

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE
DEPARTEMENT GEOPHYSIQUE, GENIE PARASISMIQUE ET
PHENOMENES ALEATOIRES

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN
GEOPHYSIQUE PETROLIERE

FILIERE : Sciences de la Terre et de l'Univers

OPTION : Sismique, Sismologie et Methodes de potentiel

Thème :
Effet des distorsions harmoniques sur les enregistrements en mode slip
sweep et leur atténuation par l'application du filtre ADVANCE-
ENAGEO®

Réalisé par :

GHERNAOUTI Nour El Houda

BENMEHIDI Souad

Suivis par :

Dr. AITOUCHE M. Amoukrane

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ

الرَّحِیْمِ

Remerciements

*Nous alluons **ALLAH** pour tous les bienfaits dont il nous a fait part.*

*Nous tenons tout d'abord à remercier chaleureusement **Mr. BABAJA Faudil**, chef du département VSP de Enageo , non seulement pour nous avoir ouvert les portes , mais aussi pour avoir pris part à de nombreuses discussions cruciales sur des sujets de fond. Il n'a jamais hésité à prendre de son temps précieux, ni à " décrocher son téléphone " pour régler des problèmes administratifs et meme pour répondre à des questions concernant notre mémoire.*

*Nous voudrions également remercier **Mr. AITOUCHE M. Amoukrane** en tant que notre promoteur pour ses remarques pertinentes , pour sa disponibilité à tout moment et surtout pour sa grande patience , il a su nous laisser progressivement de plus en plus de liberté pour que nous puissions avoir la possibilité de développer et mettre en œuvre nos propres idées.*

Nos remerciements vont aussi à ceux qui nous ont fait l'honneur de juger notre travail, le président de jury et les examinateurs .

*Nous remercions également tous les enseignants du département 'Géophysiques parasismique et phénomènes aléatoires' pour leurs contributions à notre formation durant les cinq années, un special remerciement au Chef du département **Mr. ELHADJ Said** qui a toujours été présent pour nous orienter.*

*Nous voudrions pas terminer cette partie sans remercier tout le personnel de la mission EGS180 : **Nardjes** , le chef mission, le chef terrain et le personnel de la mission EGS210 spécialement le chef terrain **HOUARI. M. Amine** .Sans oublier le chef du département de formation **Mr. BENCHABANA** et **Mr. MEDJNOUNE** le directeur des ressources humaines de l'EDS.*

Merci à tous qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Houda et Souad

Dédicace

A cœur ouvert, je laisse mes sentiments guider mes doigts,

Je chéri ce travail qui fait preuve de volonté, sincérité et de beaucoup de fierté

Je tiens à dédier ce modeste mémoire...

Au sommet de cette liste, mes chère parents :

***Papa**, je manque de mots pour décrire ma reconnaissance pour tout ce que tu t'es privé pour me donner tout ce que tu as sacrifié pour me satisfaire absolument tout ce qui fait de moi ce que je suis devenue aujourd'hui, ce travail témoigne ma gratitude, tu seras à jamais mon idole.*

***Maman**, aucune dédicace ne saurait exprimée l'estime, le dévouement et le respect que j'ai pour la femme qui m'a mis au monde. Je te dois toute ma réussite tu n'as jamais cessé de me pousser vers l'avant on me dit que je ressemble à mon père mais la bonté c'est ton ADN qui ma privilégié de ce don, je te promets mon avenir, mais il ne sera jamais assez pour te rendre tous les sacrifices que tu n'as jamais calculé*

Mes trois rayons de soleil,

***Selma, Nada et Rana**, trois caractères différents ça n'a pas était facile d'être votre grande sœur, mais j'avoue que parfois c'est amusant, je vous souhaite un avenir brillant, une vie sereine débordante de joie et de bonheur.*

Tous les membres de ma famille, grands et petits

*J'espère pouvoir honorer mon nom et accomplir mon rôle, j'espère vous rendre fière comme vous m'avez toujours rendu. En particulier, je tiens à remercier **ma famille maternelle** je me vois pas arriver jusqu'au là sans vous, votre aide, vos conseils m'ont été précieux.*

Mes chers amis,

*L'amitié, un mot qui a pris sens quand je vous ai connu : **Amina ZERABI, Rym BOUABDELLAH, Maroua HERICHE, BENBOURJIF Nor Elhouda et Imad TIBOURTINE** au nom de tous les bons et les mauvais moments qu'on a partagé, je vous dédie ce minuscule travail et je vous souhaite une vie pleine d'aventures que je partagerai volontairement chaque minute.*

*Je dédie ce travail à tout mon **groupe MAGP10** vous avez fait preuve de fraternité et de beaucoup de respect, je n'oublierai jamais les moments qu'on a vécu tout ces longues cinq années, à tout mes camarades de la table de la bibliothèque et à toute personne avec qui j'ai un jour partagé un souvenir, un sourire, une larme ou une miette.*

*Une dédicace particulière à mon très cher binôme **BENMEHIDI Souad** et toute sa famille, les photos et les vidéos témoigneront sur les fous moments qu'on a partagés. Tu as marqué ton passage dans ma vie à jamais.*

*Je l'es probablement jamais dit, mais voilà que je l'écris : **je vous Aime.***

Houda

Allah Tout Puissant :

Le Très Miséricordieux. Je me prosterne devant ta Grandeur pour te remercier de m'avoir comblée de ta grâce et de m'avoir assistée tout au long de ce voyage dans le jardin du savoir. Merci surtout Dieu pour ce souffle de vie et la santé que tu as accordé à toute ma famille alors que j'étais si loin. Oh Dieu Unique ! Tu es si merveilleux, si bon pour moi, j'implore ta bénédiction et que ta lumière guide mes pas.

Avec un cœur débordant de joie et de fierté je tiens à dédier ce travail :

À ma très chère, gentille et généreuse Maman,

Aujourd'hui très chère maman, je savoure ces moments de partage, de bonheur et de joie avec toi maman. C'est toi qui as guidé mes premiers pas à l'école, toi qui fus tout au long de ta vie le soutien inconditionnel, tu étais toujours présente 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 ainée. Ce que tu as apporté dans ma vie ne peut être compté ou mesuré. Je te dis merci, merci et encore merci. Tu as été présente malgré l'éloignement, tu n'as pas lésiné un seul instant pour moi, pour m'encourager, tu as parcouru des distances pour m'assister et me consoler et voilà le résultat, un MASTER 2 à la clé après avoir réussi avec succès la soutenance du Master 1.

A mon exemple dans la vie, à mon très cher aimé, à mon regretté Papa,

C'est dommage que tu ne sois plus là. Déjà un certain temps que tu nous as quittés, laissant auprès de nous un vide dont personne ne saurait pouvoir combler. Tu es resté gravé dans mon cœur. Le Tout Puissant t'a rappelé à lui sans que tu ne puisses vivre l'accomplissement de tous tes vœux et assister à mes soutenances. Tu nous as enseigné la bonté et l'amour du prochain. Que la paix soit avec toi dans la maison de l'éternel. J'aurais aimé partager la fin de ce travail avec toi Papito. Tu me manqueras toujours. Mais la volonté divine en a voulu ainsi, mais sache papa que ta fille Souad a réussi à faire son premier pas vers l'avenir. Repose en paix Papa.

A mon adorable tante "3amtiiiiii",

J'espère que tu es si fière de moi en ce moment. Je te dis merci pour ton amour, ton soutien, tes merveilleux mots et pour tes prières pour moi que Dieu te gardera en bonne santé.

À mon très cher oncle "Khali Mohamed"

Merci pour ton aide, pour ta gentillesse et pour l'amour que tu as pour moi et mes petites sœurs.

À mon adorable neveu, mon chouchou, à mon petit prince 'Hamoudou'

À mes très chères sœurs Nour El Houda , Hadjer, Fatima , Amina et Nadjet

À mes chers frères Abdou, Mestapha, Amine, Hassan et Mohamed, leurs femmes et leurs enfants,

Merci d'être toujours présents pour moi, d'être ma source d'inspiration et pour la confiance que vous m'avez accordé.

À toutes mes tentes, mes oncles et leurs enfants

À toute ma famille du près et du loin.

À ma chère enseignante "Chakour Kheira"

À mes professeurs du secondaire

Mme Bouzar et Mr Moumou

À ma précieuse "Hanane",

Tu es la personne avec qui j'ai partagé les meilleurs moments pendant les cinq ans.

À ma très chère amie "Seddiki Halima"

À mes adorables et très chères amies,

Halloum, Amel, Badra, Noussaiba, Bouchra et Wafaa. Je tiens à vous remercier pour les moments inoubliables et émouvants que nous avons vécus ensemble. Je vous aime.

À mon binôme "Douds"

À très chers amis Djebrit Abk Ryad et Doudou Hocine,

Merci pour le soutien que vous m'avez offert.

À tout le groupe MAGP10.

Enfin à tous qui me connaissent et m'ont soutenu pour pouvoir accomplir ce travail et qui me sont chers partout dans le monde.

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Généralités

1. Introduction	3
2. Caractéristiques d'un signal	3
1- Causalité d'un signal.....	3
2- Stationnarité d'un signal.....	3
3- Transformation de Fourier.....	4
4- Convolution et corrélation dans la TF.....	6
3. Définition d'une impulsion sismique	10
4. Paramètres descriptifs d'une impulsion sismique	10
5. Étude de différents types d'impulsions	12
1- Impulsion de Dirac.....	12
2- Impulsion créneau (fonction Porte).....	15
3- Impulsion sinusoïde amortie.....	16
4- Impulsion de Berlague.....	18
5- Impulsion de Ricker.....	20

Chapitre II : La méthode vibrosismique

1. Historique	22
2. Une brève description de la méthode vibrosismique	22
3. Mise en œuvre	22
4. Les essais en vibrosismique	23
4.1 Dimension du dispositif.....	23
4.2 Géométrie des nappes de géophones.....	25
4.3 Géométrie du point vibré et énergie émise.....	25
4.4 Bande de fréquence émise et sens de balayage.....	26
4.5 Longueur et nombre de sweeps.....	27
5. Instruments et équipements adaptés à la méthode	27
1) Source d'énergie	27
1.a Partie vibrante	27
1.b Partie électronique	28
2) Principe de fonctionnement du vibroseis	28
3) Contrôle du vibroseis	28

4) Système d'exploitation vibroseis	31
5) Tests de similarité	32
6) Le signal vibrosismique 'Sweep'	35
6.1 Calcul du spectre d'amplitude d'un sweep.....	35
6.2 Analyse spectrale d'un sweep.....	36
6.3 Types de sweeps.....	37
6.4 Paramètres descriptifs d'un sweep.....	38
7) Procédé de corrélation en vibrosismique	44
7.1 Procédé de corrélation.....	44
7.2 Résidus de corrélation.....	46
7.3 L'autocorrélation du sweep.....	47
7.4 Caractéristiques physiques d'un Klaunder.....	47
8) Avantages et inconvénients de la méthode vibrosismique	49

