Un modèle d'un Up-sweep.....	47
Fig III-15 Un modèle d'un Down-sweep.....	48
Fig III-16 effet de la longueur du sweep, en haut : deux sweep de différentes longueurs, en bas : les spectres d'amplitudes des deux sweeps.....	49
Fig III-17 effet de la bande fréquentielle sur le spectre d'amplitude sur un sweep.....	49
Fig IV-1 Représentation de mode d'envoi de la méthode d'acquisition vibrosismique (ISS) avec 8 vibrateurs fonctionnent indépendamment.....	51
Fig IV-2 des enregistrements terrain corrélé bruts (avant filtrage), (Document CGG).....	52

Fig IV-3 Des enregistrements terrain corrélés après filtrage (Document CGG).....	52
Fig IV-4 Représente le mode d'envoi de la méthode d'acquisition vibrosismique DS ³ , (Geophysical prospecting, Jack Bouska).....	53
Fig IV-5 Représente des enregistrements terrain corrélé filtré en mode DS ³ , (Document CGG).....	53
Fig IV-6 schémas représente cinq sweeps concaténés.....	54
Fig IV-7 schémas représente le sweep émis et le sweep de référence (pour la corrélation)...	54
Fig IV-8 Représentation de mode d'envoi de slip sweep (Document ENAGEO).....	55
Fig IV-9 Acquisition vibrosismique de type slip sweep.....	56
Fig IV-10 Représentation de mode d'envoi conventionnelle (Document ENAGEO).....	56
Fig IV-11 Acquisition vibrosismique conventionnelle.....	57
Fig IV-12 down-sweep montrant le fondamental et le kième harmonique.....	58
Fig V-1 Représentation temps-fréquence des harmoniques avant et après corrélation dans le mode conventionnel et le mode slip sweep.....	61
Fig V-2 présente les composantes fondamentales et harmoniques en mode vibrosismique (Document ENAGEO).....	62
Fig V-3 les harmoniques après corrélation, (a) cross-corrélation d'un up-sweep avec le pilote, (b) projection temps-fréquence de (a).....	62
Fig V-4 Un événement dans l'enregistrement n (zone rouge) crée des harmoniques, qui après corrélation sont présentés par la ligne bleue (P. Ras*, M. Daly and G. Baeten, Schlumberger).....	64
Fig V-5 Effet du slip time sur l'enregistrement.....	65
Fig V-6 Projection T-F d'un VP en mode slip time de 20 sec.....	66
Fig V-7 Projection T-F d'un VP en mode slip sweep avec un slip time de 12sec.....	67
Fig V-8 Projection T-F d'un IVP en mode slip sweep avec un slip time de 8 sec.....	67
Fig V-9 impact de la méthode HPVA pour atténuer les harmoniques (Document ENAGEO).....	71
Fig V-10 : Décomposition du GF pour le calcul d'opérateur.....	74
Fig V-11 l'extraction de la composante fondamentale contenue dans un sweep distordu à deux harmoniques. (Document ENAGEO).....	75
Fig V-12 décomposition de la composante harmonique dans le domaine temps-fréquence...	76
Fig V-13 Présente le projet GEH-3D, (EGS-290).....	77
Fig V-14 Représente le périmètre GEH-3D. (EGS-290).....	77
Fig V-15 Situation géographique du permis GEH. (SH-EXPLORATION).....	78

Fig V-16 Situation géographique du bassin d'oued Mya (Document de Sonatrach).....	79
Fig V-17 Fiche stratigraphique type du périmètre GUERN ECH CHEIKH (Document Sonatrach).....	82
Fig V-18 Cartes en isobathes du périmètre GUERN ECH CHEIKH (Document de Sonatrach).....	84
Fig V-29 Plan de position de la zone d'étude (Document Sonatrach).....	84
Fig V-20 Profil sismique 2D. Ligne 2 (à gauche), ligne 1 (à droite) (Document Sonatrach)...	85
Fig V-21 Les paramètres d'acquisition du projet GEH-3D. (ENAGEO-290).....	86
Fig V-22 stack en couverture complète du premier test avec 03 groupes de 04 Vbs/groupe : un (01) sweep de 14 sec.....	87
Fig V-23 stack en couverture complète du deuxième test avec 03 groupes de 04 Vbs/groupe : deux (02) sweep de 14 sec.....	88
Fig V-24 stack en couverture complète du troisième test avec 03 groupes de 04 Vbs/groupe : un (01) sweep de 14 sec.....	89
Fig V-25 stack en couverture complète du quatrième test avec 04 sets de 03 Vbs/groupe : un (01) sweep de 16 sec.....	90
Fig V-26 stack en couverture multiple du cinquième test avec 04 sets de 03 Vbs/groupe : un (01) sweep de 18 sec.....	91
Fig V-27 Procédure opératoire sur terrain.....	92
Fig V-28 représente un enregistrement des données sismiques avant et après filtrage (EGS-290).....	92
Fig V-29 Différence entre un tir après et avant le filtrage, (ENAGEO/EGS-290).....	93
Fig V-30 enregistrement terrain corrélés brut (avant filtrage), avec un slip time de 10.008sec.....	93
Fig V-31 enregistrement terrain corrélés après filtrage avec un slip time de 10.008sec.....	94
Fig V-32 Enregistrement terrain corrélés avant et après filtrage obtenu avec un slip time 10.008 et les harmoniques enlevés de ces enregistrement.....	94
Fig V-33 spectre moyen d'enregistrement corrélé.....	95
Fig V-34 présente la projection F-T d'une seule trace (sélectionnée en rouge) de l'enregistrement précédente avant et après filtrage.....	95
Fig V-35 différentes sweeps en Blue : le sweep pilote en rouge : le signal GF en mauve : le signal fondamentale et le GF (composantes harmoniques).....	96
Fig V-36 représentation F-T de signal fondamentale et ses résidus (harmoniques).....	97
Fig V-37 étapes du filtrage des bruits harmoniques (la soustraction).....	98
Fig V-38 enregistrement terrain corrélés (bruts), en mode slip sweep.....	99

Fig V-39 enregistrement terrain corrélés après filtrage en mode slip sweep.....	99
Fig V-40 enregistrement terrain corrélés après filtrage en mode conventionnel.....	100
Fig V-41 tir et spectre de fréquence d'un enregistrement terrain corrélés (brut), dans le mode slip sweep.....	100
Fig V-42 tir et spectre de fréquence d'un enregistrement terrain corrélés après filtrage, dans le mode slip sweep.....	101
Fig V-43 tir et spectre de fréquence d'un enregistrement terrain corrélés après filtrage, dans le mode conventionnel.....	101
Fig V-44 Stack Inline avec les paramètres d'acquisition et les séquences de traitement appliquées (ENAGEO/EGS-290).....	102
Fig V-45 Cube en 3-D du projet GEH-3D. (ENAGEO-290).....	103

Liste des tableaux

Tab V-1 degré de contamination en fonction de LT.....	59
Tab VI-2 représente le nombre de VPs dans le mode conventionnelle et le mode slip sweep.....	60

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La sismique 3D est, sans nul doute, le développement le plus remarquable en exploration géophysique de ces dernières années. Elle consiste à recueillir des mesures à intervalles fins et réguliers sur toute la surface de la zone à prospector, permettant le recouvrement précis et total de tous les objectifs du sous-sol sous investigation.

La sismique 3D est souvent présentée par les économistes comme une nouvelle technologie qui, avec les puits horizontaux va permettre des découvertes de réserves d'hydrocarbures. Cependant avec l'imagerie on peut espérer demain extraire 80%-90% d'un gisement. Du moment qu'en sismique 2D on corrige l'obliquité dans le plan d'un profil, il est normal d'aller enregistrer latéralement pour corriger l'obliquité réelle en 3D, ceci montre que la sismique 3D est l'extension naturelle de la sismique 2D de détail, et un outil indispensable pour développer et valoriser le gisement.

Bien que la sismique 3D, engendre des coûts d'acquisition relativement élevés, elle est plus économique comparé à la 2D. Avec la mise au point de programmes performants d'Interpolation de traces, elle a tendance à se généraliser même dans les phases de reconnaissance, d'autant plus que les problèmes d'exploration ne cessent de devenir de plus en plus complexes.

Le souci de tout géophysicien est d'obtenir un bon signal sismique à l'enregistrement des temps les plus courts possibles avec un coût réduit, mais ceci n'est pas toujours réalisable. Pour y parvenir le planificateur doit trouver un équilibre entre les contraintes géophysiques et les contraintes économiques.

Une mission sismique est gouvernée par trois conditions fondamentales, la durée de réalisation du projet, le prix de revient et la qualité des données recueillies. Cette dernière est l'un des soucis majeurs pour le géophysicien ainsi que pour le maître d'ouvrage, qui doit veiller sur le bon fonctionnement des équipes sismiques et plus particulièrement sur le contrôle quotidien de l'appareillage et la qualité des enregistrements.

Lors de l'acquisition vibrosismique le camion vibreur engendre des distorsions harmoniques de sweep PILOTE théorique que l'on souhaiterait générer. De ce fait, beaucoup d'études ont été élaborées pour améliorer la productivité et atténuer ces harmoniques. Plusieurs méthodes ont été proposées par différentes compagnies.

A cet effet, et dans le cadre de la préparation de notre mémoire de fin d'étude, nous développons un travail qui a pour thème : Acquisition sismique en haut productivité –slip sweep- Projet GEH-3D.

L'objectif de notre présent travail est d'étudier les différentes méthodes d'acquisition sismique telles que la méthode conventionnelle et les méthodes en haut productivité, se spécifier la méthode slip sweep, avec une analyse comparative avec celle conventionnel. Le travail a été élaboré selon la méthodologie suivante :

Chapitre I : Dispositifs d'acquisition sismique 3D – Planification -Design.

Chapitre II : Généralités sur les impulsions sismiques.

Chapitre III : la méthode vibrosismique.

Chapitre IV : la technique de haute productivité « slip sweep ».

Chapitre V : effet des harmoniques dans la technique slip sweep.

Conclusion générale et recommandation.

CHAPITRE I

Dispositif d'acquisition

sismique 3D-

Planification-Design

Chapitre II

Généralités sur les impulsions sismiques

CHAPITRE III

La méthode vibrosismique

CHAPITRE IV

La technique de haute productivité "slip-sweep"

CHAPITRE V

CHAPITRE V

Effet des harmoniques dans la technique

Effet des harmoniques dans la technique

"slip-sweep"

PARTIE
PARTIE
PRATIQUE
PRATIQUE

PARTIE
PARTIE

THEORIQUE
THEORIQUE

I.1 Introduction

En sismique 3D, il existe plusieurs méthodes d'acquisition dont chacune ayant :

- Ses Propres caractéristiques.
- Ses Difficultés de mise en œuvre.
- Ses Avantages et ses inconvénients.

Ces techniques d'acquisition, sont des variantes de deux classes principales portant les noms :

- Profilage parallèle ou In-line profiling.
- Profilage croisé ou cross profiling.

I.2 Dispositif en sismique 3D

I.2.1 Dispositif en Grille ou 'Swath Shooting'

Dans ce type de géométrie, les lignes d'émission sont disposées dans la direction X-Line orthogonalement aux lignes de réception qui, elles, sont parallèles à la direction In-Line. (Fig I-1).

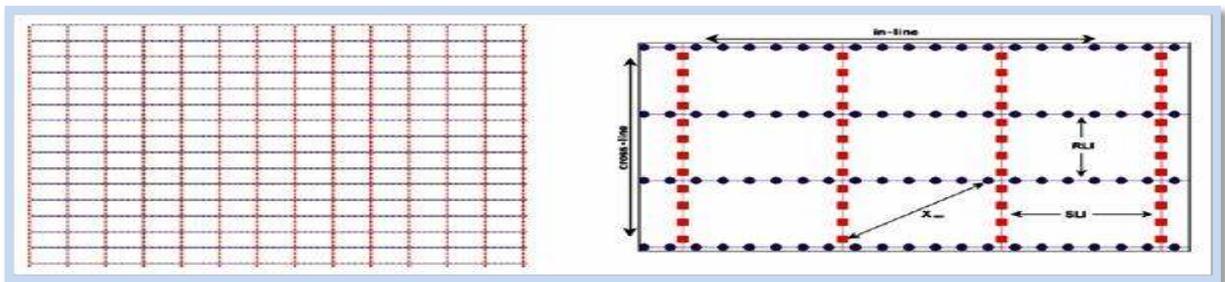


Fig I-1 Schéma du dispositif swath shooting (d'après A. Cordsen et al.).

L'avantage de cette technique est qu'elle offre une bonne distribution d'offsets, une mise en œuvre aisée et un minimum d'équipements en mouvement. Son inconvénient est qu'elle fournit une mauvaise distribution des azimuts. Vue la simplicité de sa mise en œuvre, cette géométrie est la plus utilisée en sismique 3D.

I.2.2 Dispositif Non Orthogonal (Slant)

Les lignes de réception forment avec les lignes de tir un angle inférieur à 90° , c'est généralement un angle de 45° . Ce dispositif a une bonne distribution d'offset, (L'azimut dépend du nombre de lignes réceptrices dans le patch). Mais il offre une distribution étroite des azimutes, (Fig I-2).

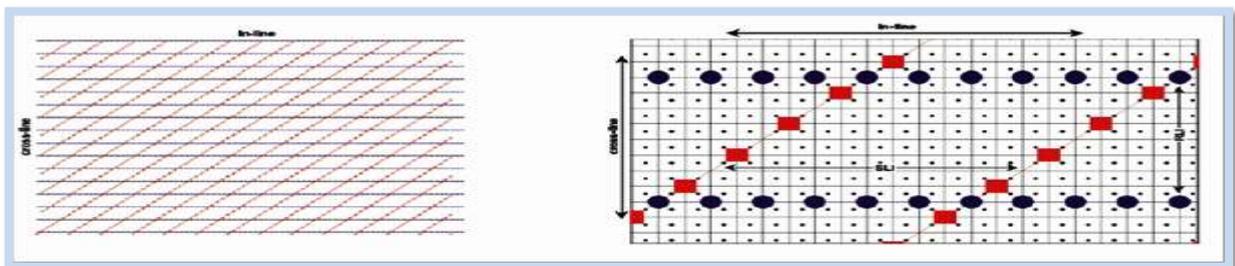


Fig I-2 Schéma du dispositif Non Orthogonal (d'après A. Cordsen et al.).

I.2.3 Dispositif en Button Patch

Dans ce dispositif la séquence de tir n'est plus une seule ligne mais une distribution surfacique généralement rectangulaire. Ce dispositif a montré son efficacité dans les systèmes faisant appel à un grand nombre de traces. Il offre une bonne distribution d'offsets et d'azimuts ainsi qu'une amélioration très nette de la résolution (**Fig I-3**).

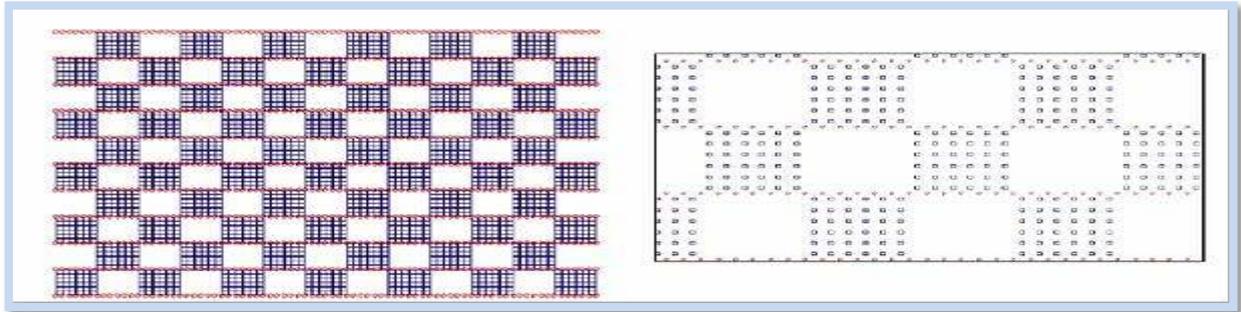


Fig I-3 Schéma du dispositif Button Patch (d'après A. Cordsen et al.).

I.2.4 Dispositif en Brique (Brick Wall)

Il ressemble au dispositif en grille sauf, que dans ce cas, au passage d'une ligne de réception à une autre les points de tir sont décalés de manière à former des briques avec des lignes de réception (**Fig I-4**).

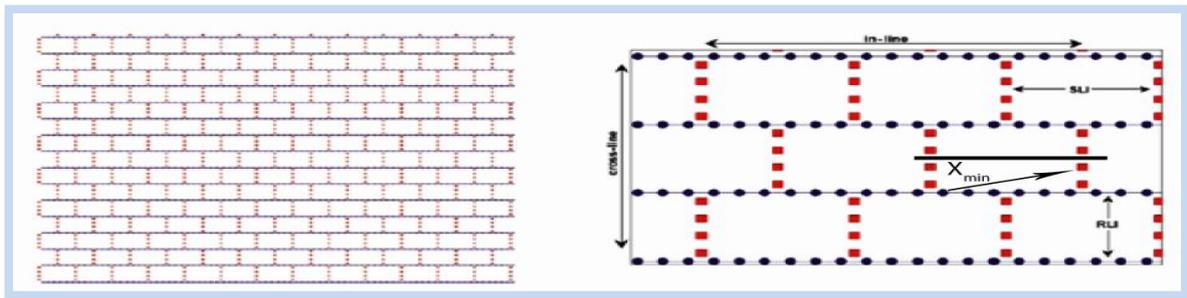


Fig I-4 Schéma du dispositif en Brique (d'après A. Cordsen et al.).

La distribution des offsets et des azimuts est raisonnable. Le mouvement des équipements est parfois difficile.

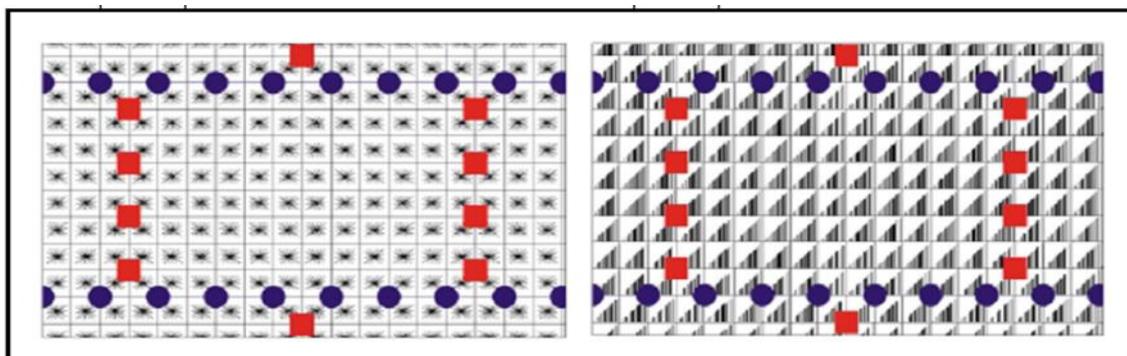


Fig I-5 Attributs du dispositif en briques

(a) Distribution des azimuts.

(b) Distribution des offsets.

I.2.5 Dispositif en Zigzag

Cette géométrie demande une accessibilité facile entre les lignes de réception, ce qui fait qu'elle est très répandue dans les zones désertiques. Elle consiste à décaler chaque point de tir unitaire de son précédent dans un sens ou dans un autre (Fig I-6).

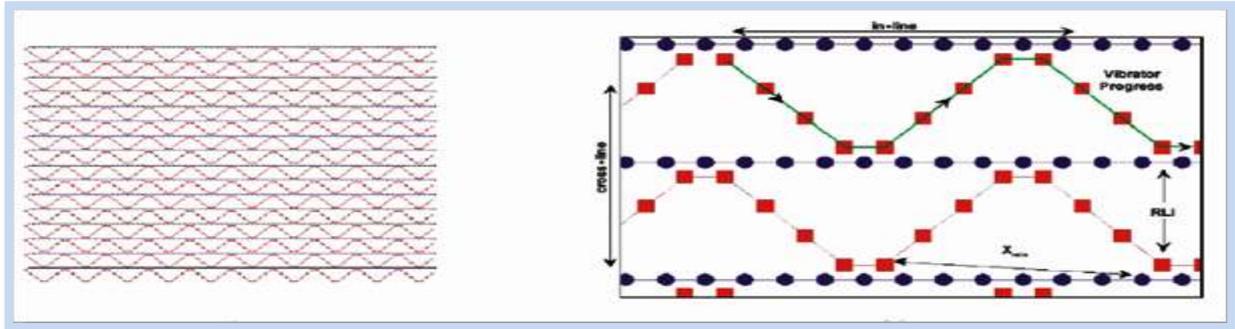


Fig I-6 Schéma du dispositif en Zigzag (d'après A. Cordsen et al.).

Il existe une variante du zigzag qu'on appelle double ZigZag entrelacé et qui offre la possibilité d'améliorer davantage la distribution en offsets (Fig I-7).

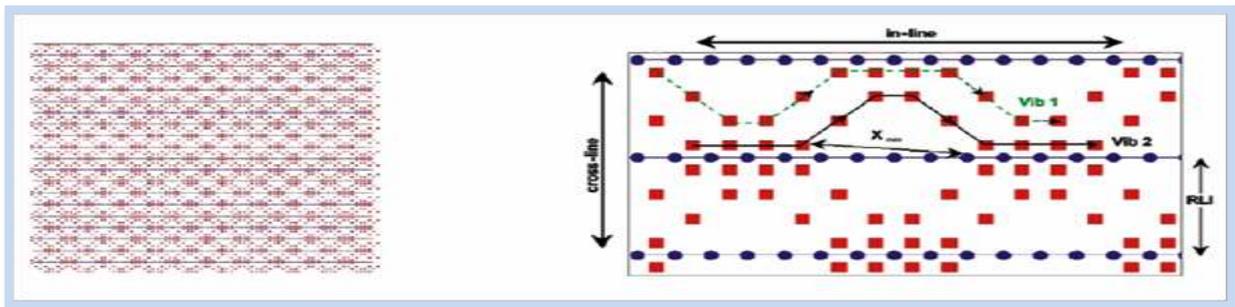


Fig I-7 : Schéma présentant le dispositif en double ZigZag (d'après A. Cordsen et al.).

I.3 Concepts de base d'une planification 3D

La planification d'une étude sismique 3-D nécessite l'utilisation des moyens de calcul importants avec comme référence

- Données sismique 2D (ou 3D précédente) : carte en isochrone ou en isobathes, stacks d'anciennes campagnes, rapport de fin de campagne.
- Données sismiques du puit (check shots, vsp, sonique...).
- Données géologiques (lithologie, stratigraphie, axe principale des structures).

Il existe deux critères fondamentaux qui gouvernent le planning :

- Le pouvoir de résolution.
- La préservation des pendages.

I.3.1 Le pouvoir de résolution

L'amélioration du pouvoir de résolution verticale et horizontale est l'un des objectifs principaux de l'acquisition. Par définition, le pouvoir de résolution en sismique, est la capacité de séparer et distinguer deux événements sismiques très proches les uns des autres. Le pouvoir de ce dernier est diminué en profondeur à cause de phénomène d'absorption des hautes fréquences par la sub-surface immédiate.

Il est toujours mesuré en termes de longueur d'onde :

$$\lambda = V/F \quad (I.1)$$

Avec :

F : fréquence de l'onde sismique.

V : vitesse du milieu.

I.3.1.1 La résolution verticale

Le pouvoir de résolution verticale est défini comme étant la capacité de séparer deux interfaces sismiques qui sont le toit et le mur d'une couche géologique mince. Il est courant en sismique pour accroître cette résolution d'enregistrer dans une bande de fréquence assez large cela est conditionnée par le choix du pas d'échantillonnage temporel.

Le pouvoir de résolution verticale diminue avec la profondeur cela s'explique par :

- ✓ L'atténuation des hautes fréquences (HF) avec la profondeur qui est due aux phénomènes d'absorptions et de dispersions.
- ✓ L'accroissement des vitesses avec la profondeur.

La déconvolution augmente la résolution verticale en compressant le signal

I.3.1.2 La résolution latérale

C'est la possibilité de séparer latéralement les accidents du sous-sol. Il est lié à la zone de Fresnel, avant migration deux diffractions ne seront pas distinguées si elles sont plus étroites que le premier diamètre de la zone de Fresnel, cela signifie que le CMP stack les petites anomalies peuvent facilement être manquées. La migration augmente la résolution horizontale en diminuant la zone de Fresnel

Pour un trajet simple (surface-réflecteur) la différence maximale de temps de trajet correspond à $\lambda/4$ et le diamètre de la zone de Fresnel est égale à $\sqrt{2\lambda Z}$ pour un objectif situé à une profondeur Z

On ne peut séparer deux accidents du sous-sol que si la distance horizontale qui les sépare est supérieure au diamètre de la zone de Fresnel.

$$D > \sqrt{2\lambda Z} \quad (I.2)$$

L.R.DENHAM (1980) a relié la résolution verticale à la résolution latérale par la relation :

$$\Delta H_R = \Delta V_R / \sin\theta \quad (I.3)$$

Avec :

ΔH_R : la résolution latérale.

ΔV_R : la résolution verticale.

θ : l'angle du pendage du réflecteur.

I.3.1.3 Choix de la couverture

La couverture en sismique 3D est le nombre de points milieu ou le nombre de traces collectées et contenu dans le même BIN (plus exactement c'est le nombre de fois que le BIN est touché par des rayons sismiques de différents trajets), qui doivent après être sommés pour former le CMP BIN.

Dans une étude 3D, la majorité des BIN ont une couverture maximale (nominal fold, optimal fold ou full fold), mais aux bordures de l'étude la couverture chute, de ce fait on introduit une autre notion la marge de couverture (taper fold ou **Halo Zone**) qui est la zone d'extension nécessaire à la construction de la couverture optimale elle est assurée soit par le

dispositif au cours d'acquisition soit au cours du traitement par la migration (concentration d'énergie), (**Fig I-8**).

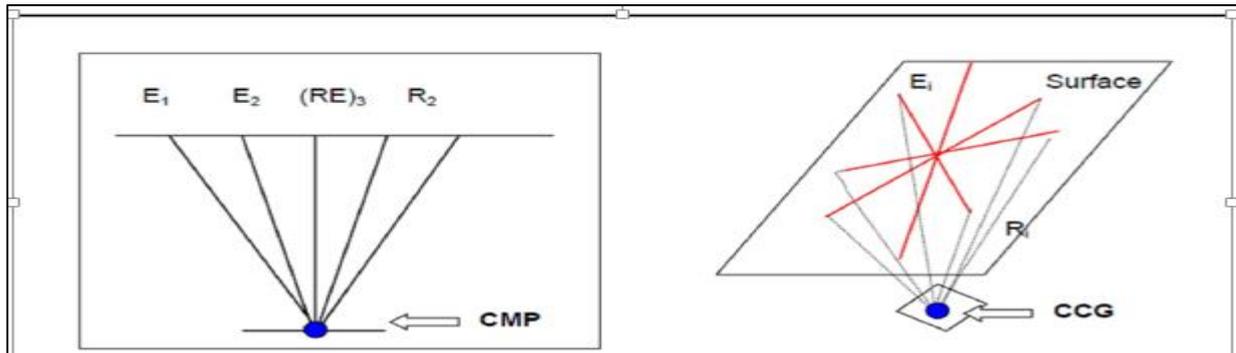


Fig I-8 couverture en 2D et couverture en 3D.

Plusieurs relations ont été proposées pour exprimer la relation entre la couverture 2-D (C_{2D}) et celle du 3-D (C_{3D}) ses résultats sont utilisés actuellement en design 3-D :

L'influence du rapport S/B sur la couverture est donnée les relations suivantes :

Si le rapport S/B est excellent alors :

$$C_{3D} = 1/3 C_{2D} \quad (I.4)$$

Si le rapport S/B est faible alors :

$$C_{3D} = 2/3 C_{2D} \quad (I.5)$$

Il y a plusieurs manières de calculer la couverture mais la formule qui permet de la déterminer plus facilement est :

$$CV_{2D} = N_S \cdot N_C \cdot B^2 \cdot U \quad (I.6)$$

Avec :

N_S : Le nombre de points de source par unité de surface.

N_C : Le nombre de point canaux.

B: La dimension de bin.

U: facteur unitaire ($10^{-6}m/Km^2$).

La couverture totale est le produit de deux sous couvertures suivant les directions In line et Cross-line.

$$C_T = C_L \times C_{TR} \quad (I.7)$$

La (**Fig I-9**) montre la distribution de la couverture totale du même patch (10^*72) :

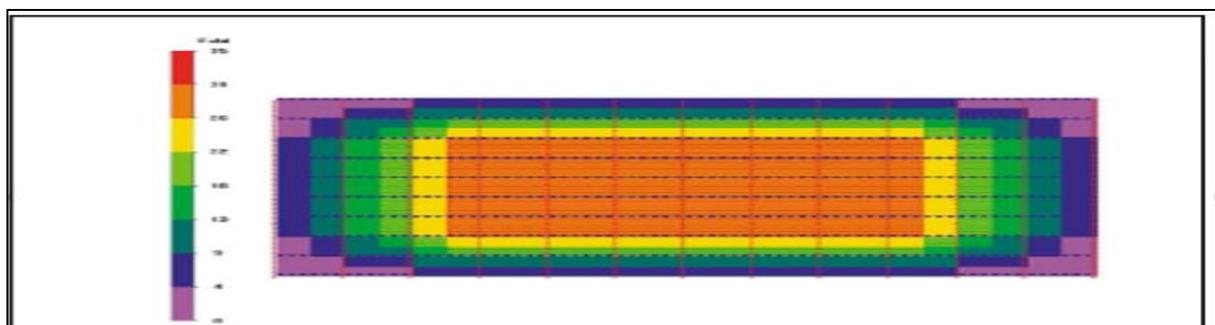


Fig I-9 la couverture totale

- **La couverture longitudinale (In line)**

C'est la couverture utilisée dans la direction parallèle aux lignes de réception. L'expression générale de calcul de la couverture longitudinale est :

$$C_L = \frac{RLL}{2 \times SLI} \quad (I.8)$$

Avec :

RLL : la longueur de la ligne source.

SLI : Interligne d'émission (source line interval).

Fig I-10 montre un exemple de la distribution de la couverture d'un patch de dimension (10×72).

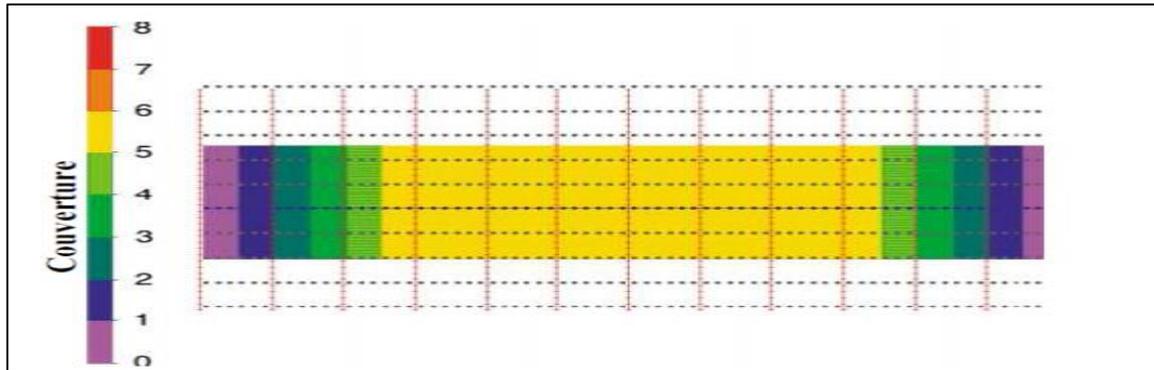


Fig I-10 Couverture In line d'un patch de dimension (10× 72).

- **La couverture transversale (cross line couverture) x line**

C'est la couverture réalisée suivant la direction verticale aux lignes de réception, Cette couverture se calcule par l'expression suivante :

$$C_T = \frac{NRL}{2} \quad (I.9)$$

Avec :

NRL : le nombre des lignes sources.

La Fig I-11 suivante montre la distribution de la couverture d'un patch de (10 * 72) :

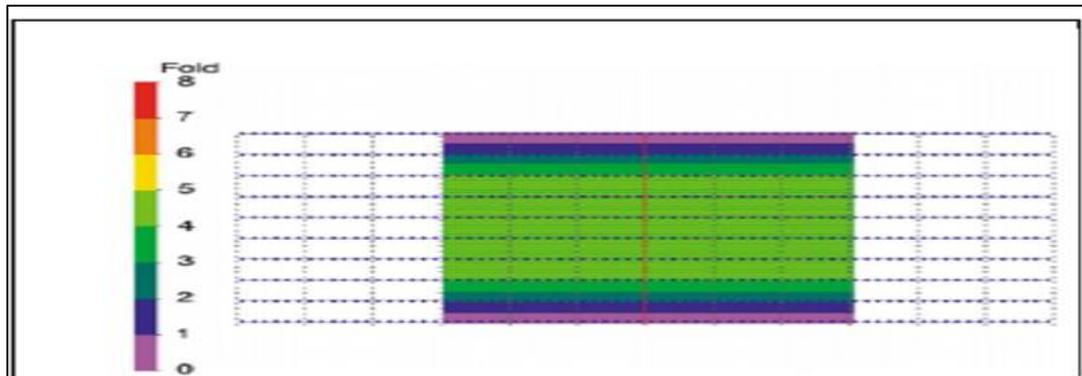


Fig I-11 Couverture transversale.

I.3.1.4 Le rapport S/B et la couverture

Plus la dimension du BIN est grande, plus serait grand le rapport S/B et plus serait grande la couverture ce qui conduit à un renforcement du signal comme le BIN peuvent faire converger des rayons sismiques distribués selon des azimutes et des plages d'offsets variées, lors du traitement, ces rayons sont regroupés en CMP Gather, il est par conséquent aisé de conclure que les dimensions du BIN sont intimement liées à l'ordre de couverture ainsi qu'au rapport S/B.

$$C = K(S/B)^2$$

(I.10)

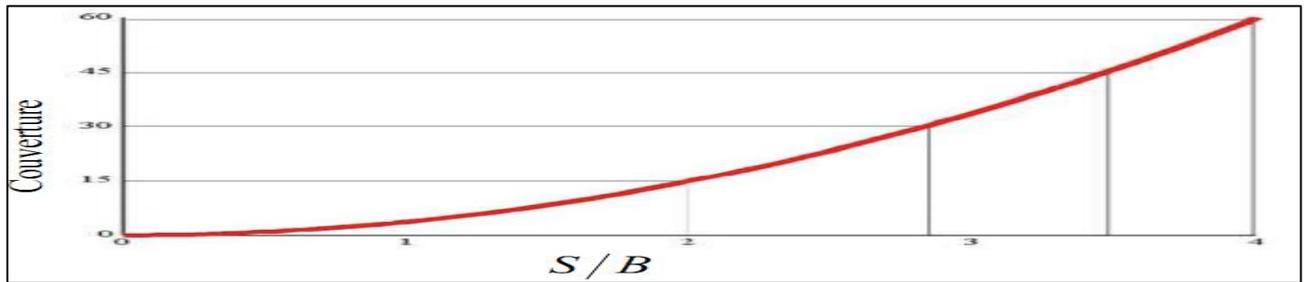


Fig I-12 variation de la couverture en fonction du S/B.

I.3.1.5 Détermination de la dimension d'un bin

On peut définir le bin comme étant l'élément de sub-surface équivalent à un CDP, tous les points appartenant à ce bin vont être sommés pour donner un seul CDP. En sismique 2D l'image obtenue est un plan (une coupe) perpendiculaire à la surface du sol échantillonné en points appelé CDP. Chaque BIN est défini par (RI/2, SI/2), Avec RI : receiver interval et SI : source interval, (Fig I-13).

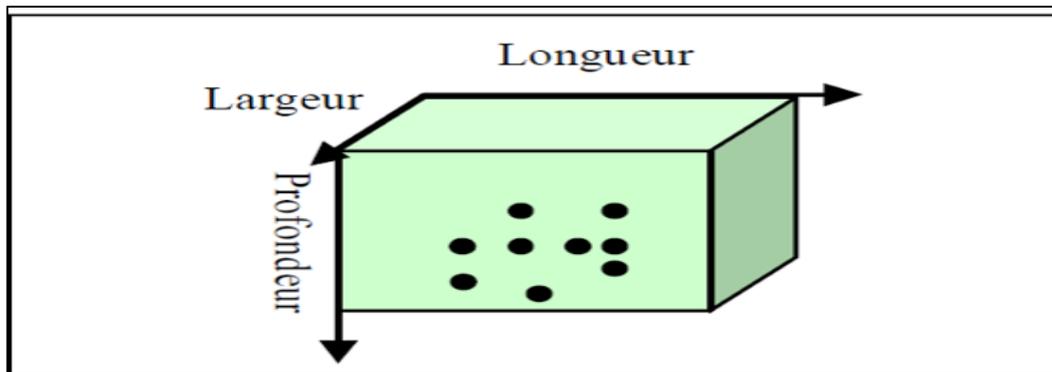


Fig I-13 Dimension du bin contient des points CMP.

La dimension d'un Bin est liée à la dimension de la plus petite anomalie sur l'horizon d'intérêt. Gordsen (1995) a montré que cette dimension avoisine le 1/3 de la longueur de l'anomalie. Si cette anomalie est encore plus petite, un filon par exemple, il faudra la représenter par au moins deux Bin longitudinalement et par deux Bin transversalement.

La dimension du *Bin* est fonction de plusieurs considérations dont les plus importantes sont :

- Le rapport S/B.
- La couverture.
- La taille de l'objectif.
- Phénomène d'aliasing.
- La résolution latérale.

D'après Cordsen (1995) la dimension du bin est voisine du tiers la longueur de l'anomalie :

$$\text{Dimension du bin} \leq \frac{1}{3} \text{ épaisseur de l'objectif} \quad (\text{I.11})$$

I.3.1.6 La dimension du BIN et le rapport S/B

L'augmentation de la dimension du bin conduit à une contribution d'un plus grand nombre de points CMP, cela veut dire que La dimension du bin est directement proportionnelle au rapport S/B, or ce changement engendre une augmentation ou une

diminution du nombre de points miroir au sien du bin et donc modifié la qualité du rapport S/B, (**Fig I-14**). Cette proportionnalité peut être exprimée par la relation suivante :

$$S/B = C \times B \quad (\text{I.12})$$

Avec :

p : Constante (0,066).

B : Longueur d'un côté du bin.

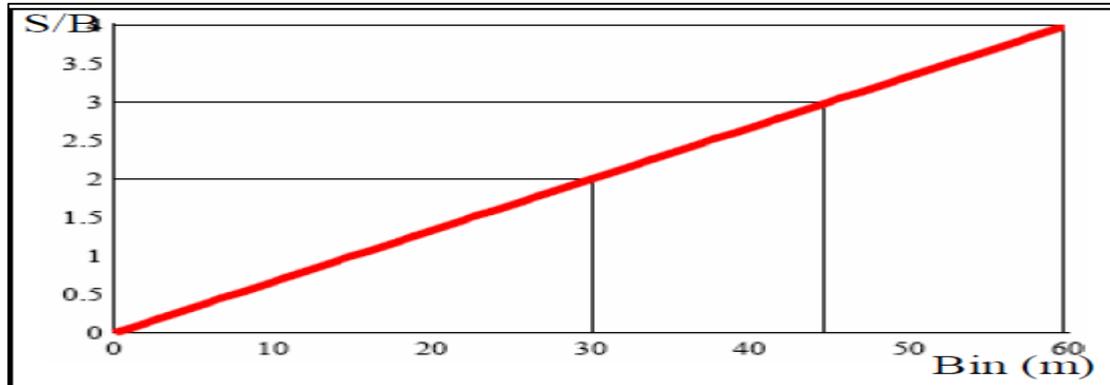


Fig I-14 Influence de la dimension du bin sur le rapport S/B.

I.3.1.7 Dimension du BIN et couverture

La couverture est très sensible à la dimension du bin, elle est une fonction quadratique de la longueur d'un côté du bin. En effet, plus la dimension du BIN est grande, plus serait grande la couverture. Comme le BIN est le lieu vers où peuvent converger des rayons sismiques distribués selon des azimuts et des plages d'offset variées, et du fait que, lors du traitement, ces rayons sont regroupés en CMP Gather, il est par conséquent aisé de conclure que les dimensions du BIN sont intimement liées à l'ordre de couverture, (**Fig I-15**).

Cette relation se manifeste sous la formule :

$$C = K \times b^2 \quad (\text{I.13})$$

Avec :

C : Couverture.

b : Longueur d'un côté du bin.

K : est le nombre des points milieu dans une unité de surface carré.

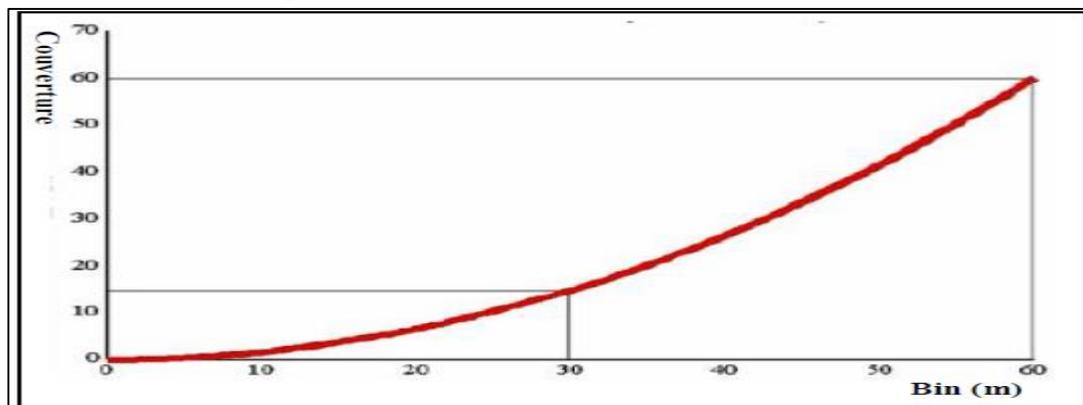


Fig I-15 Influence de la dimension du bin sur la couverture.

Il existe d'autre formule qui relie la couverture est la dimension du bin est la suivante :

$$C = SD \times NC \times B^2 \quad (\text{I.14})$$

Avec :

SD : Nombre de sources par unité de surface.

NC : Nombre de Canaux.

B : Longueur du bin.

I.3.1.8 Dimension du bin et la taille de l'objectif

Comme un bin est équivalent à une trace renforcée, donc deux à trois traces suffisent pour identifier une anomalie, ajoutons à cela que la longueur de l'anomalie est presque sûrement identifiée par les trois traces. Ce la signifié que quatre à neuf traces vont être liées à l'objectif dans la coupe temps de l'horizon visé. Cette relation est exprimée par la relation suivante :

$$b = L/3 \quad (I.15)$$

Avec :

L : largeur de l'objectif à identifier.

b : Longueur d'un côté du bin.

I.3.1.9 Dimension du bin et résolution latérale

La réduction de moitié de la dimension du bin équivaut à une augmentation du nombre de traces ce qui implique une étude 3-D économiquement plus chère, De même Si l'on augmente la dimension du bin, il y a un risque que quelques événements ne soient pas résolus latéralement. C'est à dire on aura une faible résolution latérale.

I.3.1.10 Dimension du bin et le phénomène d'aliasing

C'est le chevauchement des spectres, il s'appelle aussi le repliement du signal se produit quand les données sont sous-échantillonnées. Ce problème peut être résolu en utilisant un espacement fin entre les traces, une distance optimale ΔX qui évite l'aliasing doit être déterminée. Le front d'onde arrive au géophone G1 au temps T et au géophone G2 au temps T+ ΔT , l'aliasing se produit quand la différence de temps d'arrivée ΔT est égale à la demi période (T/2). Par un raisonnement de géométrie simple

$$\sin \theta = \frac{VT}{4\Delta X} = \frac{V}{4F_{max}\Delta X}$$

$$F_{max} = V/4\Delta X \sin \theta$$

$$\Delta X = V/4F_{max} \sin \theta \quad (I.16)$$

Avec :

F_{max} : fréquence maximale non aliasée.

θ : L'angle du pendage du réflecteur.

I.3.2 Préservation des pendages

Dans le cas où le pendage des structures est important il est possible de choisir dans un design en sismique 3D la taille et l'orientation de l'étude.

I.3.2.1 Taille de l'Etude

Généralement la taille d'une étude dépend de la focalisation et de la défocalisation de l'énergie. Dans le cas où la structure présente une convexité, l'énergie réfléchi est défocalisée. Ce qui conduit à prévoir des extensions souvent importantes de la surface de l'étude, mais dans le cas où la structure est concave l'énergie réfléchi est focalisée. Dans ce cas une petite surface de réception serait alors suffisante pour recueillir les données nécessaires. Donc pour construire l'image complète de l'horizon objectif il est nécessaire

d'agrandir la dimension de la zone d'observation c'est-à-dire additionner une frange supplémentaire : c'est la migration aperture.

I.3.2.2 Choix de la Migration Aperture

Si la taille de l'étude venait à se limiter au point **A**, la portion du réflecteur **OO'** ne trouvera alors aucun récepteur en surface pour enregistrer les échos qu'il renverra. Pour bien cerner le prospect, il est donc nécessaire d'étendre la taille de l'étude jusqu'au point **B** d'une distance XX_{max} appelée "Ouverture Maximale".

$$XX_{max} = \frac{1}{2} \times VT \sin \theta \tag{I.17}$$

Avec :

T : le temps du trajet **BO'**

Il ressort de cette formule que l'ouverture de la migration suivant la direction de la plus grande pente (direction des lignes de tir) n'est pas forcément égale à celle suivant la direction qui lui est perpendiculaire (direction des récepteurs). Il est à signaler, à propos de cette formule, qu'elle n'est applicable que pour des couches ayant un pendage inférieur à 20°. Au-delà de cette limite, la diffraction prend le dessus sur la réflexion, (**Fig I-16**).