Chapitre III : Les distorsions harmoniques dans la méthode vibrosismique

1. Introduction	51
2. Origine des distorsions harmoniques	51
3. Distorsions harmoniques	52
4. Effets des harmoniques sur la crosscorrélation	53
5. Estimation de l'intervalle de la distorsion (temps d'occurrence)	57
6. L'utilisation du signal émis (Ground Force) pour la corrélation	59
7. Méthodes d'atténuation des harmoniques	61
7.1 la variophase.....	61
7.2 les sweeps en cascade (Cascaded sweep).....	68

Chapitre IV : la technique de haute productivité "Slip-Sweep"

1. Introduction	75
2. Méthodes de haute productivité dans l'acquisition vibrosismique	75
2.a Independent Simultaneous Sweeping (ISS).....	75
2.b Distance separated simultaneous sweeping(DS ³).....	76
2.c Sweeps en cascade (Cascaded sweep).....	76
2.d Slip Sweep.....	76
1. Slip sweep naissance.....	76
2. Principe de la méthode Slip sweep.....	77
3. Modifications proposées au système d'acquisition.....	81
4. Problème de la méthode Slip sweep.....	81

Chapitre V : Effets des harmoniques dans la technique Slip-Sweep

1. Introduction	84
2. Comparaison entre la méthode conventionnelle et la méthode Slip sweep	84

3. Analyse mathématique des harmoniques dans la méthode Slip sweep.....	87
4. Techniques de réductions des bruits harmoniques.....	89
5. Analyse graphique des harmoniques dans la méthode Slip sweep.....	90
6. Méthode de réduction des bruits harmoniques dans la méthode Slip sweep.....	96
6.1 Introduction.....	96
6.2 Filtrage par HPVA (High Productivity vibroseis acquisition).....	97
6.3 Filtrage temps variant avec référence (filtrage par ENAGEO-ADVANCE).....	101
6.3.1 Filtre optimal.....	101
6.3.2 Estimation du filtre du bruit harmonique à partir du modèle de la trace sismique.....	102
6.3.3 Filtrage par la méthode à entrées/sorties multiples.....	104
6.3.4 Méthodologie d'application de la méthode.....	104
6.3.5 Décomposition du GF (Ground Force).....	105
7. Application sur des données réelles.....	108
7.1 Présentation de la région.....	108
7.2 Choix des paramètres d'acquisition.....	109
7.3 Application du filtre ADVANCE-ENAGEO sur des données réelles.....	114
7.4 Conclusion.....	126

Conclusion générale.

Liste de figures

Figure I.1 : Paramètres descriptifs d'une impulsion.

Figure I.2 : représentation symbolique de l'impulsion de Dirac

Figure I.3 : (a) Peigne de Dirac, (b) spectre de peigne de Dirac

Figure I.4 : la fonction Porte et son spectre d'amplitude

Figure I.5 : Impulsion sinusoïdale amortie

Figure I.6 : (a) Graphe de l'impulsion de Berlague, (b) Spectre d'amplitude

Figure I.7 : Impulsion de Ricker et son spectre.

Figure II.1 : Point vibré.

Figure II.2 : test d'énergie.

Figure II.3 : camion vibreur.

Figure II.4 : schéma du principe de contrôle de vibreur.

Figure II.5 : Différence entre le GF du premier vibreur et le signal pilote.

Figure II.6 : Différence entre le GF du deuxième vibreur et le signal pilote.

Figure II.7 : Différence entre le GF du troisième vibreur et le signal pilote.

Figure II.8 : (a) phase instantanée d'un sweep linéaire, (b) fréquence instantanée d'un sweep linéaire.

Figure II.9 : Un modèle d'un Up-sweep.

Figure II.10 : Un modèle d'un Down-sweep.

Figure II.11 : effet de la longueur du sweep, en haut : deux sweep de différentes longueurs, en bas : les spectres d'amplitudes des deux sweeps.

Figure II.12 : effet de la bande fréquentielle sur le spectre d'amplitude sur un sweep.

Figure II.13 : effet de la loi de pondération. A gauche : différents sweeps avec différents types de taper, à droite : leurs spectres d'amplitude.

Figure II.14 : effet de la longueur du taper sur le sweep d'amplitude et sur la f.

Figure II.15 : Klauder d'un Sweep de $T= 5\text{sec}$.

Figure II.16 : Paramètres de définition d'un Klauder.

Figure II.17 : Facteur influant sur la résolution.

Figure II.18 : Effet de la largeur de la bande fréquentielle sur la résolution.

Figure III.1 : Schéma de principe du fonctionnement du Servo-valve.

Figure III.2 : Couplage: base plate-sol.

Figure III.3 : différentes représentations de sweep avec harmoniques.

Figure III.4 : down-sweep montrant le fondamental et le kième harmonique.

Figure III.5 : illustration de la cross-corrélation d'un sweep de longueur de 0.5sec et de bande fréquentielle [50, 10Hz] avec son second harmonique.

Figure III.6 : Corrélogramme correspondant à l'exemple présenté dans la figure III.5 (A. J. SERIFF* AND W. H. KIM *).

Figure III. 6: Représentation graphique de T1 et de T2 en fonction de $\frac{f_0}{B}$ et T pour k = 2.

Figure III.7 : les termes survenant lors de la corrélation d'un sweep distordu avec le GF.

Figure III.8 : Organigramme de la réalisation de la variphase pour M = 4.

Figure III.9 : des traces synthétiques générées à partir de sweep affecté par des harmoniques, les quatre sweeps sont identiques (T = 12 sec ; B = [8 - 80Hz]) avec différentes phases.

Figure III.10 : différents types spectres d'amplitude.

Figure III.11 : les projections **temps-fréquence** de : (a) sweep distordu **S1(t)**, (b) la différence de **S1(t) - S3(t)**, (c) la différence de **S2(t) - S4(t)**, (d) la somme finale.

Figure III.12 : Séquences utilisées dans la méthode cascaded sweep.

Figure III.13 : séquence de sweep de référence (up sweep), S4 étant le segment de sweep supplémentaire ajouté au début de la séquence.

Figure III.14 : séquence du sweep émis (up sweep), S1 étant le segment de sweep supplémentaire ajouté a la fin de la séquence.

Figure III.15 : séquence du sweep de référence (down-sweep).

S1 étant le segment de sweep supplémentaire ajouté à la fin de la séquence.

Figure III.16 : séquence du sweep émis (down-sweep).

S4 étant le segment de sweep supplémentaire ajouté au début de la séquence.

Figure III.17 : la cross-corrélation du sweep émis composé de quatre segments avec le sweep de référence.

Figure III.18: Zoom sur les pics d'autocorrélation aux temps -4, 0, 4 (zone d'intérêt) de A, B et C respectivement.

Figure III.19 : projection dans le domaine temps-fréquence de la cross-corrélation.

Figure IV.1 : Acquisition conventionnelle.

Figure IV.2 : Acquisition vibrosismique de type slip sweep.

Figure IV.3 : Comparaison entre l'acquisition conventionnelle et l'acquisition en mode slip sweep.

Figure IV.4 : la productivité en fonction de nombre de groupes de vibroseis et de move-up.

Figure IV.5 : degré de contamination.

Figure V.1 : représentation temps-fréquence des harmoniques avant et après corrélation dans le mode conventionnel et le mode slip sweep.

Figure V.2 : A gauche : un up-sweep linéaire qui représente le sweep pilote et sa projection sur le plan F-T (sans présence d'harmonique).

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

Figure 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*).

Figure V.5 : géométrie des nappes.

Figure V.6 : effet du slip time sur l'enregistrement.

Figure V.7 : la projection T-F d'une trace des VPs avec différents slip time.

Figure V.8 : Projection T-F d'un VP en mode conventionnel.

Figure V.9 : Projection T-F d'un VP en mode slip sweep avec un slip time de 18 sec.

Figure V.10 : Projection T-F d'un VP en mode slip sweep avec un slip time de SL= 12 sec (A) et SL = 8 sec (B).

Figure V.11 : Comparaison d'un vibrosismique de référence enregistrement.

Figure V.12 : Décomposition du GF pour le calcul d'opérateur

Figure(V.13) : décomposition de composante harmonique par filtre adaptatif.

Figure V.14.: décomposition de la composante harmonique dans le domaine temps-fréquence

Figure V.14 : zone d'étude

Figure V.15 : nature de terrain

Figure V.16 : stack en couverture complète du premier test avec 03 groupes de 03

Vibs/Groupe : un (01) sweep de 14sec

Figure V.17 : stack en couverture complète du deuxième test avec 03 groupes de 04

Vibs/Groupe : un (02) sweep de 14sec

Figure V.18 : stack en couverture complète du troisième test avec 03 groupes de 04

Vibs/Groupe : un (01) sweep de 14sec

Figure V.19 : stack en couverture complète du quatrième test avec 03 groupes de 03

Vibs/Groupe : deux (01) sweep de 16 sec.

Figure V.20 : : stack en couverture complète du cinquième test avec 04 groupes de 03

Vibs/Groupe : un (01) sweep de 18sec.

Figure V.21 : Enregistrements terrain corrélés (bruts) **(a)** enregistrement obtenu avec un slip time **10.008 sec** **(b)** enregistrement obtenue avec un slip time **10.02 sec**.

Figure V.22 : Procédure opératoire sur terrain

Figure V.23 : Enregistrements terrain corrélés après filtrage **(a)** enregistrement obtenu avec un slip time **10.008 sec** **(b)** enregistrement obtenue avec un slip time **10.02 sec**.

Figure V.24 : Bruits soustraits par le filtrage **(a)** enregistrement obtenu avec un slip time **10.008 sec** **(b)** enregistrement obtenue avec un slip time **10.02 sec**.

Figure V.25: spectre moyen d'enregistrement corrélé

Figure V.26 : projection dans le plan temps-fréquence d'une trace de chaque enregistrement.

Figure V.27 : Différents sweeps

Figure V.28 : représentation F-T de **(1)** signal fondamental **(2)** sweep pilote **(3)** signal GF **(4)** résidus (harmoniques).

Figure V. 29: représentation F-T de (A) sweep de référence (B) signal GF du vibreur 1 (C) signal GF du vibreur 2.

Figure V.30 : Projection sur le plans F-T d'une trace issue d'un enregistrement mère non corrélé avec des GFs réels

Figure V. 31: première étape du filtrage

Figure V.32 : deuxième étape du filtrage

Figure V.33 : troisième étape du filtrage

Figure V.34 : trace du premier VP avant l'application du filtre (Bleue : signal utile ; rouge harmoniques)

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Parité de la TF

Tableau III.1 : caractéristiques du sweep fondamental et de son kième harmonique.

Introduction

Les ressources en gaz et en pétrole restent pendant encore quelques décennies, la source d'énergie la plus utilisée dans le monde. Dans le but de maintenir la productivité à haut niveau, les compagnies pétrolières emploient des méthodes d'exploration avancées qui permettent d'obtenir des détails plus précis sur la structure géologique du réservoir et des propriétés des roches. Par conséquent, la demande sur des techniques de haute résolution et de haute productivité a augmenté, pour répondre au besoin du marché et satisfaire les demandes, les compagnies géophysiques ont innové dans l'acquisition sismique terrestre et marine. Elles ont proposé des techniques de haute productivité afin de réaliser un grand volume de datas et de minimiser le coût.