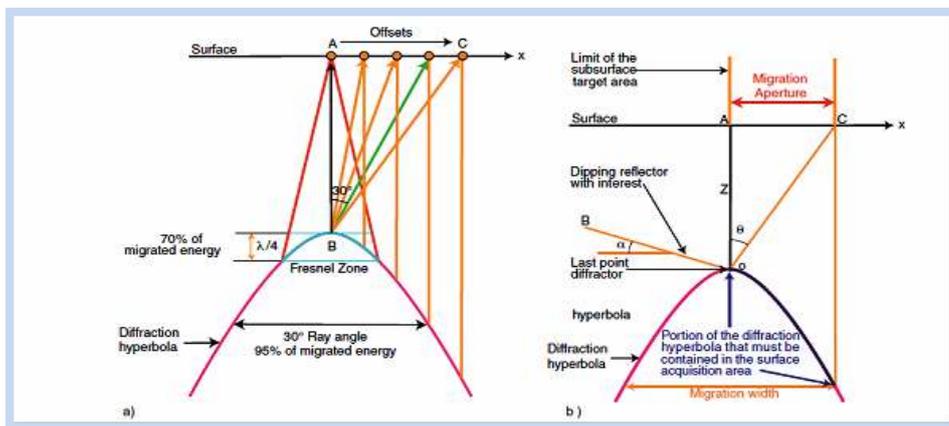


Fig I-16 Migration aperture. (a) : 95 % de l'énergie de migration sismique est obtenue en prenant $\theta = 30^\circ$. (b) : La valeur de la migration est $M_a = z \cdot \tan$ (d'après A. Chaouch et J. L. Marie).

Afin d'estimer cette extension nécessaire, nous reproduisons le schéma ci-dessous (**Fig I-17**) l'image d'un réflecteur penté dont on veut avoir l'image complète jusqu'au point **O'** en allant vers l'aval.

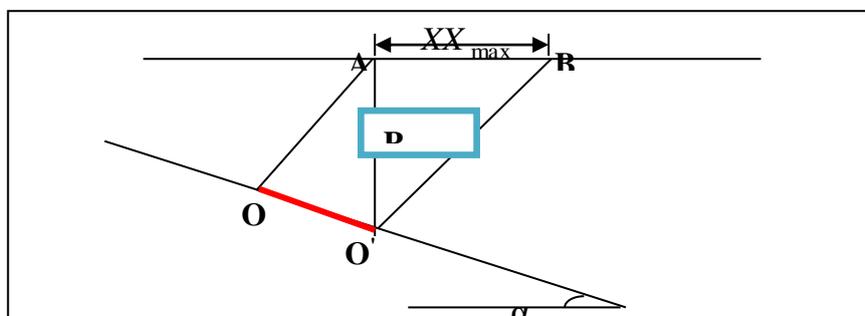


Fig I-17 Cas d'un réflecteur penté. XX_{max} : Frange de la migration aperture ; P : La profondeur à l'aplomb du point **A**, α : Le pendage.

I.3.2.3 Choix du Fold Taper

Les approches utilisées pour la détermination de cette frange sont :

- Sa largeur est fonction de la superficie exploitant une couverture totale, elle est choisie égale à 20% de l'offset maximal.
- Une autre approche consiste à cerner cette frange entre les deux valeurs $2X_{\min}$ et X_{\max} .

On définit selon la direction X-line et In-line deux longueurs différentes pour cette frange.

I.3.2.4 Influence du pendage sur l'orientation d'une étude

Le pendage des réflecteurs pose un problème sur l'orientation de l'étude par rapport aux réflecteurs horizontaux. Ainsi les informations qui parviennent à des réflecteurs inclinés doivent subir une migration pour les résoudre et les remettre à la position réelle.

L'efficacité de cette opération ainsi que celle d'analyses de vitesse (choix de la vitesse pour les corrections dynamiques) est conditionnée pour une bonne estimation de pendage structural de la zone à prospecter tout en utilisant des anciennes études 2D réalisées dans la région ou bien les données de puits (PSV). Les profils de réceptions sont disposés perpendiculairement au pendage c'est-à-dire suivant la direction (strike-line) et les lignes d'émissions seraient dans la direction du pendage (Dip-line). Cette organisation permet de simplifier les problèmes de traitement sismique en 3D.

I.3.3 Détermination des plages d'offsets

L'offset est déterminé comme étant la distance séparant un émetteur d'un récepteur. L'utilisation de plusieurs lignes de réception simultanément en sismique 3D conduit à une large gamme de variation des offsets, les plus intéressantes sont X_{\max} et X_{\min} (offset maximal et minimal). La détermination de la plage des offsets obéit à plusieurs critères dont le plus important reste l'atténuation des multiples. On distingue l'offset minimal (X_{\min}) et l'offset maximal (X_{\max}) qui est autour de 0.65 fois la profondeur de l'objectif.

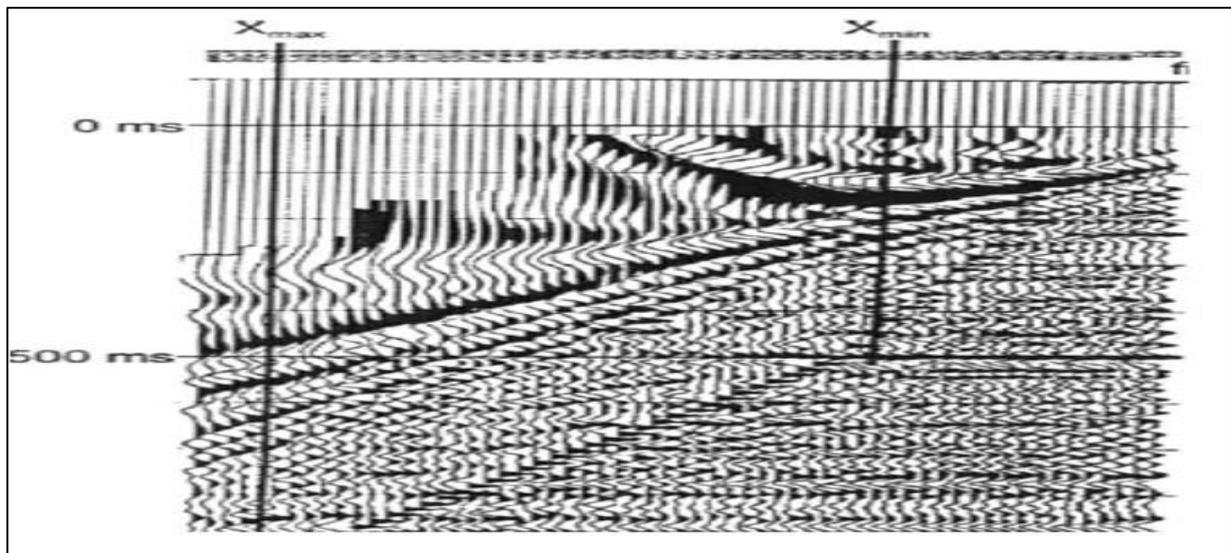


Fig I-18 Définition des plages d'offsets (document ENAGEO).

I.3.3.1 Choix de l'offset minimum

Il est lié à la distance séparant deux lignes réceptrices et deux lignes émettrices adjacentes. Elle est proportionnelle à la profondeur de l'objectif superficiel à carter, Le bin au centre d'un box constitué par deux lignes émettrices et deux lignes réceptrices adjacentes

correspondra au plus grand minimum offset de n'importe quel bin dans une étude 3D. Le plus grand minimum offset sera donc la diagonale de ce box.

Il s'en déduit que la formule donnant l'offset minimum dans ce cas peut s'écrire :

$$X_{\min} = \sqrt{(RLI^2 + SLI^2)} \quad (I.18)$$

Avec :

RLI : interligne de réception.

SLI : interligne des sources.

Dans le cas où les lignes de réception et d'émission sont décalées par la moitié de la dimension de bin, le X_{\min} va changer, (**Fig I-19-2**) On remarque dans cette configuration les quatre bines centraux ont le même offset (minimal) exprime par la relation :

$$X_{\min} = [(RLI - SI/2)^2 + (SLI - RI/2)^2]^{1/2} \quad (I.19)$$

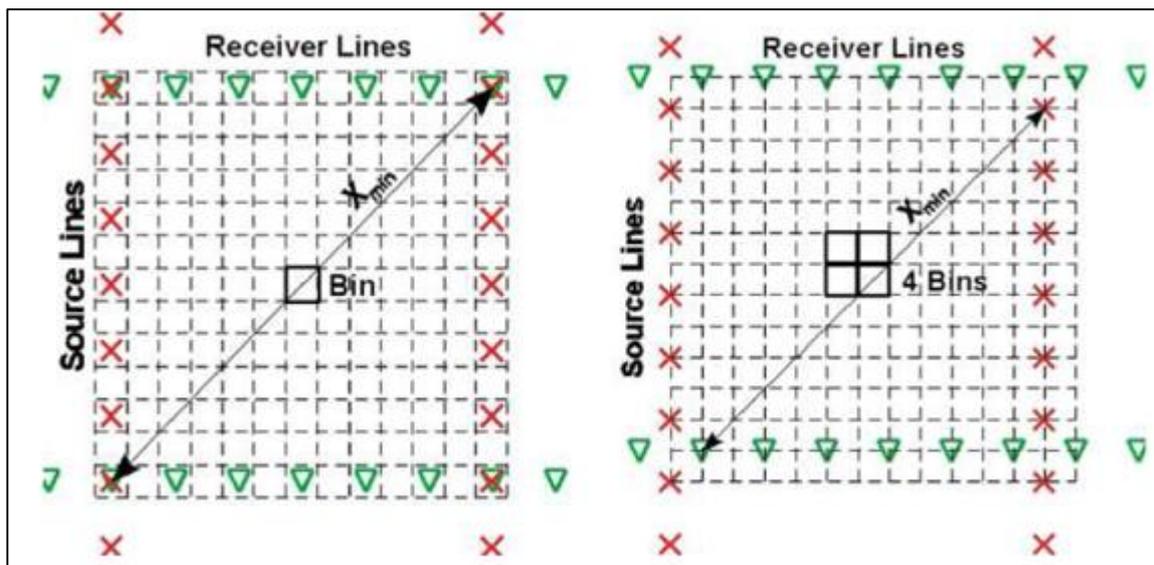


Fig I-19-1 X_{\min} avec récepteur source confondus.

Fig I-19-2 X_{\min} avec ligne de réception Décalée d'une dimension du bin.

I.3.3.2 Choix de l'offset max

L'offset maximale représente la distance entre un point de tir et le dernier récepteur dans un Template. Il dépend de la profondeur du réflecteur le plus profond qu'il convient de cartographier.

Nous citons dans ce qui suit quelques critères dont il faut tenir compte pour bien choisir l'offset maximum :

I.3.3.2.1 Profondeur de l'objectif

Les traces se trouvant à des offsets longues enregistrent les réflexions en prévenant des événements les plus profonds. En sismique 3D on prend souvent l'offset maximal proche de la profondeur de l'objectif visé. En règle générale X_{\max} est pris en considérant plusieurs études, égal à deux tiers de la profondeur de l'objectif pétrolier recherché.

I.3.3.2.2 Interférence des ondes directes

Dans le but d'éviter cette interférence entre la réflexion et l'onde directe X_{\max} , doit être pris inférieur à X_D . L'offset X_D peut être facilement déterminé à partir des données antérieures.

$$X_D = V_d \times (T_R + T_M) = V_D \cdot [(T_0^2 + S_D^2 / V^2)^{1/2} + T_M] \quad (I.20)$$

Avec :

V_D : vitesse des ondes directes.

V : vitesse des ondes réfléchies.

X_D : offset d'interférence.

T_M : temps de mute ajouté.

T_R : temps de réflexion.

T_0 : temps de réflexion à incidence normal.

I.3.3.2.3 Interférence des ondes réfractées

L'interférence de ces ondes avec les réflexions se fait à un offset X_{REF} , il suffit donc pour éviter cette interférence de prendre $X_{MAX} < X_{REF}$

$$X_{REF} = V_{REF} [(T_0^2 + X_{REF}^2 / V^2)^{1/2} + T_M] \quad (I.21)$$

Comme l'interférence des ondes réfléchies se fait avec les ondes directes avant les ondes réfractées, il suffit donc de vérifier l'expression de l'interférence avec les ondes directes pour s'assurer que l'interférence des réfractées ne peut avoir lieu. Soit $X_{REF} < X_d$, (**Fig I-20**).

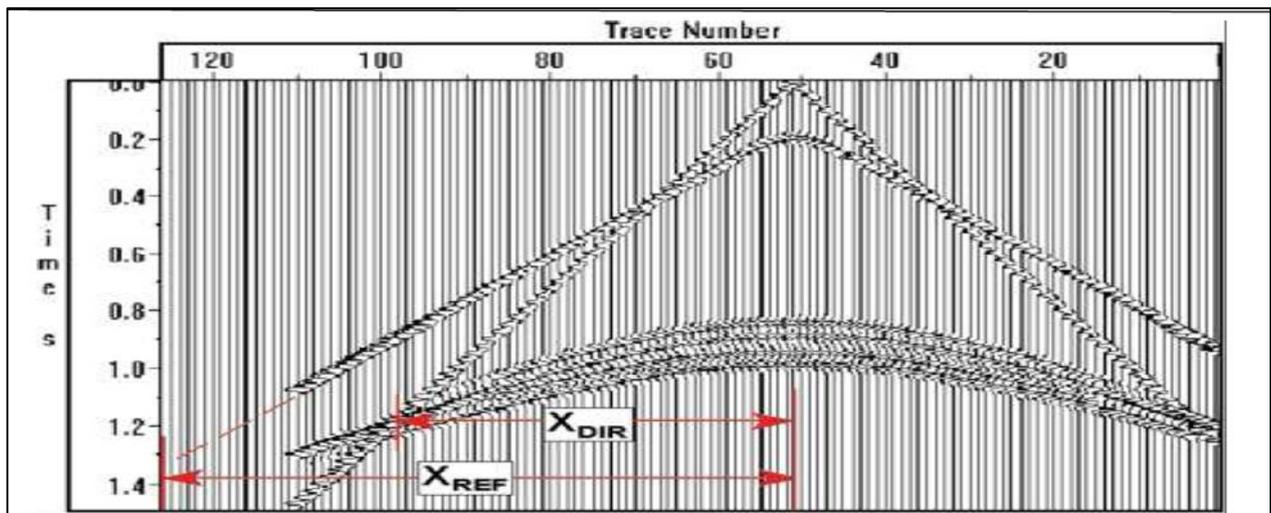


Fig I-20 Interférence des ondes réfractées et directes avec les ondes réfléchies.

I.3.3.2.4 Discriminant NMO

Pour que l'hyperbole de réflexion soit visible on doit s'assurer que l'offset X_{max} est supérieur à une certaine valeur X_{NMO} (**Fig I-21**) tel que :

$$X_{NMO} = V \times (\Delta T^2 + 2\Delta T \times T_0)^{1/2} \quad (I.22)$$

Avec :

X_{NMO} : la distance à partir de laquelle on applique la correction NMO.

ΔT : Période désirée (1,5 longueur d'onde).

T_0 : temps vertical double.

V : vitesse des ondes réfléchies.

$$X_{\max} > X_{\text{NMO}} \quad (I.23)$$

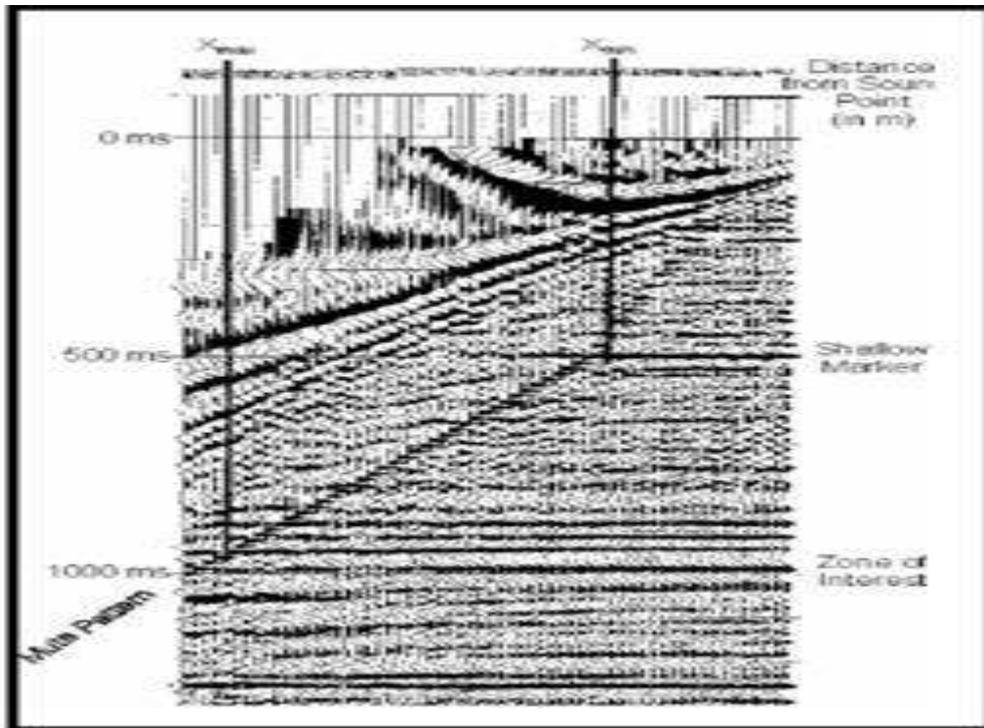


Fig I-21 Correction NMO dans un Shot Gather (d'après A. Cordsen et al)

I.3.3.2.5 Temps d'enregistrement

Le temps total d'enregistrement doit inclure la réflexion de l'horizon objectif. Le temps double à la verticale peut être déterminé facilement à partir des données de la sismique 2D. Margrave (1997) a montré que le temps d'enregistrement dans le cas d'un réflecteur penté et pour une vitesse constante est donné par la relation suivante :

$$T_0 = (2 \times P) / (V_m \times \cos \theta) \quad (I.24)$$

Avec :

θ : Le pendage.

I.4 Design

Le design final est le fruit d'une mûre réflexion, d'une batterie de tests ainsi que de la mise en considération des contraintes géophysiques, topographiques et surtout économiques. C'est la dernière étape au cours de laquelle le planificateur opte pour le dispositif d'acquisition adéquat ainsi que la densité de tir nécessaire à une acquisition réussie. Le design consiste à porter une grande attention aux points suivants :

I.4.1 Dimension du Template et Rapport d'Aspect

Les dimensions du Template doivent être choisies convenablement en fonction de l'offset maximal et le nombre de ligne à utiliser. Le rapport d'aspect est le rapport entre la demi-largeur et la demi-longueur du Template. Afin de déterminer les dimensions du Template, la règle des 85 % est la plus utilisée.

I.4.2 La règle des 85 %

La règle des 85% a été établie afin de maximiser le nombre de traces affichant l'offset maximum. La demi longueur du Template X_r qu'on prend soit égale à 0.85 % X_{max} au lieu X_{max} , et pour avoir une large distribution azimutale on considère la demi largeur X_s égale à 0.85 % X_r (Fig I-22), à gauche: si on choisit le patch bleu ; on aura peu de traces qui enregistrent le X_{max} , et si on prend le patch rouge ; on aura un nombre élevé de trace à muter. Patch idéal on utilisant la règle de 85 % (à droite) : lorsqu'on prend le patch vert ; on aura un gain 'en bleu'.

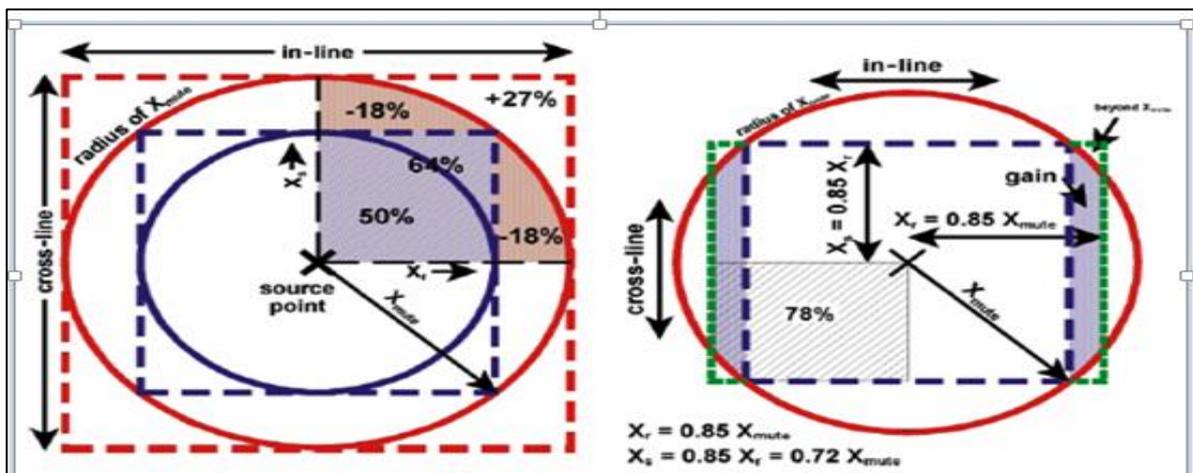


Fig I-22 Schéma présentant les dimensions du Patch en fonction de X_{mute} (d'après A. Cordsen et al.).

I.4.3 Distribution de la Couverture

Il s'agit d'accorder une grande importance à la distribution de la couverture selon les plages d'offsets courtes, moyennes et longues. Ce sont les vides en couverture qu'il faut éviter, notamment en zone d'interprétation (ou domaine de l'interpréteur) qui cible l'objectif. En effet, ces vides ne manqueront pas d'influer sur le rapport S/B après sommation, et de ce fait, causer d'énormes difficultés lors du traitement et de l'interprétation.

I.4.4 Distribution des Offsets

La distribution des offsets dans un CMP bin est affectée par la couverture. Une faible couverture donne une mauvaise distribution des offsets. Quand la couverture augmente la distribution des offsets s'améliore. On essaye d'avoir une même distribution de l'offset proche, intermédiaire et lointaine afin de faciliter le calcul de la vitesse pour la correction NMO et obtenir une réponse de stack meilleure. Lorsqu'un même offset se répète plusieurs fois dans un même bin selon des azimuts différents on ne tiendra compte que d'une seule trace lors du traitement.

I.4.5 Notion de redondance des offsets

C'est le phénomène de répétition d'offsets dans le même bin. Le nombre de répétitions définit l'ordre de redondance. La redondance des offsets est avantageuse pour les corrections statiques et pour la détermination de l'orientation du pendage des structures.

I.4.6 Distribution des Azimuts

La distribution des azimuts est aussi importante que celle des offsets et de la couverture. Elle est régulée par la couverture et le rapport d'aspect du Patch.

- Si le rapport d'aspect est inférieur à 0,5 on peut attendre une mauvaise distribution des azimuts ce qui donne une distribution d'azimuts étroite. Par contre si le rapport d'aspect est entre 0.6 et 1, on aura une large distribution azimutale (**Fig I-23**).

Une bonne distribution azimutale assure que l'information de tous les angles qui entoure le CMP bin est incluse dans le stack.

- Une distribution azimutale étroite est bonne pour l'analyse AVO et quand il y a une variation significative de la vitesse latérale. Par contre une distribution azimutale large est meilleure pour l'analyse de vitesse et l'atténuation des multiples.

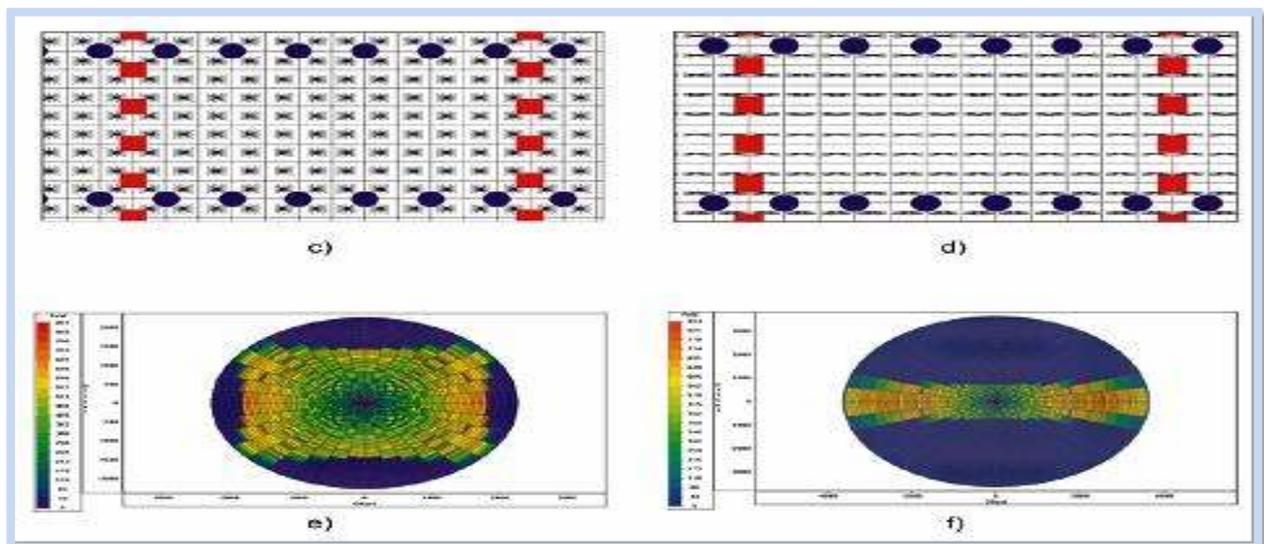


Fig I-23 Spider diagram (D'après A. Cordsen et al.), (c) : Distribution azimutale large, (d) : distributions azimutale étroite. Rose diagramme, (e) : Distribution azimutale large, (f) : distributions azimutale étroite.

II.1 Introduction

Conjointement à un au modèle géologique de référence, toute modélisation en sismique passe impérativement par le choix d'un type de signal-source (signal d'excitation) dont les critères de sélection reposent sur :

- Les objectifs attendus de cette modélisation : sismique réflexion, réfraction, migration, traitement spécial...
- La qualité du modèle : résolution
- La mise en œuvre du modèle synthétique.

Ces paramètres ne peuvent être fixés individuellement car il y a certainement des interdépendances entre eux. Il y a donc un problème d'optimisation qui se posera plus tard.

II.2 Définition d'une impulsion sismique

Une impulsion Est un signal court émis par une source sismique, elle peut être caractérisée par sa période T et l'amplitude de ses différentes arches. Les impulsions sismiques se propagent et sont réfléchies dans les séries géologiques en ne subissant que de faibles modifications. Ces impulsions sismiques ne durent que pendant un temps très bref et elles ont la forme d'une impulsion décroissante-amortie.

La fonction du transfert traduit la modification de l'impulsion en fonction de la distance et du temps entre deux capteurs adjacents ou pour l'ensemble des capteurs. La modification de l'impulsion se traduit une modification d'amplitude, de phase et de temps d'arrivée (retard pur).

En modélisation sismique l'impulsion est appelée ondelette en ce sens qu'elle est constituée d'une collection de composantes sinusoïdales primaires de variation très lente tout comme une onde sismique.

Différencier une source sismique quelconque d'une impulsion, ne peut se faire que par rapport à deux critères :

- ✓ Un critère de phase minimale souhaitée
- ✓ Un critère d'amplitude, donc d'énergie révélée par le spectre de puissance lui-même et conditionné par le contenu spectral (fréquentiel). Une impulsion sismique sera un modèle de signal, à phase minimale, de spectre le plus large possible, (**figure II-1**).

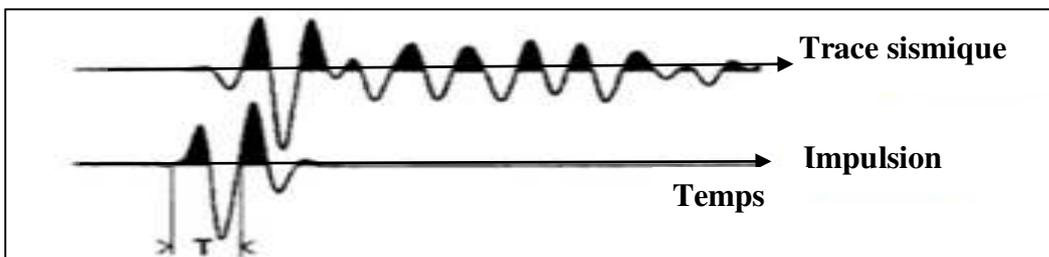


Fig II-1 trace sismique et impulsion.

II.3 Paramètres descriptifs d'une impulsion

A côté des paramètres classiques de tout signal (équation temporelle, spectre d'énergie,...) il existe d'autres caractéristiques d'une impulsion à savoir :

- Le type causal ou non.
- Le premier passage par zéro.
- La largeur.
- La largeur de son spectre.
- La phase.

Notons que la phase dans ce cas est définie comme l'intervalle de temps séparant l'instant d'émission t_i et l'instant t_{i+1} où l'impulsion atteint son amplitude maximale.

II.4 Etude de différents types d'impulsion

II.4.1 impulsion idéale de Dirac

II.4.1.1 modèle mathématique

Bien que n'ayant pas d'existence physique, l'impulsion idéale de Dirac $\delta(t)$ joue néanmoins un rôle fondamental en traitement de signal en général et des données sismiques en particulier. Elle joue le rôle de l'impulsion unité dans les problèmes de physique impulsionnelle notamment pour décrire des événements infiniment brefs mais de puissance finie non nulle ou le phénomène d'échantillonnage.

Suivant Dirac, on peut songer à représenter une fonction $\delta(t)$ qui est exprimée comme suit :

$$\delta(t) = \begin{cases} +\infty & \text{si } t = 0 \\ 0 & \text{si } t \neq 0 \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \end{cases}$$

L'opération fondamentale à laquelle Dirac voulait soumettre $\delta(t)$ est l'évaluation de l'intégrale $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)f(t)dt$

Où f est une fonction continue quelconque. Cette intégrale peut être évaluée par l'argument suivant : puisque $\delta(t)$ est nulle pour $t \neq 0$, les bornes d'intégration peuvent être remplacées par $-\epsilon$ et $+\epsilon$, où ϵ est un nombre positif petit. De plus, puisque f est continue en $t = 0$, ses valeurs dans l'intervalle $(-\epsilon, +\epsilon)$ ne diffèrent pas beaucoup de $f(0)$. On écrit donc approximativement :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)dt = \int_{-\epsilon}^{+\epsilon} \delta(t)f(t)dt \cong f(0) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)dt \quad (\text{II.1})$$

L'approximation s'améliore au fur et à mesure que ϵ s'approche de 0. À la limite $\epsilon \rightarrow 0$, on a exactement l'égalité :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)f(t)dt = f(0) \quad (\text{II.2})$$

L'impulsion de Dirac n'admet pas à proprement parler de graphe si ce n'est qu'une présentation symbolique (**Fig II-2**).

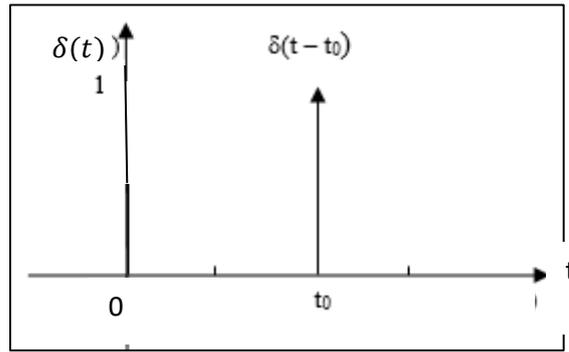


Fig II-2 représentation symbolique de l'impulsion de Dirac

En pratique, l'impulsion de Dirac est approchée par une simple impulsion de largeur minimale présentant un pic, d'amplitude maximale au voisinage de l'origine.

II.4.1.2 Spectre de l'impulsion de Dirac

$$TF [\delta(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) \exp(-2\pi jvt) = \exp(-2\pi jvt) \Big|_{t=0} = 1 = 1(v) \tag{II.3}$$

1 \longrightarrow fonction constante de la fréquence v

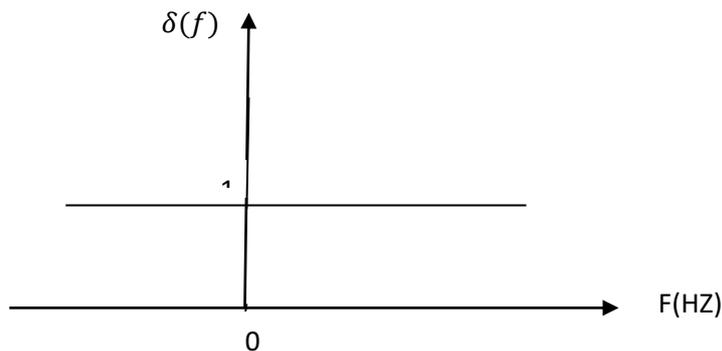


Fig II-3 Spectre d'amplitude de Dirac.

II.4.1.3 Propriétés de l'impulsion de Dirac

II.4.1.3.1 Multiplication de $\delta(t)$ par une fonction continue

On sait que $\delta(t)$ Étant nulle partout ailleurs qu'à l'origine, il en est de même du produit $f(t) \cdot \delta(t)$

On a donc:

$$F(t) \cdot \delta(t) = f(0) \cdot \delta(t) \tag{II.4}$$

II.4.3.1.2 Intégration du produit de $\delta(t)$ par une fonction continue

Multiplions les deux membres de l'équation (II.4) par dt et intégrons de $-\infty$ à $+\infty$:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \delta(t) \cdot dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(0) \cdot \delta(t) \cdot dt = f(0) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) \cdot dt = f(0)$$

Donc:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \delta(t) \cdot dt = f(0) \quad (\text{II.5})$$

II.4.3.1.3 Changement d'origine

Il suffit d'effectuer le Changement d'origine de temps $t' = t - t_0$. Dans ce cas la on a:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta(t') = 0 \quad \text{si} \quad t' \neq 0 \\ \delta(t') = 1 \quad \text{si} \quad t' = 0 \end{array} \right\}$$

Alors:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta(t - t_0) = 0 \quad \text{si} \quad t' \neq 0 \\ \delta(t - t_0) = 1 \quad \text{si} \quad t' = 0 \end{array} \right\} \quad (\text{II.6})$$

II.4.1.4 Série d'impulsion de Dirac (peigne de Dirac)

Pour échantillonner un signal avec un période d'échantillonnage régulière T, il est pratique de définir une suite d'impulsions de Dirac qui jouent le rôle d'opérateur d'échantillonnage, (**Fig II-4**).

Notée $\text{III}(t)$, la série d'impulsion de Dirac de période 1 définie comme suit :

$$\text{III}(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - n)$$

Pour une série d'impulsion de Dirac de période quelconque T, on pose :

$$\text{III}_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT)$$

$$\text{Sachant que } \delta(kt) = \frac{1}{|k|}$$

D'autre part on a :

$$\text{III}_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT)$$

Par la mise en commun du terme T :

$$\text{III}_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\left(T\left(\frac{t}{T} - n\right)\right)$$

D'après la propriété citée précédemment :

$$\text{III}_T(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\left(\frac{t}{T} - n\right)$$

$$\text{III}_T(t) = \frac{1}{T} \text{III}\left(\frac{t}{T}\right) \quad (\text{II.7})$$

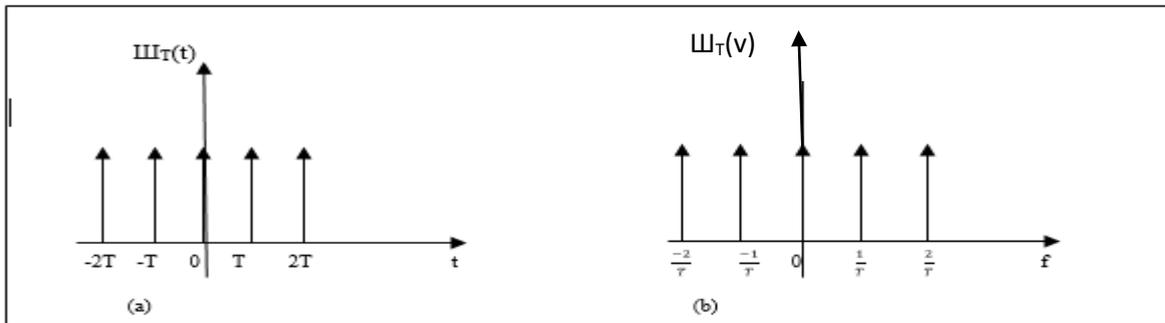


Fig II-4 Peigne de Dirac (a), spectre de peigne de Dirac (b).

II.4.1.5 Spectre d'un peigne de Dirac

Sachant que :

$$\text{TF} [\text{III}(t)] = \text{III}(v)$$

Nous pouvons déduire le spectre d'une série d'impulsion de largeur quelconque T, en effet :

$$\text{TF} [\text{III}_T(t)] = \text{TF} \left[\frac{1}{T} \text{III}\left(\frac{t}{T}\right) = \text{III}(vT) \right]$$

$$\text{TF} [\text{III}_T(t)] = \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(vT - n) = \frac{1}{T} \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta\left(v - \frac{n}{T}\right)$$

$$\text{TF} [\text{III}_T(t)] = \frac{1}{T} \text{III}_{\frac{1}{T}}(v) \quad (\text{II.8})$$

Le spectre d'une série d'impulsion de Dirac de largeur T, est encore une série d'impulsions de Dirac mais exprimée dans le domaine spectral avec une période $\frac{1}{T}$, et un facteur multiplicatif des amplitudes également de valeur $\frac{1}{T}$.

II.4.2 Impulsion créneau (fonction Porte)

La fonction porte de largeur 1, notée rectangle, est une fonction réelle de la variable réelle (**Fig II-5**)

II.4.2.1 Fenêtre naturelle

On définit la fenêtre naturelle, noté $\Pi(t)$ par :

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } -\frac{1}{2} \leq t \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases}$$

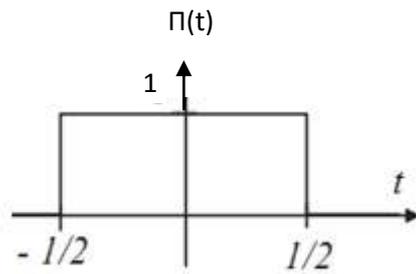


Fig II-5 Représentation simplifiées d’une fonction Porte de largeur unité.

II.4.2.2 Fenêtre de largeur T

On définit ainsi la fenêtre de largeur T :

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases}$$

Ainsi : $\Pi_T(t) = \Pi\left(\frac{t}{T}\right)$ (II.9)

Ou bien :

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } -\frac{1}{2} \leq \frac{t}{T} \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases}$$

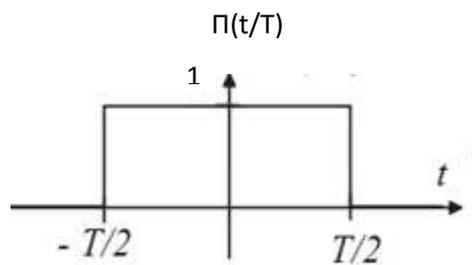


Fig II-6 Représentation simplifiées d’une fonction Porte de largeur T.

II.4.2.3 Série d’impulsion créneau de largeur Δt

Symboliquement, une série d’impulsion créneau peut s’écrire sous la forme :

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \Pi(t - k\Delta t)$$
 (II.10)

II.4.2.4 Spectre d'amplitude de la fonction porte

II.4.2.4.1 Calcul de la TF de la fonction porte

Comme TF $[\Pi(t)] = \frac{\sin \pi v}{\pi v}$

Pour une largeur d'impulsion T :

$$\text{TF} [\Pi_T(t)] = \text{TF} [\Pi(\frac{t}{T})]$$

$$\text{TF} [\Pi_T(t)] = T \frac{\sin \pi v T}{\pi v T}$$

Donc :

$$\text{TF} [\Pi_T(t)] = T \text{sinc}(\pi v T) \quad (\text{II.11})$$

Le spectre d'amplitude d'une impulsion créneau est donc réel.

La fonction rectangle, utilisée dans le domaine fréquentielle, permettra aussi de définir des filtres idéaux, passe bas, passe haut, ou passe bande. Elle est aussi très utile pour exprimer mathématiquement une portion d'un signal de largeur T.

II.4.3 Impulsion sinusoïde amortie

II.4.3.1 Introduction

L'impulsion sinusoïde amortie est certainement la plus représentative des impulsions sismiques car elle renferme dans son expression à la fois un comportement sinusoïdal (ce qui est souvent souhaité) et un facteur d'amortissement exponentiel ce qui la place dans la classe des impulsions réelles.

II.4.3.2 Expression analytique d'une impulsion sinusoïdale amortie

Une impulsion sinusoïdale amortie S(t) admet une expression analytique :

$$S(t) = A e^{-at} \sin w_0 t \quad (\text{II.12})$$

Avec:

A: facteur multiplicatif de contrôle.

a : facteur d'amortissement ($a > 0$).

W_0 : fréquence fondamentale de l'impulsion.

L'impulsion causale définie pour $t > 0$ sont les plus indiquées dans la modélisation, dans notre cas on écrit :

$$S(t) = H(t) \cdot S(t) = H(t) \cdot A e^{-at} \sin w_0 t \quad (\text{II.13})$$

H(t) : représente la fonction échelon unité définie par :

$$H(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t > 0 \\ \frac{1}{2} & \text{si } t = 0 \\ 0 & \text{si } t < 0 \end{cases}$$

II.4.3.3 Spectre d'une impulsion sinusoïdale amortie

$$TF [s(t)] = TF [A.H(t). e^{-at} \sin w_0 t]$$

$$TF [s(t)] = TF [A.H(t) e^{-at}] * TF[\sin w_0 t]$$

$$\text{Où : } w_0 = 2\pi f_0$$

On a aussi :

$$TF [A.H(t) e^{-at}] = \frac{A}{a+j2\pi f}$$

$$TF [\sin t] = \frac{j}{2} [\delta(f + \frac{1}{2\pi}) - \delta(f - \frac{1}{2\pi})]$$

$$TF [\sin 2\pi f_0 t] = \frac{j}{2} [\delta(f + f_0) - \delta(f - f_0)]$$

Donc, il en résulte que:

$$TF [s(t)] = TF [A.H(t). e^{-at} \sin 2\pi f_0 t]$$

$$TF [s(t)] = TF [A.H(t) e^{-at}] * TF[\sin 2\pi f_0 t]$$

$$TF [s(t)] = \frac{A}{a+j2\pi f} * [\delta(f + f_0) - \delta(f - f_0)]$$

D'après les deux relations :

$$\begin{cases} f(t) * \delta(t + t_0) = f(t + t_0) \\ f(t) * \delta(t - t_0) = f(t - t_0) \end{cases}$$

Donc :

$$TF [s(t)] = \frac{Aj}{2} [\frac{1}{a+j2\pi(f+f_0)} - \frac{1}{a+j2\pi(f-f_0)}]$$

$$TF [s(t)] = \frac{A}{2} [\frac{2\pi f_0}{a^2 - 4\pi^2(f^2 - f_0^2) + j4\pi a f}] \tag{II.14}$$

II.4.3.4 Calcul du spectre d'amplitude

$$\text{D'après : } |S(f)| = \sqrt{A^2(f) + B^2(f)}$$

A(f) : partie réelle

B(f) : partie imaginaire

Alors :

$$|S(f)| = \frac{A}{2} \frac{2\pi f_0}{[\alpha^2 - 4\pi^2(f^2 - f_0^2)^2 + (4\pi a f)^2]^{\frac{1}{2}}}$$

$$|S(f)| = \frac{2A\pi f_0}{[\alpha^2 - 4\pi^2(f^2 - f_0^2)^2 + (4\pi a f)^2]^{\frac{1}{2}}} \tag{II.15}$$

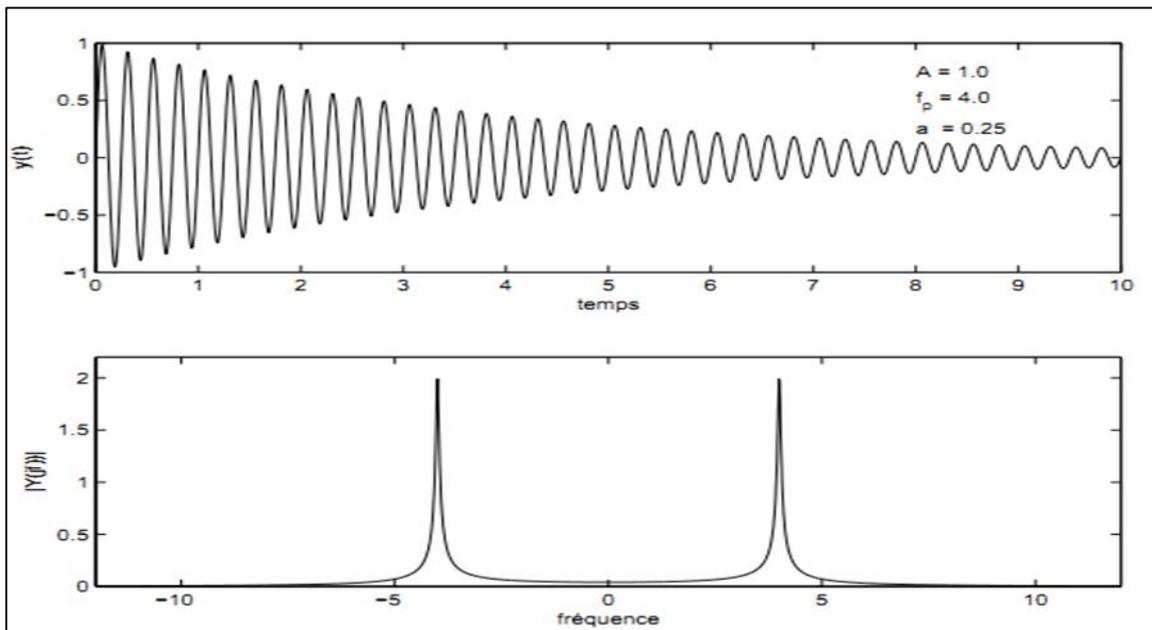


Fig II-7 Sinus amorti, et le module de sa densité spectrale d'amplitude, (Christian Juttin. Théorie du signal).

II.4.4 Impulsion de Berlague

II.4.4.1 Définition et les propriétés temporelles

L'ondelette de Berlague (1936) généralisée est définie par :

$$B(t) = A.H(t).t^n . e^{-at} . \cos (2\pi.V_0.t + U_0) \tag{II.16}$$

$n \in \mathbb{N} : a > 0$ (f_0, U_0) des constants fixés

H(t) : fonction de Heaviside.

L'enveloppe de l'ondelette est contrôlée par :

- le paramètre de décroissance « n » : supposé positif car il figure en exposant de l'exponentiel, en générale « n » n'est pas nécessairement entier.

- L'obtention d'une généralisation de l'impulsion de Berlague est faite par l'introduction d'une phase U . Un cas particulier $U_0 = -\frac{\pi}{2}$

Alors :

$$B(t) = A.H(t).t^n.e^{-at}.\sin(2\pi.V_0.t) \quad (\text{II.17})$$

Les différentes variantes de l'impulsion de Berlague sont obtenues en faisant varier U_0 de $(-\frac{\pi}{2} \text{ à } \frac{\pi}{2})$.

II.4.4.2 Avantages de l'impulsion de Berlague

Ses avantages sont les suivantes :

- Sa causalité.
- Son caractère de fonction continument différentiable.

Si $U_0 = \pm \frac{\pi}{2}$, les « n » premières dérivées de $B(t)$ sont continuées.

- Energie, moment et longueur.

L'énergie dans le domaine temporel de $B(t)$ s'écrit :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |B(t)|^2 dt = A^2 \int_{-\infty}^{+\infty} t^{2n}.e^{-2at}.\cos(2\pi.V_0.t + U_0).dt$$

Si : $U_0 = -\frac{\pi}{2}$; et si on passe par la TF :

$$E(t) = \int_0^{+\infty} t^{2n}.e^{-2at}.\cos(2\pi.V_0.t).dt \quad (\text{II.18})$$

II.4.4.3 Le spectre l'impulsion de Berlague

$$B(V) = \frac{A.j.n!}{2} \left[\frac{1}{(a+j.2\pi(V+V_0))^{n+1}} - \frac{1}{((a+j.2\pi(V-V_0))^{n+1}} \right] \quad (\text{II.19})$$

II.4.4.4 Le spectre d'amplitude de l'impulsion de Berlague

$$B(V) = 4A\pi.V_0 \left[\frac{|a+j\pi.V|}{(a^2-4\pi(V+V_0)+j.4\pi aV_0)^4} \right] \quad (\text{II.20})$$

II.4.5 Impulsion de Ricker

II.4.5.1 Introduction

L'ondelette à phase nulle, la plus considérée en modélisation sismique, est l'ondelette de Ricker. L'intérêt réside dans le choix de sa formulation mettant en jeu une fonction polynomiale en t^2 , donc assez simple, la présence de paramètres de contrôle (R et b), dont les variations peuvent en générer une grande famille.

II.4.5.2 Expression de l'ondelette de Ricker

Dans le domaine temporel, l'ondelette de Rickert admet pour expression :

$$S(t) = P(b, R, t). e^{\left(\frac{-t}{b}\right)^2} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$P(b, R, t) = \frac{R}{2\sqrt{b}} \left[1 - 2 \left(\frac{t}{b} \right)^2 \right] \quad (\text{II.22})$$

L'expression $e^{\left(\frac{-t}{b}\right)^2}$ assure une décroissance rapide de l'ondelette au voisinage de l'infini tout au moins vers les grandes valeurs du temps.

R: est un paramètre de contrôle de l'amplitude, donc de l'énergie maximale de l'ondelette.

b: est un paramètre de contrôle de la largeur fréquentielle de l'ondelette. Il est relié à la fréquence maximale f_m par l'expression :

$$b = \frac{1}{\pi f_m} \quad (\text{II.23})$$

Une valeur exagérément faible de b, permettra à la limite d'assimiler l'impulsion de Rickert à un signal de Dirac. Ces deux paramètres représentent les paramètres de description d'une impulsion de Rickert, (Fig II-8)

L'impulsion de Rickert, représentée par un polynôme en t^2 doublé d'un terme d'atténuation en exponentiel décroissant et d'un usage relativement simple. Opter pour ce type d'impulsion passe par la fixation de l'un des deux paramètres R et b.

L'impulsion de ricker est définie dans le domaine temps par la relation :

$$r(\tau) = (1 - 1/2 W p^2 \tau^2) \exp(-1/4 w_p^2 \tau^2) \quad (\text{II.24})$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} r(\tau) d\tau = 0 \quad (\text{II.25})$$

La demi-largeur de l'impulsion de ricker est définie par la relation suivante :

$$\tau_b = 2/\omega_p \sqrt{\frac{1}{2} - \omega(\sqrt{e})/4} \quad (\text{II.26})$$

La transforme de fourrier de ricker s'écrit par la formule suivante :

$$R_w = (2\omega^2/\omega_p^3 \sqrt{\pi}) \exp(-\omega^2/\omega_p^2) \quad (\text{II.27})$$

Avec : ω : la fréquence angulaire Et $\omega = \omega_p$

L'expression analytique de la fréquence centrale est donnée par la formule suivante :

$$\omega_c = \omega_p/2 \cdot \left\{ \sqrt{-wc\left(-\frac{1}{2e}\right)} + (\sqrt{-W(-1)}\sqrt{-1/2e}) \right\} \quad (\text{II.28})$$

L'expression analytique de la bande passante est donnée par la formule suivante :

$$\omega_b = \omega_p/2. \left\{ \sqrt{-w(-1)(-\frac{1}{2e})} + (\sqrt{-w(-0)}\sqrt{-1/2e}) \right\} \quad (\text{II.29})$$

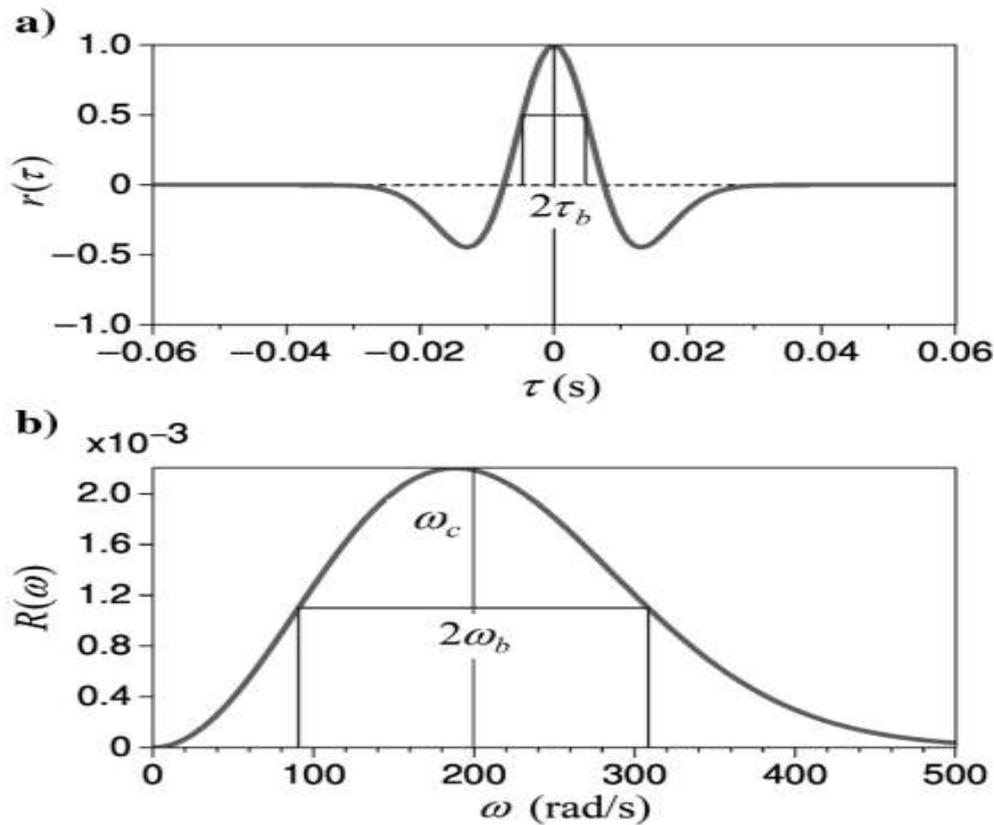


Fig II-8 (a) impulsion de Rickert $r(\tau)$ et son spectre τ : le temps, $2\tau_b$ la largeur de l'impulsion (b) la fréquence du spectre, $R(\omega)$: la fréquence angulaire de l'impulsion $r(\tau)$, ω_c : la fréquence centrale, $2\omega_b$: la bande passante.

III.1 Historique

En février 1960, John Crawford, William E.N.Doty et Milford R.LEE publièrent un article dans ' Geophysics ' intitulé Signal Sismographe Continu (continue signal sismographe) et par la suite introduisirent un nouveau système totalement d'exploration sismique : **Le système vibroseis**.

Les implications théoriques d'une source d'énergie développée en surface étaient très attractives et plusieurs géophysiciens ont considéré le vibroseis comme l'instrument d'acquisition sismique du futur. Presque une dizaine d'année après, d'intenses et couteux travaux de recherche ont été menés par la **Continental Oil Company** pour aboutir en 1961 au dépôt d'une licence industrielle. Dès lors l'idée d'un signal sismique continu et long a trouvé une large application et a prouvé ses performances dans le cadre de la prospection sismique.

III.2 Une brève description du système d'exploitation par vibroseis

La méthode vibrosismique est une méthode de prospection sismique dans laquelle l'énergie génératrice des ondes élastiques ne provient pas d'un explosif mais d'un système vibrateur. Dans ce système, on utilise des impulsions très énergiques, générées par les sources explosives et remplacée par une ou plusieurs émissions d'une énergie de faible puissance dans le sol mais étalées dans le temps (train d'impulsions). Le signal émis est à balayage fréquentiel donc modulé en fréquence (signal FM), de type sinusoïdal appelé " Sweep", il est d'amplitude constante situé dans une bande de fréquence choisie comme paramètre. Le sweep est généré puis transmis dans la sub-surface par des vibrateurs conçus spécialement basés sur un mécanisme d'activation hydraulique commandés électroniquement. Le vibroseis appartient donc à la catégorie des sources de surface non explosives à émission continue des fréquences sismiques.



Fig III-1 vibrateur d'acquisition

III.3 Mise en œuvre

En général, trois ou quatre vibrateurs peuvent travailler simultanément dans un but du renforcement de l'énergie du signal d'entrée et d'atténuer certaines formes de bruits (exemple : les ondes de surface). Dans ce cas, une grande synchronisation est requise pour assurer une meilleure qualité des données.



Fig III-2 Schéma représente la mise en œuvre sur terrain.

Les capteurs (géophones) enregistrent une famille de signaux décalés en temps qui sont des répliques des signaux émis. En conséquence, à cette étape de l'acquisition les enregistrements sismiques ne permettent aucune interprétation.

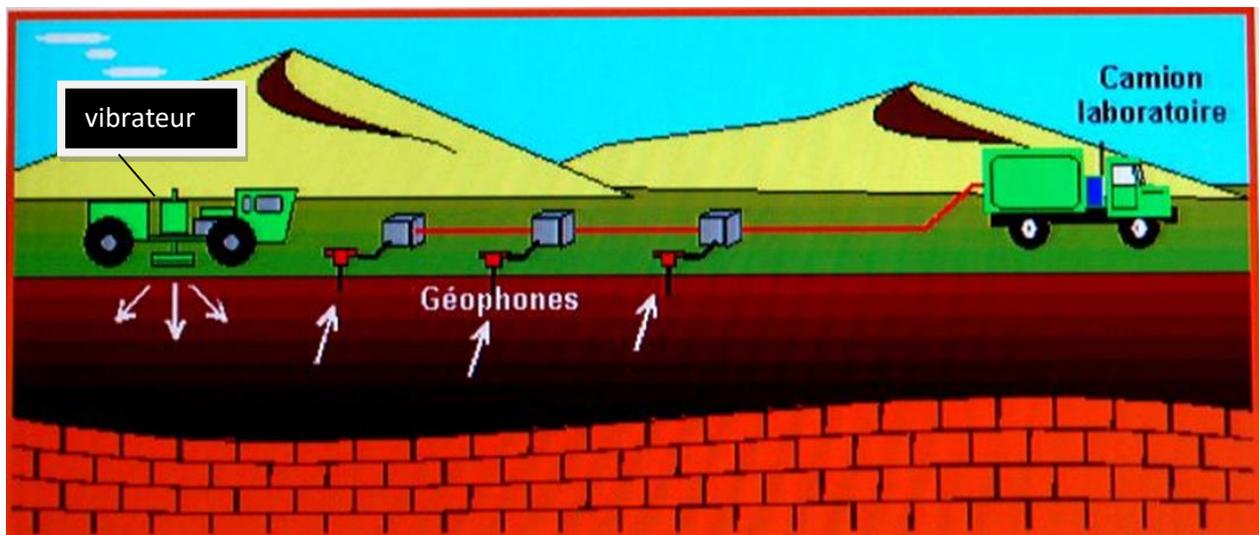


Fig III-3 représentation d'une acquisition vibrosismique sur terrain.

III.4 Les essais en vibrosismique

En sismique conventionnelle, des essais sont à mettre en œuvre au début pour définir les paramètres d'exploitation à savoir :

- La dimension du dispositif sismographique à préciser :
 - L'offset minimal.
 - L'offset maximal.

- La distance de l'inter trace.
- La géométrie des nappes de géophones.
- La géométrie du point vibré, et l'énergie émise.
- La bande de fréquence émise et le sens du sweep.
- La longueur du Sweep.

III.4.1 Dimension du dispositif sismographique

Les dimensions du dispositif sismographique seront données en fonction de l'objectif de l'étude. Elles devront assurer une bonne couverture des horizons sismiques. Avec un contenu fréquentiel satisfaisant, la détermination des différents facteurs constituant un dispositif sismographique se fera comme suit :

III.4.1.1 Offset minimal (distance entre la source et la première trace sismique)

En considérant l'offset minimal comme très large, des horizons sismiques superficiels seront couverts par un degré de couverture insuffisant, où ils pourront être complètement inopérante. En contrepartie, l'offset minimal devra être assez large, d'une part pour que les traces centrales ne soient pas affectées par le bruit des vibrateurs. On peut dire, cependant, que la détermination de l'offset minimal en utilisant les enregistrements " playsbacks " est souvent difficile à fixer à cause du bruit superposé avec les réflexions. Néanmoins, en utilisant la déconvolution pour le traitement des enregistrements appropriés, nous pouvons fixer la longueur de l'offset minimale. Une offset de longueur 75m à 125m est toujours acceptable pour la vibrosismique.

III.4.1.2 Offset maximal (distance entre la source et la dernière trace sismique)

L'offset maximal dépend directement de l'objectif le plus profond. Sa longueur doit assurer que toutes les réflexions importantes seront captées et qu'elles ne seront pas affectées par l'effet des corrections dynamiques. Si le degré de couverture est inadéquat pour un horizon donné, ou que l'onde réfractée vient à s'interférer avec les réflexions les plus profondes, alors, l'offset maximal doit être réduit au détriment de la longueur de l'intertrace.

III.4.1.3 Longueur de l'inter trace

Au cours des procédures de traitement actuelles, les sections sismiques sont généralement soumises à un traitement spécifique, c'est la migration, en vue d'améliorer la résolution horizontale qui est liée directement à la longueur de l'intertrace. Or, tenter d'améliorer la résolution horizontale, entraîne une manipulation du contenu fréquentiel, et de la longueur d'onde du signal émis. La fréquence de coupure maximale du signal émis est introduite (clairement définie dans la méthode du vibroseis). Pour la résolution horizontale des réflexions :

$$R_h = \frac{v}{8 \sin(a) f_{\max}} \quad (\text{III.1})$$

Où :

R_h : résolution horizontale.

V : vitesse moyenne de l'onde dans la couche géologique (m/s).

f_{max} : fréquence de coupure maximale.

a : angle d'incidence utilisé dans le traitement par migration, généralement on applique une migration 45° (offset maximale égale à la profondeur de l'objectif).

La longueur maximale de l'inter trace correspondante à la résolution horizontale est :

$$G_h = 4.R_h$$

$$G_h = \frac{V}{2 \sin(a) f_{max}} \quad (III.2)$$

Où :

G_h : la longueur maximale de l'inter trace.

R_h : la résolution horizontale.

III.4.1.4 Géométrie des nappes de géophones

La géométrie des nappes de géophones sera déterminée après analyse d'un tir de bruit classique. Actuellement, avec l'utilisation des couvertures multiples de degré élevé et des chaînes d'enregistrement de large dynamique, le rôle de la nappe de géophone est d'atténuer certains bruits organisés. Par conséquent, sa longueur est basée essentiellement sur le bruit qui a la plus grande longueur d'onde. De même, la distance entre géophone doit être faible, afin d'atténuer le bruit qui a la plus petite longueur d'onde.

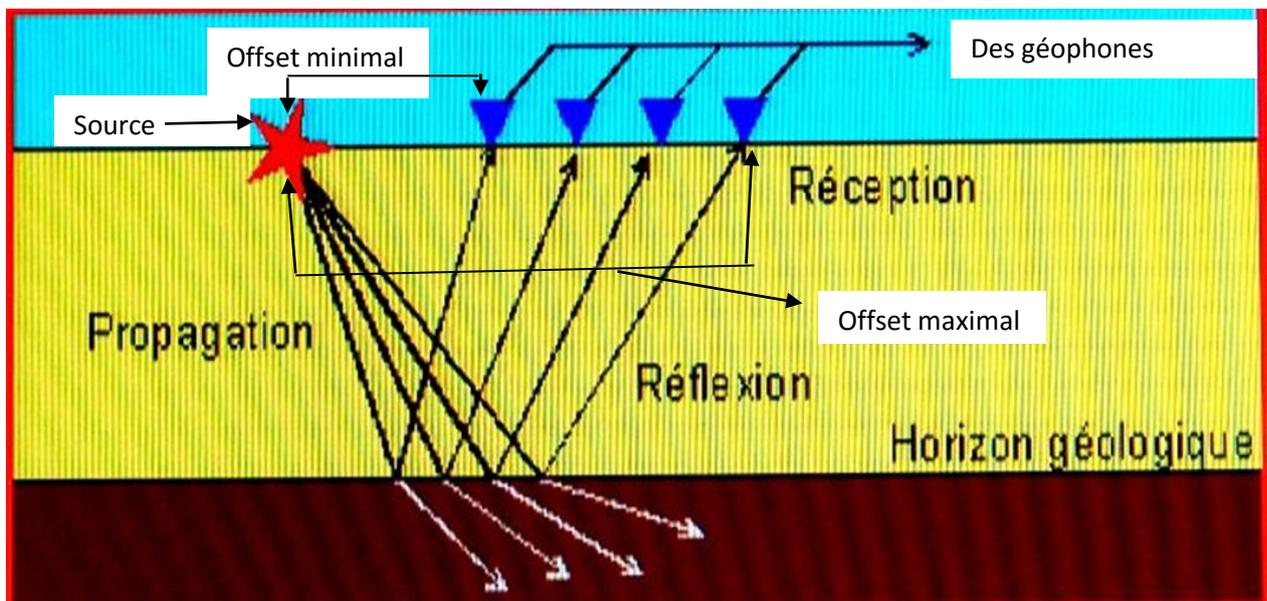


Fig III-4 schémas représente la dimension du dispositif sismographique de la méthode vibrosismique.

III.4.1.5 Géométrie du point vibré et énergie émise

Un point vibré est l'ensemble des stations sur lesquelles s'effectue l'émission du signal. Sa géométrie a un rôle similaire à celui d'une nappe de géophone. En conséquence, les vibrateurs peuvent être positionnés en ligne côte à côte, ou décalés diagonalement.

La longueur du point vibré doit être assez importante, pour fournir une atténuation adéquate des bruits organisés ayant une grande longueur d'onde (ex : ground roll).

- L'espacement entre vibrateurs doit être faible, pour atténuer le bruit ayant une petite longueur d'onde (ex : l'onde aérienne).

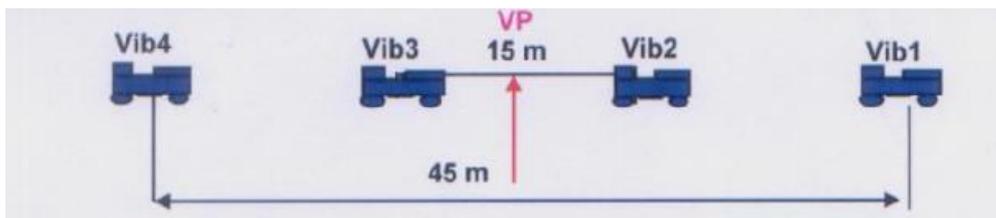


Fig III-5 Point vibré.

L'énergie émise par chaque point vibré doit être équivalente à celle émise par un point de tir en sismique conventionnelle. Elle doit être suffisante en regard du bruit aléatoire, cette énergie dépend du :

- Nombre de stations par point vibré.
- Nombre de vibrateurs et de leur puissance.
- Nombre total de sweeps.

Le test d'énergie consistera en la comparaison directe des " films sommes", obtenus avec une somme de 2, 4, 6, 8, et 16 de sweeps d'une longueur donnée. Une fois choisie, l'énergie nécessaire, par exemple 16 sweeps de 12sec, on vérifie que le même résultat peut être obtenu avec 8 sweeps de 24 sec, ou 6 sweeps de 32 sec, le nombre minimal de sweeps à conserver est égal au nombre de stations à vibrer pour détruire convenablement les bruits organisés, (Fig III-6).

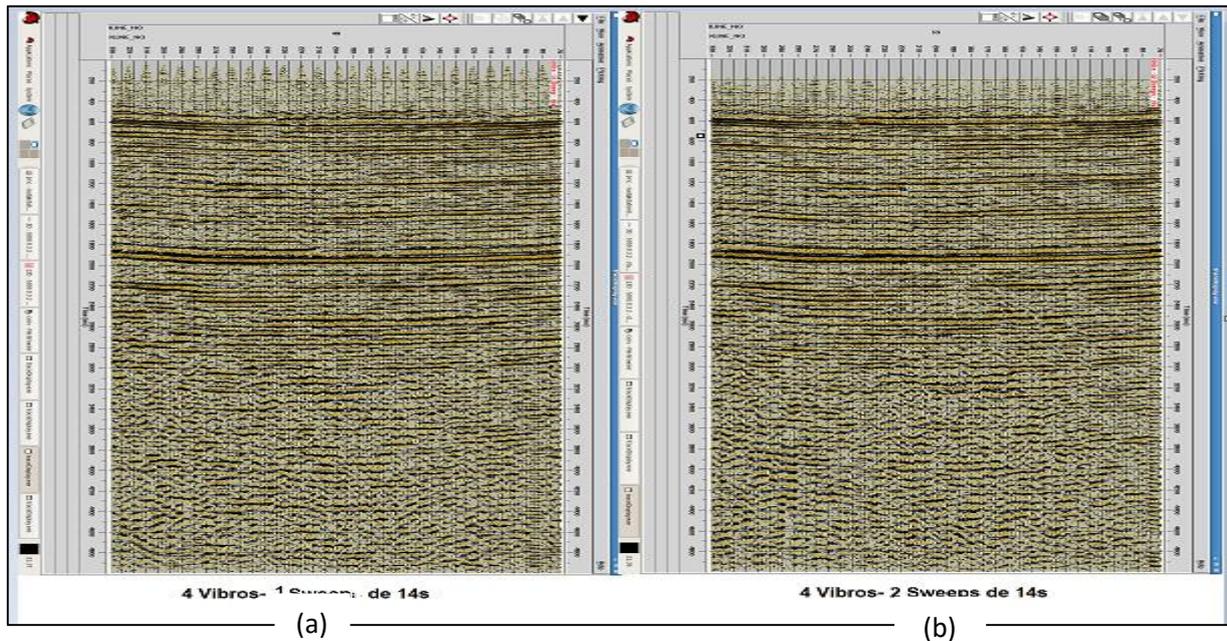


Fig III-6 test d'énergie.

(a) 4 vibrateurs avec un sweep de 14sec (b) 4 vibrateurs avec deux sweeps de 14sec

III.4.1.6 Bande de fréquence émise

La bande émise est un paramètre dépendant directement des conditions locales. Pour déterminer cette " bande passante ", une méthode est actuellement utilisée, on choisit la bande passante la plus large possible, comprise dans les limites de l'enregistrement, c'est à-dire, limitée vers les hautes fréquences par la fréquence d'anti-aliasing ($F_{\text{Nequist}} \geq F_{\text{max}}$), et vers les basses fréquences par la fréquence de coupure des géophones (ce choix est fait pendant le tir).

Une analyse du contenu fréquentiel des enregistrements sera faite sur ordinateur (Pro-max... etc.). Connaissant la position de l'objectif pétrolier en temps, on procède au filtrage par bande adjacente à partir de la fréquence minimale du sweep. On choisira celle qui permettra de pointer l'objectif avec plus de précision. Lorsqu'on fait déplacer progressivement la bande de fréquence vers les HF, on peut détruire totalement le ground-roll.

III.4.1.7 Sens du balayage

Il est constaté que pour des raisons purement mécaniques, le vibrateur génère plus d'harmoniques en commençant à vibrer par les basses fréquences (Up sweep). Donc, il est plus intéressant d'utiliser un down sweep d'une durée telle que le fantôme de corrélation dû aux harmoniques apparaisse en dehors de la zone d'intérêt.

III.4.1.8 Longueur et nombre de sweeps

En vibrosismique, on suppose que la puissance de la source est liée directement au nombre de vibrateurs opérant ensemble et à leurs puissance (" peak force"). Dans ce cas, la puissance de la source dépendra du temps mis par point vibré (longueur du sweep, plus

nombre de sweeps). Ce sont les deux variables que l'on doit ajuster pour améliorer le rapport signal sur bruit. La détermination de la longueur, et le nombre de sweeps fait partie du test d'énergie.

III.5 Instruments et équipements adaptés à la méthode

III.5.1 Source d'énergie

Le type de vibrateur utilisé comme source d'énergie, est un vibrateur hydraulique contrôlé électroniquement (**Fig III-7**).

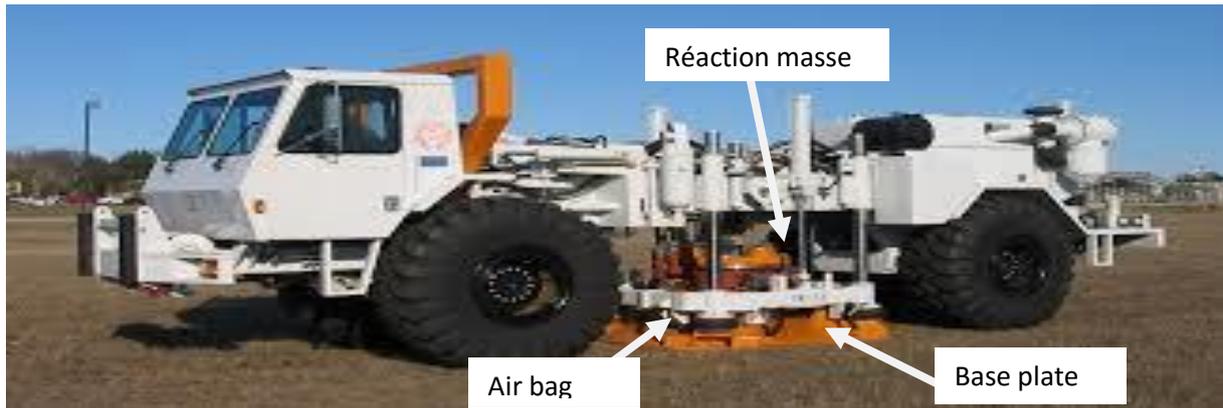


Fig III-7 camion vibreur.

III.5.1.1 Partie vibrante

Cette partie est constituée d'une masse impulsive, traversée par un piston séparant deux chambres : l'une supérieure et l'autre inférieure. Ce piston est maintenu solidaire à une plaque (base plate) reposant directement sur le sous-sol. L'ensemble du véhicule porteur appuie sur la plaque et la maintient en contact permanent avec le sol. L'énergie est fournie par une pompe hydraulique à haute pression.

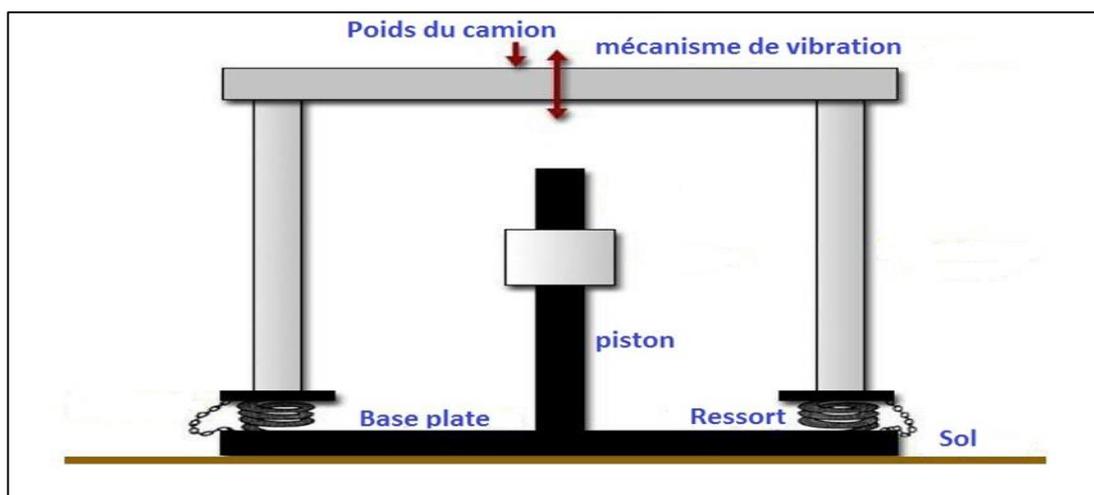


Fig III-8 partie vibrante.

III.5.1.2 Partie électronique

La partie électronique du " vibroseis" a les mêmes fonctions quel que soit le constructeur. Dans ce qui suit on va décrire le système **Sercel**, il est constitué essentiellement de deux unités :

III.5.1.2.1 Un boîtier DPG (Digital Pilot Generator)

Situé sur le camion laboratoire, le rôle de ce boîtier est de générer un signal dit sweep pilote qui est envoyé par radio à chaque vibrateur. Ce boîtier génère aussi un sweep de référence qui est transmis au corrélateur (pour servir à la corrélation des enregistrements bruts).

III.5.1.2.2 Un boîtier DSD (Digital Servo Drive)

Situé dans chaque cabine des vibrateurs. Ce boîtier sert essentiellement à décoder le signal reçu sur une radio FM du DPG et de générer d'une part un sweep de référence qui servira à la compensation de phase (le même pour chaque vibrateur) et d'autre part un autre sweep ("drive sweep") dont le rôle est d'actionner la partie vibrante.

III.5.2 Principe de fonctionnement du vibroseis

Le signal de commande est généré par le boîtier DPG au laboratoire, il sera transmis par radio FM à chaque vibrateur. Une fois que le boîtier DSD eût reçu ce signal, il démarre le générateur de sweep. Ce dernier est converti en une variation de pression d'huile par l'intermédiaire d'un relais électromécanique appelé " **Servo - valve** ". Cette huile alternativement injectée dans deux chambres supérieure et inférieure du piston provoque un mouvement de montée et de descente de la masse impulsive autour du piston. L'application du système (base plate + piston) contre le sol, entraîne la transmission de l'énergie (fournie par le mouvement de la masse impulsive) dans le sous-sol en créant des ondes sismiques. Un accéléromètre fixé sur la base plate enregistre les mouvements de celle-ci, et les synchronise avec le sweep de référence par l'intermédiaire d'un boucle de contre réaction.

III.5.3 Contrôle du vibroseis

Chaque vibrateur possède un système de contrôle incorporé dans le boîtier DSD qui a pour rôle le contrôle du bon fonctionnement de la partie vibrante, ainsi que la compensation de phase entre le sweep de référence qui présente le mouvement désiré, et le mouvement de la base plate (plaque vibrante) qui représente le mouvement réel.

Le signal de sortie du vibrateur (transmis dans le sous-sol) dépend directement de la variation de la pression d'huile, écoulee depuis le circuit hydraulique jusqu'au piston, donc celle-ci nécessite d'être contrôlée. Le contrôle d'écoulement se fait sur trois étapes :

III.5.3.1 Contrôle de base

L'huile est transmise à travers ce circuit au **servo valve**. Le **Servo valve**, qui est contrôlé électriquement, transmet à son tour cette huile (d'une façon alternative) dans les chambres supérieures et inférieures, au piston.

III.5.3.2 Rétroaction ou feedback de la masse de réaction et du Servo valve

En réalité, le Servo valve est un appareil constitué de plusieurs étages comportant des circuits compliqués d'hydraulique et d'électronique. L'huile transmise au Servo valve a besoin d'être contrôlée. Pour cela, un signal feedback est nécessaire pour déterminer le déplacement de la bobine du Servo valve, et par conséquent, contrôler la transmission de cette huile, du Servo valve au piston. La position du piston relative au cylindre devrait être aussi enregistrée pour permettre au contrôle du mouvement de la masse de réaction autour de celui-ci. Deux capteurs **LVDT** mesurent les mouvements de la masse de réaction et du Servo valve, en générant des signaux proportionnels au déplacement de celui-ci, qui seront transmis à la partie 'contrôle électrique'. L'analyse des signaux **LVDT** permet de déterminer le facteur d'amplification du signal électrique (sweep), produit par le générateur de ce dernier.

III.5.3.3 Réponse du vibreur 'Vibrator feedback'

Jusqu'ici, le mécanisme de contrôle des vibreurs assure seulement que le signal généré est transformé en une variation de pression d'huile dans le cylindre. En pratique, on veut contrôler le mouvement des vibrations créées par le vibreur plutôt que l'écoulement d'huile dans le circuit hydraulique. Par conséquent, un signal de feedback supplémentaire est nécessaire pour permettre la compensation de phase entre le sweep de référence et la réponse du vibreur (**Fig III-9**).

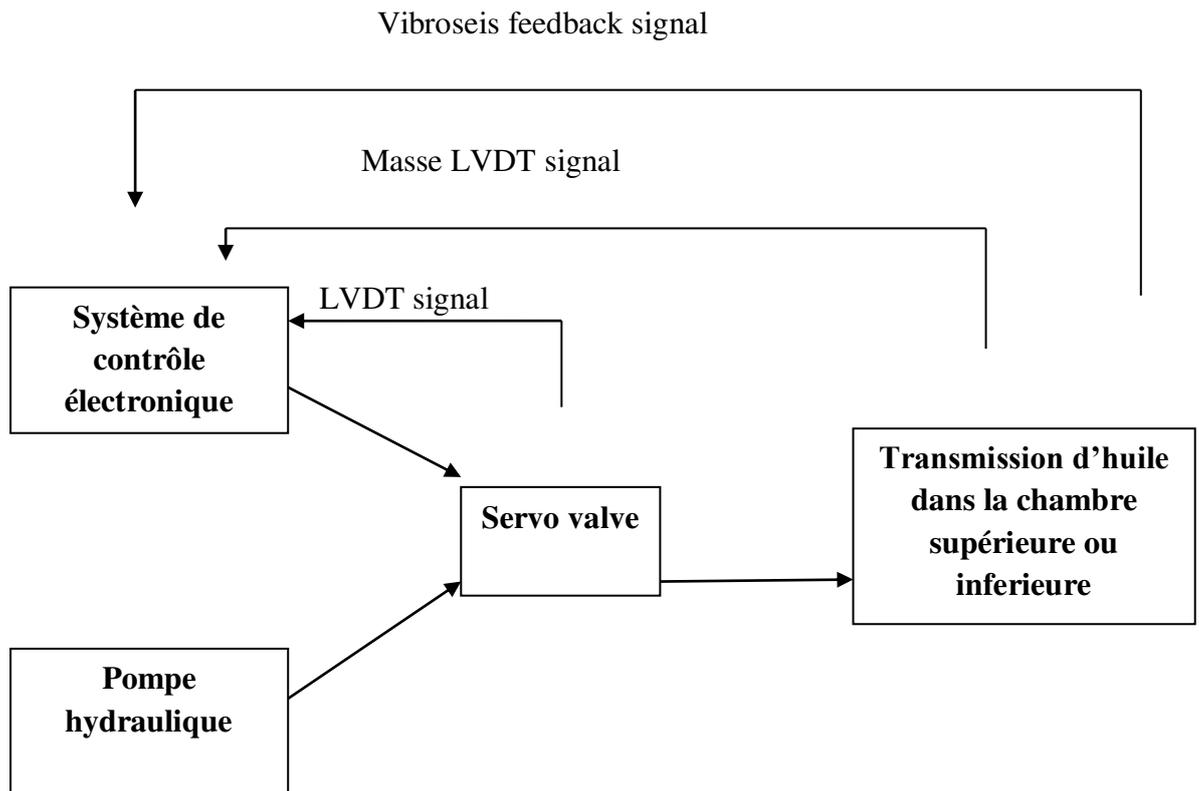


Fig III-9 schéma du principe de contrôle d'un vibrateur.

La compensation de phase dans le système du vibroseis est une opération inévitable pour deux raisons :

- ✓ Sans compensation de phase, le sweep émis dans le sous-sol n'est pas le même que le sweep de référence. Par conséquent, le procédé de corrélation ne peut donner des résultats fiables.
- ✓ Sans compensation de phase, il est impossible de synchroniser un nombre de vibrateurs entre eux.

Tout signal du vibrateur qui a été enregistré, peut être utilisé pour la compensation de phase (déplacement, vitesse ou accélération, de la base plate ou de la masse de réaction).

III.5.4 Le système d'exploitation vibroseis

Le système d'exploration "Vibroseis" est introduit pour pallier aux caractéristiques aléatoires des sources explosives conventionnelles. Le signal d'émission, de paramètres intrinsèques choisis (forme, durée,..) consiste en un chapelet d'impulsions émises dans le sous-sol pendant une durée variant de 7sec à 10sec.

L'un des avantages recherchés à travers le choix de ce type de signal est la possibilité d'intervenir sur l'énergie du signal émise puisqu'elle est elle-même proportionnelle à la durée d'émission.

Après réflexions au niveau de chaque interface géologique, il se produit une dégradation du signal émis en termes d'amplitude, de contenu fréquentiel,...

Le signal enregistré en surface renferme l'ensemble des signaux réfléchis qui se distinguent les uns des autres par leurs amplitudes et leurs décalages temporels, d'où la difficulté de distinguer a priori une réflexion d'une interface quelconque.

Dans le traitement des enregistrements en vibrosismique, le choix du signal dépend essentiellement de ses paramètres. Le signal vibrosismique enregistré doit assurer après corrélation :

- ✓ Une bonne résolution matérialisée par des pics étroits localisés dans une gamme de déplacements donnée
- ✓ Réduire les phénomènes indésirables pouvant masquer les réflexions
- ✓ Pouvoir décaler les réflexions issues de structures plus au moins profondes sans pouvoir les assimiler à du bruit

Les signaux d'émission satisfaisant ces critères sont ceux possédant les caractéristiques suivantes :

- ✓ Signaux à large bande ex : $B = [10 \ 60]$
- ✓ Ils ne sont pas le siège de variations brusques en amplitudes
- ✓ La loi de fréquence instantanée doit être une fonction monotone
- ✓ Les valeurs de la fréquence instantanée ne doivent pas se répéter.
- ✓ Le spectre d'amplitude doit dans son ensemble présenter un caractère uniforme.

III.5.5 Tests de similarité

Avant de commencer l'exploitation par vibroseis, il faut s'assurer que les vibrateurs émettent les mêmes phases pour tous les signaux, on doit donc faire un contrôle de similarité. Les contrôles seront effectués au début de journée, ou au cours du travail si l'on a des doutes sur le bon fonctionnement des vibrateurs.

Deux types de tests de similarité sont pratiquement applicables :

- Similarité par câble ou Wire line.
- Similarité par radio.

III.5.5.1 Similarité par câble ou Wire line

C'est la méthode la plus ancienne. Elle consiste en une comparaison entre le sweep de référence et les signaux délivrés par l'accéléromètre de chaque vibrateur. Cette méthode nécessite la connexion des sorties des accéléromètres de tous les vibrateurs à une même boîte de jonction, pour être acheminé au laboratoire d'enregistrement, par un câble « Jumper » comme étant des traces sismiques. Le test est effectué en mettant en émission tous les vibrateurs ensemble. Celui-ci est enregistré sur bande magnétique pour être traité sur ordinateur (Promax).

En évaluant les résultats donnés par le test, on doit vérifier que :

- Les vibrateurs sont en phase entre eux

- La réponse de chaque vibreur est en phase avec le sweep de référence
- L'autocorrélation du sweep de référence et sa cross-corrélation avec la réponse de chaque vibreur est en phase
- Le spectre d'amplitude de la réponse du vibreur représente bien la bande de fréquence émise.

Remarque :

Actuellement, la compensation de phase se fait par le signal « Ground Force » car il tient compte à la fois de la phase et l'amplitude du signal de sortie.

III.5.5.2 Similarité par radio

C'est la méthode la plus récente. Elle permet un contrôle continu des vibrateurs sans avoir besoin de leur liaison par câble au laboratoire. L'interprétation des résultats se fait juste après la réalisation du test. On obtient deux types de résultats : numérique (informations codées sur la qualité du signal après l'émission de chaque sweep : PSS) et graphique (analyse du signal reçu).

- ✓ Le Post Sweep Service (PSS) est un contrôle automatique instantané de tous les vibrateurs mis en émission. A la fin de l'émission de chaque sweep, les vibrateurs envoient successivement des infos codés sur l'état du GF (ou d'un autre signal désiré) au laboratoire (à le DPG) où elles seront décodées. Ces informations porteront essentiellement sur : Pourcentage du peak force maximal et minimal appliqué, durant l'émission du sweep.
- ✓ La représentation graphique se fait sur micro-ordinateur au laboratoire (connecté avec le DPG). Dans cette méthode, chaque vibreur est contrôlé individuellement. Ce test nous fournit des informations sur les paramètres suivants :
 - Sweep de référence
 - Réponse du vibreur
 - Déphasage entre le sweep de référence et la réponse du vibreur
 - Spectre d'amplitude du sweep de référence et de la réponse du vibreur
 - L'autocorrélation du sweep de référence et sa cross-corrélation avec la réponse du vibreur
 - La valeur du Ground Force
 - Le pourcentage des distorsions harmoniques.

Les Figs (III-10), (III-11) et (III-12) montrent la différence de phase entre les GFs de trois vibrateurs différents. (Désigné comme réponses des vibrateurs ou bien le signal émis réellement), et le sweep de référence ayant pour bande de fréquence 10-80Hz et une longueur

de 16sec. Le déphasage produit est acceptable pour les trois vibrateurs, il est de l'ordre de 1 degré pour le premier vibrateur, 2 degré pour le deuxième et 3 degré pour le troisième, au début de l'émission (dû aux basses fréquences) et ça réduit vers sa fin où un bon couplage de la base plate avec le sol est prévu.

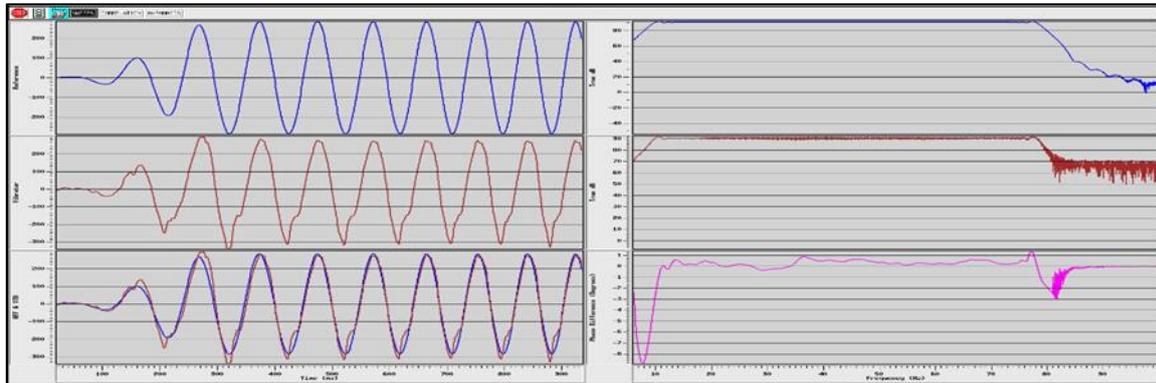


Fig III-10 Différence entre le GF du premier vibrateur et le signal pilote.

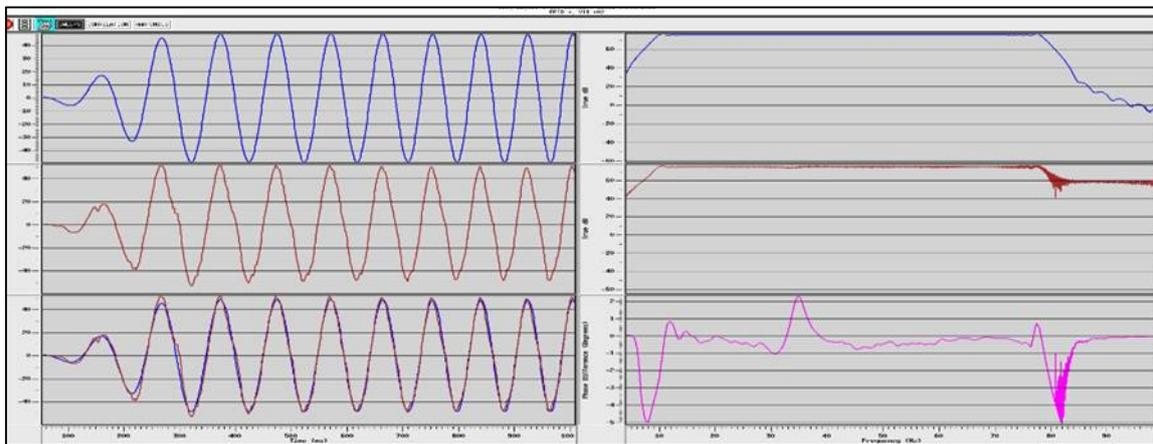


Fig III-11 Différence entre le GF du deuxième vibrateur et le signal pilote.