Autrefois, on utilisait les sources explosives lors de l'acquisition, mais pour tout les inconvénients qu'elles présentaient on l'a remplacé par une nouvelle technique. Cette dernière utilise une source mécanique pour la génération du signal, on l'appelle la vibrosismique.

Le plus grand effort de développement dans les opérations sismiques, était dévoué à la réduction du cycle de temps de vibration qui détermine principalement le coût de la sismique 3D. Avec un seul groupe de vibrateurs, le cycle temps de vibration représente la somme de la durée de sweep et le temps nécessaire pour que le vibrateur arrive au prochain point vibré. L'utilisation d'un second groupe, qui est mis en œuvre lorsque le premier se déplace vers le prochain point, a presque doublé la productivité dans certains terrains. Cette technique a été appelée 'flip flop', elle peut être très efficace. Une haute productivité a été accomplie par la suite en réduisant la longueur du sweep, bien que le décroissement correspondant dans le cycle temps de vibration ne soit pas proportionnel car le vibrateur en déplacement ne sera pas toujours prêt à temps. De plus, la détérioration de la qualité des datas par la longueur de sweep réduite ne sera pas compensée par une augmentation propice de la productivité. Toutes ses expériences ont abouti à une solution qui réside dans l'utilisation de plusieurs groupes de vibrateur opérant au même temps et permettant ainsi une amélioration considérable dans la productivité. Depuis, plusieurs méthodes ont été développées pour accélérer l'acquisition vibroseis dont la technique Slip sweep qui fera le sujet de notre étude. La technique Slip sweep a été introduite par **Rozemond** en **1996** à **Oman**. Elle représente un moyen séduisant pour optimiser la productivité à un niveau qui peut maintenir le volume de la densité des sources à une limite raisonnable. Cependant, cette technique souffre d'un inconvénient, les

enregistrements sont affectés par des bruits harmoniques qui nécessitent d'être filtré afin de récupérer la qualité des datas.

L'objet de notre étude consiste donc à faire une comparaison entre l'acquisition vibrosismique en mode conventionnel et en mode slip sweep, et cela à travers l'approche méthodologique caractérisée par les étapes suivantes :

- Introduction
- **Chapitre I** : Généralités
- **Chapitre II** : La méthode vibrosismique
- **Chapitre III** : les distorsions harmoniques dans la méthode vibrosismique
- **Chapitre IV** : La technique de haute productivité 'slip sweep'
- **Chapitre V** : Effet des harmoniques dans la technique slip sweep et méthode de réduction
- Conclusion générale et Recommandation.

1. Introduction :

Conjointement 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 ou la résolution
- La mise en œuvre du modèle synthétique.

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

2. Caractéristiques d'un signal :

2.1 Causalité d'un signal :

En traitement numérique du signal, un **signal causal** est défini par $s(t) = 0$ pour $t < 0$. Autrement dit, un signal est dit causal si ce signal est nul quand $t < 0$. Par opposition, un signal non-causal est défini non-nul pour au moins une valeur $t < 0$.

Ce type de signal est aussi la réponse impulsionnelle d'un système causal. Un tel système possède, à l'instant t , un signal de sortie qui ne dépend que des valeurs précédentes (et éventuellement courant, selon les définitions) du signal d'entrée mais pas des valeurs futures prises par ce signal. On a donc la sortie du système $y(t_0)$ qui dépend uniquement de l'entrée $u(t)$ pour $t \leq t_0$.

Cette définition s'applique aussi bien à un système discret qu'à un système continu. Par exemple, le système $y(n) = u(n + 1)$, où u désigne l'entrée et y la sortie, n'est pas causal car la valeur du signal de sortie à l'instant n (où n désigne des instants discrets à intervalle régulier) dépend de la valeur du signal d'entrée à un instant ultérieur ($n + 1$).

2.2 Stationnarité d'un signal :

Pour accéder aux propriétés essentielles d'un signal physique il peut être commode de le considérer comme une réalisation d'un processus aléatoire (voir quelques précisions dans Processus continu). Le problème est largement simplifié si le processus associé au signal peut être considéré comme un **processus stationnaire**, c'est-à-dire ses propriétés statistiques caractérisées par des espérances mathématiques sont indépendantes du temps. Lorsque cette

hypothèse est vraisemblable, le processus bâti autour du signal est rendu ergodique, les moyennes temporelles étant identiques aux moyennes d'ensemble

Un processus est un ensemble $X(t)$ de fonctions ordinaires $x(t)$, chacune d'elles étant une réalisation du processus. On peut caractériser ce processus en lui associant à chaque instant t_0 une densité de probabilité $P_X(x, t_0)$.

À une réalisation donnée on peut associer les moyennes temporelles :

$$\overline{x(t)^n} == \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)^n dt \quad (\text{I.1})$$

À la densité de probabilité $P_X(x, t_0)$, on peut associer les moments appelés moyennes d'ensemble :

$$E[X(t_0)^n] = \int_{-\infty}^{\infty} x^n P_X(x, t_0) dx \quad (\text{I.2})$$

2.3 Transformée de Fourier :

2.3.1 Transformée de Fourier direct :

Soit un $x(t)$ un signal transitoire (en particulier non périodique) vérifiant $\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt$ fini.

La transformation de Fourier nous donne le spectre complexe de $x(t)$:

$$X(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi vt} dt \quad (\text{I.3})$$

Avec : $X(v) = TF[x(t)]$

Ce spectre est une fonction à valeurs complexes. Les parties réelles et imaginaires du spectre sont :

$$Re[X(v)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cos 2\pi vt dt, \quad (\text{I.4})$$

$$Im[X(v)] = - \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \sin 2\pi vt dt. \quad (\text{I.5})$$

Ce sont les composantes de $x(t)$ en phase (cosinus) et en quadrature (sinus) à la fréquence v .

On donnera souvent le spectre complexe en module et phase :

- **Le spectre d'amplitude :**

$$|X(v)| = \sqrt{Re[X(v)]^2 + Im[X(v)]^2} \quad (\text{I.6})$$

- **Le spectre de phase :**

$$\varphi_X(v) = \text{Arctg} \left[- \frac{Im[X(v)]}{Re[X(v)]} \right] \quad (\text{I.7})$$

2.3.2 Transformée de Fourier Inverse TF⁻¹ :

Une des propriétés essentielles de la transformation de Fourier est son invisibilité. On peut reconstituer le signal $x(t)$ à partir de son spectre complexe par :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(v) \cdot e^{-j2\pi vt} dt = TF^{-1}[X(v)] \tag{I.8}$$

La transformation de Fourier inverse TF^{-1} permet d'interpréter $x(t)$ comme une somme de composantes de fréquence pure ($e^{j2\pi vt}$) dont le module et la phase sont fixés par le spectre complexe $X(v)$.

2.3.3 Quelques propriétés de la transformation de Fourier :

1. Linéarité de la TF :

La transformée de Fourier est une opération linéaire :

$$f(t) \leftrightarrow F(v)$$

$$g(t) \leftrightarrow G(v)$$

Entraîne :

$$f(t) + g(t) \leftrightarrow aF(v) + G(v)$$

2. Propriétés de parité de la TF :

Le tableau ci-après les résume.

$x(t)$	$X(v)$
Réelle et paire	Réelle et paire
Réelle et impaire	Imaginaire et impaire
Imaginaire et impaire	Réelle et impaire
Complexe et paire	Complexe et paire
Complexe et impaire	Complexe et paire
Réelle quelconque	Partie réelle paire
Réelle quelconque	Partie imaginaire impaire
Imaginaire quelconque	Partie imaginaire paire et partie réelle impaire
Partie réelle paire et partie imaginaire impaire	réelle
Partie réelle impaire et partie imaginaire paire	Imaginaire

Tableau(I.1) : Parité de la TF

3. Conjugué :

Étant donné $x(t) \stackrel{TF}{\leftrightarrow} X(v)$ alors $x^*(t) \stackrel{TF}{\leftrightarrow} X^*(-v)$

Avec : x^* est le complexe conjugué de x

C'est-à-dire : $TF[x^*(t)] = X^*(-v)$ (I.9)

4. Propriété de translation :

L'équation $f(t) \leftrightarrow F(v)$, entraîne :

$$f(t - a) \leftrightarrow e^{-j2\pi vt} F(v),$$

$$f(t) \leftrightarrow \cos 2\pi va F(v) - j \sin 2\pi va F(v) \quad (I.10)$$

Ceci implique que les transformées de Fourier de $f(t)$ et de $f(t - a)$ ont même module mais la transformée de Fourier de $f(t - a)$ subit une rotation de phase supplémentaire de $-2\pi va$.

Cette propriété est réciproque, c'est-à-dire que :

$$F(v) \leftrightarrow f(t),$$

Entraîne :

$$F(v - a) \leftrightarrow f(t) e^{-2\pi jat}$$

5. Propriété de Dérivation :

Si $x(t) \leftrightarrow X(v)$

$$\frac{dx(t)}{dt} \leftrightarrow (2\pi jv) X(v)$$

$$\frac{d^n x(t)}{dt^n} \leftrightarrow (2\pi jv)^n X(v) \quad (I.11)$$

2.3.4 Conditions d'existence de la transformation de Fourier :

On démontre que, pour une fonction $f(t)$ ait une transformé de Fourier, fonction de v , il faut et il suffit que :

- La fonction $f(t)$ soit bornée (pas de valeurs infinies).
- L'intégrale de $|f(t)|$ entre $-\infty$ et $+\infty$ ait une valeur finie.
- Les discontinuités de $f(t)$ ainsi que ses maxima et minima soient en nombre fini.

2.4 Convolution et corrélation dans la TF :

2.4.1 Convolution de deux signaux :

Ces deux fonctions sont des propriétés fondamentales de la transformée de Fourier. Elles jouent un rôle important dans l'analyse moderne des signaux, ce sont des concepts physiques significatifs dans plusieurs domaines scientifiques.

Définition : le produit de convolution que l'on appelle parfois « produit de composition » [Schwartz] de deux signaux est donné par le produit suivant :

$$z(t) = x(t) * y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tilde{t})y(t - \tilde{t})dt \quad (\text{I.12})$$

La convolution exprime généralement la réponse à un signal quelconque à partir de celle d'un signal type (impulsionnel) caractérisé par $y(t)$. \tilde{t} exprime le retard t des signaux.

Propriétés :

- **Commutative :** $x * y = y * x$,
- **Distributif** $x * (y + z) = (x * y) + (x * z)$
- **L'élément neutre de la convolution :** $x(t) * \delta(t) = \delta(t) * x(t) = x(t)$

$\delta(t)$: Représente la fonction de Dirac.