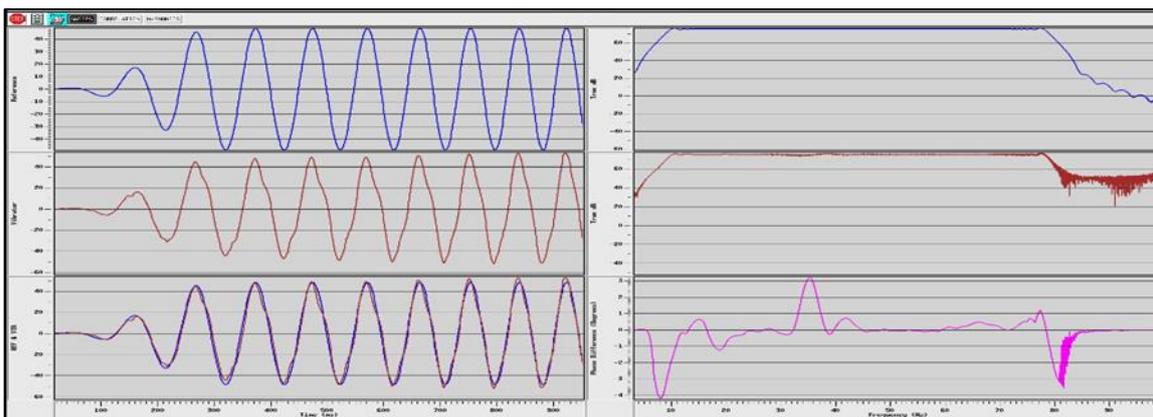


Fig III-12 Différence entre le GF du troisième vibrateur et le signal pilote.

III.5.6 le signal vibrosismique ” le sweep “

Un sweep est un signal source issu d'un phénomène vibratoire dans le sol pour provoquer des vibrations, il est constitué d'une gamme de fréquences déterminées étalée dans le temps, généré à partir d'un générateur de sweep selon une configuration déterminée à l'avance.

Expression Générale d'un sweep :

$$S(t)=a(t).\sin(\Phi_i(t)+\Phi) \quad (\text{III.3})$$

Avec : $a(t)$: loi de modulation d'amplitude du sweep.

$\Phi_i(t)$: phase instantanée du sweep.

Φ : phase initiale du sweep

Un autre paramètre intervient au sweep et aussi estimé, il s'agit de la fréquence instantanée $f_i(t)$ définie comme suit :

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = a + b t \quad (\text{III.4})$$

Il s'agit donc d'une loi de modulation fréquentielle linéaire croissante ou décroissante suivant le signal de la pente b . La valeur de la fréquence instantanée à l'instant $t = 0$ représente la fréquence initiale f_0 : $f_i(t = 0) = f_0 = a$

Si le signal émis (sweep) est pris sur une durée T , la loi de fréquence instantanée sera elle-même définie sur une bande fréquentielle B .

L'équation du spectre $s(t)$ s'écrit alors :

$$S(t)=a(t).\sin.[2\pi(f_0 \pm \frac{B}{2T}t)t] \quad (\text{III.5})$$

$$\text{Avec : } \frac{-T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}$$

T : la durée du sweep

$B = f_2 - f_1$: la bande fréquentielle occupée par le signal

Le signe (\pm) désigne le cas d'un up-sweep ou down-sweep.

III.5.6.1 Calcul du spectre d'amplitude d'un sweep

Le calcul se fera en considérant les parties réelles et imaginaires du signal complexe :

$$E1(t) = \prod \left(\frac{t}{T}\right) e^{2\pi j(f_0 t + \frac{B}{2T} t^2)} \quad (\text{III.6})$$

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} 1 \quad \text{si } -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ \end{array} \right.$$

$\Pi(t) = 0$ ailleurs

III.5.6.2 Analyse spectrale du sweep

Pour des raisons de simplicité des calculs. Nous considérons comme expression de sweep l'équation suivante :

$$s(t) = \begin{cases} \text{Cos}[2\pi (f_0t + \frac{B}{2T}t^2)] & \text{si } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad \text{(III.7)}$$

Les paramètres B et T désignent respectivement la bande fréquentielle et la durée du sweep. Dans le domaine fréquentielle, le domaine d'étude du signal se fera dans l'intervalle $[f_0, f_0+B]$ la fréquence instantanée est d'expression :

$$f_i(t) = f_0 + \alpha t \quad \text{(III.8)}$$

Avec : $\alpha = \frac{B}{T}$

III.5.7 Types de sweeps

La résolution verticale est un objectif majeur de la géophysique, une telle résolution nécessite une amélioration des hautes fréquences dans le signal émis avec un rapport signal sur bruit suffisant. Cependant l'atténuation du sous-sol agit comme un filtre coupe haut.

La méthode du vibroseis a traditionnellement employé un signal sweep ayant des fréquences variant linéairement en fonction du temps. Quoiqu'il produise un spectre d'amplitude idéal, le signal enregistré perd toutes ses hautes fréquences durant sa propagation à cause de l'atténuation du sous-sol, c'est le sweep linéaire (**Fig III-13**).

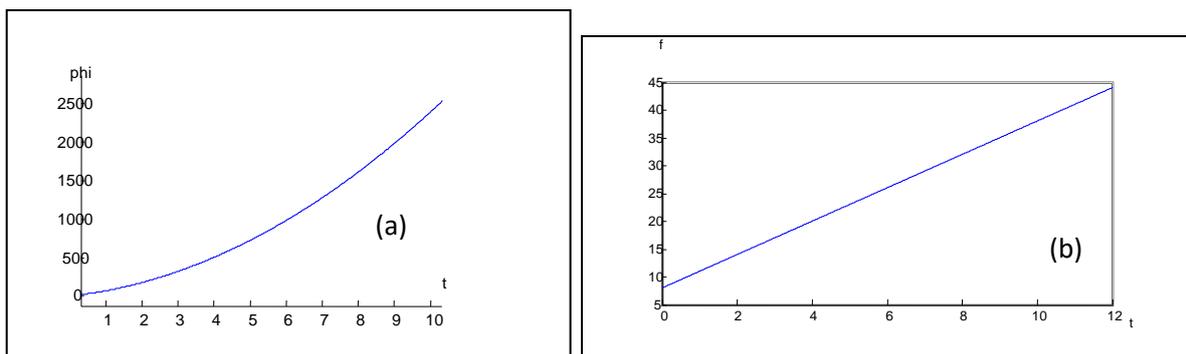


Fig III-13 (a) phase instantanée d'un sweep linéaire, **(b)** fréquence instantanée d'un sweep linéaire

Alors que, les fréquences instantanées du sweep sont générées d'une façon non linéaire avec le temps, on peut alors générer un signal ayant un spectre d'amplitude inverse à l'effet d'atténuation. Une telle opération est effectuée en utilisant un **sweep non-linéaire** ayant ses

fréquences variant selon une fonction spécifique choisie en fonction des fréquences qu'on voudrait favoriser, on distingue essentiellement :

III.5.7.1 Les sweeps logarithmiques

Favorisent les hautes fréquences, le sweep met la majeure partie de sa durée en transmettant les HF. Il a pour courbe de variation des fréquences la fonction suivante :

$$f_i(t) = f_0 + \frac{Bt^{\frac{1}{\alpha}}}{T^{\frac{1}{\alpha}}} \quad \text{avec } \alpha > 1. \quad (\text{III.9})$$

Avec B : la bande fréquentielle du sweep

T : la durée du sweep.

α : coefficient > 1

III.5.7.2 Les sweeps exponentiels

Contrairement aux précédents, ce type favorise les basses fréquences, sa fonction de variation de fréquence est :

$$f_i(t) = f_0 + \frac{Bt^\alpha}{T^\alpha} \quad \text{avec } \alpha < 1. \quad (\text{III.10})$$

Pour un sweep linéaire de bande fréquentielle [14 – 56 Hz], le temps mis pour transmettre l'énergie dans le sous-sol est le même, que pour la bande [14 – 18 Hz] (basses fréquences), ou pour celle de 52 – 56 Hz (hautes fréquences). Puisque les Hautes fréquences sont fortement atténuées durant le transit dans le sous-sol, nous avons alors besoin de les renforcer dans le but d'obtenir un bon rapport signal sur bruit. Nous pouvons atteindre notre but en utilisant un sweep linéaire en faisant augmenter sa longueur. Or, ceci entraîne une augmentation du prix de revient de l'étude. Avec un non-linéaire, on a la possibilité de renforcer les hautes fréquences du sweep émis tout simplement en les favorisant à la transmission par rapport aux basses fréquences sans avoir besoin d'augmenter la longueur du sweep.

Il est donc nécessaire d'améliorer le rapport signal sur bruit pour pouvoir pointer les réflexions très profondes. La dynamique de la chaîne d'enregistrement est limitée, et peut être incapable d'enregistrer des réflexions HF d'amplitude très faible, surtout en présence de bruit BF. Avec un sweep linéaire, ni sa longueur ni le nombre de sweeps par point vibré (VP) ne peuvent compenser l'incapacité de la dynamique d'enregistrement, mais avec un sweep non-linéaire on peut augmenter l'amplitude des composantes fréquentielles HF vis-à-vis des bruits BF.

III.5.8 Paramètres descriptifs d'un sweep

Les paramètres descriptifs du sweep sont :

- Sens du balayage
- Sa durée (longueur) : 7 à 10 sec
- Sa bande fréquentielle B définie par les limites fréquentielles f_1 et f_2
- La position de la bande fréquentielle B dans l'échelle des fréquences liées à $f_1 + f_2$
- La loi d'émission ou de modulation exprimée par la loi de fréquence instantanée $f_i(t)$
- La loi d'amplitude instantanée
- La fréquence centrale $f_c = \frac{f_1 + f_2}{2}$
- Le rapport de fréquence $\frac{f_2}{f_1}$
- La dispersion $D = BT$

III.5.8.1 Sens du balayage

Un balayage fréquentiel ne peut avoir que deux sens :

- ✓ Un balayage vers les hautes fréquences ou up-sweep (**Fig III-14**).
- ✓ Un balayage vers les basses fréquences ou down-sweep. (**Fig III-15**)

Supposant un sweep de longueur T sec, de bande de fréquence $B = [f_0 - f_m]$ si ces fréquences croissent de f_0 à f_m ($f_0 < f_m$) on parle d'un Up-sweep qui aura pour une expression :

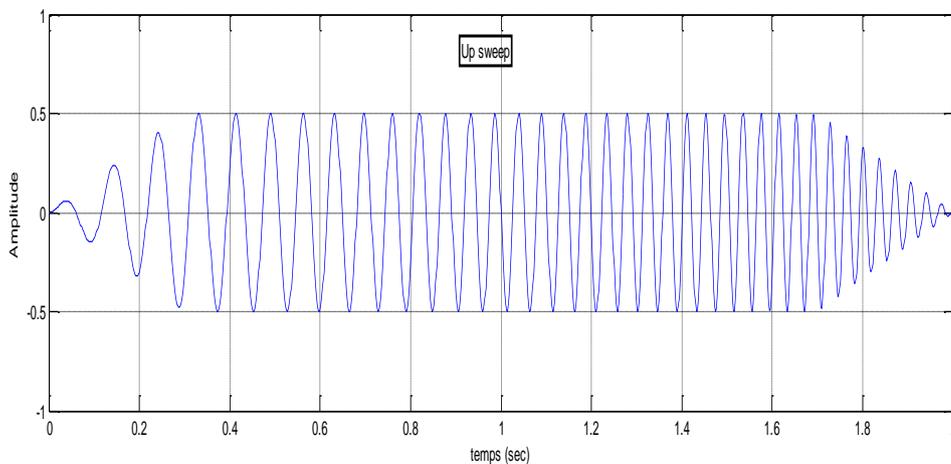
$$S_1(t) = a_1(t) \cdot \sin. \left[2\pi \left(f_0 + \frac{B}{2T} t \right) t \right] \quad (\text{III.11})$$


Fig III-14 Un modèle d'un Up-sweep.

Si ces fréquences décroissent de f_m à f_0 on parle d'un Down-sweep qui aura une expression de :

$$S_2(t) = a_1(t) \cdot \sin\left[2\pi\left(f_0 + \frac{B}{2T}t\right)t\right] \quad (\text{III.12})$$

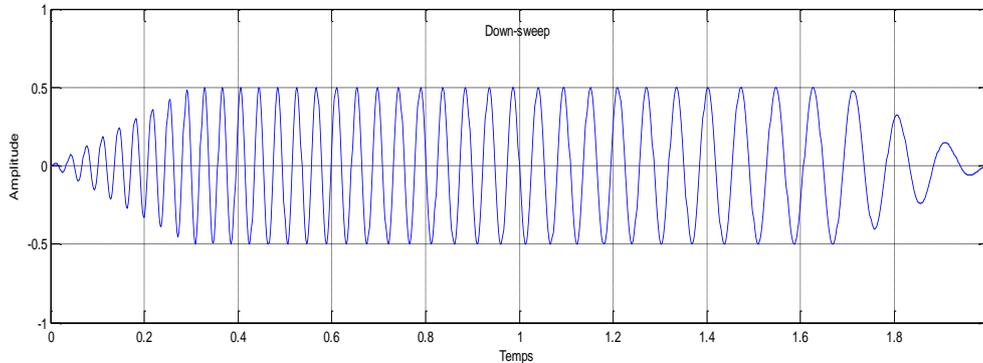


Fig III-15 Un modèle d'un Down-sweep.

III.5.8.2 Longueur (sa durée)

Elle est de plusieurs secondes ex : $[0\ 2]$ sec. Dans un enregistrement vibroseis, la durée de la trace initiale terrain est constituée de deux temps :

- la longueur du sweep.
- le temps d'écoute qui est équivalent à la durée d'enregistrement en méthode dynamite.

Dans la méthode vibrosismique, le principe est d'utiliser un signal pilote de longue durée. En général, on utilise une longueur de 6 à 9 Hz pour les problèmes courants et jusqu'à 12 ou 16 Hz pour des zones difficiles de mauvais rapport S/B.

Le rapport signal sur bruit dans la vibrosismique dépend de la longueur du sweep utilisé :

$$S/B = 20 \log_{10} N \cdot G (n \cdot C \cdot B \cdot T)^{0.5} \quad (\text{III.13})$$

Tel que : N : Nombre de vibrateurs.

G : Peak Force appliqué.

n : Nombre de sweeps par VP.

C : Couverture multiple.

B : Bande de fréquences.

T : Longueur du sweep en temps.

La (**Fig III-16**) représente deux sweeps de longueurs différentes (bleue : 8 sec ; rouge : 12sec) de même bande fréquentielle, on voit clairement que le spectre en terme d'amplitude est plus long et plus riche en énergie que celui avec une longueur inférieure.

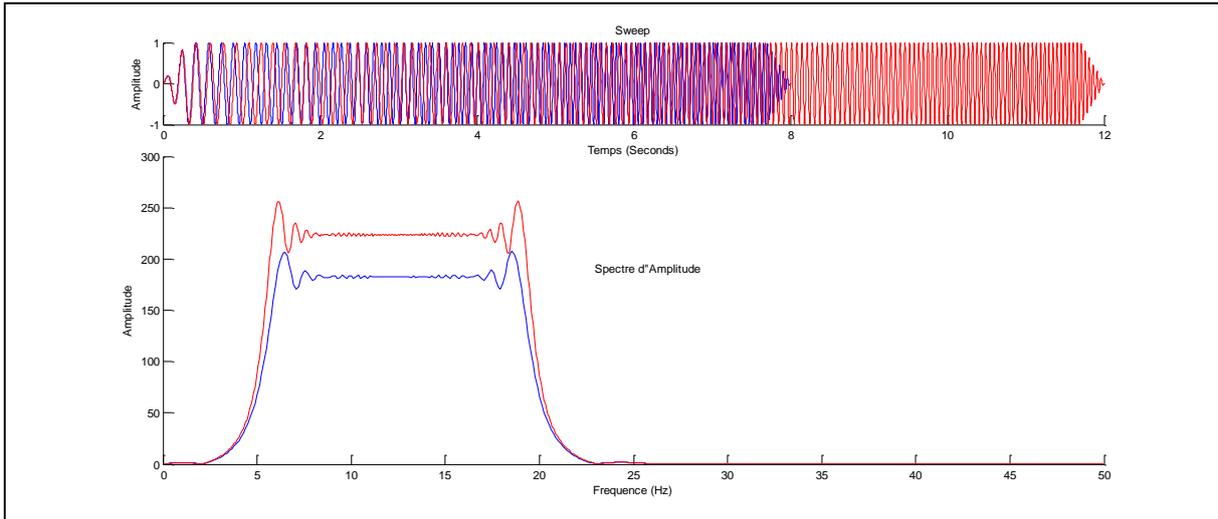


Fig III-16 effet de la longueur du sweep, en haut : deux sweep de différentes longueurs, en bas : les spectres d'amplitudes des deux sweeps.

III.5.8.3 Bande fréquentielle

Elle représente la bande de fréquences contenues dans le sweep et injectées dans le sol, elle est comprise entre deux fréquences f_0 : fréquence initiale et f_m : fréquence finale.

Pour un sweep linéaire de $f_0 \Rightarrow f_m$, la bande de fréquences est $B = [f_0 - f_m]$. (**Fig III-17**)

Pour un sweep non linéaire, la bande fréquentielle est exprimée en octave :

$$\log f_0 \Rightarrow \log f_m \quad B = [\log f_0 - \log f_m] / \log 2.$$

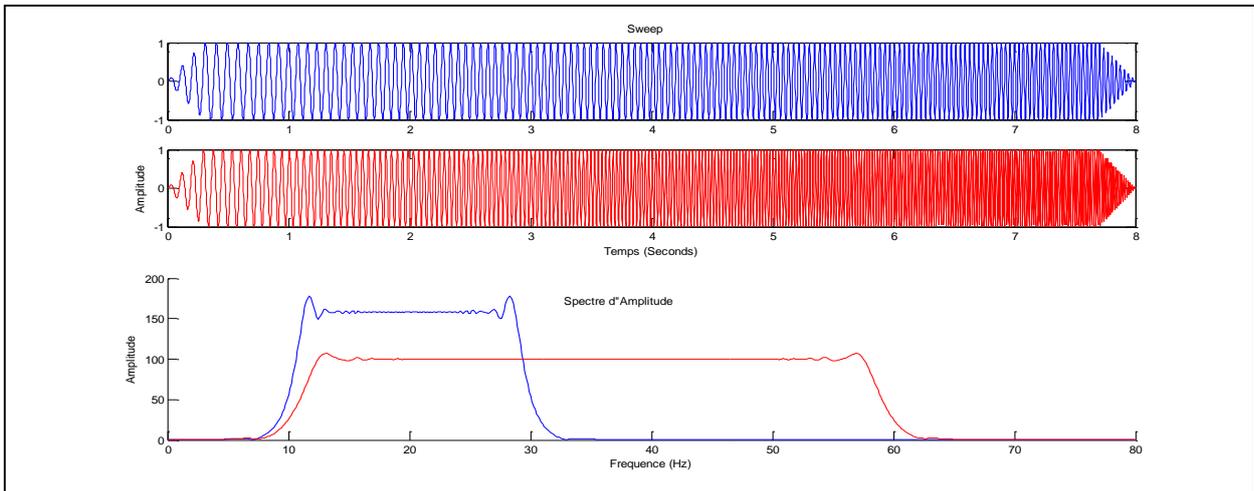


Fig III-17 effet de la bande fréquentielle sur le spectre d'amplitude sur un sweep.

La (**Fig III-17**) présente deux sweeps de même longueur $L = 8\text{sec}$ et de bandes fréquentielles différentes tel que $B_{\text{bleue}} = [10-30]$ et $B_{\text{rouge}} = [10-60]$, on remarque que le spectre d'amplitude du signal de plus large bande fréquentielle est plus large que celui de la bande moins large.

III.5.8.4 Loi de variation des fréquences

Cette loi enseigne sur le type de sweep (up-sweep ; down-sweep ; linéaire sweep ; logarithmique : exponentielle...).

III.5.8.5 Loi de variation des amplitudes (enveloppe)

En applique la même loi pour tous les sweeps.

IV.1 Introduction

Il existe plusieurs méthodes de travail qui favorise les hautes productivités dans l'acquisition sismique, ceci conduit à la mise au point de diverses techniques telles que la mise en œuvre de plusieurs groupes de vibrateurs, fonctionnant soit en mode simultané ou en mode flip flop parmi lesquelles celle étudiée dans ce mémoire à savoir la méthode slip sweep qui a été mis au point par **Petroleum Development Oman (PDO)**.

Cette dernière est caractérisé par un paramètre très important qui est le temps entre deux sweep consécutifs, appelé slip-time et qui peut contrôler la productivité et l'augmenté en terme économique dans les zones ou les obstacles ne ralentissent pas les déplacements des groupes de vibrateurs.

Par ailleurs, ce paramètre présent des contraintes qui dégradent la qualité des enregistrements sismiques c'est ce qu'on appelle les harmoniques. Pour cela, il y a plusieurs techniques élaborées pour réduire ce type de bruits, dont celle mise au point à l'ENAGEO et appelée ENAGEO-ADIVANCE.

IV.2 méthodes de hautes productivités dans l'acquisition vibrosismique

De nombreuses méthodes ont été élaborées ces dernières années pour améliorer l'acquisition vibrosismique et augmenter la productivité, ces méthodes sont groupées selon trois espèces : tirs simultanés (Simultaneous Shooting), sweep en cascade (Cascade sweep) et le Slip sweep. On va essayer de resserrer les caractéristiques primordiales de chaque méthode.

IV.2.1 Independent Simultaneous Sweeping (ISS)

Une technique récente d'acquisition appelée ISS a été mise en œuvre lors de l'engagement SEG 2008 à Las Vegas (Howe, Allen, Jack et al SEG 2008), elle a été testée en 2006 et appliqué depuis 2008 en Algérie et en Lybie.

Dans cette méthode, tous les vibrateurs vibrent indépendamment en effectuant des enregistrements continuellement, en fonction de la capacité du laboratoire (**Fig IV-1**).

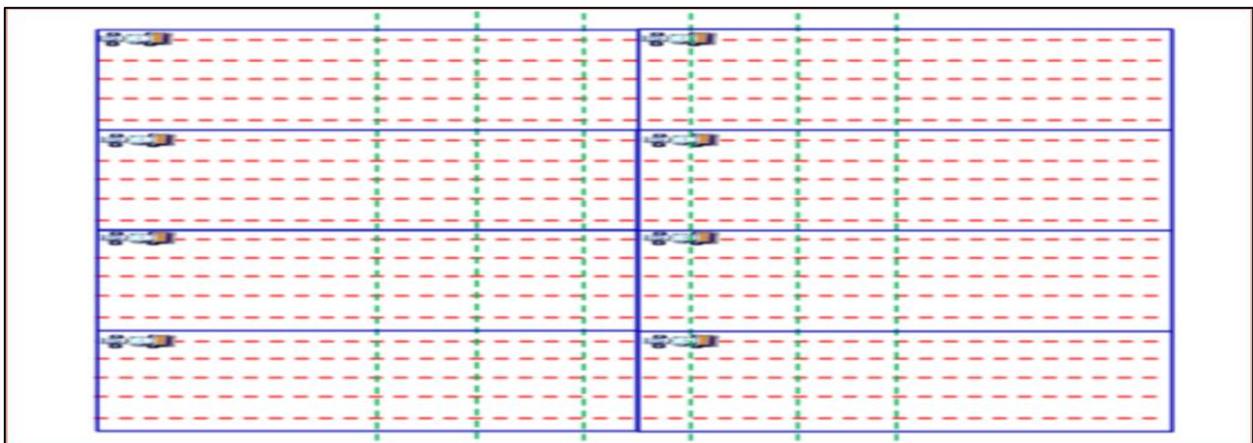


Fig IV-1 Représentation de mode d'envoi de la méthode d'acquisition vibrosismique (ISS) avec 8 vibrateurs fonctionnent indépendamment.

Le principe est que toute interférence entre sources est traitée comme «bruit». Plusieurs méthodes d'élimination de bruits sont appliquées pendant l'étape de traitement, en se basant sur le temps GPS pour séparer les enregistrements et les réarranger car on observe un chevauchement des harmoniques et même des chevauchements entre les sweeps fondamentales, (Fig IV-2 et Fig IV-3).

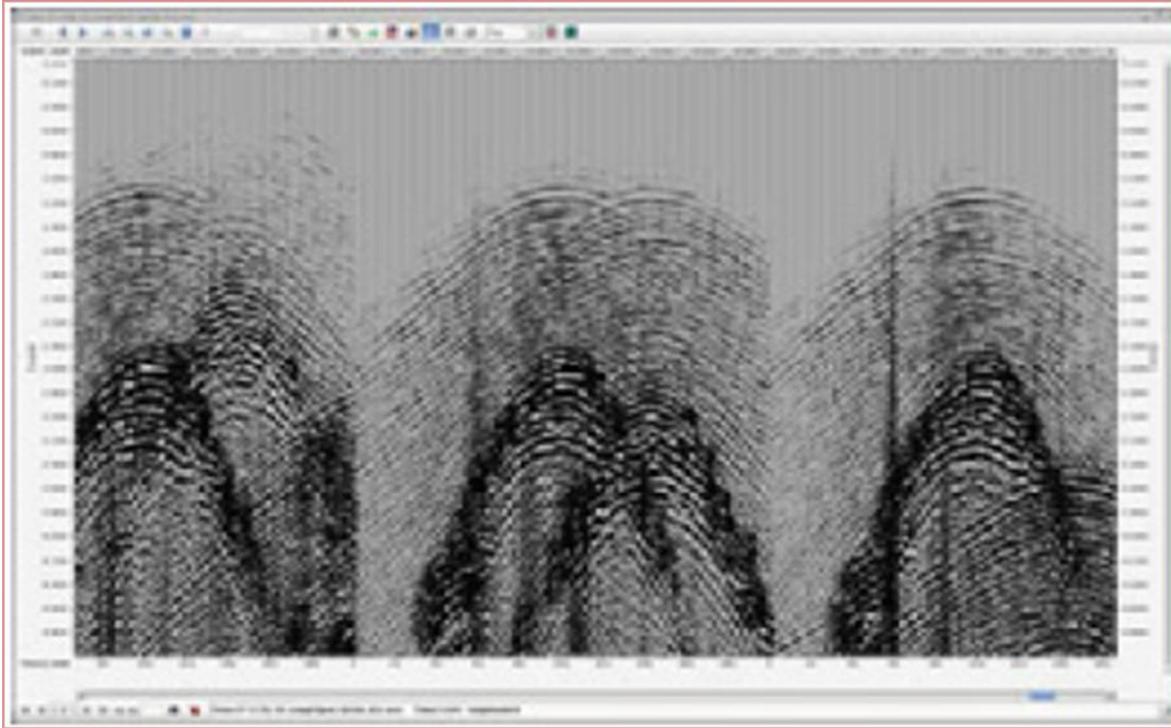


Fig IV-2 des enregistrements terrain corrélé bruts (avant filtrage), (Document CGG).

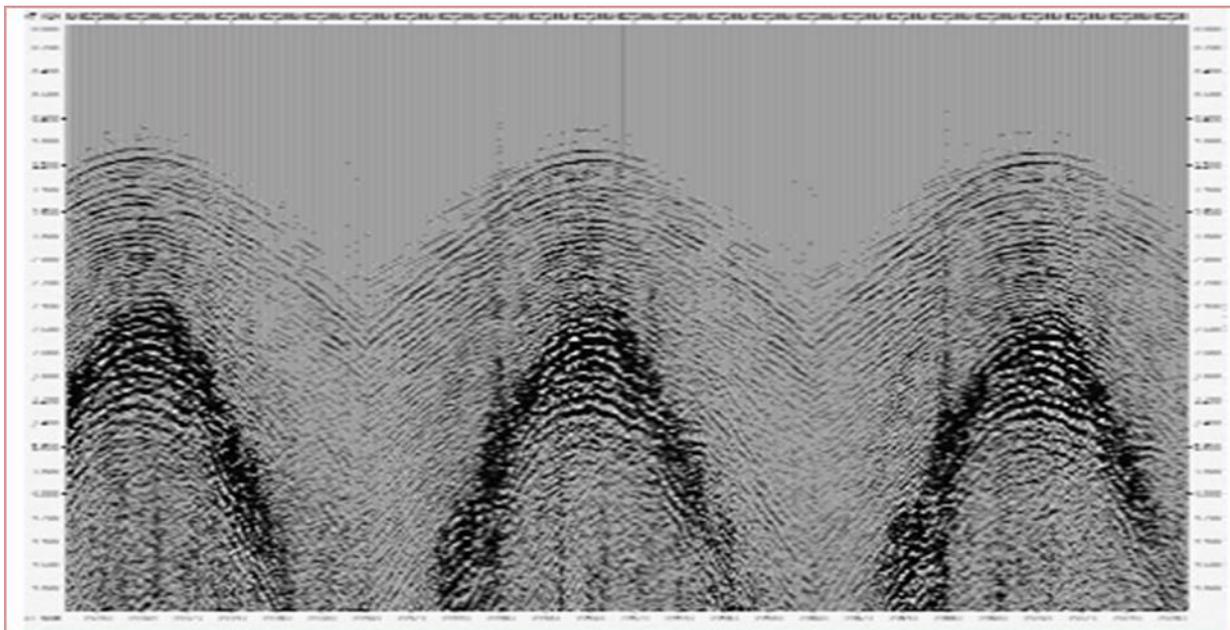


Fig IV-3 Des enregistrements terrain corrélés après filtrage (Document CGG).

IV.2.2 Distance Separated Simultaneous Sweeping (DS³)

Parmi les nouvelles méthodes développées par British Petroleum BP, à Bouska en 2008 la technique DS³. Dans cette méthode, tous les vibrateurs vibrent indépendamment en effectuant des enregistrements discrets en choisissant une distance qui les séparent en fonction de l'objectif recherché pour éviter leurs interférences, (**Fig IV-4**).

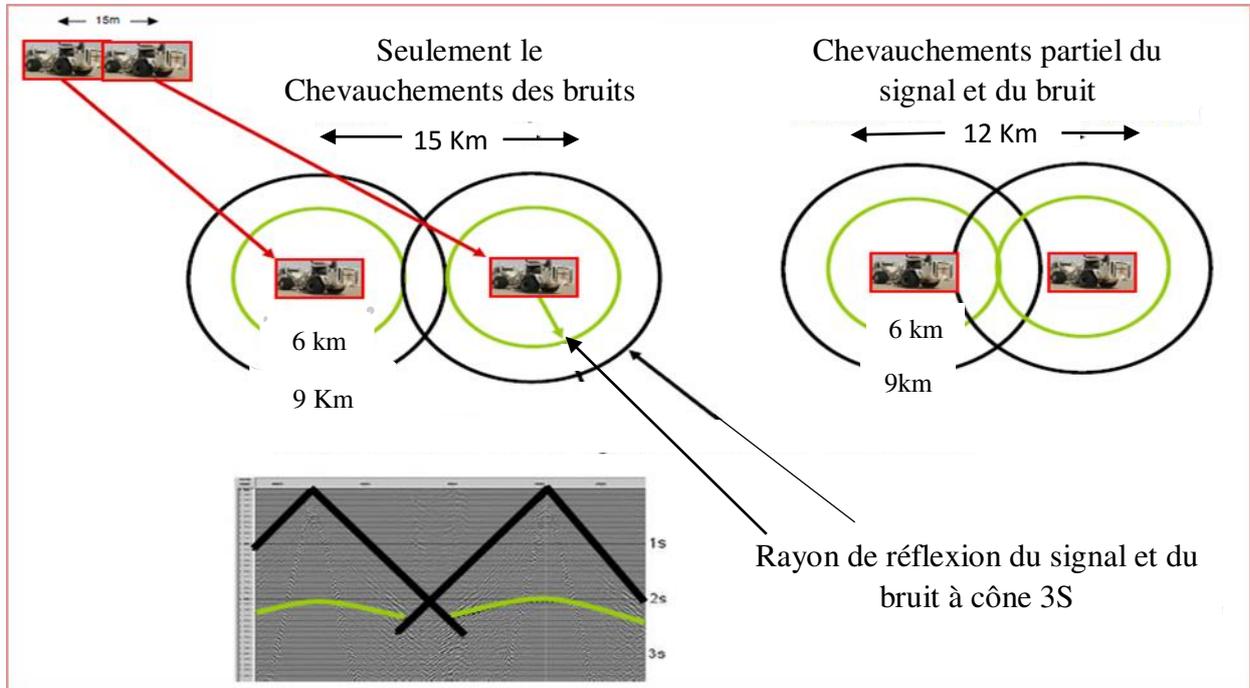


Fig IV-4 Représente le mode d'envoi de la méthode d'acquisition vibrosismique DS³, (Geophysical prospecting, Jack Bouska).

Par conséquent elle ne demande aucun traitement elle nécessite juste la séparation des enregistrements ce qui est relativement facile. Cette dernière donne une bonne couverture et une distribution azimutale, (**Fig IV-5**).

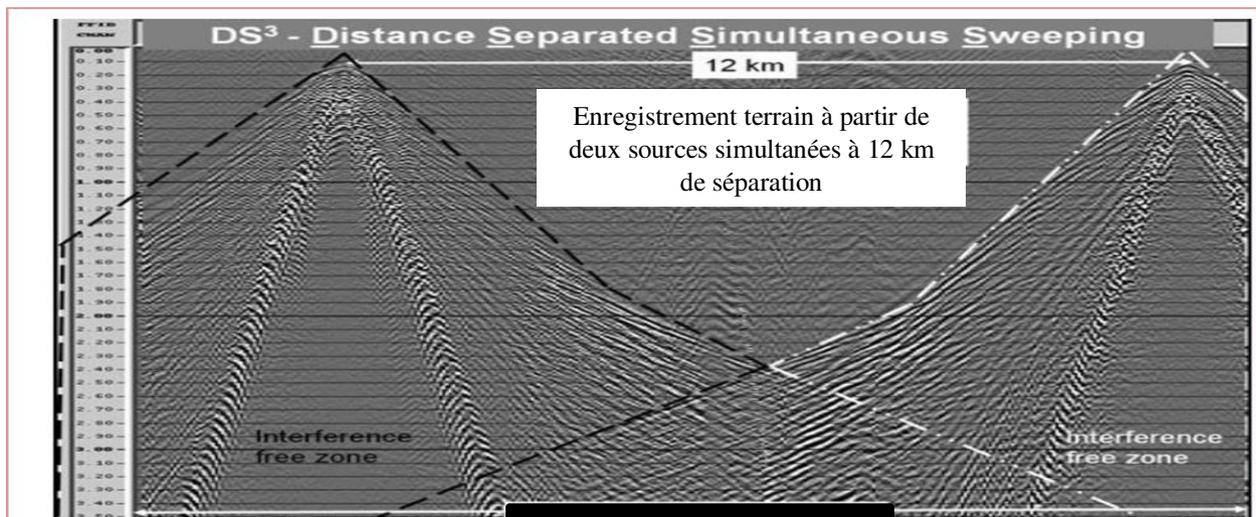


Fig IV-5 Représente des enregistrements terrain corrélé filtré en mode DS³, (Document CGG).

IV.2.3 Sweeps en cascade (Cascade sweep)

C'est une méthode introduite par (Anderson1995, Moreing et Al. 2001) durant les derniers dix ans dans le but d'augmenter la productivité lors de l'acquisition vibrosismique. Elle consiste à réduire le temps d'acquisition par l'élimination du temps d'écoute et le temps de la réinitialisation du système en utilisant plusieurs sweeps concaténés, (**Fig IV-6**).

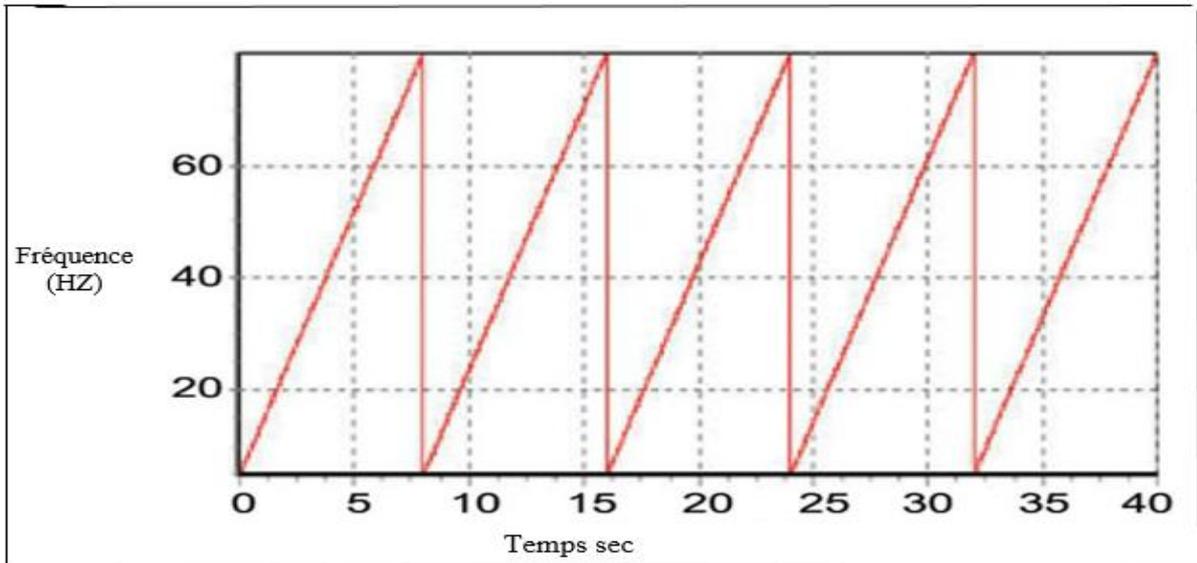


Fig IV-6 schémas représente cinq sweeps concaténés.

Elle permet d'atténuer les harmoniques par l'utilisation des segments de sweep de différentes phases et ajouter un « extra segment » de sweep durant le processus de corrélation. Le nombre de segments de sweeps est en fonction du rapport S/B, (**Fig IV-7**).

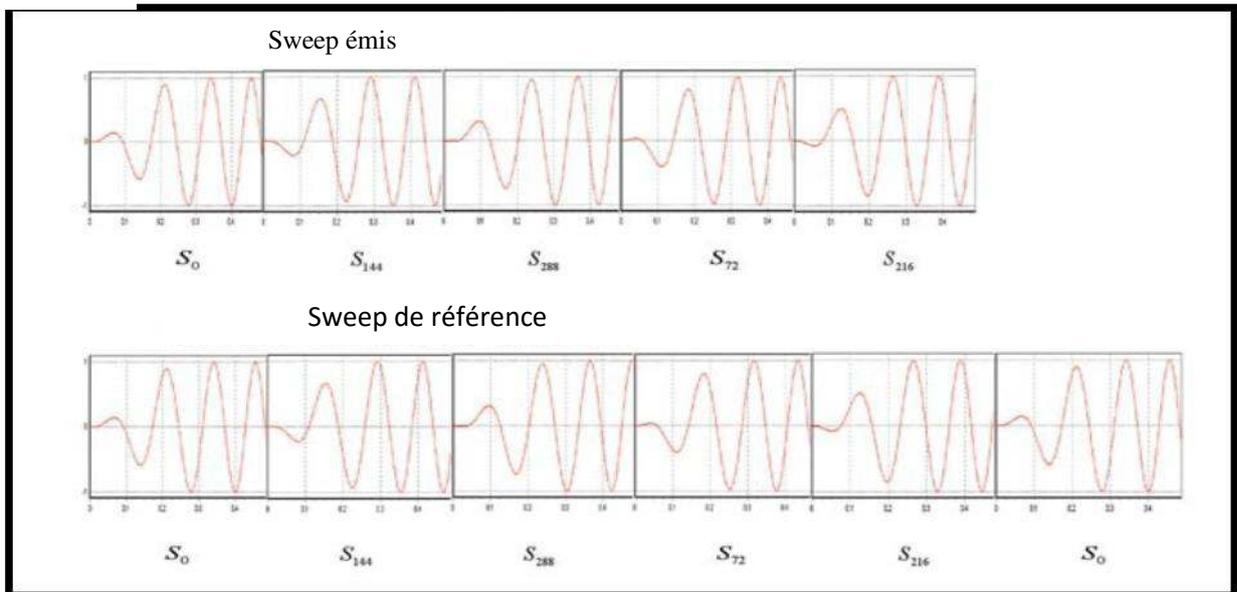


Fig IV-7 schémas représente le sweep émis et le sweep de référence (pour la corrélation).

IV.2.4 Slip sweep

Dans cette technique mise en œuvre par Rozemund en 1996 et testée par PDO (Petroleum Development Oman), plusieurs groupes de vibreur sont utilisés. Le but était de parvenir à une augmentation significative de l'efficacité d'acquisition couplé avec une qualité d'image supérieure.

Différents tests ont prouvé la faisabilité opérationnelle de la technique slip-sweep dans les opérations vibroseis.

IV.2.4.1 Principe de la méthode Slip-sweep

Cette méthode consiste à déclencher le sweep d'un groupe de vibreurs sans attendre la fin du sweep du groupe précédent. Le temps entre deux sweep successifs est appelé « Slip-time ». La durée du cycle de vibrations peut être considérablement réduite, impliquant une amélioration de la productivité avec le nombre de groupe de vibreurs, ainsi que le move-up dépendant de la nature du terrain et de son accessibilité. Plus grand est le move-up plus grand est le cycle de vibration, plus la productivité est petite, (Fig IV-8).

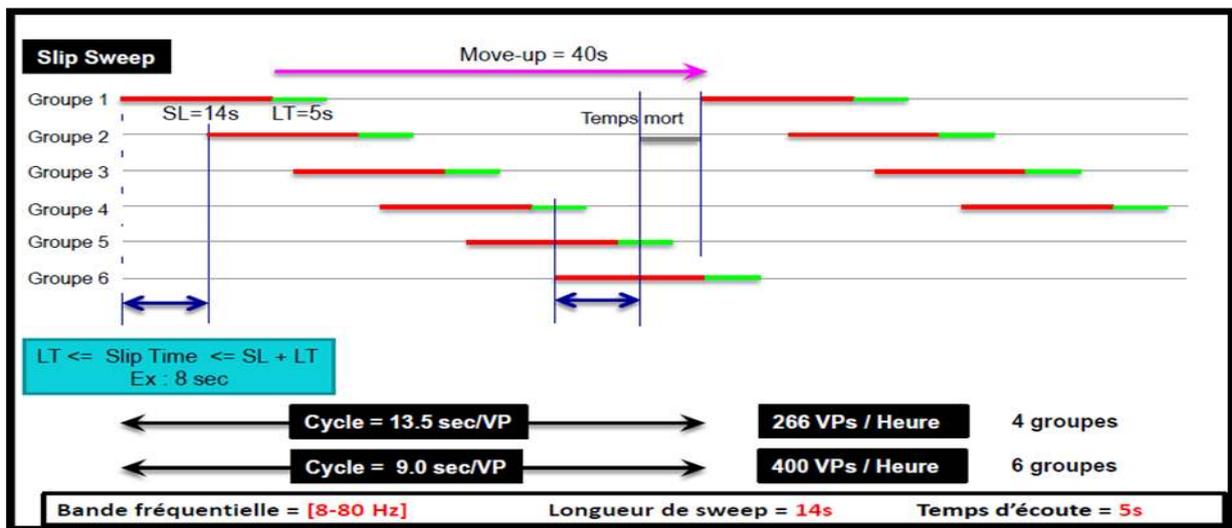


Fig IV-8 Représentation de mode d'envoi de slip sweep (Document ENAGEO).

La méthode du slip-sweep n'utilise qu'un seule sweep et de type up sweep. En fait, il suffit juste de corrélér l'enregistrement mère avec le sweep pilote pour obtenir un enregistrement « mother gather » ou les enregistrements sont continus et par la suite ils sont coupés en enregistrements individuels en se basant sur les premières arrivés.

La **Fig IV-9** représente des enregistrements type de la méthode du slip sweep.