- $TF[x(t) * y(t)] = X(v).Y(v)$

2.4.2 La fonction de corrélation :

La fonction de corrélation est une des propriétés les plus remarquables dans la Transformée de Fourier, utilisée dans le but de l'interprétation des signaux, son rôle est de déterminer s'il existe une relation entre deux signaux. Pour un signal transitoire (à énergie finie), la corrélation est :

$$C_x(\tilde{t}) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x^*(t - \tilde{t})dt \quad (\text{I.13})$$

$C_x(\tilde{t})$ est homogène à une énergie. $C_x(0)$ est l'énergie du signal

Pour un signal périodique à (puissance moyenne finie) :

$$C_x(\tilde{t}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x^*(t - \tilde{t})dt \quad (\text{I.14})$$

Ici, $C_x(\tilde{t})$ est homogène à une puissance et $C_x(0)$ est la puissance moyenne.

De manière imagée, on peut dire que la corrélation est un indicateur de la déformation du signal au cours du temps. Pour un signal périodique, la corrélation est elle-même périodique :

La corrélation de $x(t) = a \cos(2\pi\nu_0 t + \varphi)$ est $C_x(\tilde{t}) = \frac{a^2}{2} \cos 2\pi\nu_0 \tilde{t}$

La corrélation est maximale au retard nul :

$$|C_x(\tilde{t})| \leq C_x(0) \quad (\text{Intégralité de Schwartz})$$

Ceci est conforme à l'intuition qui présente la corrélation comme un moyen de chiffrer la ressemblance entre $x(t)$ et $x(t - \tilde{t})$.

- L'autocorrélation :

Elle consiste à comparer une fonction $x(t)$ avec elle-même, durant un intervalle de temps, dont l'une est décalée d'une certaine valeur \tilde{t} .

$$C_{xx}(\tilde{t}) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x^*(t - \tilde{t})dt = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \tilde{t})x^*(t)dt \quad (\text{I.15})$$

Où :

$C_{xx}(\tilde{t})$: Est la fonction d'autocorrélation.

• Propriétés :

Pour les signaux réels, la fonction C_{xx} est paire, $C_{xx}(t) = C_{xx}(-t)$

$\forall t$ On a : $C_{xx}(t) \leq C_{xx}(0)$ (valeur maximale à $t=0$).

$$C_{xx}(\tilde{t}) = x(-\tilde{t}) * x(\tilde{t})$$

$$TF[C_{xx}(\tilde{t})] = TF[x(-\tilde{t})].TF[x(\tilde{t})]$$

$$X(\nu) = TF[x(\tilde{t})]$$

$$TF[x(-\tilde{t})] = \frac{1}{|-1|} X\left(\frac{\nu}{-1}\right)$$

$$TF[x(-\tilde{t})] = X(-\nu). \quad (\text{I.16})$$

Calcul de $X(-\nu)$:

Comme :

$$X(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t).e^{-j2\pi\nu t} dt$$

$$X(-\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t).e^{+j2\pi\nu t} dt$$

$$X(-\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{x(t)}.e^{-j2\pi\nu t} dt$$

$$X(-\nu) = \overline{\int_{-\infty}^{+\infty} x(t).e^{-j2\pi\nu t} dt}$$

$$\text{Si } x(t) : \text{Fonction réelle} \Leftrightarrow \overline{x(t)} = x(t) \quad (\text{I.17})$$

Donc :

$$TF[C_{xx}(\tau)] = \overline{X(v)}.X(v) = |X(v)|^2 \quad (I.18)$$

$|X(v)|^2$: Densité spectrale d'énergie de la fonction $x(t)$.

Dans le cas de la cross-corrélation :

$$TF[C_{xy}(\tau)] = TF[x(-\tau) * y(\tau)]$$

$$TF[C_{xy}(\tau)] = TF[x(-\tau)].TF[y(\tau)]$$

$$TF[C_{xy}(\tau)] = \overline{X(v)}.Y(v) \quad (I.19)$$

- **L'intercorrélation :**

L'autocorrélation est remplacée parfois par la corrélation mutuelle ou corrélation croisée (cross-corrélation), elle consiste à comparer deux fonctions différentes $x(t)$ et $y(t)$, dont l'une d'elles est décalée dans le temps d'une certaine valeur τ . On définit l'intercorrélation de deux signaux $x(t)$ et $y(t)$ par :

a. Signaux transitoires (énergie finie) :

$$C_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t-\tau)dt \quad (I.20)$$

b. Signaux périodiques (à puissance moyenne finie) :

$$C_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y^*(t-\tau)dt \quad (I.21)$$

Où :

$C_{xy}(\tau)$: Représente la cross-corrélation entre $x(t)$ et $y(t)$.

- **Densité spectrale :**

Elle permet d'effectuer une analyse harmonique d'un processus aléatoire stationnaire considéré comme signal à puissance finie. Selon le théorème de Wiener-Khintchine, on peut densité spectrale (d'énergie ou de puissance, selon le type de signaux) sont les transformées de Fourier des fonctions de corrélation. Posons $x(t)$ et $y(t)$ comme deux signaux de fonction de corrélation $C_{xy}(\tau)$ et de densité spectrale S_{xy} , on a :

$$S_{xy}(v) = TF[C_{xy}(\tau)] = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{xy}(\tau) e^{-2\pi v\tau} d\tau \quad (I.22)$$

Symétriquement :

$$C_{xy}(\tau) = TF^{-1}[S_{xy}(v)] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xy}(v) e^{2\pi v\tau} dv \quad (I.23)$$

3. Définition d'une impulsion sismique :

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

- 1- Un critère de phase minimale souhaitée
- 2- 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.

4. 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 :

- Son type causal ou non,
- Son premier passage par zéro,
- Sa largeur (largeur d'impulsion),
- Sa largeur de son spectre (bande spectrale occupée par l'impulsion)
- Sa 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.

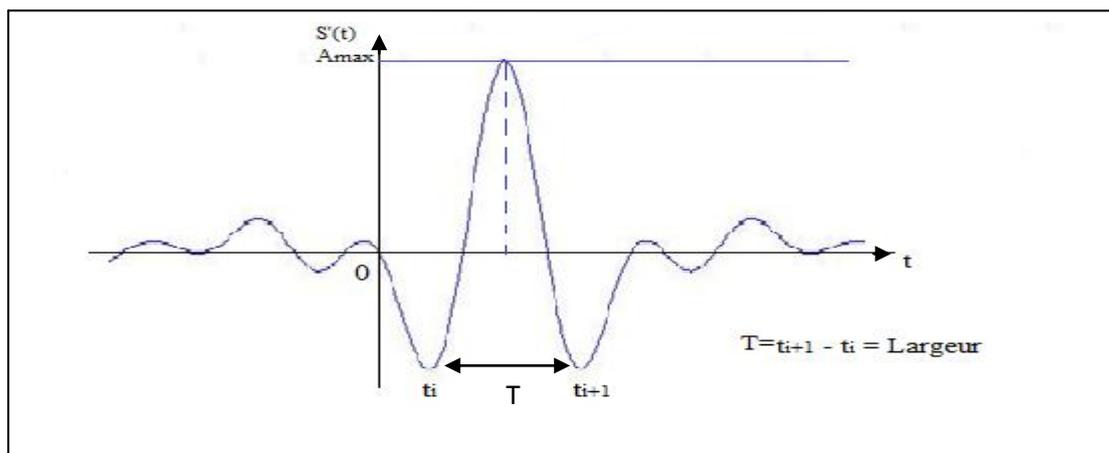


Figure I.1 : Paramètres descriptifs d'une impulsion

a- Ondelettes sismiques :

Les ondelettes asymétriques sont largement utilisées dans les études de modélisation en sismique, comme source génératrice du modèle. 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.

b- Ondelette et trace sismique réelle :

En prospection sismique par source explosive, on ne peut connaître l'impulsion ou l'ondelette émise sous la forme d'une équation déterministe si ce n'est sous la contrainte d'hypothèse dont la plus importante est la phase supposée minimale.

Partant du modèle mathématique d'une trace sismique réelle $T(t)$:

$$T(t) = O(t) * R(t) + B(t) \quad (I.24)$$

Avec :

$O(t)$: impulsion (ondelette) émise,

$R(t)$: série des coefficients de réflexions, représentée ici par une fonction de temps, donc indirectement en fonction de la profondeur.

$B(t)$: ensemble des bruits (aléatoires ou organisés) additifs.

On exprime la fonction d'autocorrélation de la trace $T(t)$ par le biais de la convolution.

$$\Phi_{TT}(\tau) = T(\tau) * T(-\tau)$$

$$\Phi_{TT}(\tau) = [O(\tau) * R(\tau) + B(\tau)] * [O(-\tau) * R(-\tau) + B(-\tau)]$$

$$\Phi_{TT}(\tau) = [O(\tau) * R(\tau) * O(-\tau) * R(-\tau)] * [O(\tau) * R(\tau) + B(-\tau)] + [B(\tau) * O(-\tau) * R(-\tau)] + [B(\tau) * B(-\tau)]$$

Avec l'hypothèse que l'ensemble des bruits $B(\tau)$ n'est corrélable avec aucun autre signal, on obtient :

$$\Phi_{TT}(\tau) = [O(\tau) * O(-\tau)] * [R(\tau) * R(-\tau)] + [B(\tau) * B(-\tau)] \quad (I.25)$$

En introduisant la fonction d'autocorrélation de chaque terme entre crochets, on aura :

$$\Phi_{TT}(\tau) = \Phi_{OO}(\tau) * \Phi_{RR}(\tau) + \Phi_{BB}(\tau)$$

Si on suppose que l'ensemble des bruits $B(t)$ est nuls (cas idéal), il reste :

$$\Phi_{TT}(\tau) = \Phi_{OO}(\tau) * \Phi_{RR}(\tau) \quad (I.26)$$

Une méthode possible pour l'extraction de l'ondelette $O(t)$ est de supposer que la série des coefficients de réflexivité vérifie une loi de distribution qui est supposé de variance σ^2 telle que :

$$\Phi_{RR}(\tau) = \sigma^2 \sum \delta(t)$$

Donc :

$$\Phi_{TT}(\tau) = \Phi_{OO}(\tau) * \sigma^2 \sum \delta(t)$$

$$\Phi_{TT}(\tau) = \sigma^2 \Phi_{OO}(\tau) \tag{I.27}$$

Il résulte donc que la fonction d'autocorrélation de la trace sismique est, à un facteur près de (σ^2) égale à la fonction d'autocorrélation de l'ondelette.

Il est ainsi possible d'extraire l'ondelette sismique et ce n'est la qu'une méthode d'extraction.

5. Étude de différents types d'impulsion :

5.1 impulsion idéale de Dirac :

5.1.a 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.

L'impulsion $\delta(t)$ est définie sous les hypothèses (mathématiquement contradictoires) suivantes :

$$\delta(t) = \begin{cases} +\infty & \text{si } t = 0 \\ 0 & \text{si } t \neq 0 \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \end{cases} \tag{I.28}$$

L'impulsion de Dirac n'admet pas à proprement parler de graphe si ce n'est qu'une présentation symbolique. (Figure I.2)

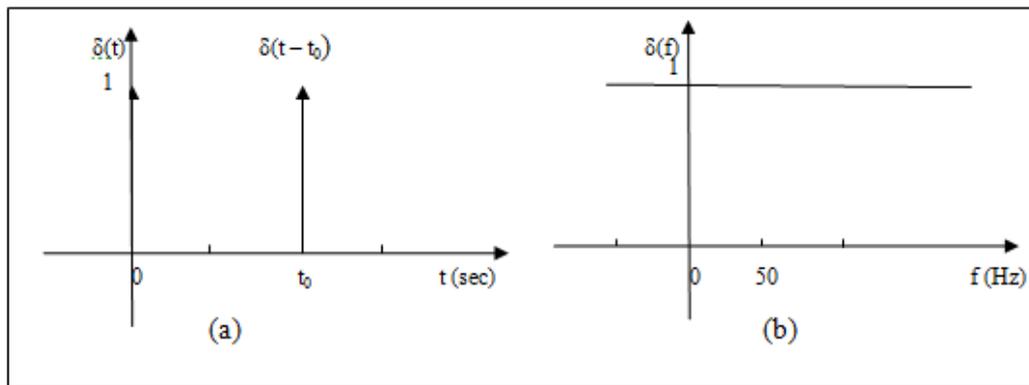


Figure (I.2) : représentation symbolique de l'impulsion de Dirac

- (a) Impulsion de Dirac
- (b) Spectre d'amplitude 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.

5.1.b Spectre de l'impulsion de Dirac :

Le spectre de cette impulsion est à calculer au sens de distribution.

Soit $\varphi \in D$, ensemble des fonctions d'essai indéfiniment dérivable et à support borné, on construit la distribution suivante :

$$TF[\delta(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)e^{-2\pi jvt} dt. \quad (I.29)$$

Il est connu que :

$$\delta(t).f(t) = f(0).\delta(t) \Rightarrow \delta(t)e^{-2\pi jvt} dt = \delta(t)$$

$$TF[\delta(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)dt = 1(v) = 1 \quad (I.30)$$

Conclusion : le spectre de l'impulsion de Dirac est constant c'est-à-dire qu'il renferme aussi bien les basses que les hautes fréquences.

5.1.c Série d'impulsion de Dirac (peigne de Dirac) :

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

$$\text{III}(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - n) \quad (I.31)$$

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

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

Notons que :

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

$$\text{III}_T(t) = \frac{1}{T} \text{III}\left(\frac{t}{T}\right) \tag{I.32}$$

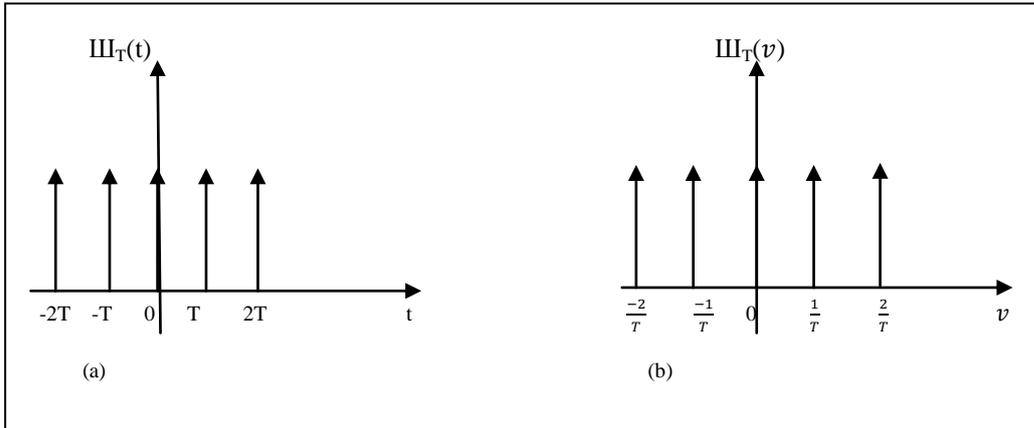


Figure (I.3) : (a) Peigne de Dirac,
(c) spectre de peigne de Dirac

5.1.b Spectre d'un peigne de Dirac :

Sachant que :

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

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

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

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

$$\text{TF} [\text{III}_T(t)] = \frac{1}{T} \text{III}\left(\frac{1}{T} v\right) \tag{I.33}$$

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 $\frac{1}{T}$.

5.2 Impulsion créneau (fonction Porte) :

5.2.a Fenêtre naturelle :

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

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } -\frac{1}{2} \leq t \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (\text{I.34})$$

5.2.b Fenêtre de largeur T :

On définit ainsi la fenêtre de largeur T :

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (\text{I.35})$$

Ou :

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } -\frac{1}{2} \leq \frac{t}{T} \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (\text{I.36})$$

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

5.2.c Série d'impulsions créneau de largeur Δt :

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

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \Pi(t - k\Delta t) \quad (\text{I.37})$$

5.2.d Spectre d'amplitude de la fonction porte :

- **Calcul de la TF de la fonction porte :**

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

Pour une largeur d'impulsion T :

$$\text{TF} [\Pi_T(t)]_{t \rightarrow v} = \text{TF} \left[\Pi \left(\frac{t}{T} \right) \right]_{t \rightarrow v}$$

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

Donc :

$$\text{TF} [\Pi_T(t)] \xleftrightarrow{f} = T \text{sinc}(\pi v T) \tag{I.38}$$

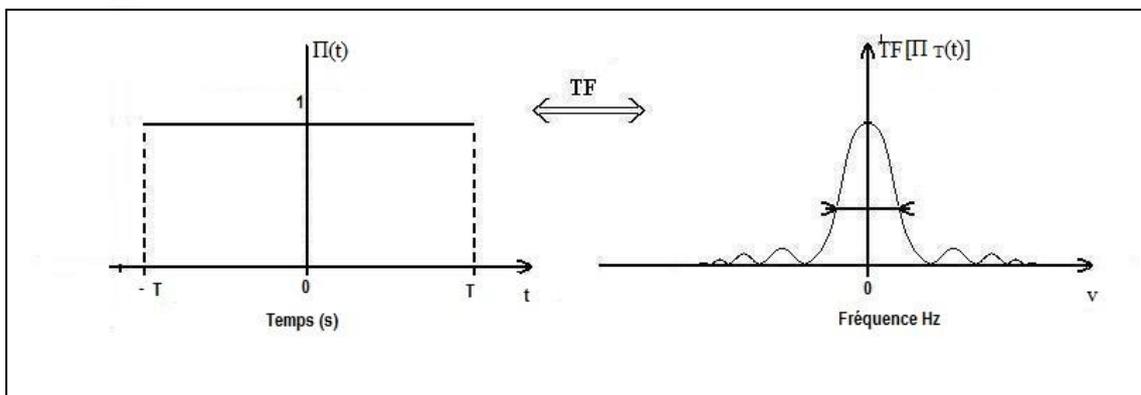
Le spectre d'amplitude d'une impulsion créneau est donc réel.

D'après la formule mathématique (I.10) , on peut avoir le spectre d'amplitude de la fonction porte avec une amplitude égale à l'unité est :

$$A(v) = \sqrt{X^2(v) + Y^2(v)} = \sqrt{[T \text{sinc}(\pi v T)]^2 + 0}$$

$$A(f) = T \text{sinc}(\pi v T) \tag{I.39}$$

Pour l'amplitude égale à l'unité : ($T \rightarrow 1$)



Figure(I.4) : la fonction Porte et son spectre d'amplitude

5.3 Impulsion sinusoïde amortie :

5.3.a 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.

5.3.b Expression analytique d'une impulsion sinusoïdale amortie :

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

$$S(t) = Ae^{-at} \sin w_0 t \tag{I.40}$$

Avec:

A: Facteur multiplicatif de contrôle

a : Facteur d'amortissement ($a > 0$)

ω_0 : Facteur fondamentale de l'impulsion.

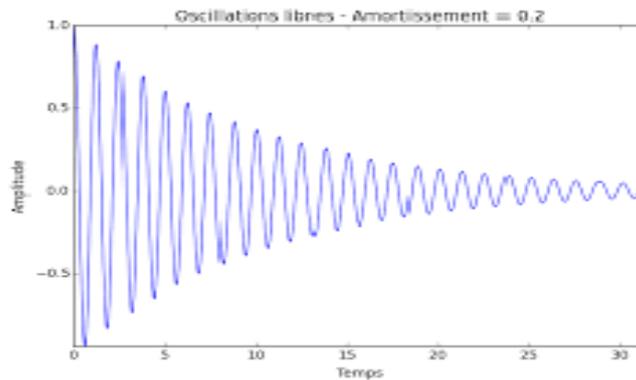


Figure I.5 : Impulsion sinusoïdale amortie

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

$$S(t) = H(t) \cdot S(t) = H(t) \cdot A e^{-at} \sin \omega_0 t \quad (I.41)$$

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

$$H(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t > 0 \\ \frac{1}{2} & \text{si } t = 0 \\ 0 & \text{si } t < 0 \end{cases} \quad (I.42)$$

5.3.c Spectre d'une impulsion sinusoïdale amortie :

$$TF [s(t)] = TF [A \cdot H(t) \cdot e^{-at} \sin \omega_0 t]$$

$$TF [s(t)] = TF [A \cdot H(t) e^{-at}] * TF [\sin \omega_0 t] \quad (I.43)$$

Où : $\omega_0 = 2\pi v_0$

On a aussi :

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

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

$$TF [\sin 2\pi v_0 t] = \frac{j}{2} [\delta(v + v_0) - \delta(v - v_0)]$$

Donc, il en résulte que :

$$TF [s(t)] = TF [A.H(t).e^{-at} \sin 2\pi v_0 t]$$

$$TF [s(t)] = TF [A.H(t) e^{-at}] * TF [\sin 2\pi v_0 t]$$

$$TF [s(t)] = \frac{A}{a+j2\pi v} * [\delta(v + v_0) - \delta(v - v_0)] \quad (I.44)$$

D'après les deux relations :

$$\left\{ \begin{array}{l} f(t) * \delta(t + t_0) = f(t + t_0) \\ f(t) * \delta(t - t_0) = f(t - t_0) \end{array} \right.$$

Donc on peut écrire :

$$TF [s(t)] = \frac{Aj}{2} \left[\frac{1}{a+j2\pi(v+v_0)} - \frac{1}{a+j2\pi(v-v_0)} \right] \quad (I.45)$$

$$TF [s(t)] = \frac{A}{2} \left[\frac{2\pi v_0}{a^2 - 4\pi^2(v^2 - v_0^2) + j4\pi av} \right]$$

5.3.d Calcul du spectre d'amplitude :

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

$A(v)$: Partie réelle

$B(v)$: Partie imaginaire

Alors :

$$|S(v)| = \frac{A}{2} \frac{2\pi v_0}{[a^2 - 4\pi^2(v^2 - v_0^2)]^2 + (4\pi a v)^2]^{\frac{1}{2}}}$$

$$|S(v)| = \frac{2A\pi v_0}{[a^2 - 4\pi^2(v^2 - v_0^2)]^2 + (4\pi a v)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (I.46)$$

5.4 Impulsion de Berlague :

5.4.a Définition et propriétés temporelle :

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

$$B(t) = A.H(t).t^n.e^{-a.t}.\cos(2\pi.v_0.t + \mu_0) \quad (I.47)$$

$n \in N; a > 0$: (f_0, μ_0) des constants fixés

$H(t)$: Fonction de Heaviside.