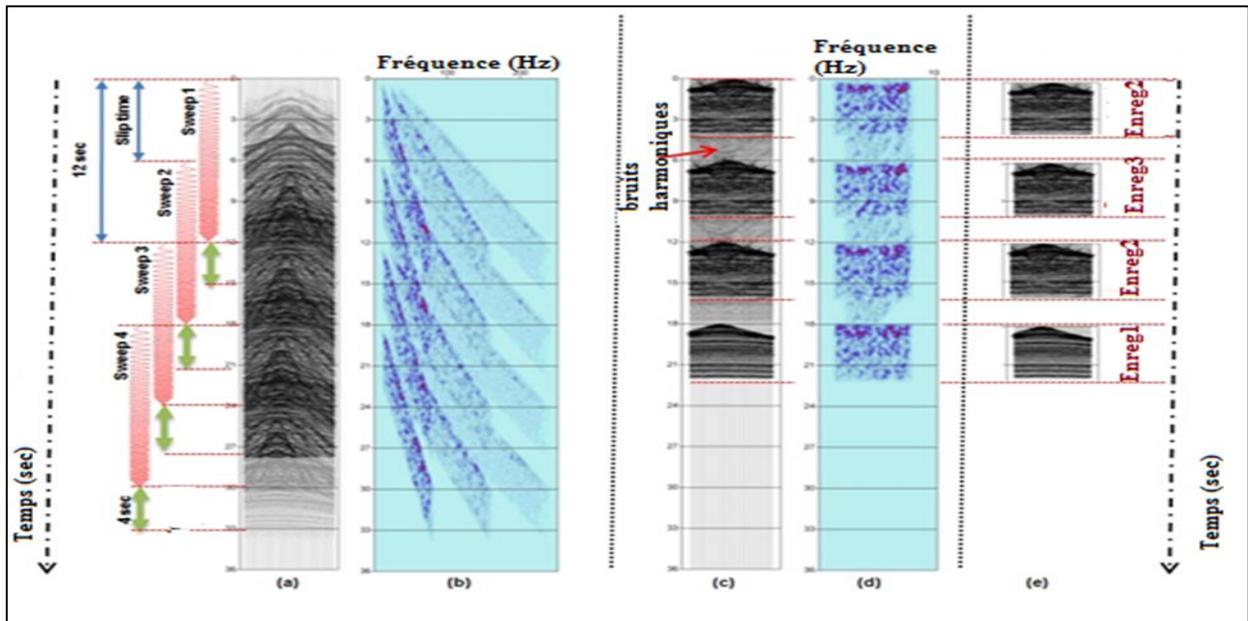


Fig IV-9 Acquisition vibrosismique de type slip sweep.

(a) enregistrement mère non corrélée composé de quatre sweeps (b) projection temps-fréquence d'une seule trace distordue de (a), (c) corrélation de (a), (d) projection temps-fréquence de la même trace de (b) après corrélation, (e) enregistrement individuel corrélé.

Dans la technique conventionnelle, les sweeps entrent en fonction dès la fin du sweep précédent contrairement au technique slip sweep (Fig IV-10).

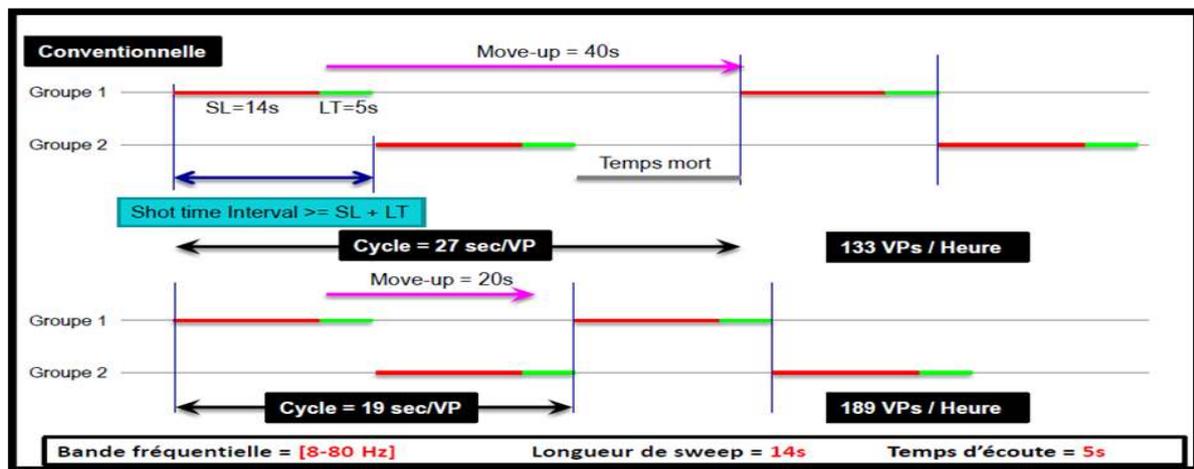


Fig IV-10 Représentation de mode d'envoi conventionnelle (Document ENAGEO).

Dans le mode d'acquisition conventionnel, les enregistrements sont corrélés les uns après les autres en utilisant le sweep pilot, (Fig IV-11).

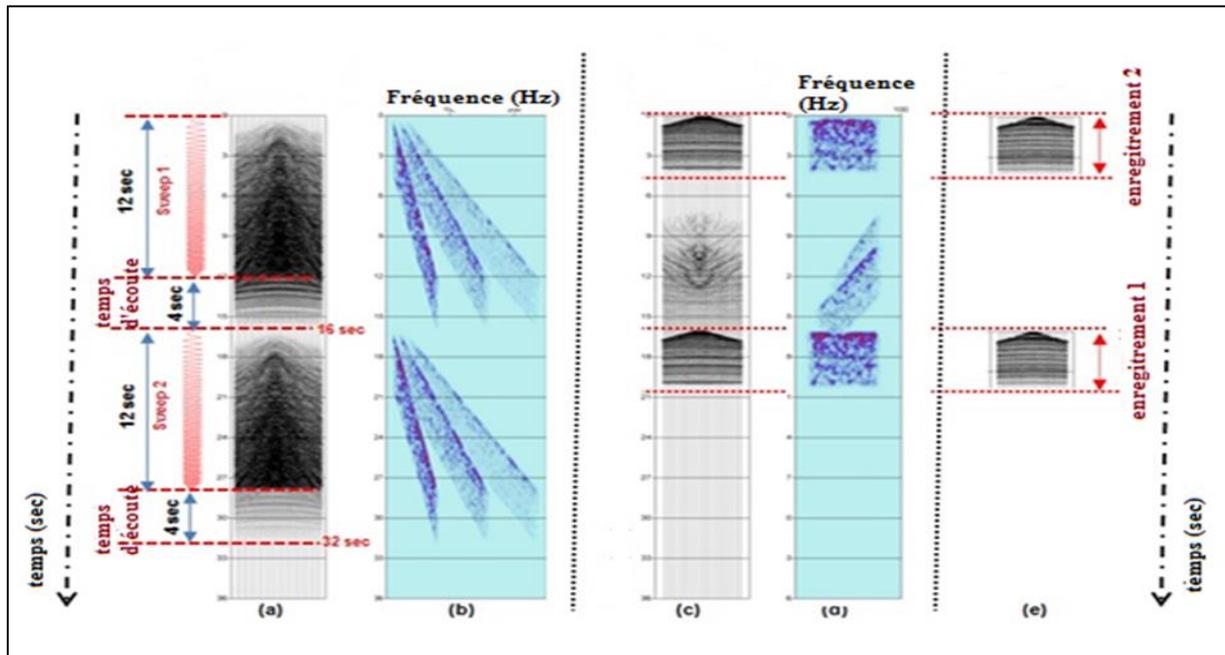


Fig IV-11 Acquisition vibrosismique conventionnelle.

(a) enregistrement mère non corrélée compose de deux sweeps distordu, (b) projection temps-fréquence d'une seule trace distordue de (a), (c) corrélation de (a), (d) projection temps-fréquence de la même trace de (b) après corrélation, (e) enregistrement individuel corrélé.

IV.2.4.2 Modifications dans le système d'acquisition

Pour que la méthode du slip-sweep offre un gain en termes de productivité et pourrait être une cible réaliste, il faut introduire des modifications au système d'acquisition afin d'accommoder la technique, entre autre la corrélation continue du système d'acquisition.

Afin de garantir une meilleure souplesse et une amélioration de productivité, nous devons laisser les groupes de vibrateurs "décider" du commencement du sweep : les vibrateurs transmettront un signal 'prêt' à l'emploi aussitôt que tous les vibrateurs dans la position avec la base plate vers le bas. L'instrument (système) activera à cette étape, de façon automatique des stations de récepteurs complémentaires. Dans le cas affirmatif, le signal doit être renvoyé aux vibrateurs et le sweep débutera alors. Notons que le délai entre deux sweeps consécutifs n'est pas être nécessairement constant, tant qu'un délai minimum (l'équivalent du temps d'écoute dans l'enregistrement conventionnel) est appliqué.

Il est évident que les modifications proposées ci-dessus sollicitent le meilleur matériel en termes d'aptitude et de gestion de la mémoire, de la vitesse des corrélations, de la communication automatisée avec les vibrateurs, des taux de transmission des données rapides et de consommation d'énergie maximisée.

IV.2.4.3 Problèmes posés par la méthode slip sweep

Un gain important sur le cout et la productivité d'une acquisition vibrosismique pourrait être réalisé en employant la méthode slip-sweep conduit à rechercher des écarts de temps entre vibrations (slip time) aussi court que possible. Dans ces conditions, les enregistrements obtenus présentent un rapport S/B dégradé par rapport à celui de la méthode conventionnelle, à cause du bruit harmonique de différentes ordres ($2f$, $3f$... nf), qui est généré grâce au mauvais couplage de la base plate avec le sous-sol (le terrain n'est pas parfait) et le système hydromécanique et hydroélectrique du vibreur c'est-à-dire il ne peut pas reproduire le signale théorique.

Généralement, l'énergie de ces harmoniques est déplacée aux temps négatifs (antérieur) par le processus de corrélation en utilisant l'up-sweep.

La (**Fig IV-10**) montre un exemple d'un down-sweep ou l'énergie des harmoniques est déplacée aux temps positive (postérieure) par le processus de corrélation.

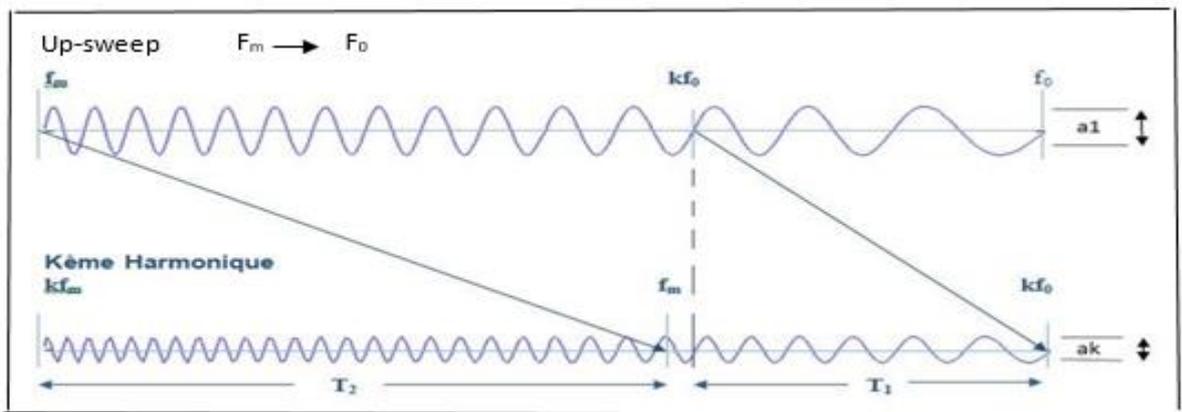


Fig IV-12 down-sweep montrant le fondamental et le kième harmonique.

Malheureusement un simple filtre passe-bande ne peut discriminer entre l'énergie 'fondamentale' et l'énergie 'harmonique' car ces harmoniques contaminent l'enregistrement des sweeps précédents. D'où la nécessité de concevoir un procédé de traitement permettant la réduction du bruit harmonique, seul. Ces dernières années, diverses techniques de réduction du bruit harmonique ont été développées. (Ces techniques sont protégées).

En général, le slip-time n'est pas suffisamment long pour prévenir une interférence entre le bruit harmonique et l'enregistrement précédent en cas d'utilisation d'un up-sweep.

Ce phénomène s'aggrave si ce paramètre est pris trop court par rapport à la longueur du sweep. Cependant, la partie la plus affectée du point vibré (IVP) précédent se situe en bas de l'enregistrement, particulièrement la partie des hautes fréquences (réflexions profondes). Cet effet peut être réduit en gardant les différents groupes de vibreurs rapprochés, évitant ainsi de grandes différences dans les amplitudes entre des tirs successives. L'effet peut aussi être réduit par l'augmentation du cycle de vibration mais bien sûr il aurait pu influencer le

coût de la productivité, ainsi l'augmentation du slip time, l'augmentation de la largeur de bande de fréquence, en diminuant la longueur du sweep.

Pour que la méthode slip sweep soit applicable il faut respecter les conditions suivantes (Fig IV-13) :

		Slip-sweep agressive	Slip-sweep simple	Conventionnel
Contamination des VPs par les harmoniques et les signaux fondamentaux des VPs suivants	Chevauchement des signaux fondamentaux Grave	Contamination de plusieurs VPs Chevauchement harmoniques- fondamental	Contamination d'un seul VP par les harmoniques du VP suivant Chevauchement harmoniques- fondamental	Pas de contamination

Tab IV-1 degré de contamination en fonction de LT.

V.1 Introduction

Le nombre d'études sismiques 3D enregistrées avec la technique slip sweep reste relativement modeste, en dehors de son pays d'origine (Oman). Une cause possible de cette Expansion lente est la crainte que les bruits harmoniques générés par la méthode affectent la qualité des données. Plusieurs expériences ont été effectuées, à Oman et ailleurs, comparant l'acquisition conventionnelle avec le Slip sweep (**Rozemond en 1996**).

V.2 comparaison entre la méthode vibrosismique conventionnelle et la méthode du slip sweep

V.2.1 délai du projet

Le tableau ci-dessous explique les statistiques du délai d'acquisition sismique en mode slip sweep et en mode conventionnel

Mode	Nvp/1h	Nvp/1mois	Nvp/1anné
Conventionnel	189	136080	1632960
Slip-sweep	432	311040	3732480

Tab V-2 Nombre de VPs dans le mode conventionnelle et le mode slip sweep.

A partir du tableau précédent, on déduit que si il n'y a pas des contraintes qui peuvent perturber les opérations on peut obtenir ces résultats qui peuvent finaliser un projet dans un délai plus court.

Il est important de noter qu'une augmentation de productivité, ne se réalisera pas seulement dans les circonstances idéales, (comme les terrains plats d'Oman), mais aussi dans des terrains plus complexes, comme les zones urbaines ou les terrains accidentés, ou le flux d'acquisition est moins régulier.

Donc les entreprises pétrolières vont réduire le délai de l'opération acquisition sismique qui prend beaucoup temps (entre 02-03 ans).

V.2.2 Le cout

La qualité des données obtenues penche vers l'utilisation de la méthode slip sweep pour réduire le coût par km² avec les mêmes paramètres d'acquisition, ou d'améliorer la résolution de l'image sismique en augmentant la densité des points de tir avec le même coût.

V.2.3 Qualité

Généralement, pour réaliser un projet en 3D ou 2D les entreprises de géophysique vont choisir les paramètres d'acquisition sismique en mode conventionnel, parmi ces paramètres, le nombre de sweeps pour augmenter le rapport S/B et obtenir une bonne qualité des données. A l'opposé en mode slip sweep, il est difficile de réaliser un projet par 2 au maximum de nombre de sweeps, globalement on utilise un seul sweep. Aussi le rapport S/B va être dégradé par rapport à la méthode conventionnelle à cause du bruit harmonique, car les harmoniques d'un sweep donné chevauchent sur les réflexions du sweep lui-même suivant contrairement

au mode conventionnel. Le spectre des harmoniques d'un sweep donné ne chevauche pas sur le spectre du deuxième sweep (**Fig V-1**).

Ainsi pendant l'étape de corrélation, les enregistrements acquis en mode conventionnel, sont corrélés les uns après les autres, tandis que en mode slip sweep, les enregistrements sont continus.

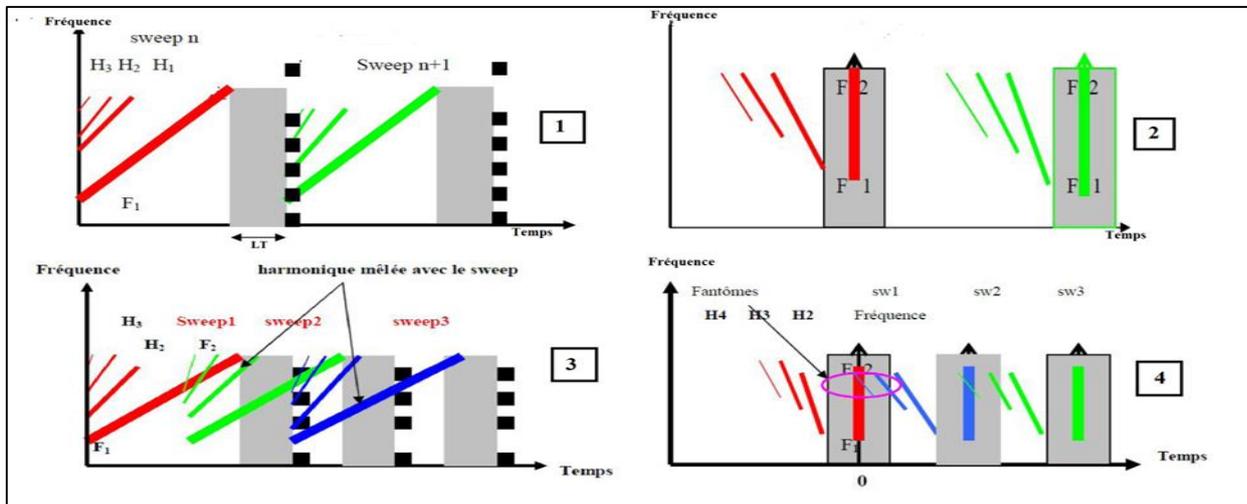


Fig V-1 Représentation temps-fréquence des harmoniques avant et après corrélation dans le mode conventionnel et le mode slip sweep.

- 1 : harmoniques avant corrélation en mode conventionnel.
- 2 : harmonique après corrélation (conventionnel).
- 3 : harmoniques avant corrélation en mode slip sweep.
- 4 : harmoniques après corrélation (slip sweep).

V.2.4 Conclusion

L'amélioration de la productivité conduit à rechercher des écarts de temps entre ces vibrations (slip-time) aussi courts que possible. Dans ces conditions, les enregistrements obtenus présentent un rapport S/B dégradé par rapport à celui de la méthode conventionnelle, à cause du bruit harmonique. Malheureusement un simple filtre passe-bande ne peut distinguer entre l'énergie fondamentale et l'énergie harmonique.

V.2.5 Modèle mathématique d'une trace sismique

Une trace sismique est la convolution du signal émis avec la réflectivité du sous-sol (en l'absence du bruit) (**Fig V-2**), elle est présentée par la formule (V.3) :

$$\text{Cas théorique : signal émis pilote : } S(t) = R(t) * F(t) \tag{V.1}$$

$$\text{Cas réel : signal émis GF : } S(t) = R(t) * [F(t) + H(t)] \tag{V.2}$$

$$S(t) = \underbrace{[R(t) * F(t)]}_{\text{Fondamentale}} + \underbrace{[R(t) * H(t)]}_{\text{Harmoniques}}$$

Avec :

* : convolution.

$R(t)$: réflectivité.

$F(t)$: composante fondamentale du sweep.

$H(t)$: composantes fondamentales du sweep.

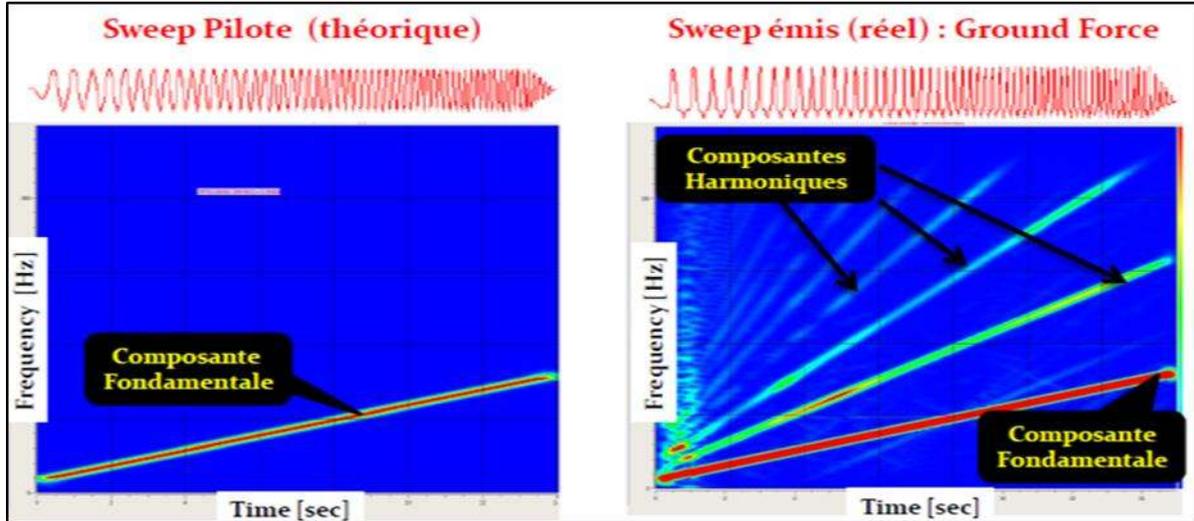


Fig V-2 composantes fondamentales et harmoniques en mode vibrosismique (Document ENAGEO).

Sur la **Figure V-2** on peut distinguer la composante fondamentale des composantes harmoniques sur le plan temps-fréquence. Après corrélation, ils apparaissent comme suit : (**Figure V-3**).

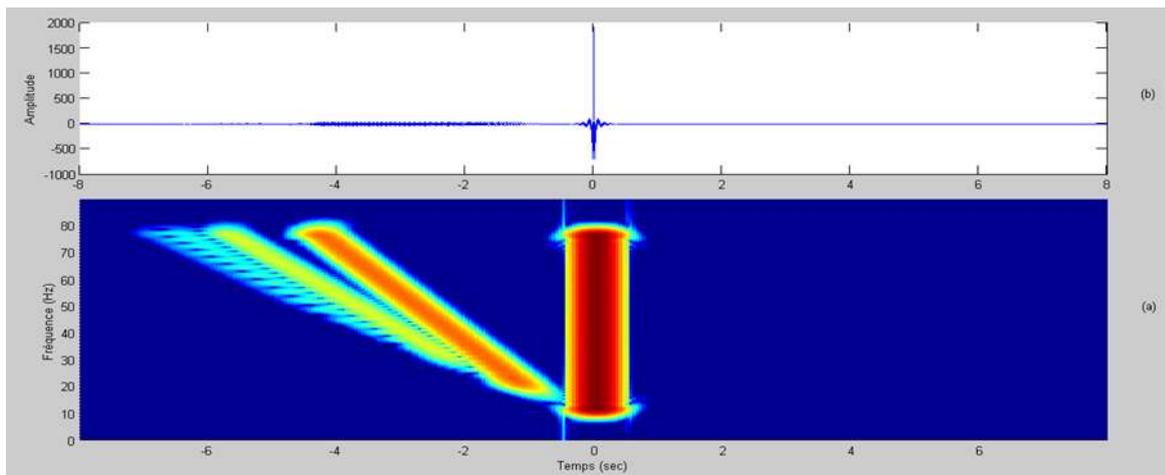


Fig V-3 les harmoniques après corrélation, (a) cross-corrélation d'un up-sweep avec le pilote, (b) projection temps-fréquence de (a).

V.3 Analyse mathématique des harmoniques dans la méthode slip sweep

Dans ce qui suit, on va effectuer une analyse quantitative de l'effet de corrélation sur des données slip-sweep contaminées par les harmoniques, tout en discutant les différentes théories élaborées pour étudier cet effet.

Considérons un up-sweep linéaire et sa $k^{\text{ième}}$ harmonique et déterminons les relations entre signaux. Pour un événement qui prend un temps τ (temps de transit) du point de tir au géophone, la relation fréquence-temps pour la $k^{\text{ième}}$ harmonique ($k=1$ correspond à la composante fondamentale du sweep) est donnée par :

$$f_i = kf_0 + \frac{k W(t - \tau)}{T} \quad (\text{V.3})$$

Avec :

f_i : fréquence instantanée à l'instant t .

f_0 : fréquence initiale du sweep émis (minimale dans le cas d'un up-sweep).

W : bande fréquentielle du sweep.

T : longueur du sweep.

τ : Temps de transit.

k : ordre d'harmonique considéré.

Cas particulier : $K=1$ correspond à la composante fondamentale du sweep

Après corrélation, le sweep fondamental se transforme en une ondelette zéro phase de courte durée, tandis que les harmoniques se manifestent comme un sweep inverse apparaissant aux temps de corrélation négatifs (**Fig V-3**). Par conséquent, ils interfèrent avec les réflexions des sweeps précédents (**Fig V-4**). Les fréquences initiale et finale du sweep inverse sont kf_0 et f_m , respectivement.

Lors de l'acquisition en méthode slip-sweep le temps de transit prolongé d'un événement ayant un temps de transit τ sur un enregistrement d'ordre i , ou le slip time utilisé est ST (égal ou supérieur au temps d'écoute (LT)) et le nombre totale des enregistrements effectués est de l'ordre n , est donné par la formule suivante :

$$\bar{\tau} = (n - 1) LT + \sum_{i=1}^{n-1} ST + \tau \quad (\text{V.4})$$

La représentation le domaine temps-fréquence (F-T) qui caractérise la distorsion harmonique générée par cet événement dans ce domaine est donnée par l'équation fondamentale d'évaluation de l'impact de l'harmonique d'un certain événement sur tous les enregistrements précédents :

$$[\tau_c(f_m) - \tau_c(kf_0)] = [f_m - kf_0] [\bar{\tau} - 1] - [f_m \tau_c(kf_0) - kf_0 \tau_c(f_m)] \quad (\text{V.5})$$

Avec :

f_m : fréquence finale du sweep (maximale dans le cas d'un up sweep)

$\tau_c(f)$: Le temps d'occurrence dans le domaine temps-fréquence (F-T) (temps de contamination par la fréquence f).

La fréquence f est conditionné par : $kf_0 \leq f \leq f_m$

$$\text{Et } \tau_c(f) = \frac{(k-1)fT}{kW} \tag{V.6}$$

La première fréquence dans le bruit harmonique qui contamine l'enregistrement précédant directement. Cette fréquence représente la fréquence initiale du bruit et est donnée par :

$$f_s = \frac{(ST-\tau)kW}{(k-1)T} \tag{V.7}$$

Pour d'autres auteurs :

$$f_s = \frac{(ST-LT)kW}{(k-1)T} \tag{V.8}$$

On constate que les relations précédentes donnent la fréquence maximale f_s pour laquelle les données n'interfèrent pas avec l'harmonique d'ordre k. Elle est donnée en fonction des fréquences limites du sweep (f_0 et f_m), la longueur du sweep T, slip time ST et le temps d'écoute LT. La partie des données non affectées par les bruits harmoniques est alors limitée dans la fréquence par f_0 et f_s .

$$t_{lim} = SL - \frac{(k-1)Tf_m}{kW} \tag{V.9}$$

L'équation (V.11) décrit le temps fixé t_{lim} au-delà duquel les données sismiques seront affectées par l'harmonique d'ordre k.

Les équations (V.9) (V.10) et (V.11) concernent un événement situé au temps $t=0$. Pour un événement quelconque au temps double τ , f_s et t_{lim} devraient être redéfinis comme suit :

$$f_s(\tau) = \frac{Wk(ST-LT+\tau)}{(k-1)T} \tag{V.10}$$

$$t_{lim} = ST + \tau - \frac{k-1}{k} \times \frac{Tf_m}{W} \tag{V.11}$$

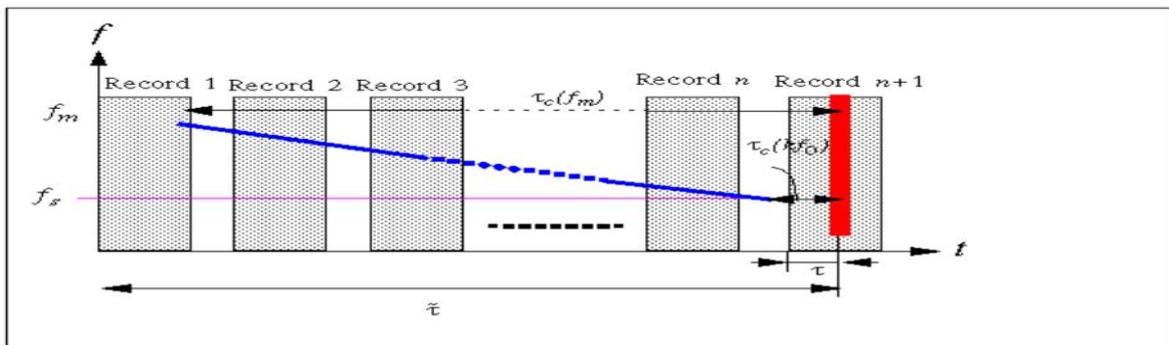


Fig V-4 Un événement dans l'enregistrement n (zone rouge) crée des harmoniques, qui après corrélation sont présentés par la ligne bleue (P. Ras*, M. Daly and G. Baeten, Schlumberger).

L'harmonique peut interférer avec un nombre d'enregistrements précédents. La ligne qui représente la projection dans le domaine F-T de la $k^{\text{ième}}$ harmonique est calculée à partir de l'équation (V.9).

V.4 Technique de réduction des bruits harmoniques

Suite à ce que s'est discuté dans le paragraphe précédent, il est donc possible de réduire l'effet des harmoniques en augmentant la fréquence du début des bruits f_s , en augmentant le temps limite de contamination t_{lim} ou les deux ensembles. Ci-dessous quelques techniques utilisées pour la réduction des harmoniques sans filtrages :

V.4.1 Slip-time constant

Comme attendu, l'interférence entre les bruits harmoniques et les données augmente au fur et à mesure que le slip time devient plus petit. Cette contamination peut toucher un seul enregistrement ou plusieurs en fonction du slip time choisi.

V.4.2 Slip-time aléatoire (comme proposé par Rozemond 1996)

Si le slip time est aléatoire, la contamination par des bruits harmoniques arrivera à des temps aléatoires ce qui permet de les atténuer par le processus de sommation. Cette atténuation augmente avec la couverture.

V.4.3 Sweeps non-linéaires

Un changement de la loi temps-fréquence du sweep (linéaire \rightarrow logarithmique) conduit à un changement de l'intervalle et l'amplitude de contamination par les bruits harmoniques, ce qui atténuera cette dernière.

V.5 Analyse graphique des harmoniques dans la méthode slip sweep

La (Fig V-5) présente un enregistrement « mother gather » avec différentes slip time :

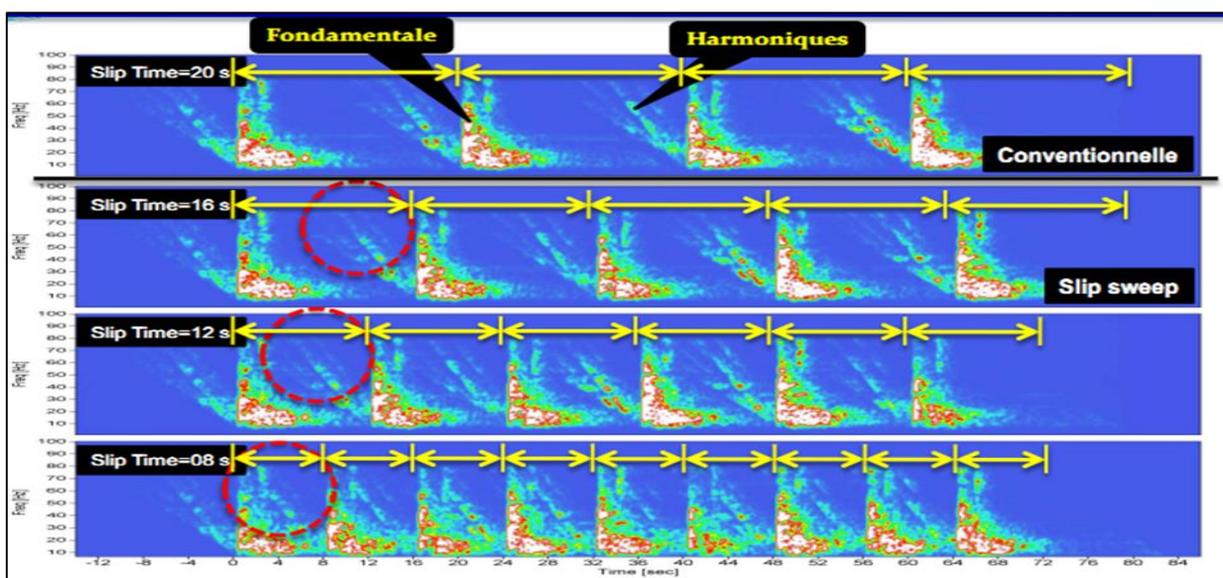


Fig V-5 Effet du slip time sur l'enregistrement.

Afin d'augmenter la productivité, on essaiera de réduire le slip time de plus en plus, mais ce dernier joue aussi sur la qualité des données, dégrade le rapport S/B et la contamination des harmoniques de différentes ordres commence : c'est-à-dire que les enregistrements précédentes vont être affectés de plus en plus par les harmoniques des VPs suivants. D'après la (Fig V-5) pour un (ST = 20 sec ou 16 sec) aucune contamination ne se présente. Donc on est dans le cas conventionnelle ou (ST = SL+LT). Pour le deuxième cas ou le (ST = 16sec ou ST = 12sec) les harmoniques chevauchent uniquement avec les réflexions du VP précédent. Pour le dernier cas qui est le cas d'un slip sweep agressif ou le ST = 8 sec il y a une grande interférence des harmoniques par exemple : les harmoniques du VP6 chevauchent avec les réflexions du VP2.

On remarque sur la (Fig V-6) une distorsion harmonique très faible qui ne peut pas gêner les réflexions, c'est le cas d'un slip time de est égale (20 sec ou 16 sec) Comme on aperçoit sur la cross-corrélation avec le pilote représenté en bas, où on distingue facilement les réflexions même de faibles amplitudes.

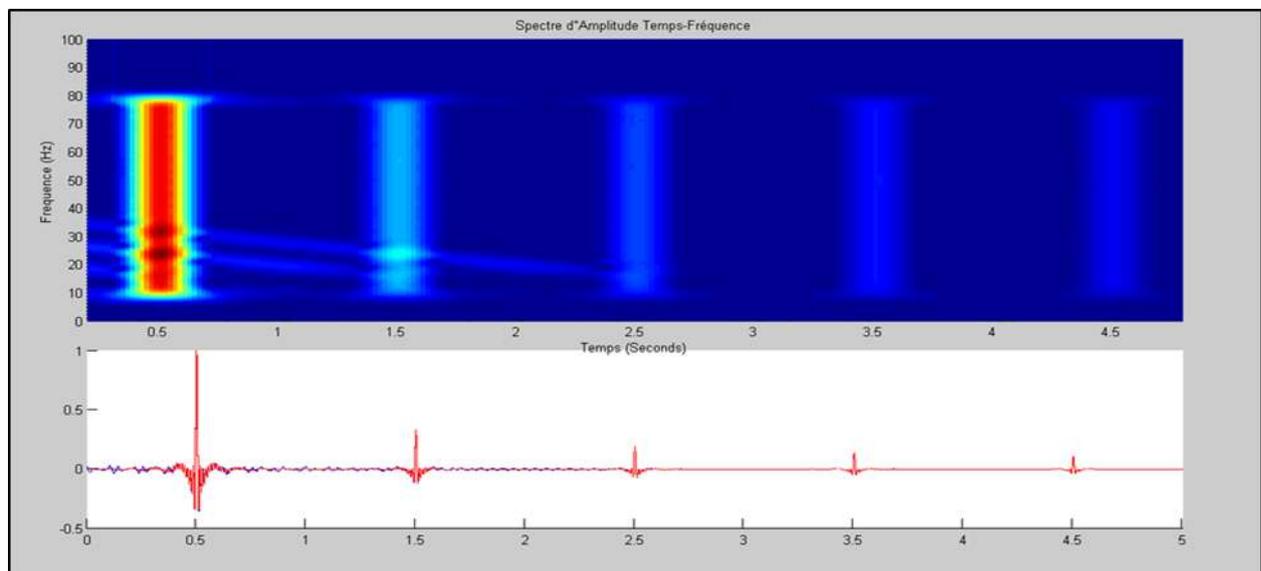


Fig V-6 Projection T-F d'un VP en mode slip time de 20 sec.

La (**Figure V-7**) montre un cas où le slip time est inférieur à $SL+LT$, les harmoniques de différents ordres commencent à chevaucher avec les réflexions précédentes.

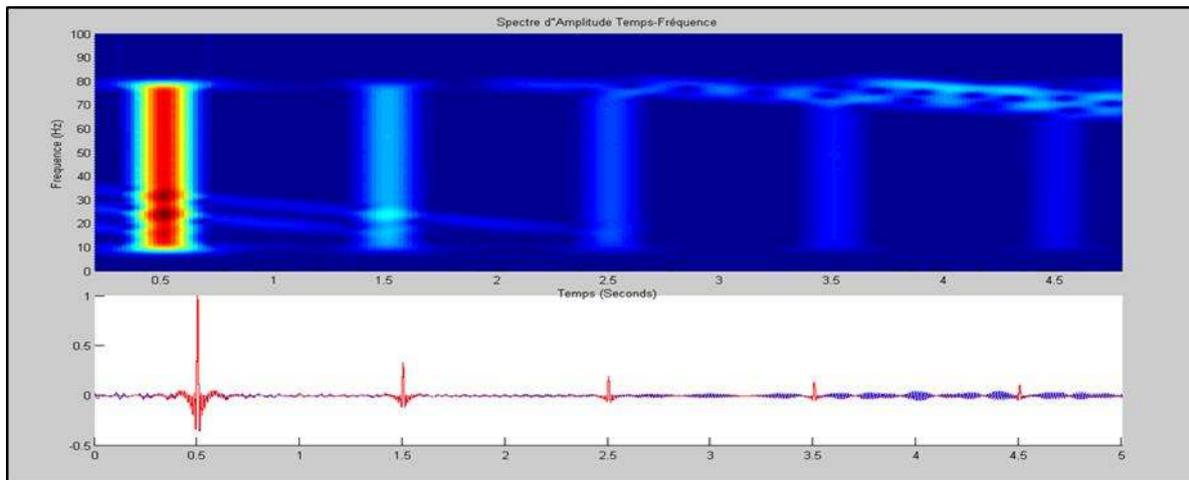


Fig V-7 Projection T-F d'un VP en mode slip sweep avec un slip time de 12sec.

Plus on réduit le slip time plus la qualité des données sera réduite. Comme on remarque clairement sur la (**Fig V-8**) que les enregistrements sont fortement contaminées par les harmoniques qui ont masqué les réflexions.

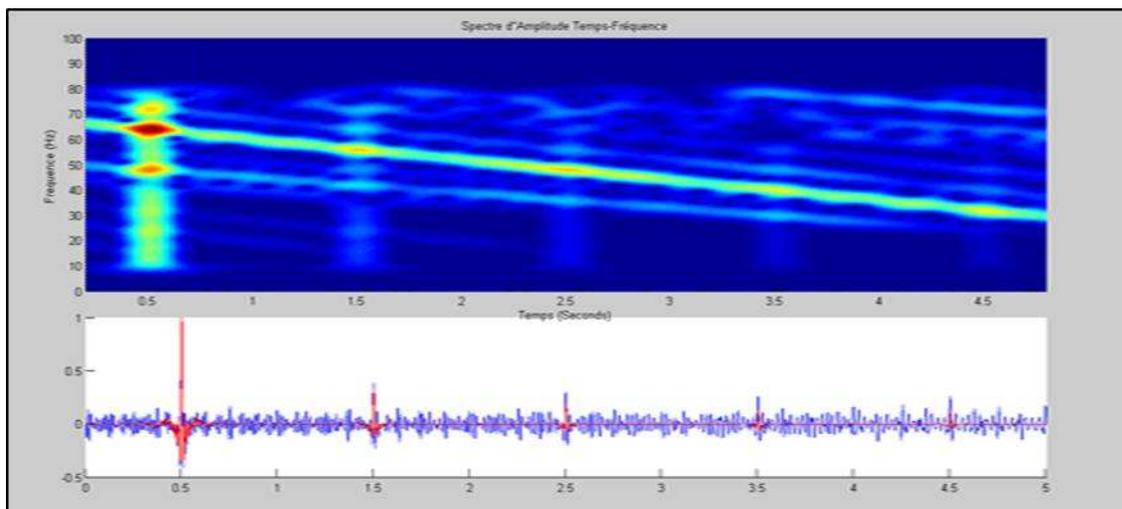


Fig V-8 Projection T-F d'un VP en mode slip sweep avec un slip time de 8 sec.

V.5.1 Conclusion

Lors de l'acquisition vibrosismiques, le camion vibrateur engendre des distorsions harmoniques de Sweep théorique (Pilote) que l'on souhaiterait générer. Ces harmoniques sont considérées comme des bruits gênants, dans le traitement et l'interprétation des données sismiques. De ce fait, beaucoup d'études ont été élaborés pour améliorer la productivité et atténuer ces harmoniques pour améliorer la qualité des données.

V.6 Technique de réduction des harmoniques dans la méthode du slip-sweep

V.6.1 Introduction

Une fois l'acquisition terrain terminée, l'étape suivante est considérée la plus importante dans le contrôle qualité des données sismiques à savoir le filtrage des bruits harmoniques dans des signaux vibrosismiques. Pour cela il existe de nombreux programmes qui ont été élaborés pour améliorer la qualité par l'atténuation des harmoniques parmi elles les techniques proposées par Fleure (2002), Meunier et Bianchi (2002) et Moro (2007). Ces études consistent à obtenir une estimation du bruit harmonique à partir de la composante fondamentale de la trace corrélée, le bruit estimé sera soustrait, par la suite, afin d'ébruiter les VPs précédents. L'opérateur d'estimation des harmoniques est calculé à partir de composantes harmoniques et fondamentale du sweep émis (GF) parmi ces techniques on cite :

- HPVA (High-Productivité vibroseis Acquisition).
- ENAGEO-ADANCE est utilisé dans le projet de mon mémoire appliqué sur le périmètre GEH-3D (GUERN ECH CHIKH).

V.6.2 Le filtrage par HPVA (High-Productivité vibroseis Acquisition)

Ce type de filtrage résout les problèmes de bruits harmoniques associés à la technique slip-sweep. Cette méthode est proposée par CGG et il est basé sur la décomposition des données sismiques dans ses composants fondamentales et harmoniques (Meunier, J. et Bianchi, T, 2002)

- ✓ La première étape consiste en l'estimation des composantes harmoniques à partir de la signature source enregistré, à savoir le Grounds- Force.
- ✓ La deuxième étape comprend la soustraction des bruits estimés des données corrélées.

V.6.2.1 Présentation de la méthode

D'une part, le signal émis par une source S_k donnée peut être modélisé comme une somme pondérée de n signaux h_1, h_2, \dots, h_n de référence correspondant à la séquence vibratoire fondamentale (h_1) et à ses harmoniques (h_2, \dots, h_n), ces différents signaux de référence étant pondérés par les fonctions de poids (calcul d'opérateur) C_1, C_2, \dots, C_n . On peut donc écrire :

$$s_k = \sum_{i=1}^n c_i . h_i \quad (V.11)$$

Avec :

$$h_1(t) = a(t) \cdot \cos(2\pi\Phi(t))$$

$$h_i(t) = a(t) \cdot \cos(2\pi i\Phi(t)) \quad i > 1$$

Où :

h_1 : le fondamental.

h_i : les harmoniques.

$a(t)$: est l'enveloppe du fondamentale.

$\Phi(t)$ est la phase instantanée du fondamental et pouvant s'écrire en fonction de la fréquence instantanée :

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi_i}{dt}(t) = f_i(t) \quad (\text{V.12})$$

D'autre part, le signal e^k en provenance d'une source vibrosismique unique S_k et enregistré par un géophone donné est décrit de la manière suivante :

$$e^k = (s^k * r + b) * \text{imp} \quad (\text{V.13})$$

Où s^k est le signal émis par une source S_k , r est une fonction représentative des coefficients de réflexion, b est une fonction représentant un bruit aléatoire, et imp est une fonction représentant la réponse impulsionnelle de la chaîne d'acquisition utilisée.

Si on néglige les bruits non-harmoniques et la réponse impulsionnelle de la chaîne d'acquisition, on peut alors considérer que l'enregistrement est la convolution du signal source s^k et des coefficients de réflexion r , c'est-à-dire :

$$e^k = (s^k * r) \quad (\text{V.14})$$

L'étape consiste en la corrélation de ce signal avec la séquence de vibrations fondamentale h_1 . On rappelle que la corrélation avec l'un des harmoniques ou fondamental h_i correspond à une convolution avec une fonction hd_i dont le spectre d'amplitude est égal au spectre d'amplitude de h_i et le spectre de phase est égal à l'opposé du spectre de phase de h_i .

Donc la composante harmonique peut être estimée à partir de la composante fondamentale par une simple convolution avec un opérateur OP calculé en fonction de H_i représentant les sweeps théoriques (connus) et de C_i (ou bien C_i/C_1) représentant les poids des harmoniques en fonction des fréquences. Ces derniers seront déterminés à partir de la signature de la source (GF) ou à partir des données sismiques enregistrées (non-corrélées), utilisant un nombre limité de traces à faible offset. Le calcul se fait comme suit :

- On corrèle le signal en question avec la séquence fondamentale de vibrations h_1 et ses harmoniques h_2, \dots, h_n .
- l'énergie mise en évidence par ces opérations est principalement centrée autour du temps zéro (temps d'arrivée de la séquence de vibrations), les termes correspondant à des corrélations de h_i et h_j croisées (c'est-à-dire avec i et j différents) étant quant à eux d'énergie beaucoup plus faible.
- En appliquant un fenêtrage centré autour de la zone où le sismogramme est le plus énergétique, c'est-à-dire autour du temps zéro, on récupère alors une approximation de la fonction $r * c_i * h_i * hd_i$.
- En posant la fonction :

$$f_i \approx r * c_i * h_i * hd_i \quad (\text{V.15})$$

Et en passant au domaine de Fourier :

$$F_i = R \times C_i \times H_i \times HD_i, \quad (\text{V.16})$$

Où

F_i , R , C_i , H_i et HD_i correspondent aux transformées de Fourier de f_i , r , c_i , h_i , hd_i .

- Les opérations de corrélation, puis de fenêtrage permettent par conséquent de déterminer des fonctions CR, dites de poids réduites :

$$CR_i = \frac{C_i}{C_1} = \frac{F_i}{F_1} \times \frac{H_1 \times HD_1}{H_i \times HD_i} \quad (\text{V.17})$$

La détermination de ces coefficients, on dispose donc, à une fonction filtre c_1 près, d'une modélisation du signal émis par la source réelle S_k .

Une fois les coefficients de poids harmoniques calculés, on détermine un opérateur d'estimation du bruit harmonique généré par la source S_k . Donc, le processus de débruitage consiste en :

- ✓ La prédiction des bruits harmoniques à partir des données fondamentales et la signature source.
- ✓ La soustraction des bruits estimés des données corrélées.

Dans un enregistrement mère de slip-sweep, le dernier point de tir n'est pas infecté (le moins contaminé) par les bruits harmoniques. Donc, il est traité en premier afin de désinfecter le point de tir précédent des bruits harmoniques. Une fois filtré, ce dernier peut alors être utilisé à son tour pour traiter le point de tir précédent et ainsi de suite jusqu'au premier point de tir.

L'exemple suivant (**Fig V-9**) explique la comparaison d'enregistrement (à gauche) par un vibreur sismique de référence à celui acquis au même endroit avec la technique slip-sweep (au centre). La contamination de bruit harmonique est clairement visible. Après application de HPVA (à droite) le bruit a été atténué et la qualité des données est comparable à la référence.

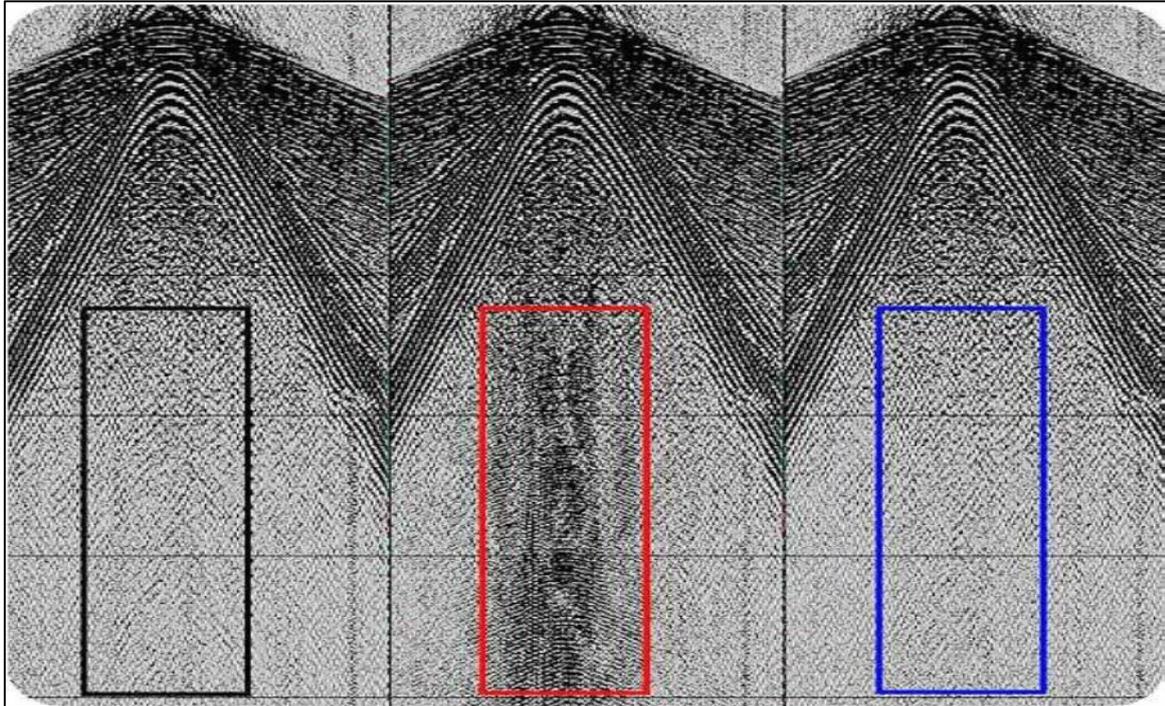


Fig V-9 impact de la méthode HPVA pour atténuer les harmoniques

(Document ENAGEO).

V.6.3 filtre temps variant avec référence, filtrage par (ENAGEO-ADVANCE)

C'est une méthode qui a été mise au point par l'ENAGEO en 2012 afin d'estimer les différentes composantes harmoniques et les atténuer par la procédure de soustraction, sur les données vibrosismiques en général ou bien sur les données slip-sweep, afin d'augmenter le rapport S/B.

V.6.3.1 filtre optimal

Le filtre optimal consiste à trouver le filtre qui permet, pour une entrée $x(t)$, qui représente dans ce qui suit le signal de référence, d'obtenir en sortie une réponse $y(t)$ la plus proche possible d'une réponse désirée $d(t)$, au sens des moindres carrés. Ce filtre est solution de l'équation matricielle suivante :

$$[R_{xx}]. [H] = [r_{dx}] \quad (V.18)$$

Où

$[R_{xx}]$: est la matrice d'autocorrélation du signal de référence $x(t)$.

$[H]$: le vecteur filtre optimal $h(t)$.

$[r_{dx}]$: le vecteur de la cross-corrélation signal désiré $d(t)$ avec le signal de référence $x(t)$.

Dans ce cas, la sortie du filtre optimal s'écrira : $y(t) = x(t) * h(t)$

On peut également utiliser l'algorithme adaptatif suivant pour les signaux non-stationnaires :

$$H^{(k+1)} = \mu R_{x,d} + (1 - \mu) R_{xx} \tag{V.19}$$

Où le facteur de convergence μ doit satisfaire la condition : $0 < \mu < 2/\lambda_{\max}$

avec : λ_{\max} : la valeur propre maximale de la matrice R_{xx} .

V.6.3.2 Filtre d'estimation du bruit harmonique à partir du modèle de la trace sismique

Appelons $x^k(t)$ le signal enregistré par l'un des géophones G. Ce signal est le résultat de la convolution du signal $s^k(t)$ émis au niveau de la base plate de la source S^k (signal Gf), par la fonction de réflectivité $r(t)$ du terrain, qui représente la succession chronologique des coefficients de réflexion des différentes interfaces géologiques rencontrées :

$$X^k(t) = s^k(t) * r(t) + n(t) \tag{V.20}$$

Avec :

$$s^k(t) = \sum_{i=1}^n s_i^k(t) \tag{V.21}$$

Où : $s_1(t)$ est la composante fondamentale supposée être très proche du sweep pilote enregistré $p(t)$, $S_2(t)$, $S_3(t)$... $S_n(t)$ les composantes harmoniques 2,3,... n contenues dans le sweep émis et $n(t)$ le bruit aléatoire additif.

Après corrélation par le sweep pilote les composantes relative au bruit aléatoire doivent être négligées.

La corrélation par sweep de référence donne un signal non-causal, dans le cas d'utilisation d'un up-sweep une image des harmoniques pour $i > 1$, située dans les temps négatifs par rapport au temps zéro du signal. Le système d'enregistrement délivre une trace corrélée causal

Afin de réaliser le filtrage avec référence, cette technique présente une nomenclature des harmoniques à extraire sous forme de sous-ensembles appelés les classes qui pouvant être formées par combinaison :

- de la composante subharmonique.
- des composantes harmoniques d'ordre entier.
- des composantes harmoniques d'ordre fractionnaire.

L'algorithme consiste à déterminer le filtre optimal à partir de la composante fondamentale. La version non causale de ce filtre peut être calculée en utilisant l'algorithme de Wiener-Levinson.

Le bruit estimé de l'ordre i est donné par :

$$b_i(t) = y^k(t) * h_i(t) \tag{V.22}$$

L'algorithme décrit ci-dessus présente l'avantage de traiter les harmoniques une par une, ou par bloc. Le bruit estimé (généré par la source S_k) est ensuite soustrait de la trace elle-même et la trace du même géophone au point de tir précédente S_{k-1} .

V.6.3.3 filtrage par la méthode à entrées/sorties multiples

Lors de la propagation et à cause de non stationnarité du sweep, il peut exister un phénomène de distorsion non stationnaire qui rend le signal émis utilisé pour le traitement différent du signal dans la trace (variation en fonction du temps sur la même trace et en fonction d'offset) par conséquent les filtres calculés de manière conventionnelle à partir de GF_s ne sont pas entièrement représentatifs de toutes les traces.

Le signal enregistré au niveau de vibrateurs, utilisé dans le calcul du filtre ne représente pas fidèlement le vrai signal émis pour la raison essentielle suivante :

- ✓ L'utilisation d'un signal moyen de plusieurs vibrateurs représentant le même point de tir.
- ✓ Manque de répétitivité dans le signal émis.
- ✓ Réflectivité différente pour chaque vibrateur du même groupe.

Par conséquent l'utilisation du GF comme signal émis, peut donner une estimation imprécise du bruit $b_i(t)$, ou une simple soustraction laissera un résidu qui peut être parfois très énergique par rapport au signal utile, particulièrement pour la composante HF de ce résidu.

V.6.3.4 Méthodologie d'application de la méthode

En subdivisant les composantes harmoniques en classes, comme décrit ci-dessus, l'algorithme proposé peut traiter les harmoniques, un par un, ou par bloc. La méthode des entrées / sorties multiples estime le bruit harmonique et le soustrait de l'enregistrement précédent contaminé. Ceci peut être réalisé en utilisant l'une des trois versions du temps-variant suivantes :

V.6.3.4.1 Version globale

Cette méthode de soustraction estime et élimine de manière globale le bruit de la classe contenant toutes les composantes harmoniques.

V.6.3.4.2 Version en Cascade

C'est une méthode de multi-soustraction (multicouches) avec la réhabilitation de l'entrée qui estime et supprime, un par un, et de manière récursive le bruit lié à chaque classe considérée.

V.6.3.4.3 Version de multi-référence

Plusieurs versions de référence : c'est une méthode utilisée pour limiter les interférences à des entrées multiples (Multi-Input Canceling Interference), qui estime et supprime simultanément le bruit lié à chaque classe.

V.6.3.5 Décomposition du GF (Ground Force)

Afin de calculer le filtre optimal, il est nécessaire de décomposer le signal émis en ses composantes fondamentales et harmoniques. Le filtre pour estimer l'harmonique $h_i(t)$, est une

fonction de la composante fondamentale $s_1^k(t)$ et de la composante harmonique $s_i^k(t)$ du signal émis (GF) (Fig V-11).

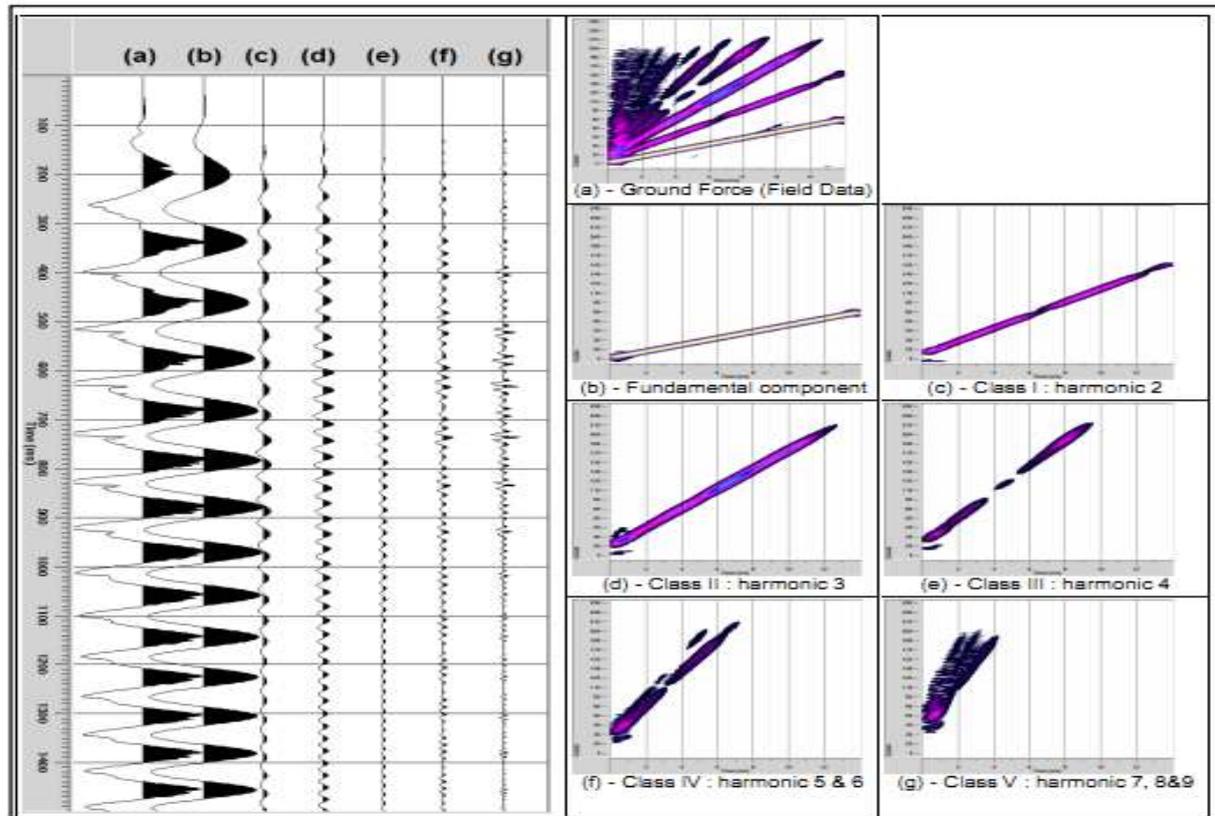


Fig V-10 Décomposition du GF pour le calcul d'opérateur.

Deux méthodes pour l'extraction des harmoniques en utilisant comme référence le sweep pilote sont proposées :

V.6.3.5.1 Décomposition par filtre adaptatif

En général, les filtres adaptatifs sont des systèmes appliqués sur des données bruitées pour obtenir une information utile à un certain instant t , La méthode de décomposition par filtre adaptatif consiste à déterminer un filtre optimal $g(t)$ à partir du signal de référence $P_i(t)$, donné par l'application de la composante harmonique de l'ordre i du signal GF, en prenant le GF comme signal désiré. Où :

$$P_i(t) = a(t) \cdot \cos(i \cdot \phi(t)) \tag{V.23}$$

avec : $a(t)$: l'enveloppe du sweep pilote

$\Phi(t)$: sa phase instantanée.

i : l'ordre de la composante harmonique

Afin de calculer le filtre optimal il est nécessaire de décomposer le signal émis en ses composantes fondamentales et harmonique.

La Fig V-12 montre un exemple de l'extraction de la composante fondamentale contenue dans un sweep distordu par deux harmoniques.

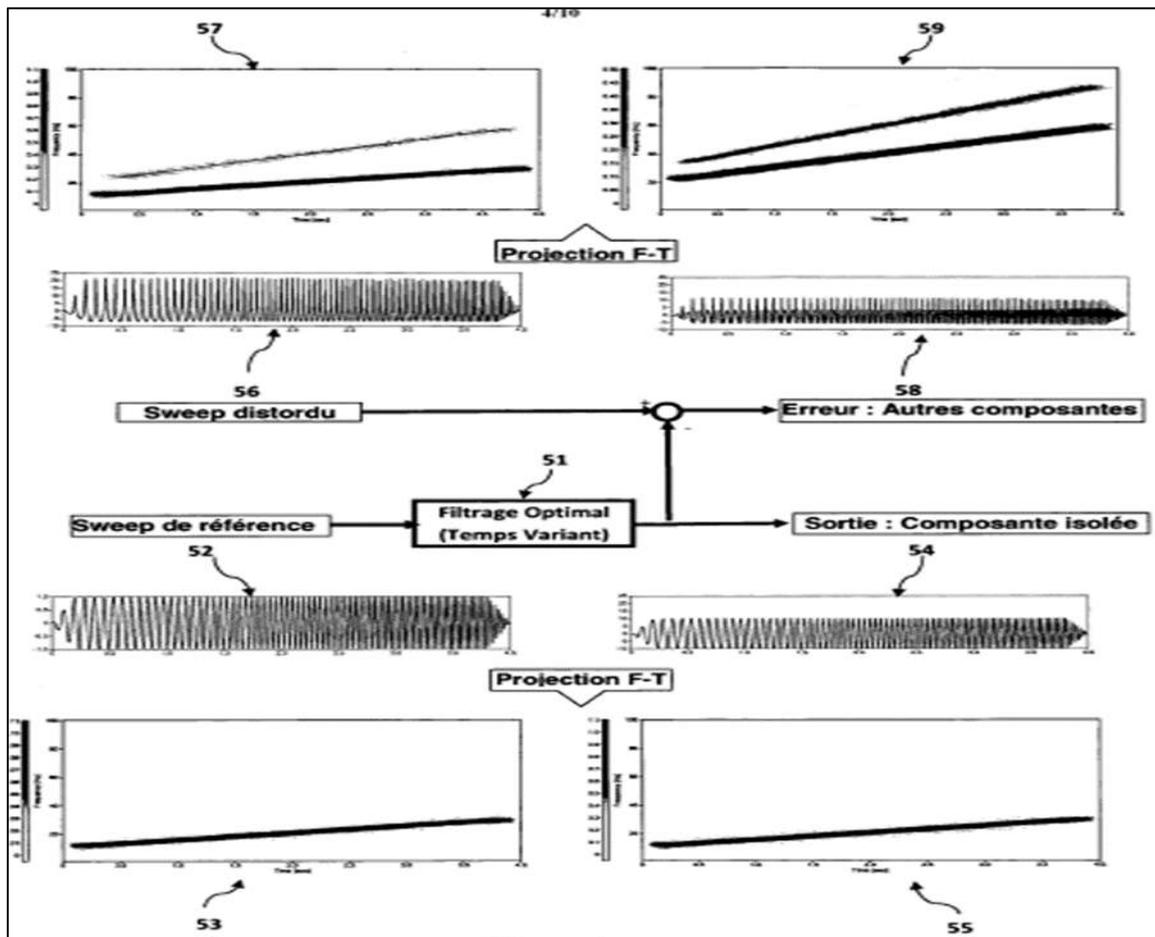


Fig V-11 extraction de la composante fondamentale contenue dans un sweep distordu à deux harmoniques. (Document ENAGEO).

V.6.3.5.2 Décomposition dans le domaine temps-fréquence

Cette méthode consiste à séparer les différentes composantes du sweep dans le domaine temps-fréquence, ce qui nécessite l'utilisation de la transformée de Fourier réduite inverse et avec une bonne résolution.

Cette technique a pour avantage le calcul automatique du masque sans avoir besoin de connaître l'expression mathématique des lois des fréquences instantanées ou des paramètres du sweep de référence (pilote). Ce calcul se fera uniquement à partir du sweep pilote introduit et l'ordre d'harmonique désirée.

On réalise tout d'abord la transformée F-T du GF, ensuite, on calcule un masque à partir du sweep pilote dans le domaine F-T (en utilisant les mêmes paramètres de la première transformation). Le résultat est obtenu après multiplication des deux images, on appliquera en dernier la transformée FT inverse pour revenir sur le domaine temporel. Pour les autres composantes, le sweep de référence est calculée précédemment à partir du sweep pilote.

La Fig V-13 explique le processus de séparation et d'extraction de la composante harmonique.

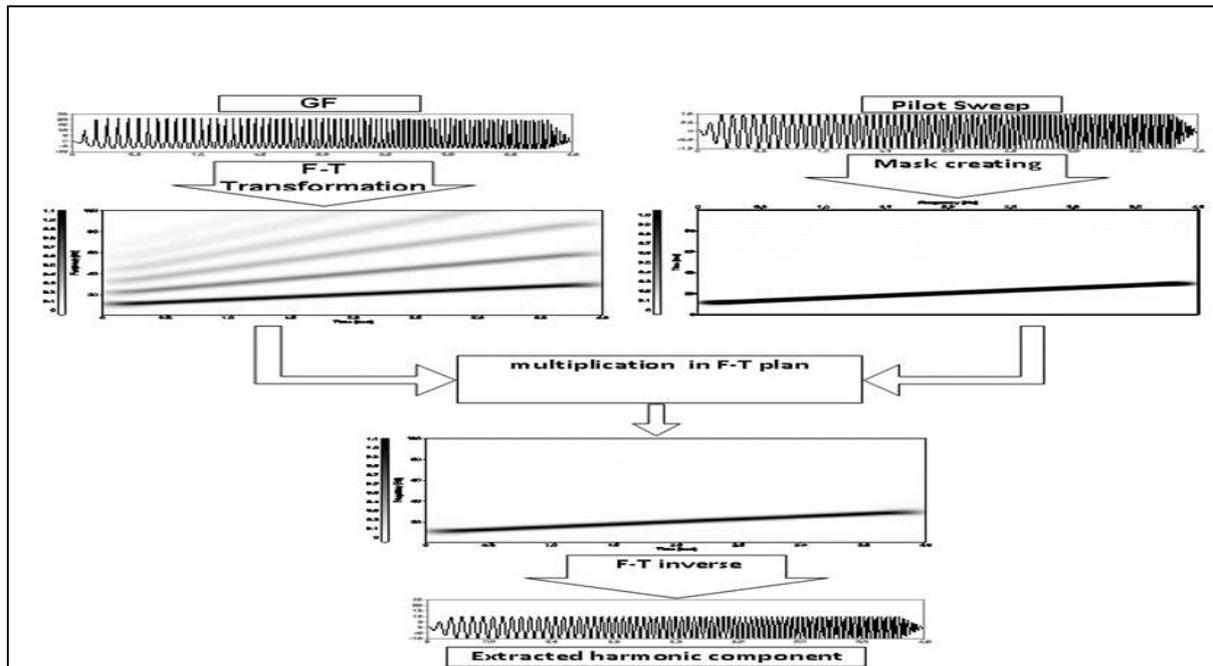


Fig V-12 décomposition de la composante harmonique dans le domaine temps-fréquence.

Les deux méthodes proposées ont la particularité d'être bien adaptées à des signaux modulés en fréquence comme le sweep. En plus, elles permettent d'extraire les différentes composantes, ou le signal de GF est considéré comme signal désiré, est réhabilité par soustraction de la composante estimée à l'étape précédente, ce qui rend facile une différenciation entre le nouveau composant à extraire et les composantes restantes.

V.7 Application sur des données réelles

Le stage est effectué au niveau du SONATRACH division exploration à Hassi Messaoud, ou on a affectées à la mission EGS 290 qui fait partie des missions de l'ENAGEO. La mission EGS 290 qui utilise la technique slip sweep.

V.7.1 Présentation de la région

V.7.1.1 Généralités : Projet GUERNE ECHIKH

Le projet GEH-3D est réalisé, en mode slip sweep, par l'Entreprise Nationale de géophysique EGS-290, réalisé pour le compte de SH-Exploration en utilisant une acquisition sismique réflexion 3D, Afin d'augmenter la productivité en permettant l'enregistrement des données à partir d'une série de balayage générée par trois sets de source dont chaque ensemble est composé de trois vibrateurs L'étude est située au Sud-ouest de la wilaya de Ghardaïa à environ 120 km (Fig V-13) et (Fig V-14).

Il est situé sur les périmètres présentés sur la Fig ci-dessus :

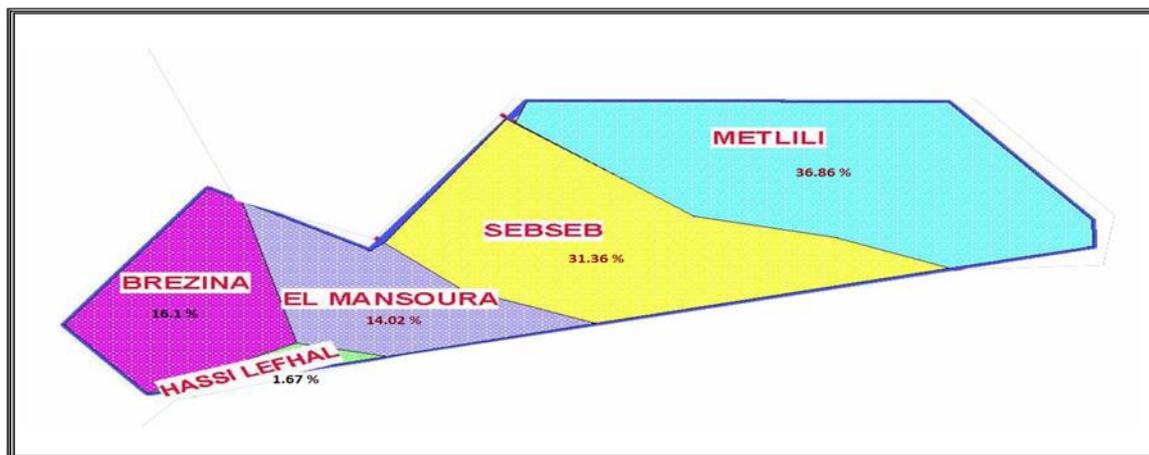


Fig V-13 Présente le projet GEH-3D, (EGS-290).

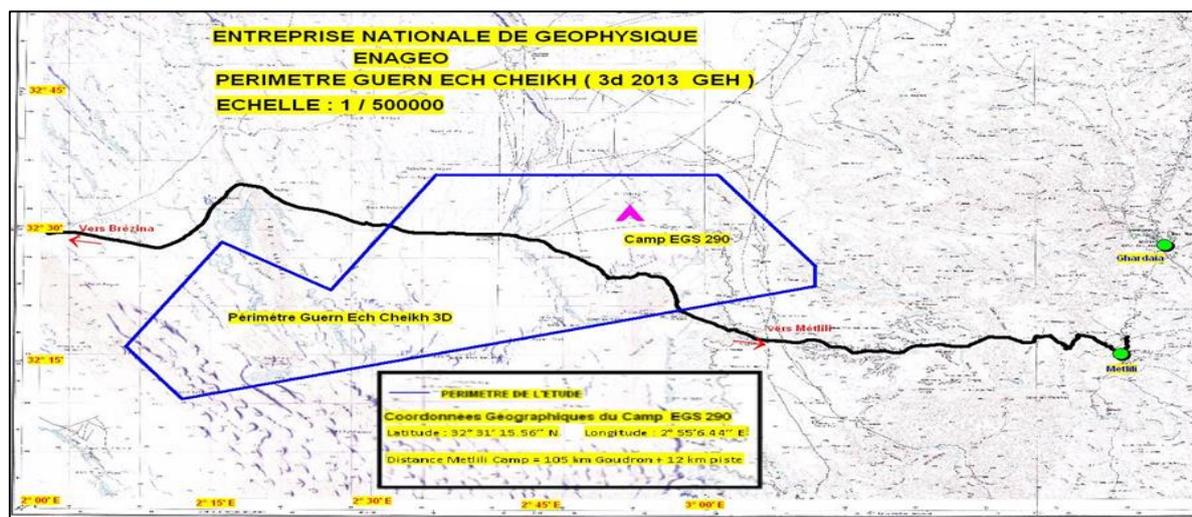


Fig V-14 Représente le périmètre GEH-3D. (EGS-290).

V.7.1.2 Nature et topographie du terrain

L'estimation de la nature du terrain du programme GUER ECH CHEIKH 3D est :

- Terrain rocailleux 150 Km² (07%).
- Oued 220 Km² (09%).
- Falaise 75 Km² (06%).
- Plat rocailleux 1845 Km² (70%).
- Erg 210 Km² (08%) dernière partie de l'étude.

La topographie du périmètre dont l'altitude varie de 550 à 780m est plus ou moins accidentée, il s'agit dans sa partie Nord Est d'un terrain rocailleux traversé par un réseau d'oueds secs alors que sa partie Sud-Ouest est couverte par des dunes de sables qui peuvent atteindre les 150m d'élévation. Les dunes sont sous forme de cordons perpendiculaire aux lignes source séparant les terrains plats.

Donc, il est nécessaire d'ouvrir des passages au niveau des croisements de chaque ligne source et des dunes à l'aide des bulldozers afin d'assurer un accès facile pour les vibrateurs.

V.7.1.3 Situation géographique

- Les parallèles 31°- 32°
- Les méridiens 2°- 5°



Fig V-15 Situation géographique du permis GEH. (SH-EXPLORATION).

Le périmètre GUERN ECH CHEIKH appartient au domaine minier du département bassin Oued Maya qui fait partie de la Direction SH-DIV EXPLORATION. Elle correspond au bloc 350 et couvre une superficie de 8666.10km² avec une zone de délimitation d'une superficie=739,33 Km² accordée à l'opérateur CNPC.

V.7.1.4 Stratigraphie et cadre géologique

Le périmètre GUERN ECH CHEIKH est situé dans la partie Est du bassin d'Oued Mya qui est limité :

- Au Nord par le dôme de Tilrhemt et les Structures de Djemââ –Touggourt.
- Au Sud par le bassin de Mouydir.

- A l'Ouest par le dôme d'Allal et le mole d'Idjerane-M'zab.
- A l'Est par le horst Amguid (Hassi Messaoud).

Il est situé au sud-ouest des champs de Hassi R'mel et de Djebel Bissa. Il est limité au nord par les blocs 313 (périmètre El Ouabed), 421 (périmètre Daoura), 434 (Djebel Bissa) et 435 (périmètre d'exploitation Hassi R'mel), au sud, il est limité par les blocs 349 et 318, à l'est par les blocs 420 (périmètre Ghardaïa) et à l'ouest par le bloc 314 (périmètre Djofra) et fait partie du système à hydrocarbures d'Oued Mya, orienté globalement SSW-NNE.

Le périmètre GUERN ECH CHEIKH constitue la jonction entre le bassin d'Oued Mya à l'est, de Djofra à l'ouest et la voûte d'Allal au sud, (Fig V-16).

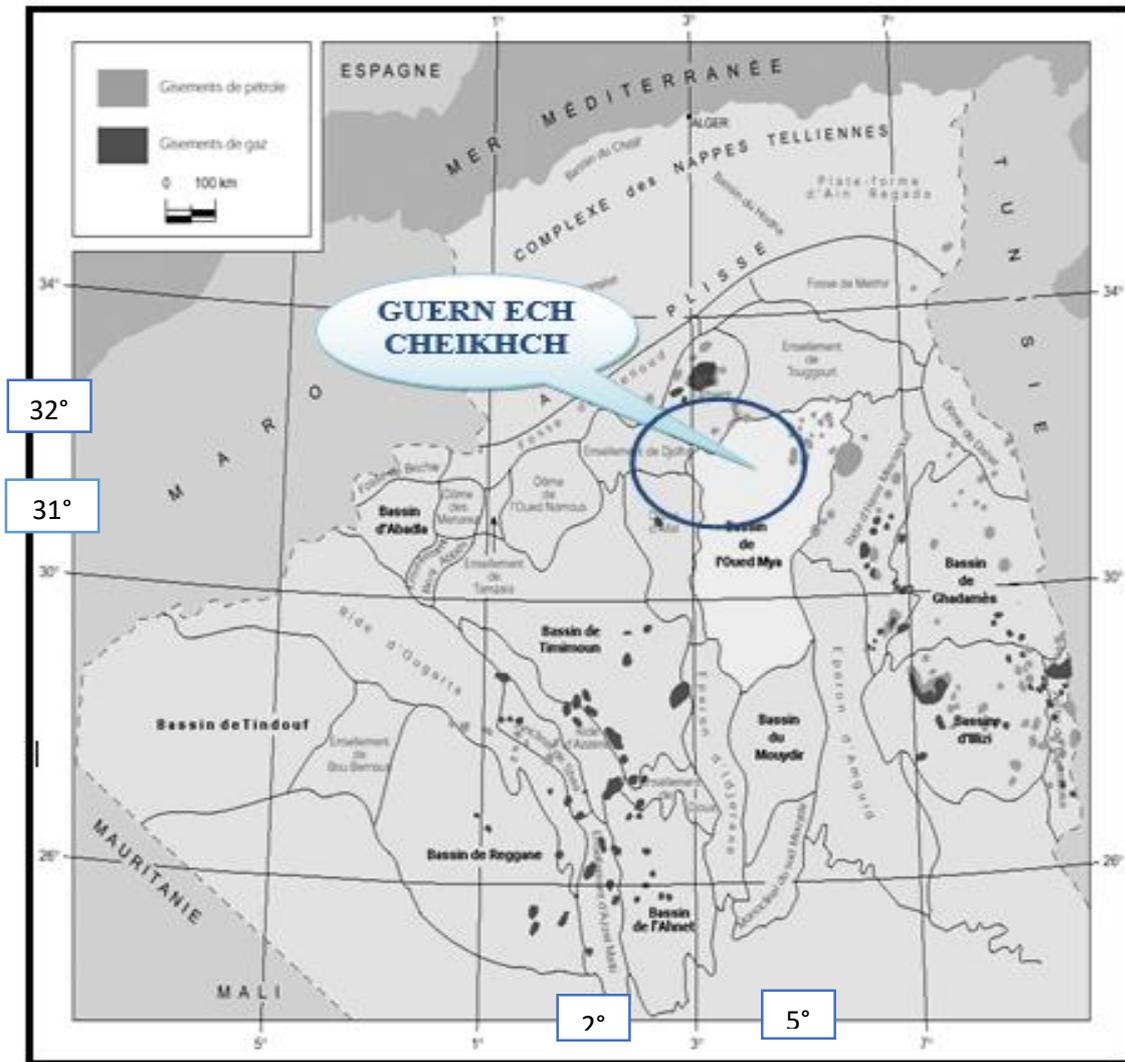


Fig V-16 Situation géographique du bassin d'oued Mya (Document de Sonatrach)

V.7.1.4.1 L'évolution Tectonique

➤ Déformations paléozoïques

- **La Phase panafricaine :** Est le résultat de collision continentale entre deux cratons : Le craton Ouest africain rigide. Et Le craton Est africain plastique. Ce qui à engendré un réseau de failles.

- **La phase tectonique** : Cette phase correspond à un mouvement compressif entraînant un soulèvement régional.
- **La phase du dévonien inférieur** : caractérisée par une période de distension.
- **La phase hercynienne** : C'est la phase principale qui a engendré des trends dans la dépression d'oued Mya.
- **Les déformations du mésozoïque**
- **La phase Rifting triasique** : Elle débute au trias supérieur est accompagné de vastes épanchements de roches volcaniques.
- **La phase autrichienne** : Caractérisée par une phase de raccourcissement entraînant une structuration importante des anticlinaux qui a servis à l'accumulation des hydrocarbures.
- **La phase pyrénéenne** : A la fin de l'éocène, on assiste à un soulèvement des zones structurales créant ainsi des anticlinaux à la fin du miocène.
 - **La phase Atlasique** : Un raccourcissement affecte le nord du bassin d'oued Mya entraînant ainsi un soulèvement de sa partie méridionale.

V.7.1.4.2 L'aspect stratigraphique

La série sédimentaire dans la région est composée par deux principaux cycles ; le Paléozoïque et le Mésozoïque, (Fig V-18).

- **Le Paléozoïque** : La phase paléozoïque est représentée par les séries suivantes :
 - **Le Cambrien** : C'est une série grés-conglomératique, d'origine fluvatile.
 - **L'Ordovicien** : Se compose de bas en haut : d'argiles d'El Gassi, des grés d'El Atchane, les quartzites de Hamra, les grés d'Ouargla, les argiles d'Azzel, les grés d'Oued Saret et les argiles micro conglomératiques et la dalle de M'krata, on distingue :
 - **L'Ordovicien inférieur** :
 - a- Les argiles d'El Gassi : Argiles noires indurées et silteuses.
 - b- Les grés d'El Atchane : Grés quartzitiques à de nombreux minéraux lourds.
 - c- Les quartzites de Hamra : grès quartzitiques à quartzites.
 - d- Les grés d'Ouargla : Représentés par des alternances de grès blancs avec des argiles indurées, silteuses, légèrement carbonatées.
 - **L'Ordovicien moyen** :
 - a- Les argiles d'Azzel : Représentée principalement par des argiles, indurées, légèrement silteuses, micacées, parfois carbonatées.
 - b- Les grés d'Oued Saret : représentés par des grés fins, légèrement dolomitiques et pyriteux, avec de l'argile silteuse.
 - **L'Ordovicien supérieur** :
 - a- Les argiles micro conglomératiques : constituées d'argiles marines, indurées, micacées, pyriteuses, La partie médiane de cette série est caractérisée par la présence d'un banc gréseux.
 - b- La dalle de M'krata : grès silteux et quartzitiques.
 - **Le Silurien** : La formation des argiles radioactives du Silurien constitue la roche mère principale de la région et présente de très bons paramètres géochimiques génératrices d'énormes quantités d'hydrocarbures, qui ont ensuite migré vers les roches magasins du Trias argilo-gréseux.

- **Le Mésozoïque** : Reposant en discordance sur les terrains paléozoïques.
- **Le Trias** : Composé de deux séries.
- a- **Le Trias argilo-gréseux** : Ce Trias est d'origine continentale, constituant le réservoir principal du gisement de GUERN ECH CHEIKH, son épaisseur est d'environ 1500 m, il se compose de bas en haut de :
 - 1- La série inférieure.
 - 2- La série éruptive.
 - 3- Le Trias gréseux : T₁.
 - 4- Le Trias gréseux : T₂.
 - 1- **La série inférieure** : Cette série géologique est constituée d'alternances de grès grossiers à la base, de grès moyens à fins, de grès fins à très fins au sommet.
 - 2- **La série éruptive** : Cette série est compacte et classiquement considérée comme couverture, bien que son étanchéité soit discutable au niveau des failles de forts rejets ou à la faveur des zones fracturées.
 - 3- **Le Trias gréseux T₁** : comprend de bas en haut une zone gréseuse et une zone argilo-dolomitique brêchique.
 - 4- **Le Trias gréseux T₂** : la base avec des grés fins sont sans intérêt réservoir notable à l'échelle de toute la zone.
- b- **La couverture mésozoïque** : correspond aux argiles et évaporites du Trias et du Lias. Elles assurent la couverture des réservoirs gréseux du Trias. Elle se compose de deux grands ensembles sédimentaires, on y distingue de bas en haut :
 - 1- Le Trias argileux salifère :
 - 2- Le Trias salifère :
 - Le Jurassique : il se compose de bas en haut des dépôts suivants :
 - 1- Lias : comportant deux séries :
 - Le Lias (S1 +S2) : composé de sel massif.
 - Lias S3 : Se compose de sel translucide
 - 2- Le Dogger : On distingue un Dogger lagunaire à la base, et un autre argileux au sommet
 - 2- Le Malm : Composée d'alternances de calcaire dolomitique et de grés.
 - Le Crétacé : On distingue de bas en haut :
 - a- Le Néocomien : Constitue un ensemble argileux à intercalations gréseuses et carbonatées.
 - b- Le Barrémien : formé de sable fin à grossier avec d'intercalations d'argile silteuses.
 - c- L'Aptien : se développe sous deux faciès :
 - Un faciès généralement plus carbonaté.
 - Un faciès argilo-sableux.
 - d- L'Albien : C'est un ensemble de grés et d'argile.
 - e- Le Cénomaniens : Une variation est notée du Sud au Nord :
 - Dans la partie sud, on trouve essentiellement des argiles et des marnes alternant avec l'anhydrite, les carbonates sont rares.
 - Dans la partie nord, au contraire, les carbonates deviennent plus abondants et alternent avec les évaporites, les argiles sont plus rares.
 - f- Le Turonien : est constitué d'un dépôt marin de calcaire
 - g- Le Sénonien : comprend les formations suivantes :

- Le Sénonien carbonaté : constitué de calcaire fossilifère, souvent dolomitique.
- Le Sénonien lagunaire : à alternance d'anhydrite massive et de dolomie.

ÈRE	SYST	ÉTAGES	Epmoy	DESCRIPTION		
CENO-ZOIQUE	CRÉTACÉ	MIO-PLIOCÈNE	30	Sable, grès et argile		
		discordance alpine				
		SÉNONIEN	CARBONATÉ	140	Calcaire dolomitique et marne	
			ANHYDRITIQUE	200	Anhydrite massive, calcaire, dolomie, argile et marne	
			SALIFÈRE	170	Sel massif, anhydrite et argile	
			TURONIEN	70	Calcaire crayeux	
			CÉNOMANIEN	145	Argile grise, anhydrite blanche, dolomie et marne	
			ALBIEN	550	Grès fins à moyen à intercalations d'argile brun-rouge et de sable grossier à la base	
			APTIEN	25	Dolomie et marne	
	BARRÉMIEN		370	Sable fin à très grossier Passées de dolomie Calcaire et marne		
	NÉOCOMIEN	150	Grès fins à moyen Passées d'argile et d'anhydrite, lignite			
	JURASSIQUE	DOGGER	MALM	210	Argile silteuse à intercalations de dolomie, de calcaire et de marne	
			ARGILEUX	140	Argile indurée	
			LAGUNAIRE	100	Anhydrite et dolomie Passées d'argile silteuse	
		LIAS	ANHYDRITIQUE	250	Anhydrite massive blanche, intercalations de dolomie et argile	
			SALIFÈRE	55	Sel massif incolore à rosé avec intercalations d'argile plastique	
			HORIZON "B"	25	Marne, argile dolomitique	
			S1 + S2	230	Sel massif incolore à rosé avec intercalations d'argile plastique	
			S3	210	Sel massif incolore avec intercalations d'argile plastique	
			ARGILES SUPÉRIEURES	70	Argile plastique salifère	
			S4	50	Argile brun-rouge parfois salifère	
		TRIASSIEN	ARGILES INFÉRIEURES	20	Argile silteuse	
			T2	20	Grès fin argilo-silteux	
			T1	20	Grès argileux	
			ROCHES ÉRUPTIVES	15	Andésite altérée	
			SÉRIE INFÉRIEURE discordance hercynienne	45	Grès fin à moyen	
		PALEOZOIQUE	DÉVONIEN INFÉRIEUR		7	Argile noire silteuse avec intercalations de grès fins
			SILURIEN RADIOACTIF		60	Argile noire radioactive et fossilifère
	ORDOVICIEN		DALLE DE M'KRATTA	10	Grès quartzitiques	
			ARGILES MICRO-CONGLOMÉRATIQUES	80	Argile noire microconglomératique	
			GRÈS DE OUED SARET	50	Argile noire à intercalations de silstone et grès fins	
			ARGILES D'AZZEL	50	Argile noire, silteuse avec passées de grès	
			GRÈS D'OURGLA	110	Argile silteuse avec intercalations de grès glauconieux ou de silstone	
QUARTZITES DE HAMRA			10	Quartzite et grès quartzitique fin à moyen, à tigillites		
GRÈS D'EL ATCHANE			45	Grès fin glauconieux à intercalation argileuse		
ARGILES D'EL GASSI	11		Argile noire silteuse glauconieuse, fossilifère à passées grés-argileuse			
CAMBRIEN	GRÈS DE MESSAOUD			Grès blanc à gris-blanc, fin à moyen, quartzitique		
SOCLE				Éléments de granite fracturé, ferromagnésiens		

Fig V-18 Fiche stratigraphique type du périmètre GUERN ECH CHEIKH (Document Sonatrach).

V.7.1.5 Intérêt pétrolier

V.7.1.5.1 Les roches mères

L'importance de la série paléozoïque est liée à la présence des roches mères du bassin, dont la plus riche est constituée par les argiles hautement radioactives du Silurien, ces argiles présentent d'excellentes caractéristiques géochimiques.

Les argiles de l'Ordovicien, notamment les argiles d'Azzel et les argiles micro conglomératiques sont aussi considérées et jugées comme intéressantes du point de vue richesse en hydrocarbures.

Les séries argilo-gréseuses du Dévonien inférieur et/ou Silurien constituent des roches mères au potentiel pétrolier moins défini. Ces dernières sont comprises entre les grès d'Ouargla et les argiles micro conglomératiques de l'Ordovicien supérieur et présentent d'importantes variations d'épaisseur.

V.7.1.5.2 Les roches réservoirs

Le Trias argilo-gréseux est relativement peu puissant, renfermant les principaux réservoirs, constitués par les séries suivantes :

- 1- La série inférieure.
- 2- Le Trias T₁, Le Trias T₂.

Les trois (3) gisements de la région produisent de l'huile à partir de la série inférieure et du réservoir T₁.

V.7.1.5.3 Les roches couvertures

La couverture du Trias argilo-gréseux est parfaitement assurée à l'échelle régionale par une puissante série évaporitique représentée par environ 1000 m de sel et d'anhydrite, allant du Trias S₄ au Lias anhydritique. Au Sud de la région, cette Couverture est directement transgressive sur le substratum paléozoïque, assurant ainsi la couverture des biseaux des différents réservoirs du Trias.