L'enveloppe de l'ondelette est contrôlée par quatre paramètres :

- Le paramètre de décroissance « n » : figurant en exposant de l'exponentiel, et l'exposant « n » sont supposés positifs, en général « n » n'est pas nécessairement entier.

L'introduction d'une phase μ permet l'obtention d'une généralisation de l'impulsion de Berlague.

- Un cas particulier $\mu_0 = -\frac{\pi}{2}$, Fig ...

Alors :

$$B(t) = A \cdot H(t) \cdot t^n \cdot e^{-n \cdot t} \cdot \sin(2\pi \cdot v_0 \cdot t) \quad (\text{I.48})$$

- Les différentes variantes de l'impulsion de Berlague sont obtenues en faisant varier μ_0 de $(-\frac{\pi}{2} \text{ à } \frac{\pi}{2})$.

5.4.b Avantages de l'impulsion de Berlague :

Ses avantages de se résument en :

- Sa causalité.
- Son caractère de fonction de fonction continûment différentiable.
- Si $\mu_0 = \pm \frac{\pi}{2}$, les « n » premières dérivées de $B(t)$ sont continuées.
- Énergie- moments et longueur.

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

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |B(t)|^2 dt = A^2 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} t^{2n} \cdot e^{-2at} \cos^2(2\pi \cdot v_0 \cdot t + \mu_0) \cdot dt$$

Si : $\mu_0 = -\frac{\pi}{2}$; et si on passe par la TF :

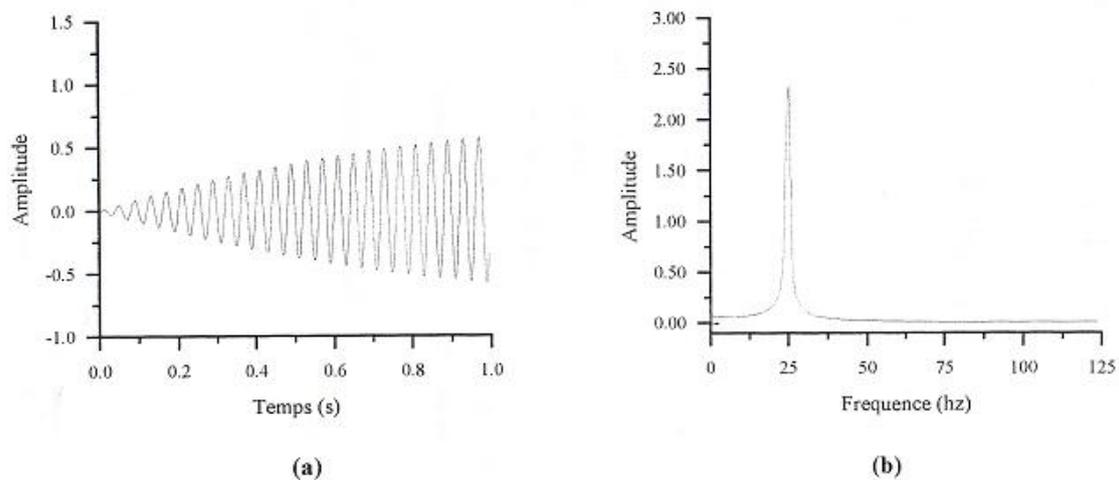
$$E(t) = \int_0^{+\infty} t^{2n} \cdot e^{-2at} \sin^2(2\pi \cdot v_0 \cdot t) \cdot dt \quad (\text{I.49})$$

5.4.c Le spectre de l'impulsion de Berlague :

$$B(v) = \frac{A \cdot j \cdot n!}{2} \left[\frac{1}{((a + j \cdot 2\pi(v + v_0))^{n+1})} - \frac{1}{((a + j \cdot 2\pi(v - v_0))^{n+1})} \right] \quad (\text{I.50})$$

5.4.d Le spectre d'amplitude de l'impulsion de Berlague :

$$|B(v)| = 4A\pi \cdot v_0 \left[\frac{|a + j\pi \cdot v|}{[a^2 - 4\pi(v + v_0) + j \cdot 4\pi a v_0]^4} \right] \quad (\text{I.51})$$



(a) Graphe de l'impulsion de BIRLAGUE
 (b) Le spectre d'amplitude de (a)

Figure (I.6) : (a) Graphe de l'impulsion de Berlague,
 (d) Spectre d'amplitude

5.5 Impulsion de Ricker :

5.5.a Introduction :

L'ondelette à phase nulle, est certainement la plus prise en modélisation sismique, est l'ondelette de Ricker.

On pense que 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.

5.5.b Expression de l'ondelette de Ricker :

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

$$S(t) = P(b, R, t) \cdot e^{\left(\frac{-t}{b}\right)^2} \tag{I.52}$$

Avec :

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

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 v_m par l'expression :

$$b = \frac{1}{\pi v_m}$$

Une valeur exagérément faible de b, permettra à la limite d'assimiler l'impulsion de Ricker à un signal de Dirac.

Ces deux paramètres représentent les paramètres de description d'une impulsion de Ricker.

L'impulsion de Ricker, 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.

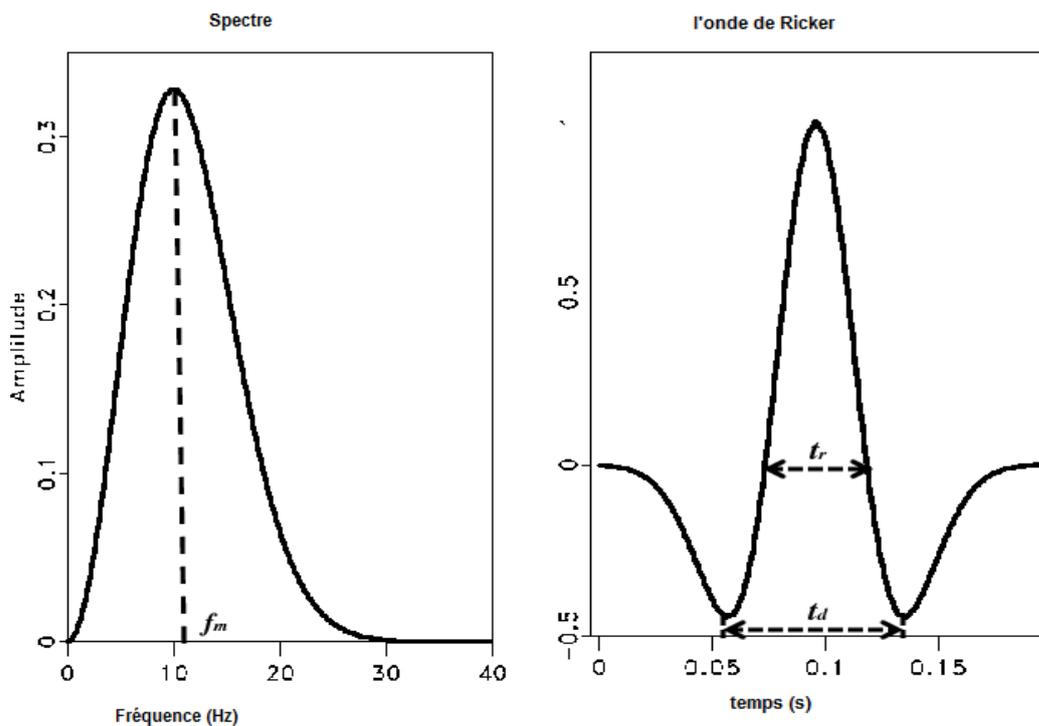


Figure (I.7) : Impulsion de Ricker et son spectre.

1. Historique :

En février 1960, John Crawford, William E.N.Doty et Milford R.LEE publièrent un article dans 'Geophysics' intitulé 'Signal Sismographe Continu (continuous signal sismograph)' et par la suite introduisirent un 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'instruction d'acquisition sismique du futur. Presque une dizaine d'année après, d'intenses et coûteux 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. Plus autres articles ont été par la suite consacrés au vibroseis.

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 vibreur. 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 subsurface 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.

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.

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.

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 :

1. La dimension du dispositif sismographique à préciser :
 - a- L'offset minimale
 - b- L'offset maximale
 - c- La distance de l'intertrace
2. La géométrie des nappes de géophones
3. La géométrie du point vibré, et l'énergie émise
4. La bande de fréquence émise et le sens du sweep
5. La longueur du Sweep.

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 qui améliorera l'addition horizontale. Avec un contenu fréquentiel satisfaisant, la détermination des différents facteurs constituant un dispositif sismographique se fera comme suit :

4.1.a) Offset minimale (distance entre la source et la première trace sismique) :

En considérant l'offset minimale comme très large, des horizons sismiques superficiels seront couverts par un degré de couverture insuffisant, où ils pourront être complètement inopérant. De plus, les traces extrêmes seront distordues à cause de l'effet des corrections statiques en appliquant un " surgical muting " sur ces parties distordues. En contrepartie, l'offset minimale devra être assez large, d'une part pour que les traces centrales ne soient pas affectées par le bruit des vibrateurs et d'autre part pour éviter l'interférence des lobes secondaires latéraux de l'autocorrélation avec les réflexions voisines peu énergiques. On peut dire, cependant, que la détermination de l'offset minimale en utilisant les enregistrements "playbacks " 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.

4.1.b) Offset maximale (distance entre la source et la dernière trace sismique) :

L'offset maximale 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 maximale doit être réduite au détriment de la longueur de l'intertrace.

4.1.c) Longueur de l'intertrace :

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. Donc pour calculer les valeurs de la résolution, la fréquence de coupure maximale du signal émis est introduite (clairement définie dans la méthode du vibroseis). Pour la résolution horizontale des réflexions :

$$R_h = \frac{V}{8 \sin(a) f_{max}} \tag{II.1}$$

- 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'intertrace correspondante à la résolution horizontale est :

$$G_h = 4.R_h$$

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

- Où: G_h : la longueur maximale de l'intertrace
- R_h : la résolution horizontale.

4.2 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 devrait être faible, afin d'atténuer le bruit qui a la plus petite longueur d'onde.

4.3 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).

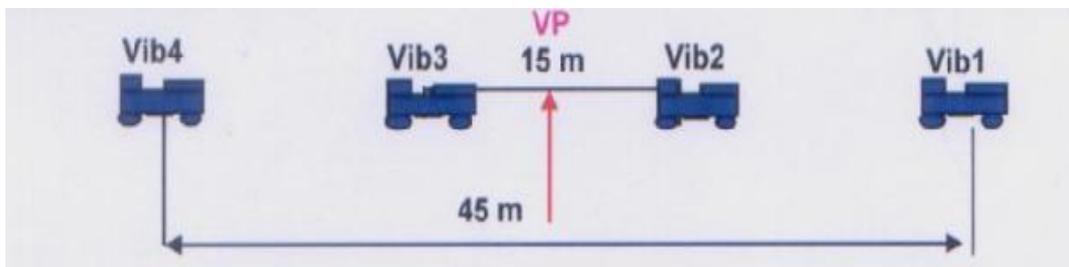


Figure II.1 : Point vibré.

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 :

- a) Nombre de stations par point vibré
- b) Nombre de vibrateurs et de leur puissance
- c) Nombre total de sweeps

Le test d'énergie consistera à 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 (Figure II.2).

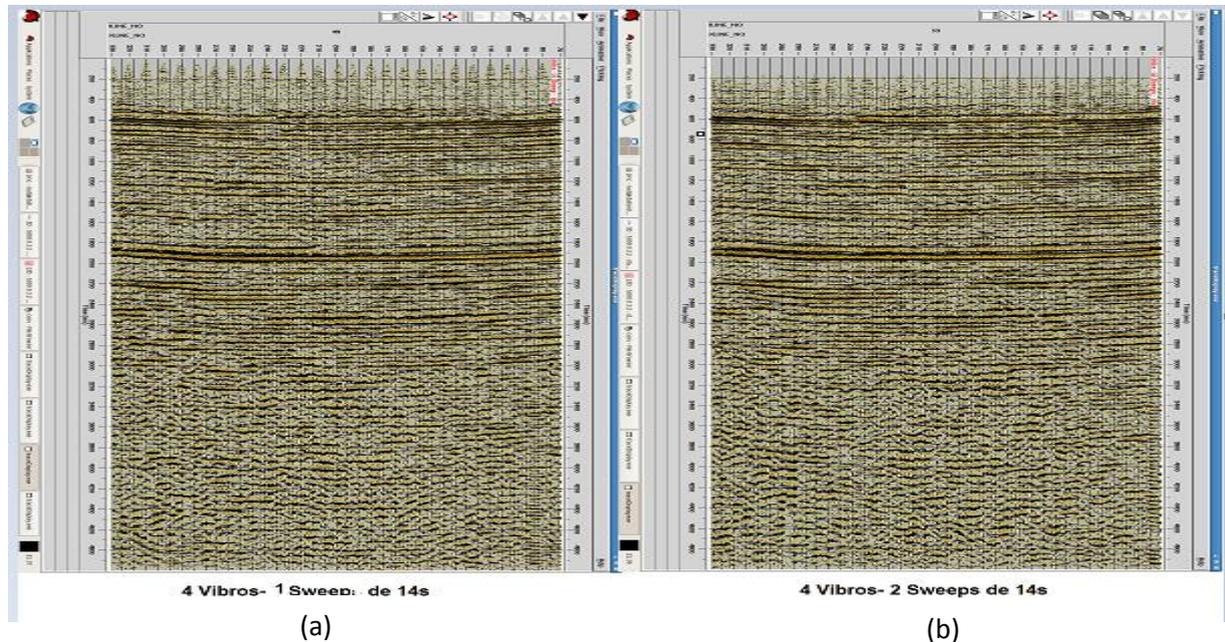


Figure II.2 : test d'énergie.

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

4.4 Bande de fréquence émise et sens du balayage :

4.4.a) 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 contiguë 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.

4.4. b) Sens du balayage :

Il est constaté que pour des raisons purement mécaniques, le vibreur 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.

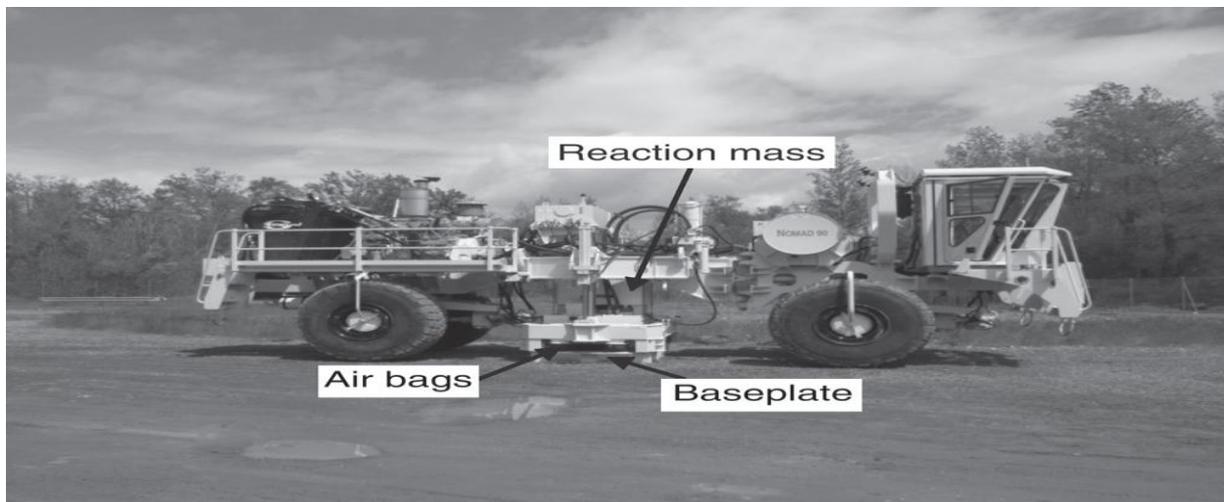
4.5 Longueur et nombre de sweeps :

En vibrosismique, on suppose que la puissance de la source est liée directement au nombre de vibreurs 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.

5. Instruments et équipements adaptés à la méthode :

1) Source d'énergie :

Le type de vibreur utilisé comme source d'énergie, est un vibreur hydraulique contrôlé électroniquement (figure II.3).



FigureII.3 : camion vibreur

1.a) 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.

1.b) 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 :

1.b.1 Un boîtier D.P.G (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 vibreur. Ce boîtier génère aussi un sweep de référence qui est transmis au corrélateur (pour servir à la corrélation des enregistrements bruts).

1.b.2 Un boîtier D.S.D (Digital Servo Drive) :

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

6. Principe de fonctionnement du vibroseis :

Le signal commande est généré par le boîtier D.P.G au laboratoire, il sera transmis par radio F.M à chaque vibreur. Une fois que le boîtier D.S.D 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.

7. Contrôle du vibroseis :

Chaque vibreur 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 :

- 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. La partie électrique contient un générateur de sweep qui produit et l'envoi au moteur de torsion qui actionnera le Servo-valve.
- 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 de d'amplification du signal électrique (sweep), produit par le générateur de ce dernier.
- 3- **Réponse du vibrateur " Vibrator feedback"** : Jusqu'ici, le mécanisme de contrôle des vibrateurs 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 vibrateur plutôt que l'écoulement d'huile dans le circuit hydraulique. Par conséquent, un signal de feedback supplémentaire et nécessaire pour permettre la compensation de phase entre le sweep de référence et la réponse du vibrateur.

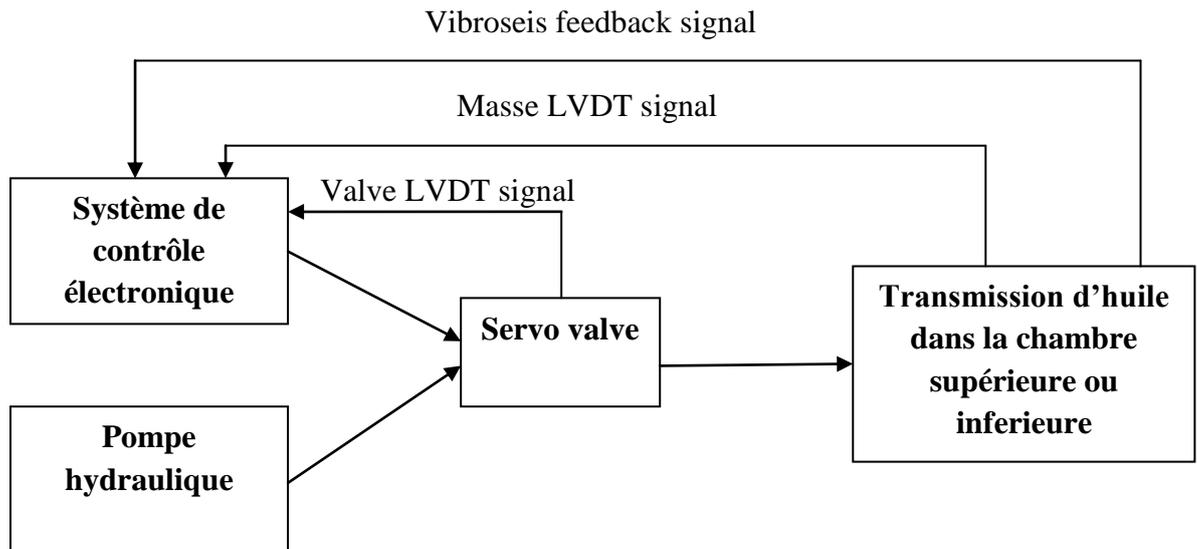


Figure II.4: schéma du principe de contrôle de vibreur

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 vibreurs entre eux.

Tout signal du vibreur qui est enregistrable, peut être utilisé pour la compensation de phase (déplacement, vitesse ou accélération, de la base plate ou de la masse de réaction).

Le système vibroseis est doté de deux accéléromètres, l'un pour enregistrer l'accélération de la masse de réaction et l'autre pour enregistrer l'accélération de la base plate. Ces deux accélérations sont utiles pour le calcul du signal GF "Ground Force" qui est la somme pondérée des deux réponses, de la base plate et de la masse de réaction, le Ground Force a pour expression:

$$GF = M_{BP} \cdot \gamma_{bp} + M_{MR} \cdot \gamma_{mr} \quad (II.3)$$

- Avec: GF : Ground Force;
 M_{BP} : masse de la base plate;
 M_{MR} : masse de la masse de réaction ;
 γ_{bp} : accélération de la base plate ;
 γ_{mr} : accélération de la masse de réaction.

Un système de contrôle automatique de la force appliquée ‘peak force’, incorporé dans le DSD du vibreur, permet le calcul des valeurs du GF (échantillon par échantillon). Un échantillon du signal de la base plate et un autre échantillon du signal issu de la masse de réaction produiront un échantillon du signal du GF par le biais de formule précédente. La valeur de l'échantillon trouvée sera comparée à un seuil (‘peak force’ désiré) qui est sélectionnée comme paramètre d'énergie. Il est déterminé en pourcentage du poids total du vibroseis.

8. 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 à priori une réflexion d'une interface quelconque.

Dans le traitement des enregistrements en vibrosismique, le choix du signal 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
- 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.

9. 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 :

- 1) Similarité par câble ou Wire line.
- 2) Similarité par radio.

A. 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 (SeisQ, Promax,...).

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

- Les vibrateurs sont en phase entre eux
- La réponse de chaque vibrateur est en phase avec le sweep de référence
- L'autocorrélation du sweep de référence et sa cross-corrélation avec la réponse de chaque vibrateur est en phase
- Le spectre d'amplitude de la réponse du vibrateur 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.