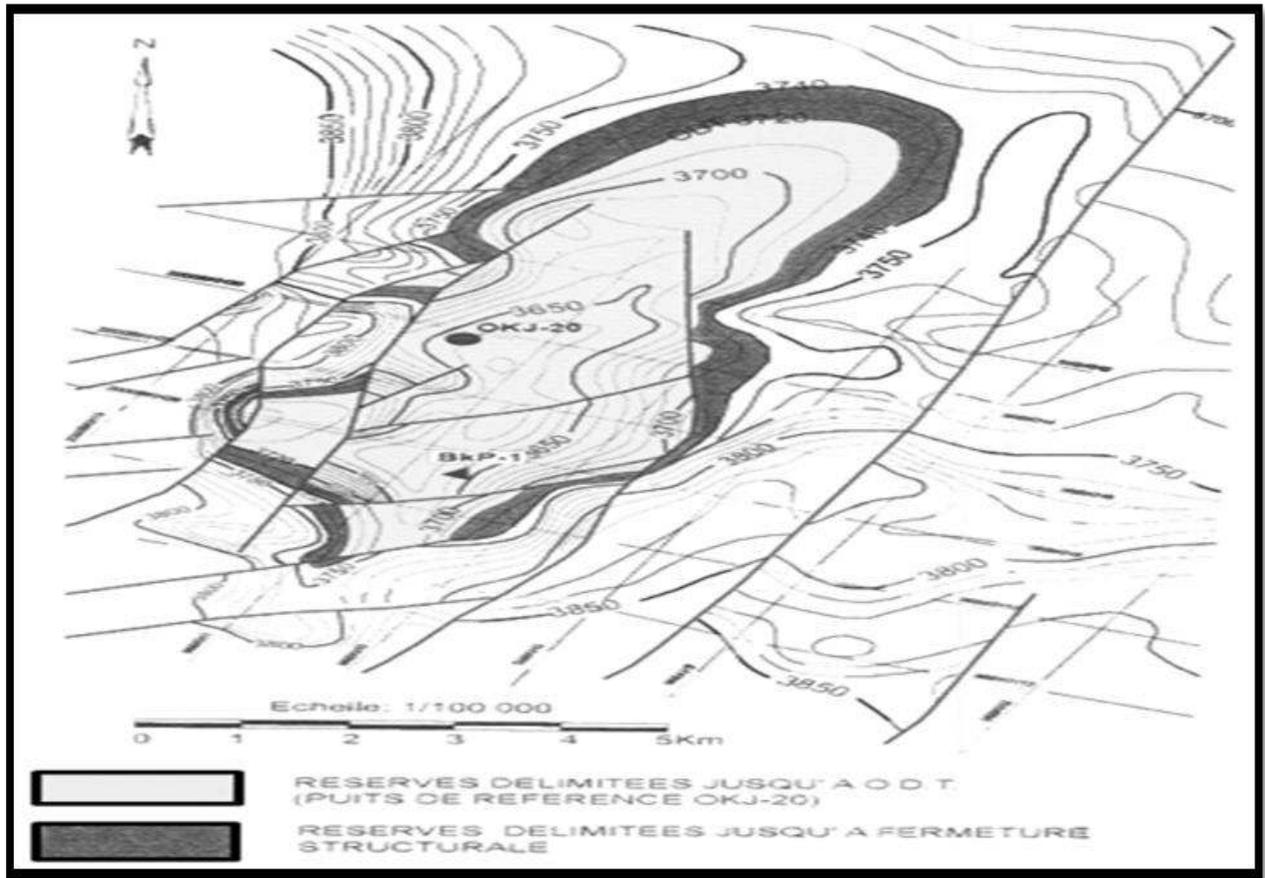


Fig V-19 Cartes en isobathes du périmètre GUERN ECH CHEIKH (Document de Sonatrach).

V.7.1.6 Travaux antérieurs réalisés dans la zone d'étude

La figure (V-20) montre le plan de position du prospect. Les puits et les profils sismiques 2D qui y sont positionnés seront utilisés durant notre étude.

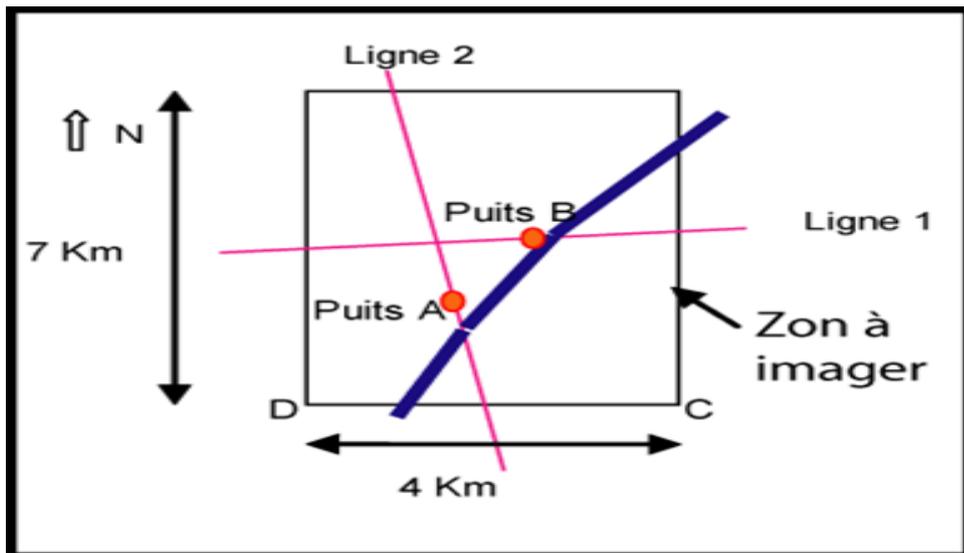


Fig V-20 Plan de position de la zone d'étude (Document Sonatrach).

V.7.1.6.1 Définition des objectifs

Les deux profils 2D (ligne 1 et 2) représentés sur la figure (V-20 et V-21) offrent quelques informations sur les caractéristiques des horizons enregistrés :

- **Type du réservoir** : réservoir gréseux
- **Temps de l'horizon superficiel considéré (Shallow marker)** : $T_{sh}=500$ ms (td)
- **Profondeur de l'horizon le plus profond** : 2800-3000m
- **Vitesse d'intervalle au niveau de l'horizon le plus profond** : $V_{int}=3700$ m/s.
- **Pendage des structures** : entre 5° et 14° .
- **Direction des structures** : structure faillée de direction SW-NE.

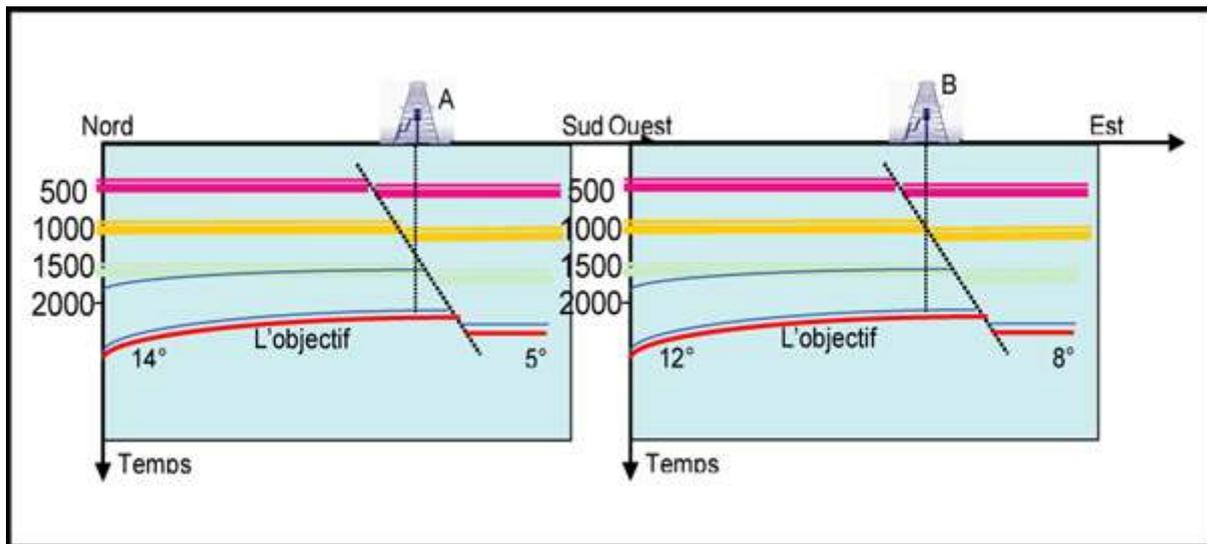


Fig V-21 Profil sismique 2D. Ligne 2 (à gauche), ligne 1 (à droite) (Document Sonatrach).

V.7.1.6.2 Documents utilisés

- Deux profils sismiques 2D, passant par deux puits ;
- Analyse fréquentielle appliquée sur la ligne sismique (1), au niveau de l'horizon objectif ;

V.7.1.7 Les paramètres d'acquisition

Survey site		3D-GEH_Partie I & II	
		Orthogonal Shooting	
		Partie II	Partie I
Template information			
Number of receiver lines in template		24	26
Number of receivers per line		130	168
Number of receivers in template		3120	4368
Number of shots in Template (salvo)		5	6
InLine Template roll (m)		200	180
Cross line Template roll (m)		200	180
Station information			
Total Receiver lines		404	207
Max receivers per line		929	866
Receiver interval (m)		40	30
Receiver line interval (m)		200	180
Receiver Line Orientation (°)		122.5°	122.5°
Live stations		254979	101406
Total length (km)		10183.00	2923.15
Station density (st/sq.km)		125	185.18
Source information			
Total Source lines		262	145
Source interval (m)		40	30
Source Line interval (m)		200	180
Source density (shots/sq.km)		125	185.18
Source Line Orientation (°)		32.5°	32.5°
Live shots		255282	101971
Fired shots		255282	101971
Total Length		10210.36	2939.43
Survey size information			
Maximum X extend (m)		52317	25978
Maximum Y extend (m)		80746	37229
Surface full fold (sq.km)		1728	409
Surface outline (sq.km)		2040.49	547.68
Fold information			
Minimum Fold		156	182
Maximum fold		156	182
Bin information			
Bin width (m)		20	15
Bin height (m)		20	15
Maximum Offset (m)		3510	3417.7
MIN Maximum Offset (m)		2580	2505
MAX Minimum Offset (m)		254.55	233
Minimum Offset (m)		28.28	21.2

Fig V-22 Les paramètres d'acquisition du projet GEH-3D. (ENAGEO-290).

V.7.2 Les paramètres d'acquisition

Le projet se réalise de 13 à 12 mois on appliquant la méthode conventionnelle c'est pour cela qu'il a été décidé de faire des tests de démarrage afin d'étudier la faisabilité d'utiliser la méthode slip sweep pour réduire la durée du projet entre 6 à 8 mois.

Donc il s'agit essentiellement d'un test de paramètre de sweep et plus précisément :

- Le nombre de sweeps par VP.
- Le nombre de vibrateurs par set.
- La longueur du sweep.

Le problème qui se pose est que pour maximiser la productivité en appliquant la méthode slip sweep on est obligé de réduire le nombre de sweep par VP à un (1) sweep. Ainsi que le nombre de vibrateur par groupe afin d'augmenter le nombre de groupes de vibrateurs. Ceci va entraîner la réduction de l'énergie émise. En contrepartie, on peut augmenter la longueur du sweep de façon à compenser une partie de l'énergie perdue et éviter l'influence des harmoniques.

Pour cette raison on a réalisée, en mode conventionnel, les tests suivants sur une portion de swaths (400 VPs a peu pres pour assurer la couverture complète) :

- ✓ 03 sets de 04 Vbs/groupe : un (01) sweep de 14 sec.
- ✓ 03 sets de 04 Vbs/groupe : deux (02) sweep de 14 sec.

- ✓ 04 sets de 03 Vbs/groupe : un (01) sweep de 14 secs.
- ✓ 04 sets de 03 Vbs/groupe : un (01) sweep de 16 secs.
- ✓ 04 sets de 03 Vbs/groupe : un (01) sweep de 18 secs.

V.7.2.1 Analyse des résultats

Les résultats du traitement sont présentés dans les Figs suivantes : V-23, 24, 25, 26,27.



Fig V-23 stack en couverture complète du premier test avec 03 groupes de 04 Vbs/groupe : un (01) sweep de 14 sec.

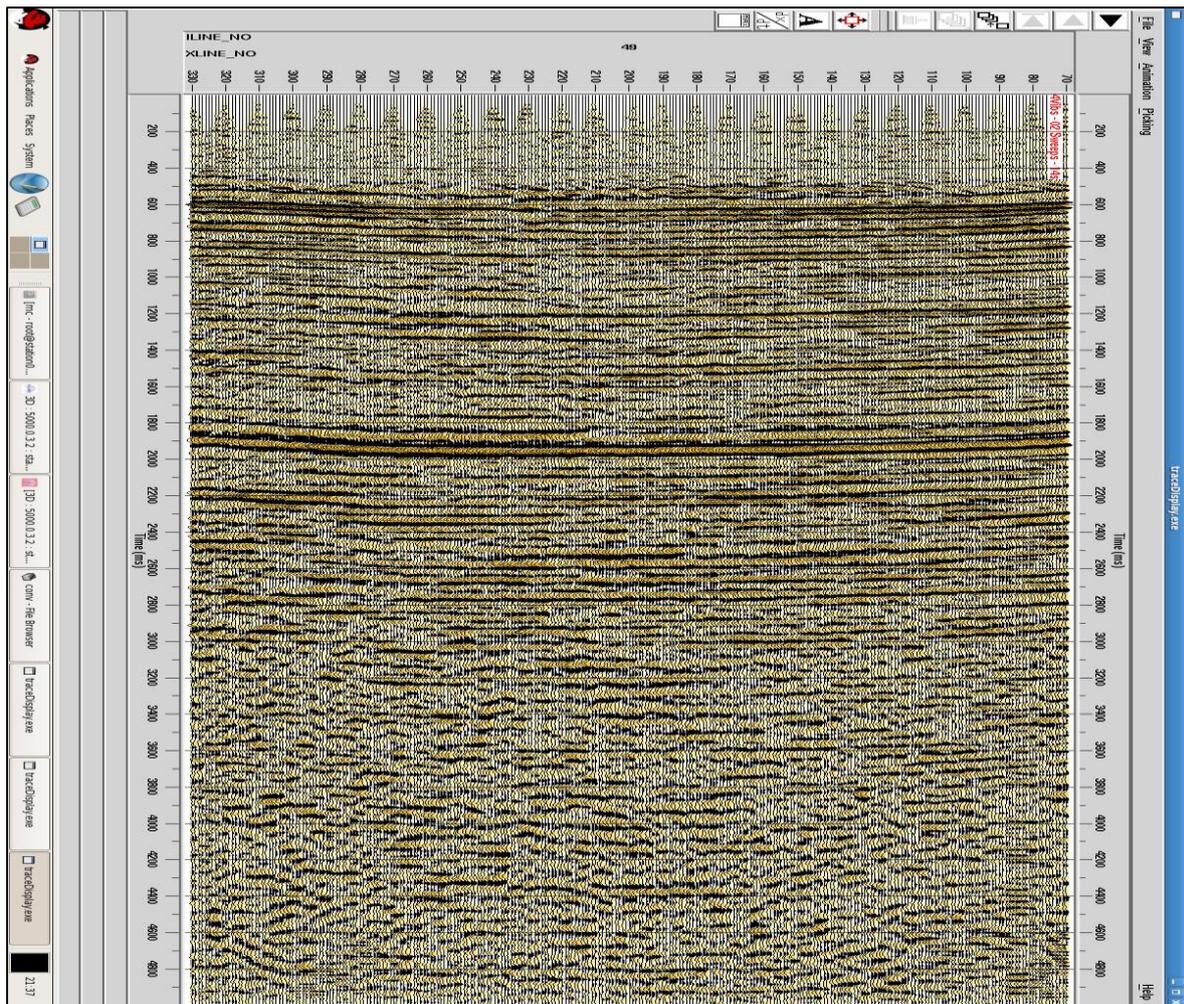


Fig V-24 stack en couverture complète du deuxième test avec 03 groupes de 04 Vbs/groupe : deux (02) sweep de 14 sec.

V.7.2.1.1 Effet du nombre du sweep

D'après le premier et le deuxième test, (**Fig V-23**) et (**Fig V-24**) on conclut que l'utilisation d'un deuxième sweep n'a pas de résultat remarquable sur le rapport S/B. c'est pour cela l'utilisation d'un (01) sweep c'est suffisante.

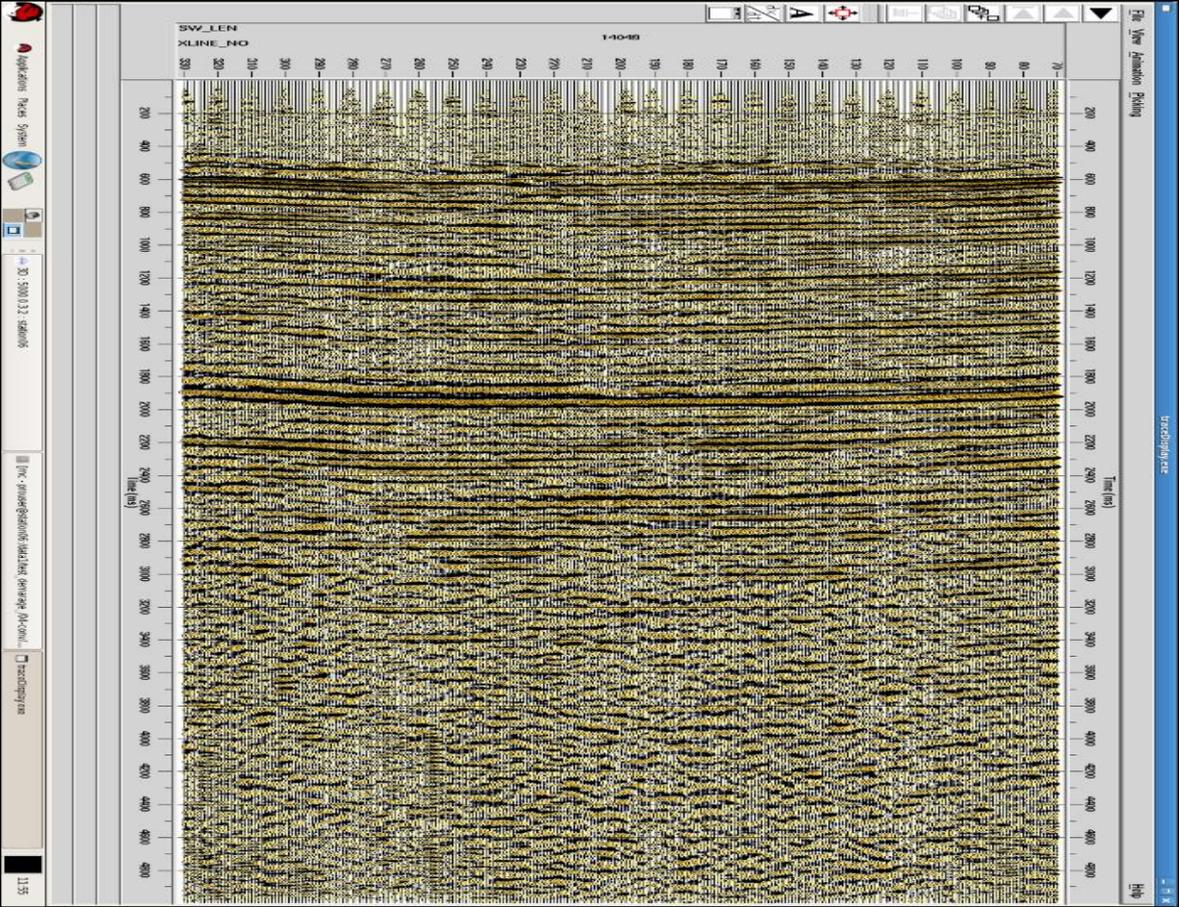


Fig V-25 stack en couverture complète du troisième test avec 03 groupes de 04 Vbs/groupe : un (01) sweep de 14 sec.

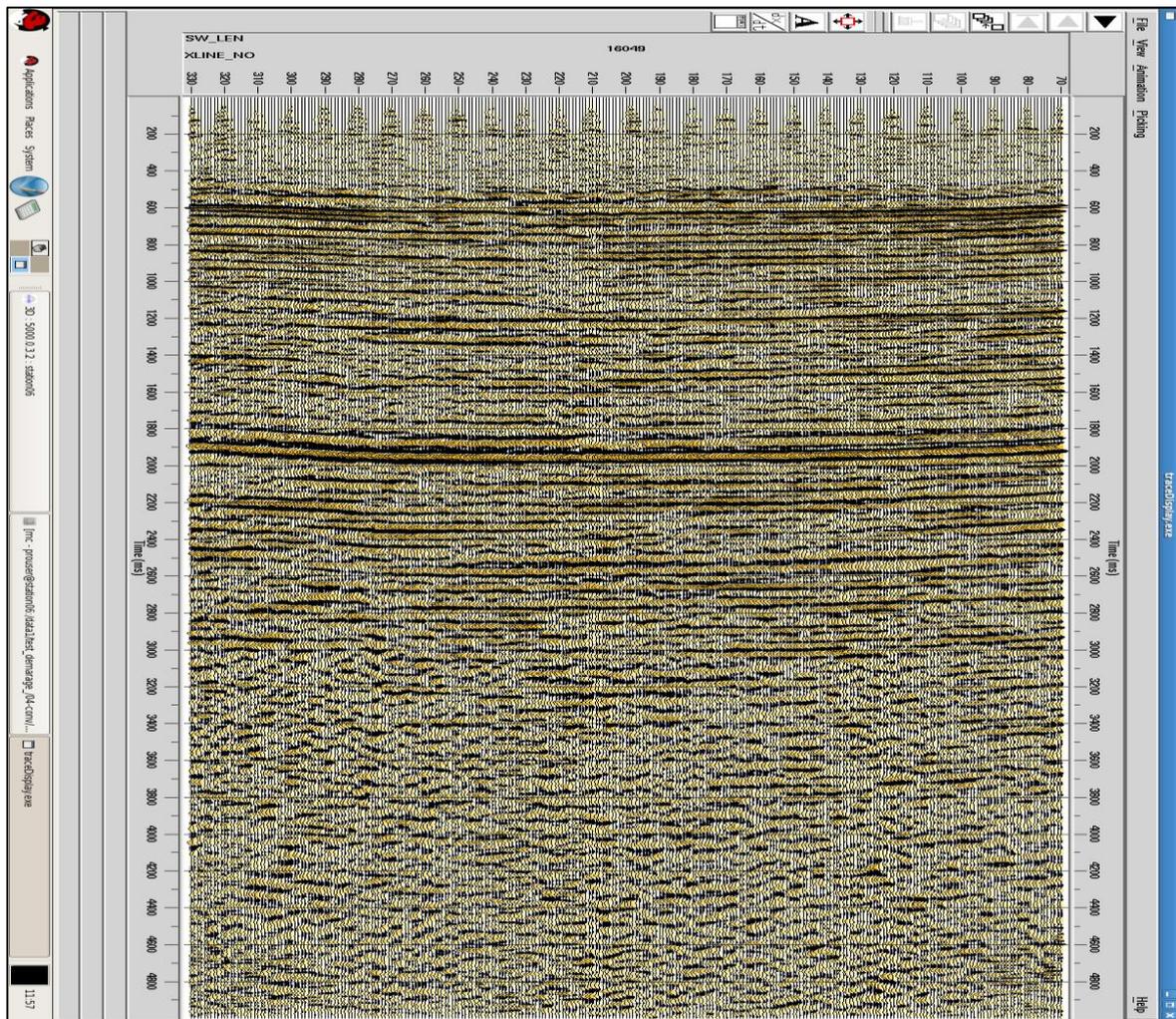


Fig V-26 stack en couverture complète du quatrième test avec 04 groupes de 03 Vbs/groupe : un (01) sweep de 16 sec.

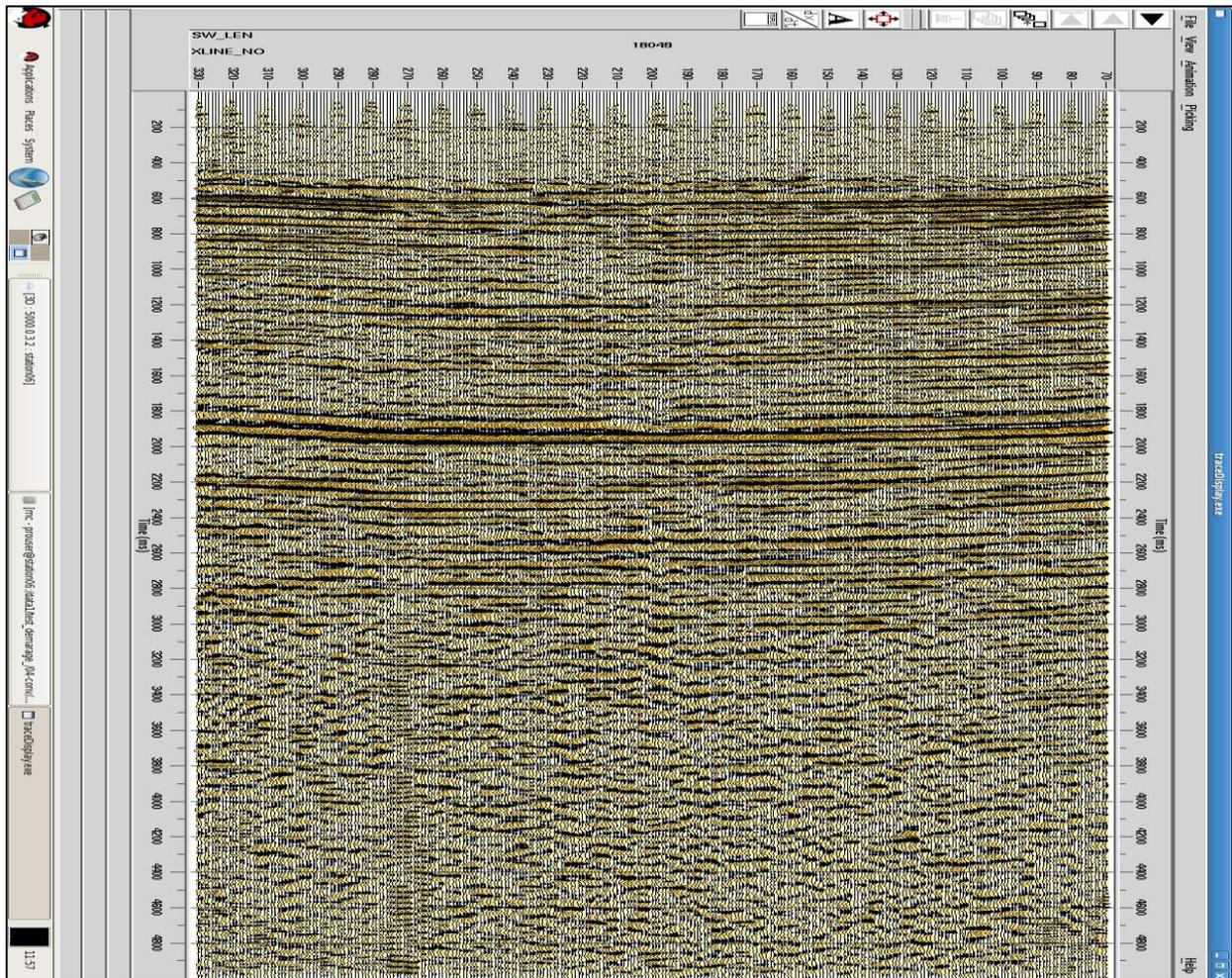


Fig V-27 stack en couverture multiple du cinquième test avec 04 groupes de 03 Vbs/groupe : un (01) sweep de 18 sec.

V.7.2.1.2 Effet de la longueur du sweep

En comparant les stacks du troisième, quatrième, et cinquième, (**Fig V-25**, **Fig V-26**, **Fig V-27**) avec le premier et le deuxième, (**Fig V-23**, **Fig V-24**) on peut constater que l'effet du 03 Vbs/GR est similaire à celui du 04 Vbs/groupe pour les zones d'intérêt ce qui nous amène à diminuer le nombre de vibrateurs par sets et augmenter le nombre de sets afin de maximiser la productivité et minimiser le cout du projet.

Finalement le client a décidé d'utiliser 04 Vbs/groupe pour avoir plus d'énergie émise et une longueur de 16 sec.

V.7.3 Fonctionnalité du logiciel ENAGEO-ADVANCE

ENAGEO-ADVANCE est un logiciel professionnel de réduction des bruits harmoniques, il est basé sur l'algorithme ENAGEO-ADVANCE développé en 2006 par l'ENAGEO. Il permet de réaliser quotidiennement des contrôles de qualités sur les données de chaque vibrateur. Il présente une interface graphique, interactive, performante, efficace et facile à utiliser. Ainsi, il permet d'organiser les données d'un projet sous forme de sous répertoire journalier et d'afficher les correspondances entre les VPs, les GFs ainsi que leurs informations.

Il permet aussi l'analyse directe du spectre d'une trace avant et après filtrage ainsi que le spectre moyen d'un VP et d'analyser directement le spectre temps-fréquence (F-T) d'un trace avant et après filtrage et du bruit estimé.

La procédure de travail sur terrain est représentée comme suit (la Fig V-28) :

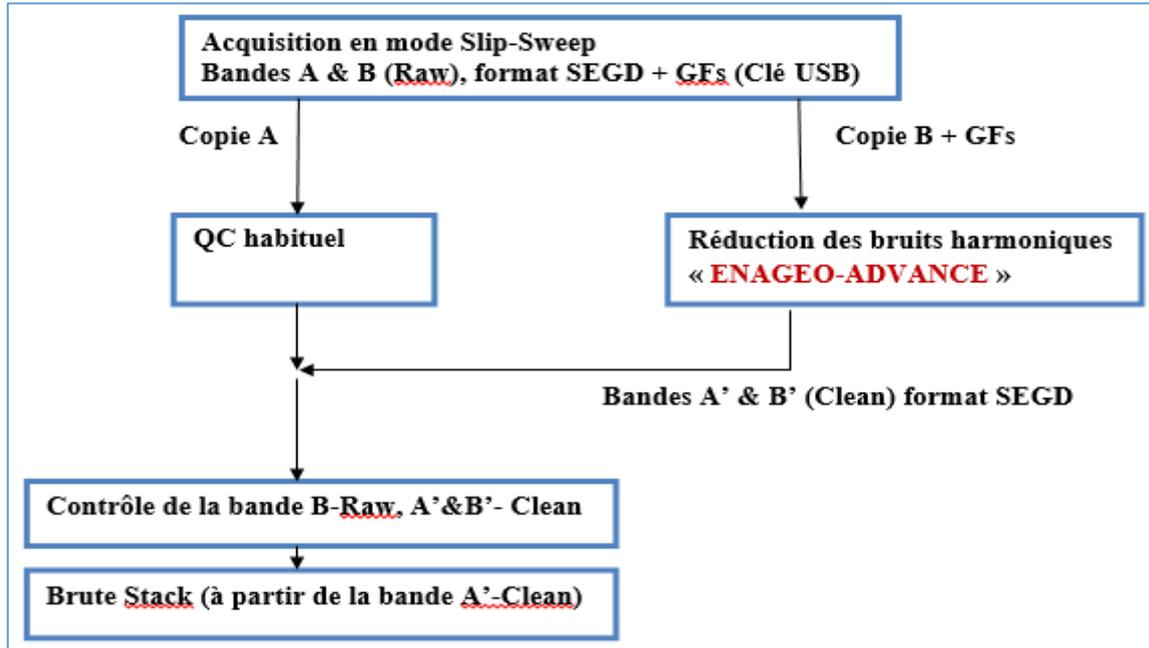


Fig V-28 Procédure opératoire sur terrain.

V.7.3.1 Application de l'algorithme ENAGEO-ADVANCE sur des données réelles

Les Figs suivantes (V-29, V-30, V-31, V-32, V-33) montrent l'impact des bruits harmoniques sur la dégradation du data, et l'efficacité de ce nouveau filtre sur les données réelles tel que la (Fig V-29-a) qui représente l'enregistrement contaminé par des bruits harmoniques. Après le passage sur l'algorithme de filtrage, les bruits soustraits sont présentés sur la (Fig V-29-b). La (Fig V-29-c) représente un enregistrement d'ébruité et claire.

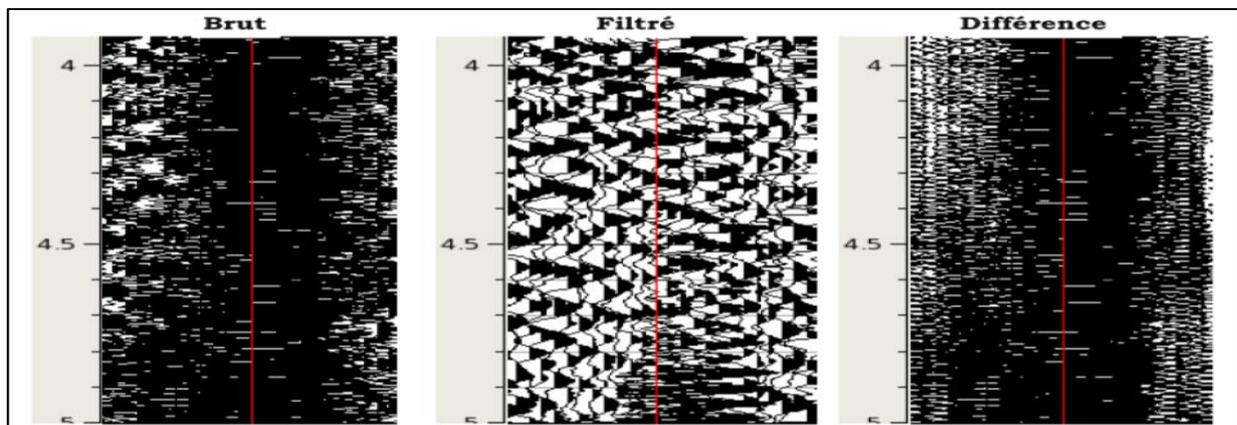


Fig V-29-a

Fig V-29-b

Fig V-29-c

Fig V-29 représente un enregistrement des données sismiques avant et après filtrage (EGS-290).

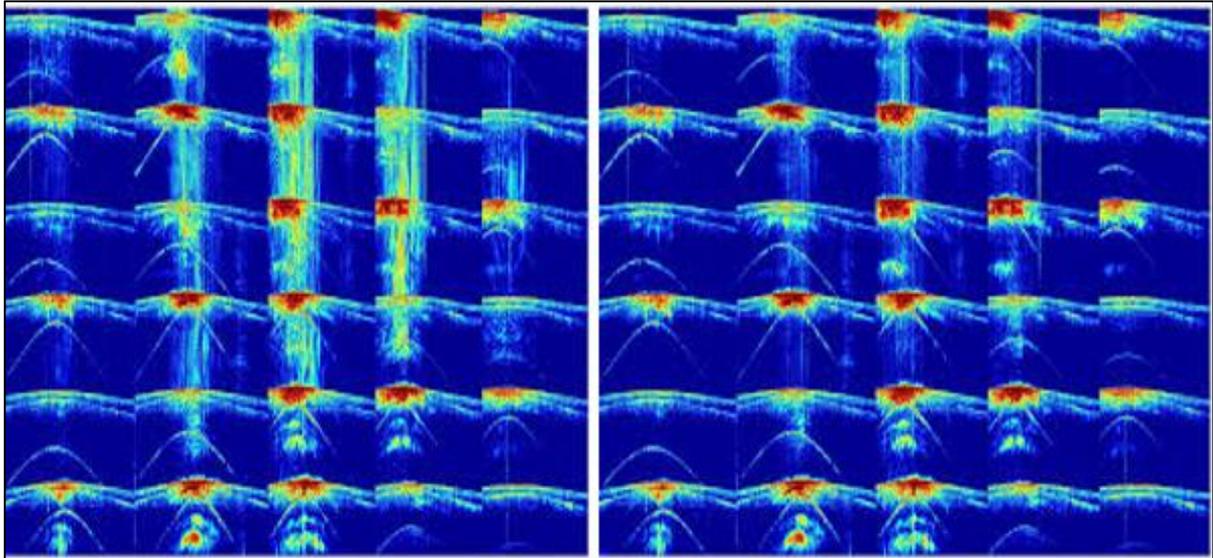


Fig V-30 Différence entre un tir après et avant le filtrage, (ENAGEO/EGS-290).

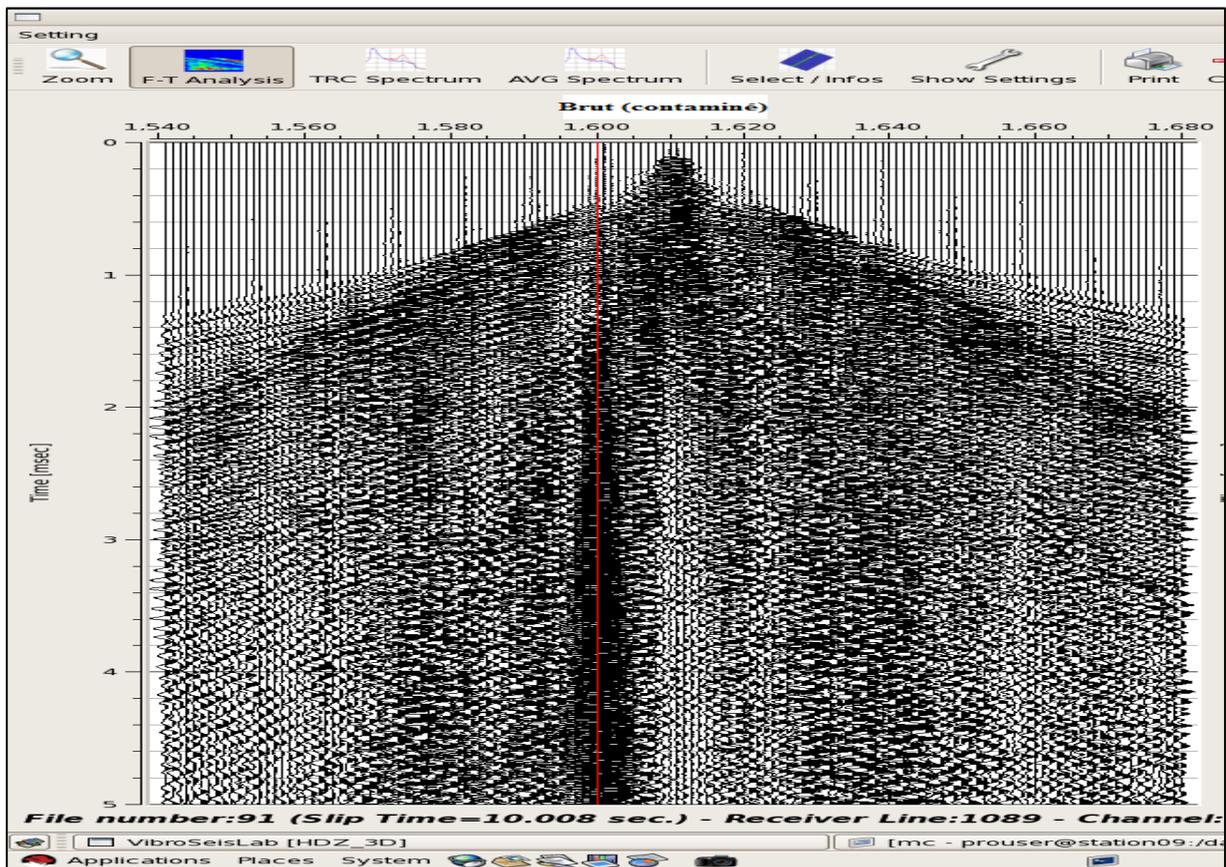


Fig V-31 enregistrement terrain corrélés brut (avant filtrage), avec un slip time de 10.008sec.

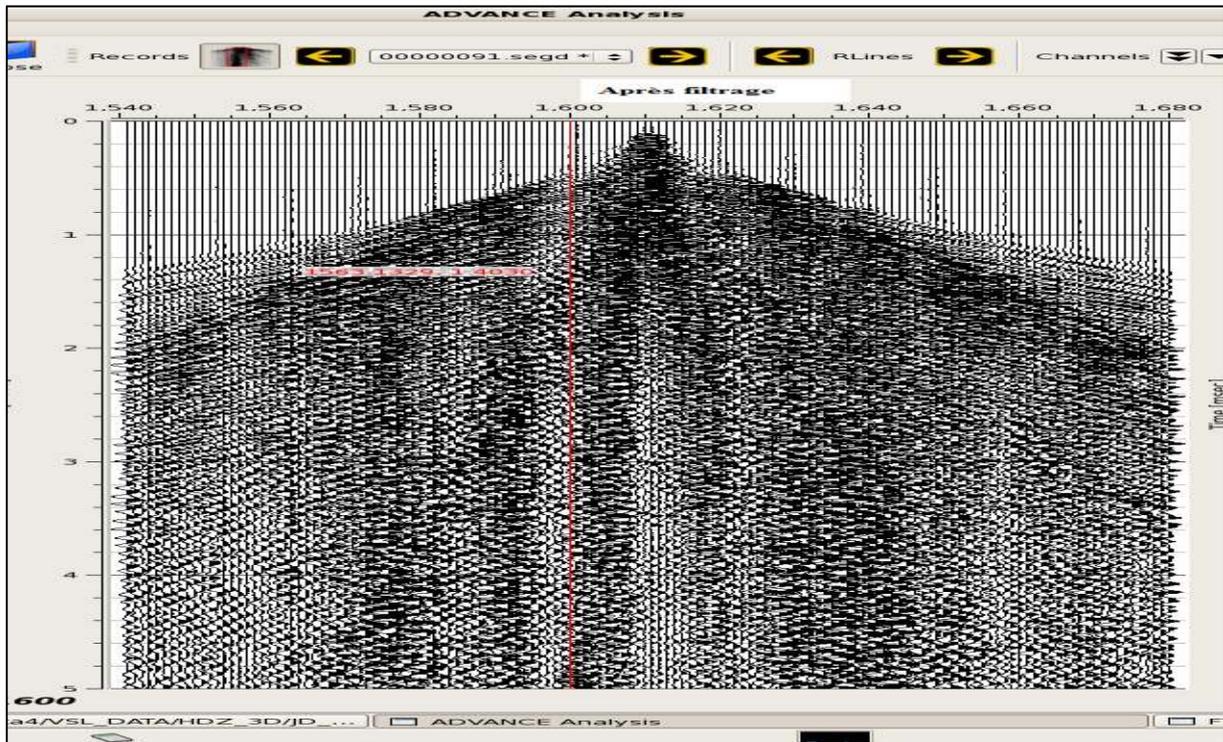
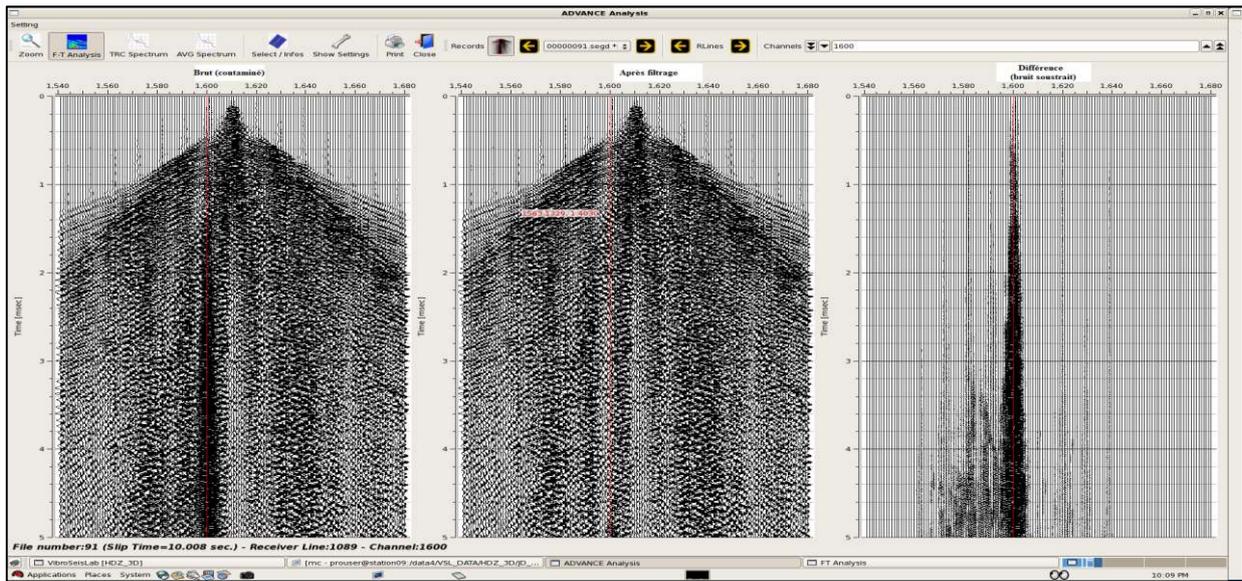


Fig V-32 enregistrement terrain corrélés après filtrage avec un slip time de 10.008sec.



A

B

C

Fig V-33 Enregistrement terrain corrélés avant et après filtrage obtenu avec un slip time 10.008 et les harmoniques enlevés de ces enregistrements.

- (A) Enregistrement terrain corrélés avant filtrage
- (B) Enregistrement terrain corrélés après filtrage
- (C) Les harmoniques enlevés des ces enregistrements

La Fig V-34 montre le spectre moyen des memes enregistrements précédentes avant et après filtrage. On note que la partie contaminée se trouve dans les hautes fréquences.

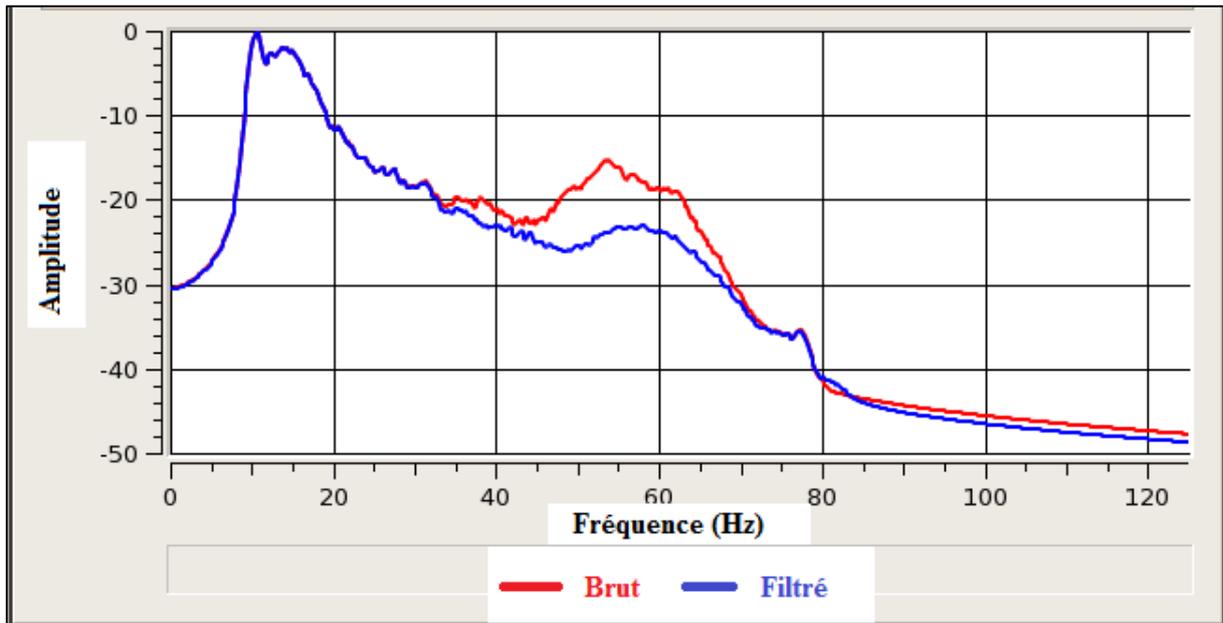


Fig V-34 spectre moyen d'enregistrement corrélé.

Les bruits harmoniques apparaissent sur la plan F-T dans la partie négative du signal utile comme il est montré sur la Fig V-35.

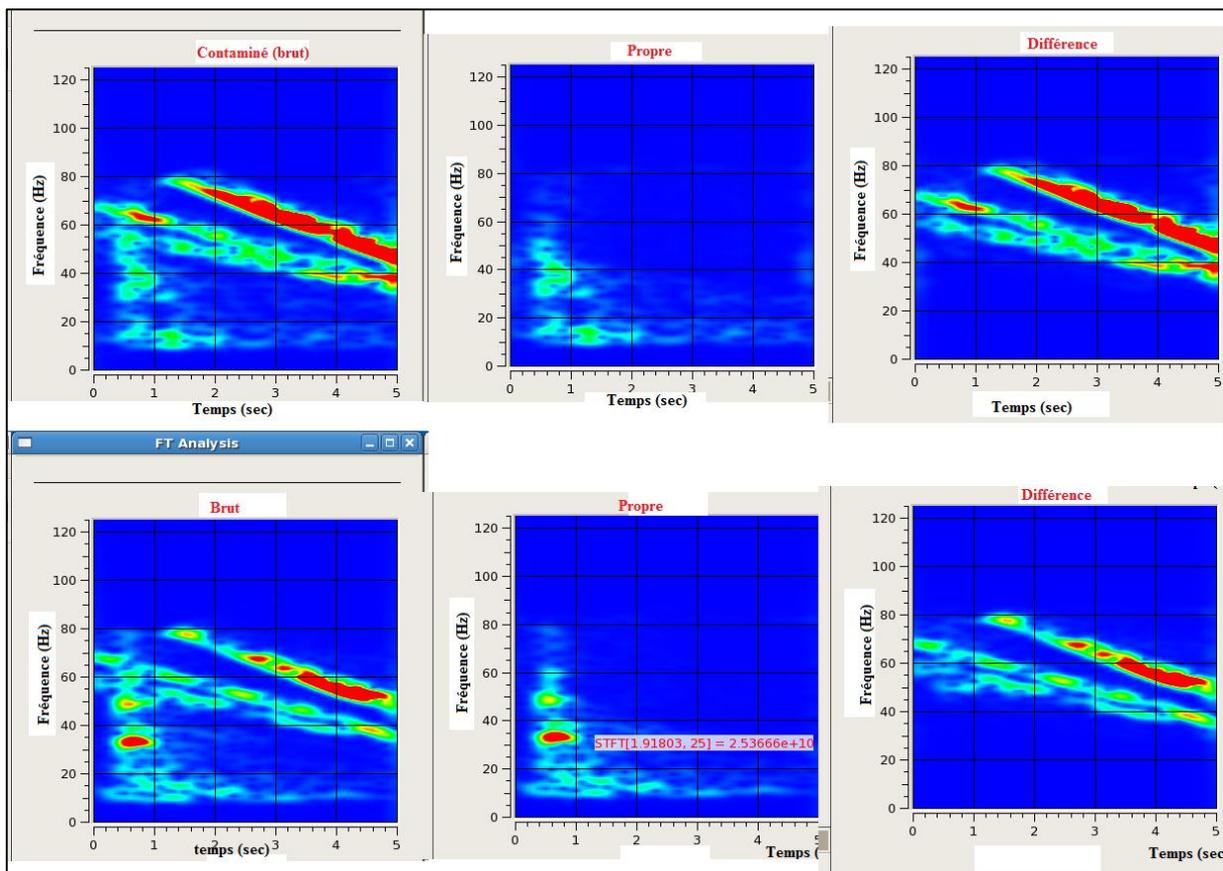


Fig V-35 présente la projection F-T d'une seule trace (selectionnée en rouge) de l'enregistrement précédente avant et après filtrage.

V.7.3.2 Procédure de réduction du bruit harmonique par le filtrage d'ADVANCE-ENAGEO

Pour éliminer les bruits harmoniques on applique l'algorithme de l'ENAGEO-ADVANCE sur des enregistrements mère obtenu à partir de signaux réels émis par le Vbroseis GF.

L'élimination des harmoniques nécessite le calcul d'un opérateur, qui est le rapport des densités spectrales de la composante harmonique et de la composante fondamentale. On estime ces composantes à partir du signal Grounds-Force, par une technique de séparation à deux options, moindres carrées, ou temps-fréquence.

Ces deux derniers sont adaptés à la composante pour extraire et subdiviser ce bruit en classes. Ensuite On calcule les harmoniques propres à l'enregistrement considéré et on procède à leur soustraction de l'enregistrement contaminé d'où la nécessité de recalculer à chaque fois un nouvel opérateur pour chaque trace afin d'estimer les harmoniques. La Fig V-36 illustre un sweep pilote, un signal ground force réel, le signal fondamental et les composantes harmoniques.

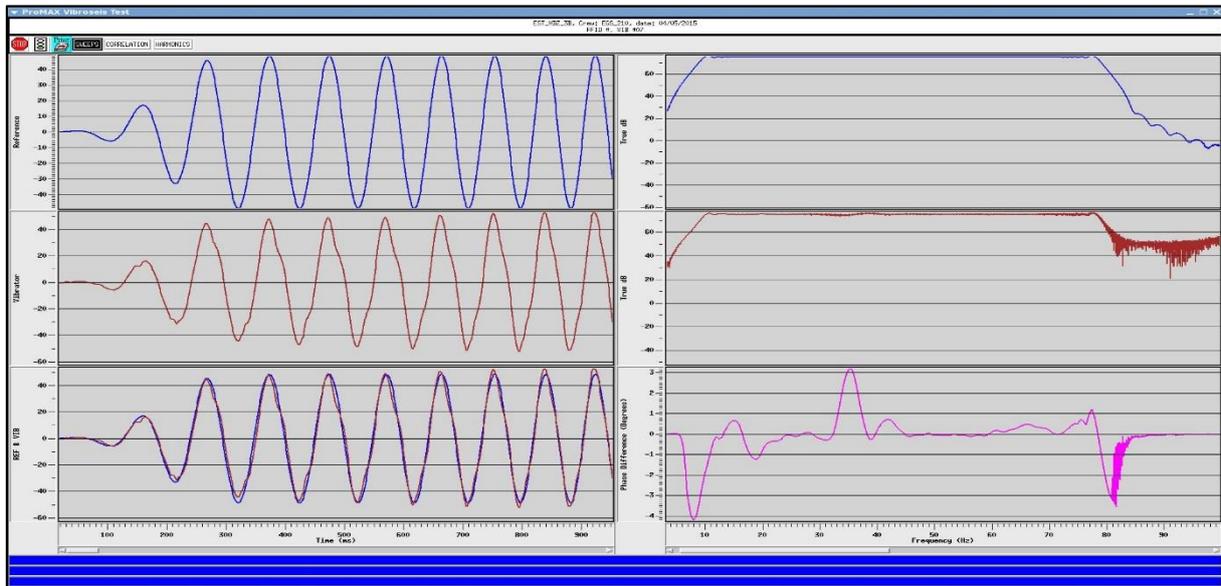


Fig V-36 différents types de sweeps en bleu : le sweep pilote en rouge : le signal GF en mauve : le signal fondamental et le GF (composantes harmoniques).

On remarque sur cette Figure que le signal réel émis (GF) diffère du signal désiré (pilote) à cause du non linéarité du système Vbroseis et le mauvais couplage de la base plate avec le sous-sol. La différence entre le GF et le fondamental est représenté par les harmoniques.

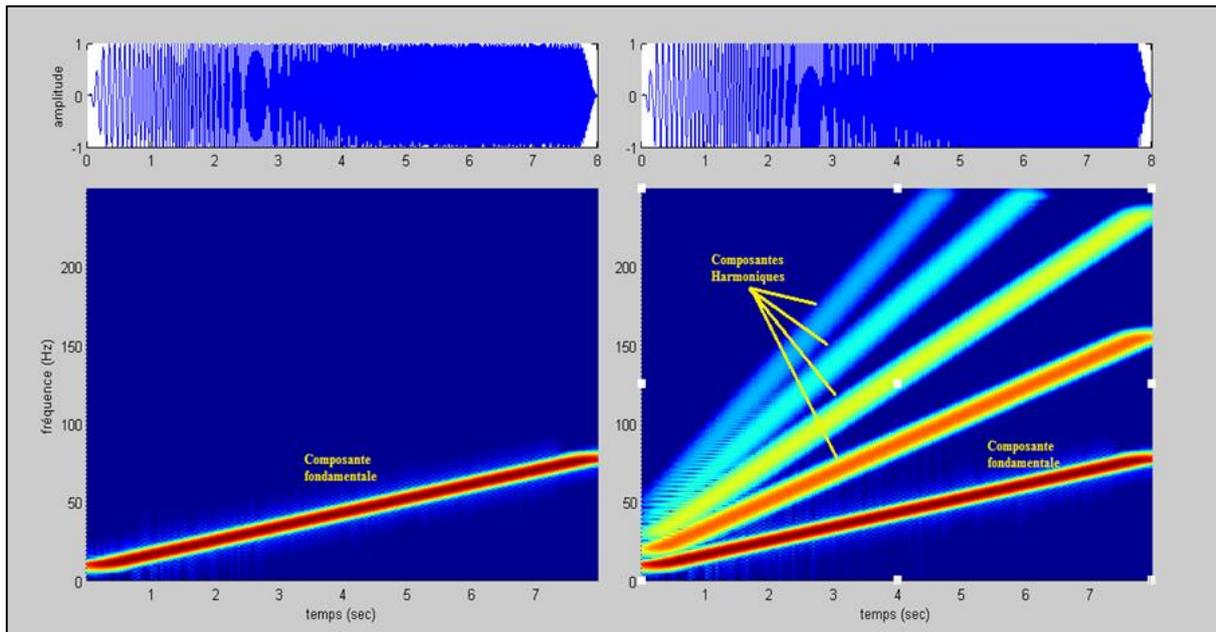


Fig V-37 représentation F-T de signal fondamentale et ses résidus (harmoniques).

L'énergie des harmoniques est relative à l'énergie du VP qui les engendre, c'est-à-dire les harmoniques générés par l'enregistrement le plus énergique sont forts et affectent plus les VPs voisins, d'où la nécessité de les éliminer.

Pour l'élimination de ces harmoniques, l'algorithme présente une grande souplesse dans le traitement il prend en charge, un par un, ou par combinaison, toutes les catégories du bruit harmonique. Tout d'abord, on commence par estimer les harmoniques du dernier VP réalisé (quatrième VP) car il n'est pas contaminé par les harmoniques d'un autre VP. Ensuite, on soustrait ces harmoniques du Vp lui-même et du VP précédente avec une soustraction simple (**Fig V-38**). Une fois le VP_n « désinfecté », il peut servir à son tour pour traiter le VP_{n-1} en suivant la même procédure jusqu'au premier VP réalisé.

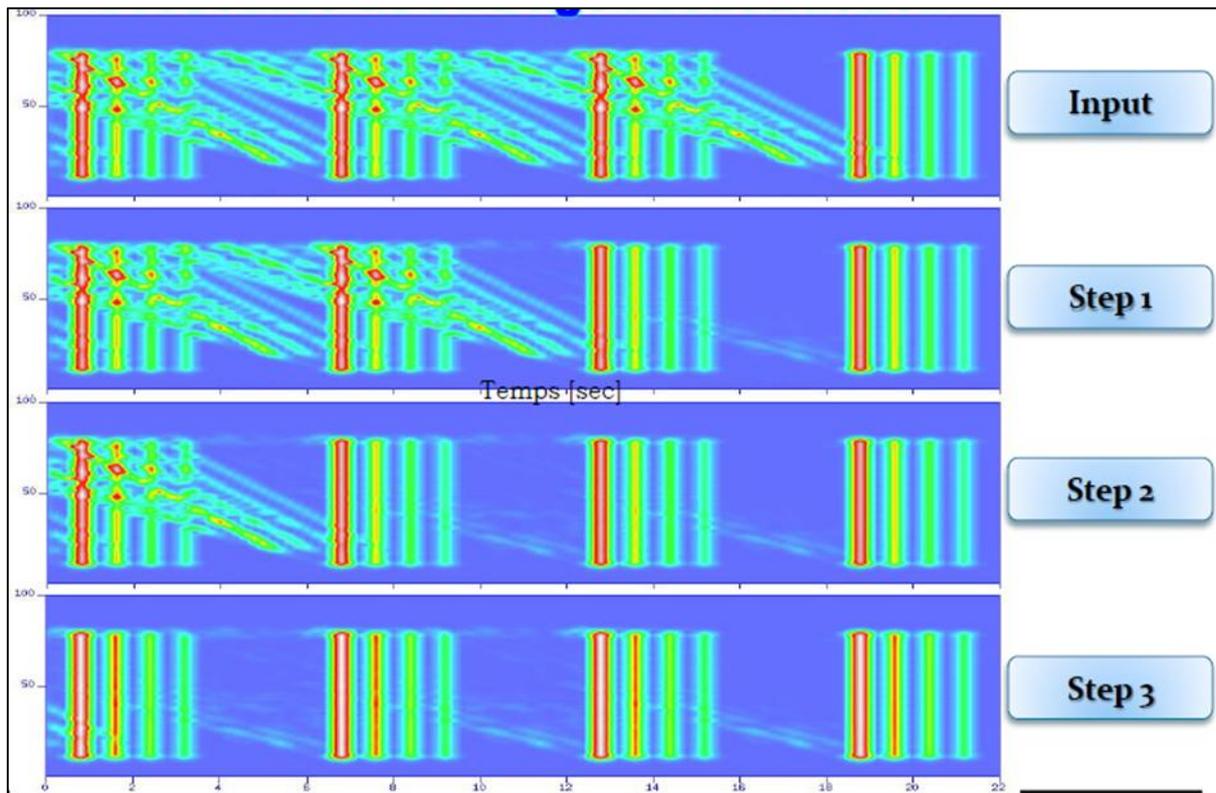


Fig V-38 étapes du filtrage des bruits harmoniques (la soustraction).

D'abord on remarque la disparition des harmoniques générés par le dernier VP qui affecte le troisième VP. aussi que Les réflexions meme de faible amplitude sont devenue Visible. Puis on utilise ce VP pour nettoyer le deuxième VP. Ensuite la disparition des harmoniques générés par le troisième VP qui contamine le deuxième VP. Pour désinfecter le premier VP, on utilise le deuxième VP. Finalement on applique le filtrage du premier VP réalisé. Afin d'éliminer tous ces résidus on utilise une soustraction adaptative au lieu d'une soustraction simple.

Les Figs (V-39, V-40, V-41, V-42, V-43 V-44, V-45) expliquent un test réalisé dans le projet Guerne Eh Cheikh tels que les shotes, spectre d'amplitude et spectre de fréquence en mode slip sweep (bruité et non bruité) vis-à-vis du mode conventionnel.

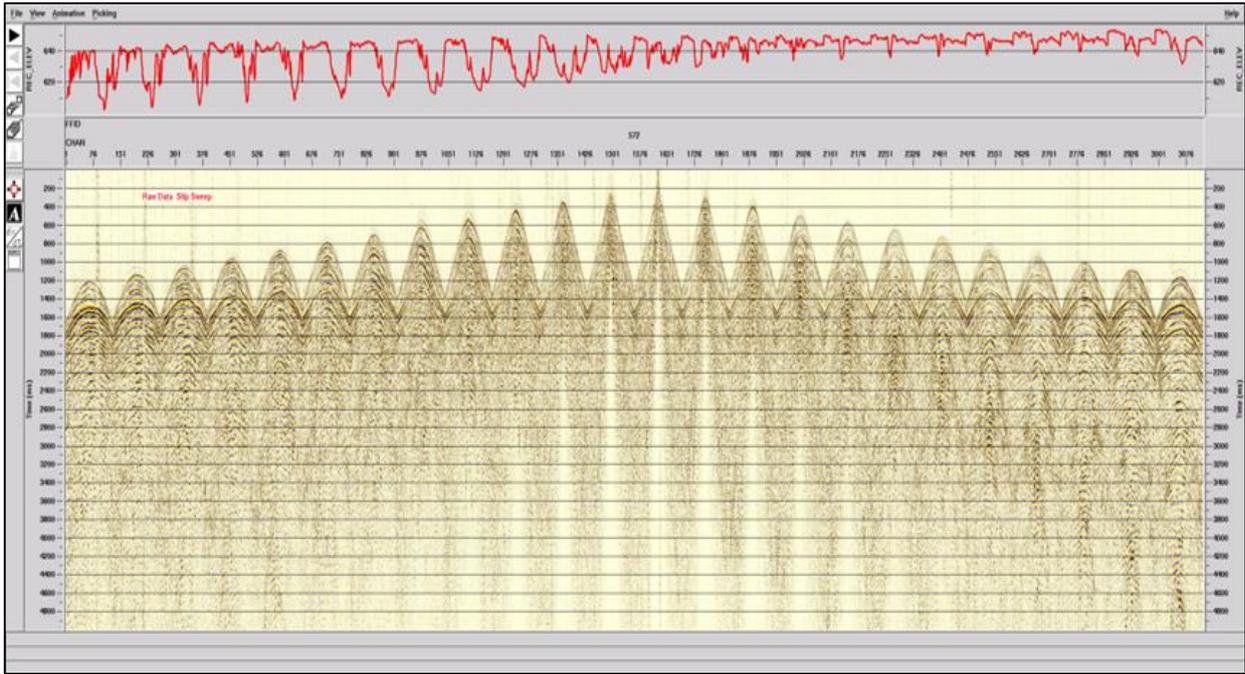


Fig V-39 enregistrement terrain corrélés (bruts), en mode slip sweep.

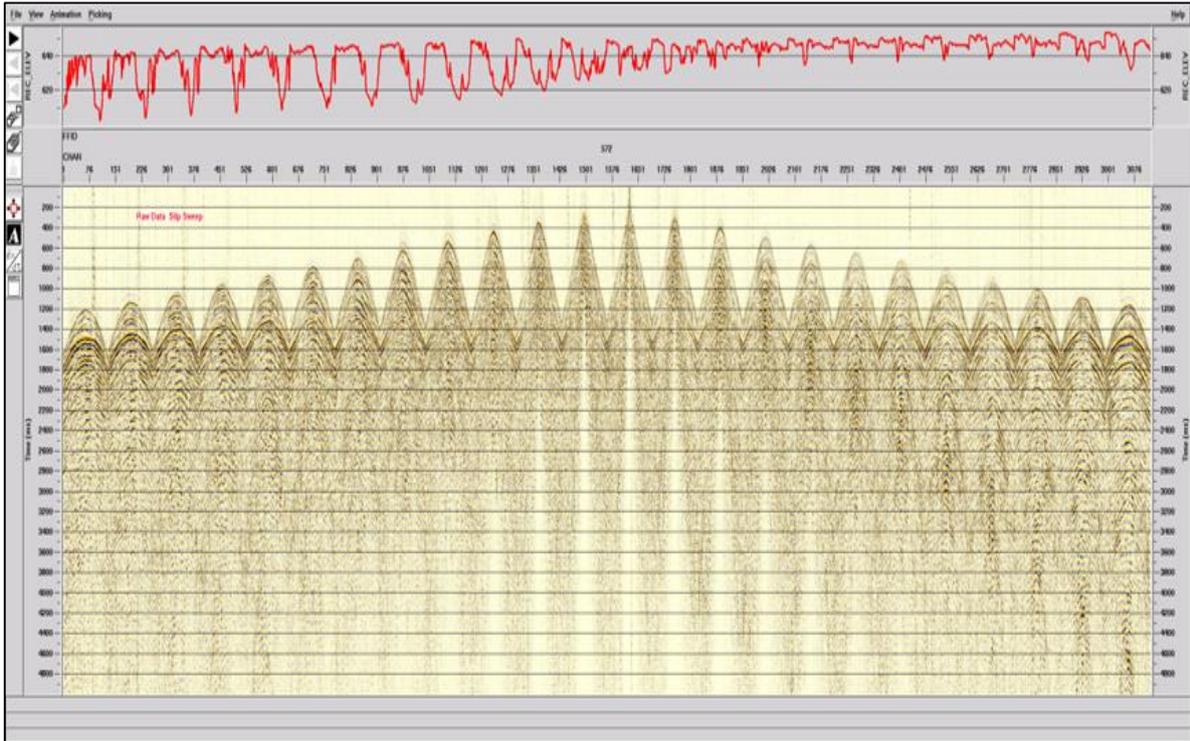


Fig V-40 enregistrement terrain corrélés après filtrage en mode slip sweep.

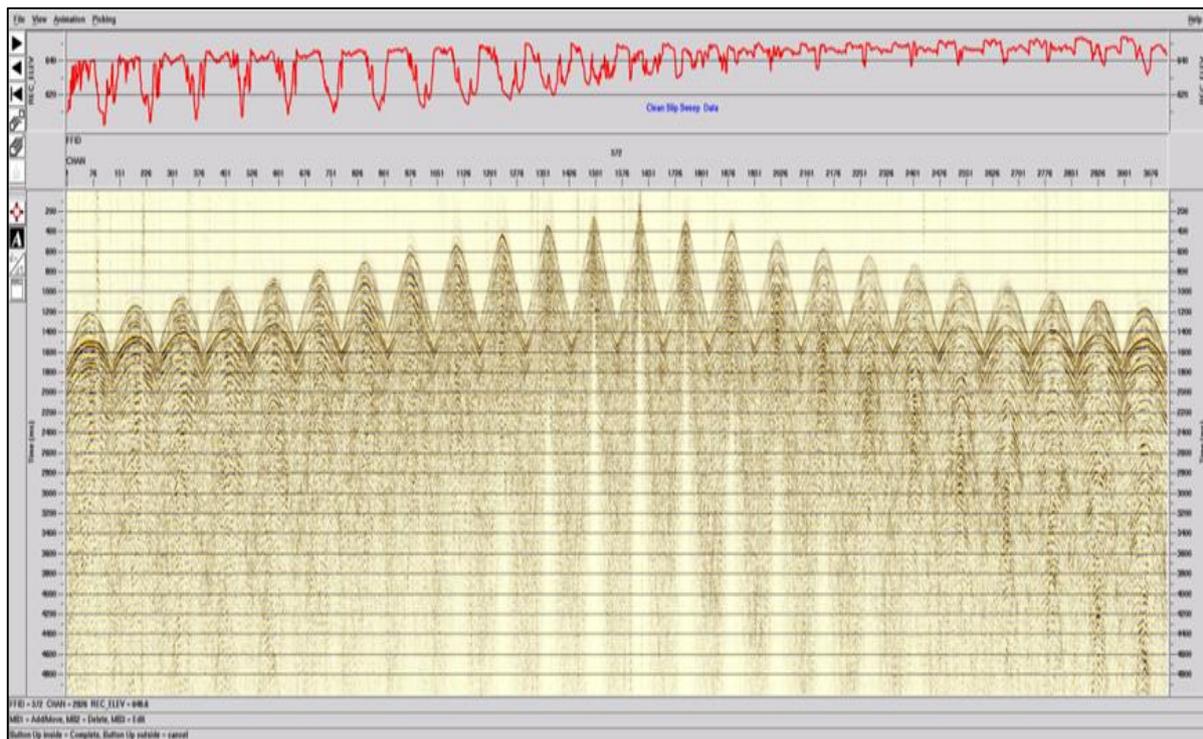


Fig V-41 enregistrement terrain corrélés après filtrage en mode conventionnel.

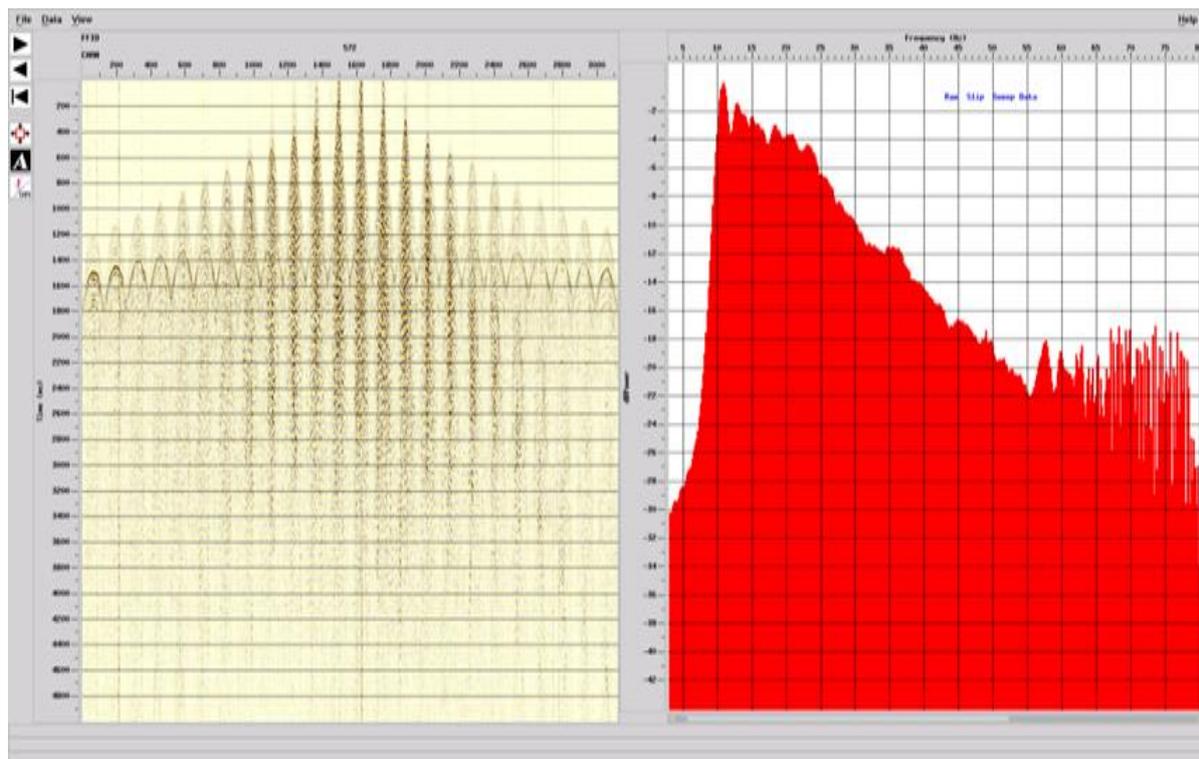


Fig V-42 tir et spectre de fréquences d'un enregistrement terrain corrélés (brut), dans le mode slip sweep.

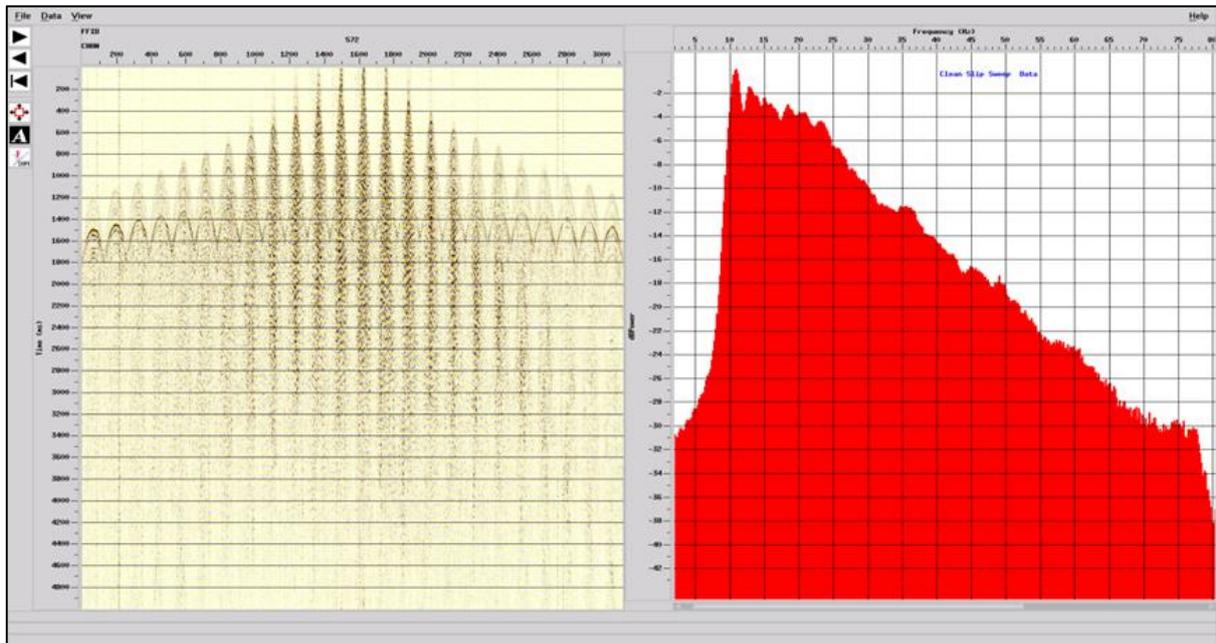


Fig V-43 tir et spectre de fréquence d'un enregistrement terrain corrélés après filtrage, dans le mode slip sweep.

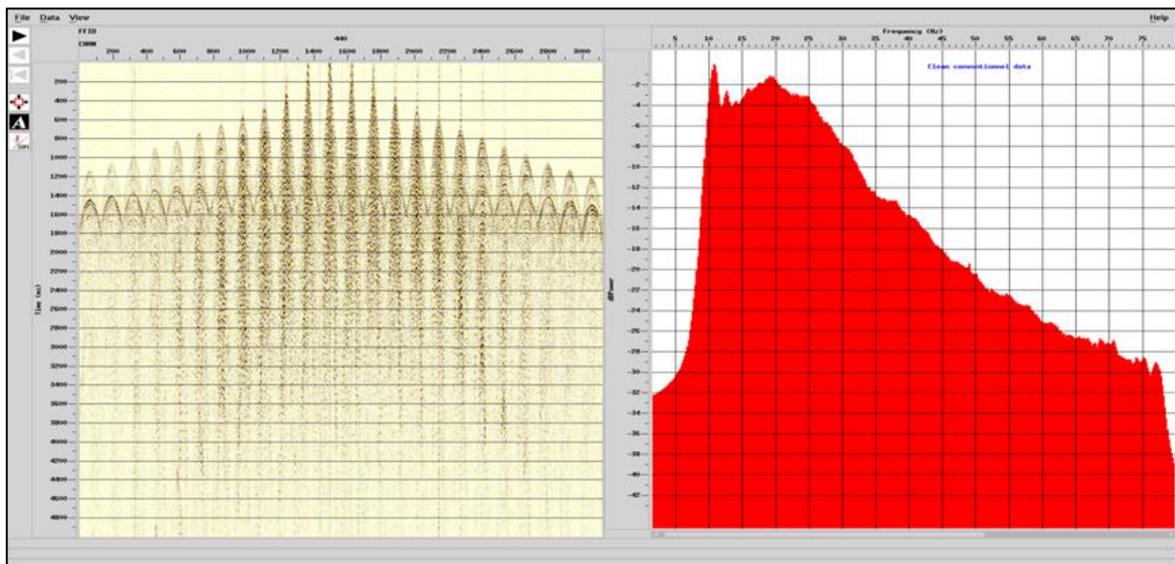


Fig V-44 tir et spectre de fréquence d'un enregistrement terrain corrélés après filtrage, dans le mode conventionnel.

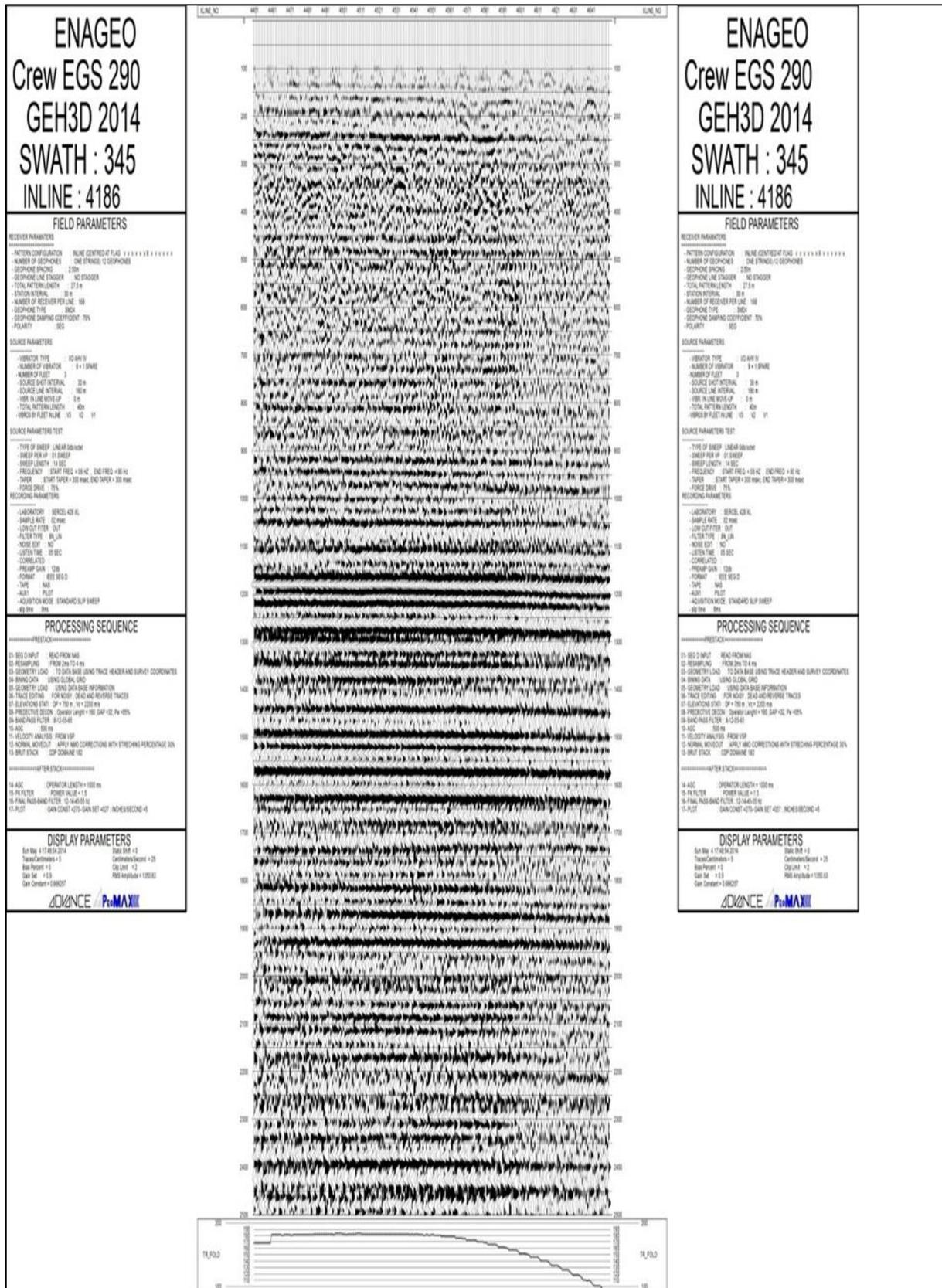


Fig V-45 Stack Inline avec les paramètres d'acquisition et les séquences de traitement appliquées (ENAGEO/EGS-290).

Après une chaîne de traitements des données sismique, le document final obtenu est un cube en 3-D présenté à la **Fig V-46**. Ce document indique la présence d'horizons claire et interprétable du projet GUERN ECH CHIKH utilisant la méthode slip sweep.

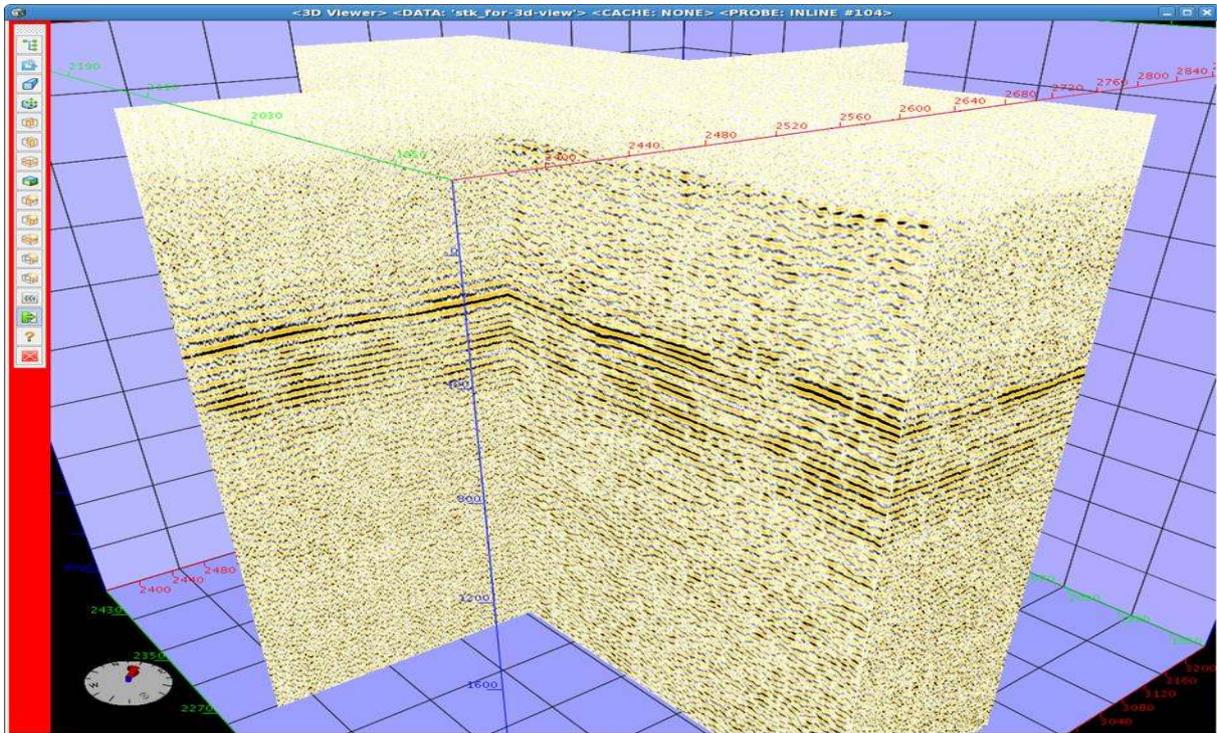


Fig V-46 Cube en 3-D du projet GEH-3D. (ENAGEO-290).

V.7.4 Conclusion

D'après la comparaison des données obtenues en acquisition flip flop et slip sweep réalisé on conclut que la productivité augmente de 212% avec une légère détérioration de la qualité des données mais on accepte une légère diminution de qualité en faveur de la productivité avec l'efficacité du nouveau filtre, ceci a permis la réduction des bruits harmoniques. Ceci encourage à l'implantation de la méthode slip sweep sans risque de détérioration remarquable de la qualité des données sismiques.

Conclusion générale

Ce mémoire avait pour but de donner un aperçu sur une des techniques de hautes productivités qui sert à maximiser la productivité lors de l'acquisition sismique appelée la méthode du "slip sweep".

Au cours de notre stage de fin d'étude effectué au sein de la mission sismique EGS-290, dont le **Projet GEH-3D** est en cours de réalisation pour le compte de SH-EXPLORATION, il est à remarquer que les techniques d'acquisitions sismiques de haute productivité décrites ci-dessus visent essentiellement une optimisation de la productivité on se basant sur la réduction du cycle de temps de vibration en augmentant ainsi le nombre de points vibrés.

Dans cette étude, nous avons effectué une comparaison sur des enregistrements de la région de **GEH-3D** obtenus en mode conventionnelle avec ceux obtenus en mode slip sweep. D'une part, on remarque une amélioration de la productivité qui a été 350VPs/jour pour atteindre jusqu'à 900VPs/jour. D'une autre part, les enregistrements obtenus présentent un rapport S/B dégradé due à la présence des distorsions harmonique à cet effet, et pour améliorer la qualité d'enregistrement, l'utilisation de l'algorithme (ENAGEO ADVANCE), montre à la fois une excellente réduction du bruit harmonique sur les enregistrements bruts et les stacks, ce qui prouve la robustesse et l'efficacité de la méthode et qui permet de récupérer la qualités des données sismiques. Il a permis l'implémentation de la méthode du slip sweep proprement sans détérioration de la qualité des données avec une amélioration de la productivité et un bas cout.

Donc, on peut considérer que les données obtenues en utilisant le technique slip sweep après filtrage sont équivalentes aux données conventionnelles.

La qualité obtenue permet l'utilisation de la méthode slip sweep pour réduire le coût par km² avec les mêmes paramètres d'acquisition, ou d'améliorer la résolution de l'image sismique en augmentant la densité des points de tir avec le même coût pour une meilleur visualisation du sous-sol.

Finalement au cours de notre stage de fin d'étude effectué au sein de la mission sismique EGS-290 (Projet GEH - 3D), nous avons constaté plusieurs contraintes qui freinent la productivité : les moyens humains (Nombre équipes pose et ramasse...) et matériels (Nombre de jeux vibros, parc géophones ...) suffisants pour mener à terme le projet afin d'éviter les wait pose, move Vibros.

Alors avant d'opter pour la méthode slip sweep, nous recommandons :

D'utiliser la technique de haute productivité slip sweep surtout dans les zones désertiques non dunaires, de même que dans les zones où l'objectif géologique ne se retrouve pas à une grande profondeur.

De plus on recommande d'utiliser un slip time supérieur à la moitié de la somme du temps d'écoute et la longueur du sweep afin de diminuer la contamination des enregistrements par des distorsions harmoniques.

Bibliographies

- Bart Duyndam, Petroleum Development Oman, Muscat, Oman. Patrick Burger, Sercel, Nantes, France.
- Chaouch, A., Mari, J. L., 2006. 3-D Land Seismic Surveys : Definition of Geophysical Parameters. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. Vol. 61, No. 5, pp. 611-630.
- Cordsen, A., 1995. How to find the optimum 3D fold : Ann. Mtg., Can. Society Exploration Geophysics. Expanded Abstracts, 96-97.
- Cordsen, A., Galbraith, M. and Peirce, J. (2000) Planning land 3-D seismic survey – Society of Exploration Geophysics Series n09 – Bob A. Hardage Ed.
- Claudio Bagaini* and Ying Ji, Schlumberger Dithered slip-sweep acquisition.
- Farid Chegrouche ENAGEO Méthode d'atténuation du bruit harmonique en vibrosismique par filtrage temps-variant avec référence WO2011144215 A2.
- Document slip sweep (ENAGEO).
- Document haut productivité (CGG).
- Shang Yongsheng, Wang Changhui* and Zhang Mugang, BGP, CNPC; Zhou Xuefeng, Li Zhenchun, Li Fenglei and Dong Lieqian, China University of Petroleum : A method for harmonic noise elimination in slip sweep data.
- La sismique réflexion haute résolution : principe et application .Rap. BRGMR39220, A. Bitri, J. Penin, A. Beauce (1966).
- Note de cours (traitement de signal/ G. Dauphin).
- M. Lavergne, Ingénieur civil des mines professeur à L'ENSPM et Directeur du centre d'étude supérieures d'exploration.
- Théorie de signal (christian juttén , Université Joseph Fourier-Polytech Grenoble).
- Géophysique pour les géologues Tom4
- Les méthodes sismiques.
- A. Guerchaoui et A. Benhama, (2006), vibrosismique : Acquisition et traitement.
- A. Khairy Abd EL-Aal, (2011), harmonic by harmonic removal technique for improving vibroseis data quality, Geophysical prospecting. (article)
- Anderson, (1995), Patent N°5,410,517, Method of cascading sweeps for a seismic vibrator.

- F.Babaia, C.Benchabana, M.Mender et A.Guerchaoui, (2011), ENAGEO-ADVANCE : Méthode d'atténuation des distorsions harmoniques dans les enregistrements vibrosismiques.
- Jean-Noel Martin, (2005), signaux et systèmes (débuter en traitement numérique du signal).
- M.Djeddi élément de base de théorie et du traitement du signal.
- Y.Gagou, (2009), cours de traitement de signal.
- 2015_GEOPHYS_Frequencies of the Ricker wavelet.
- BGP_the Implementation and Application of High Production Vibroseis Acquisition Technique.
- Cooper_N_Vibroseis_A_Counter-Intuitive_Tool_ACQ-1.
- SEG2011 Contribution of wide azimuth point receiver acquisition to inversion.
- Sismique PMechler.
- Geophys. J. Int.-2010-Abd El-Aal-1499-509.
- Yimeng Zhang*1, 2, Hua-wei Zhou3, 4, Zhihui Zou2, 5, Mugang Zhang1 1 BGP, CNPC, Zhuozhou, China Separation of ISS seismic data via vector median filter in T-X and F-X domains.
- Rozemond, H.J. [1996] Slip-sweep acquisition. SEG Annual Meeting.
- Shang Yongsheng, Wang Changhui*and Zhang Mugang, BGP, CNPC;Zhou Xuefeng, Li Zhenchun, Li Fenglei and Dong Lieqian, China University of Petroleum : A method for harmonic noise elimination in slip sweep data.
- Kenneth D.Andersen,kingwood, Tex.Method for cascading sweeps for a seismic vibrator
- T.Dean, P.Kristian et P.L vermeer (Westerngeo), (2011), high productivity without compromise-the relation ship between productivity qualité and vibroseis group size.
- A. Cordsen et al (1995).