B. 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 D.P.G) où elles seront décodées. Ces informations porteront essentiellement sur :
 - ❖ Pourcentage du peak force maximal et minimal appliqué, durant l'mission du sweep.

La représentation graphique se fait sur micro-ordinateur au laboratoire (connecté avec le D.P.G). Dans cette méthode, chaque vibrateur est contrôlé individuellement. Ce test nous fournit des informations sur les paramètres suivants :

- Sweep de référence
- Réponse du vibrateur
- Déphasage entre le sweep de référence et la réponse du vibrateur
- Spectre d'amplitude du sweep de référence et de la réponse du vibrateur
- L'autocorrélation du sweep de référence et sa cross-corrélation avec la réponse du vibrateur
- La valeur du Ground Force
- Le pourcentage des distorsions harmoniques.

Les figures (II.5), (II.6) et (II.7) 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 vibreur, 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.

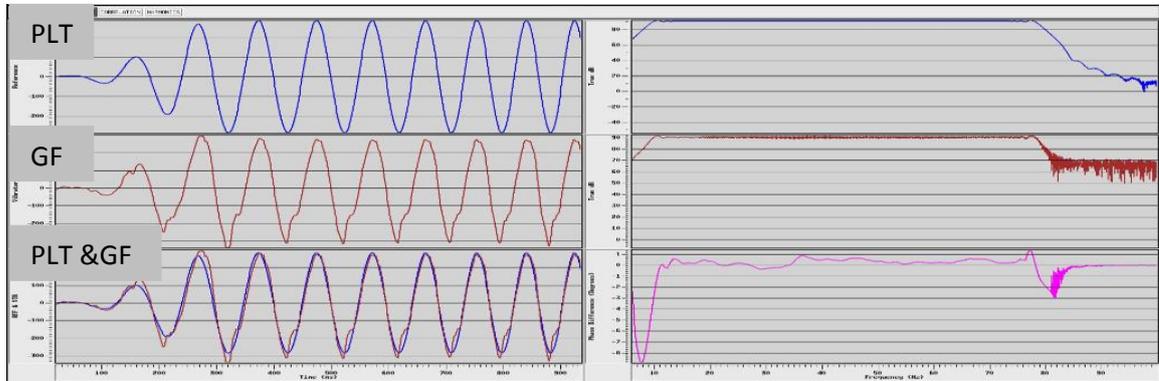


Figure (II.5) : Différence entre le GF du premier vibreur et le signal pilote.

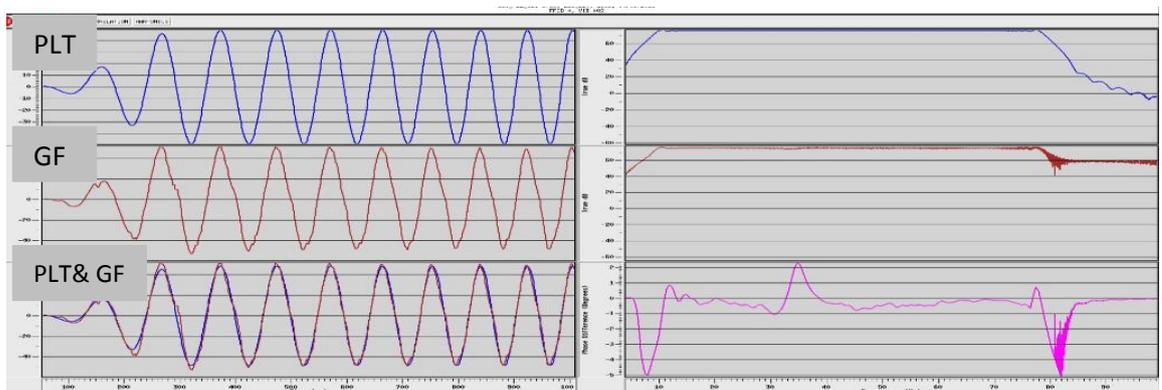


Figure (II.6) : Différence entre le GF du deuxième vibreur et le signal pilote.

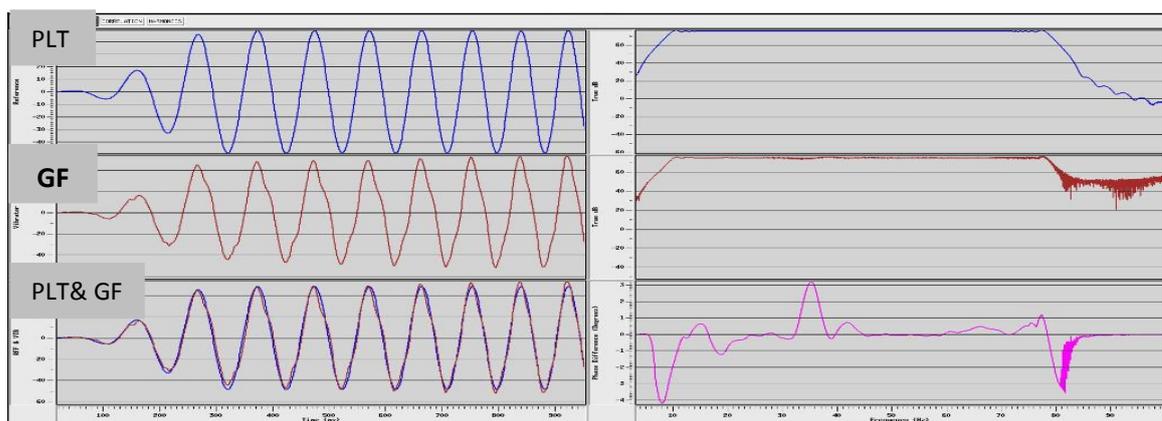


Figure (II.7) : Différence entre le GF du troisième vibreur et le signal pilote.

10. le signal vibrosismique " le sweep " :

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

Expression Générale d'un sweep :

$$s(t) = a(t) \cdot \sin(\Phi_i(t)) \quad (\text{II.4})$$

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

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

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

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = a + b t \quad (\text{II.5})$$

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 . La pente de la loi de modulation est définie par :

$$b = \frac{B}{T}$$

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

$$s(t) = a(t) \cdot \cos \left[2\pi \left(f_0 \pm \frac{B}{2T} t^2 \right) \right] \quad (\text{II.6})$$

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.

10 .1 Calcul du spectre d'amplitude d'un sweep :

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

$$E_1(t) = \prod \left(\frac{t}{T}\right) e^{2\pi j(f_0 t + \frac{B}{2T} t^2)}$$

(II.7)

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

9.2 Analyse spectrale du sweep :

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

$$s(t) = \begin{cases} \text{Cos} \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{B}{2T} t^2 \right) \right] & \text{si } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad \text{(II.8)}$$

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 :

$$f_i(t) = f_0 + \alpha t \quad \text{avec } \alpha = \frac{B}{T} \quad \text{(II.9)}$$

On exprime la TF du sweep $s(t)$ en écrivant :

$$\text{TF} [s(t)] = \int_0^T \text{Cos} \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{B}{2T} t^2 \right) \right] e^{-2\pi j f t} dt$$

Le principe de calcul de cette TF, c'est-à-dire en fait de l'intégrale, est d'exprimer la fonction cosinus en utilisant les formules d'Euler ce qui aboutit au calcul de 2 intégrales :

$$I_1 = \frac{1}{2} \int_0^T \exp \left[2\pi j \left(f_0 t + \frac{\alpha}{2} t^2 - f t \right) \right] dt \quad \text{(II.10)}$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_0^T \exp \left[-2\pi j \left(f_0 t + \frac{\alpha}{2} t^2 + f t \right) \right] dt \quad \text{(II.11)}$$

Menés à terme le calcul de ces deux intégrales nécessitent l'introduction des intégrales de Fresnel :

$$C(\tau) = \int_0^\tau \cos(\pi y^2) dy ; S(\tau) = \int_0^\tau \sin(\pi y^2) dy$$

$$\int_0^\tau \exp \left[\pm \pi j + \frac{X^2}{2} \right] dX = C(\tau) \pm j S^*(\tau)$$

La TF du sweep s'écrit alors :

$$TF [s(t)] = \frac{1}{4} \exp \left[-\pi j \frac{(f_0 + f)^2}{\alpha} \right] [C(y_2) - C(y_1)] + j [S(y_2) + \frac{1}{4} \exp \left[\pi j \frac{(f_0 + f)^2}{\alpha} \right] [C(y_4) - C(y_3)] - j[S(y_4) - j S(y_3)]$$

$C(y_1)S(y_1)$; $C(y_2)S(y_2)$; $C(y_3)S(y_3)$ et $C(y_4)S(y_4)$ sont les fonctions de Fresnel en y_1 , y_2 , y_3 et y_4 .

10.3 Types de sweep :

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 employée 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** (figure II.8).

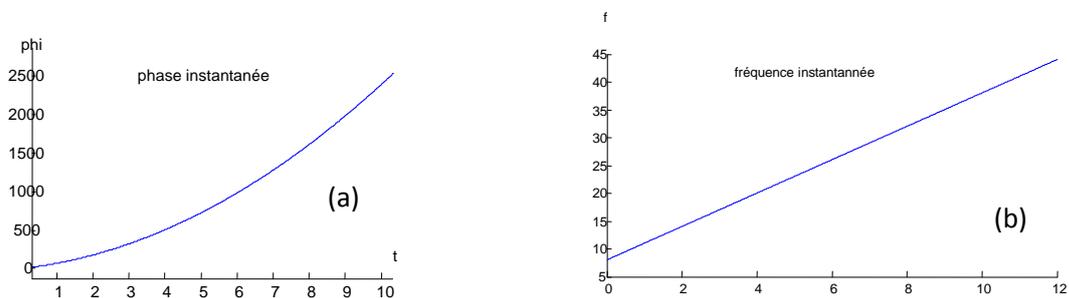


Figure II.8 : (a) phase instantanée d'un sweep linéaire, (b) fréquence instantanée d'un sweep linéaire

Si cependant, 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 :

- **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 :

$$f_i(t) = f_0 + \frac{Bt^\alpha}{T^\alpha} \quad \text{avec } \alpha > 1. \quad (\text{II.12})$$

Avec B : la bande fréquentielle du sweep

T : la durée du sweep.

α : coefficient > 1

- **les sweeps exponentiels** : contrairement aux précédents, ce type favorise les basses fréquences, sa fonction de variation de fréquence est :

$$f_i(t) = f_0 + \frac{Bt^\alpha}{T^\alpha} \quad \text{avec } \alpha < 1. \quad (\text{II.13})$$

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.

On a intérêt aussi à 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 sweep 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.

10.4 Paramètres descriptifs du 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 $D = BT$
- L'effilement (Tapering).

1. Sens du balayage : Un balayage fréquentiel ne peut avoir que deux sens :

- Un balayage vers les hautes fréquences ou up-sweep (figure II.9)
- Un balayage vers les basses fréquences ou down-sweep.(figure II.10)

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 :

$$S_1(t) = a_1(t) \cdot \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{B}{2T}t \right) t \right] \quad (\text{II.14})$$

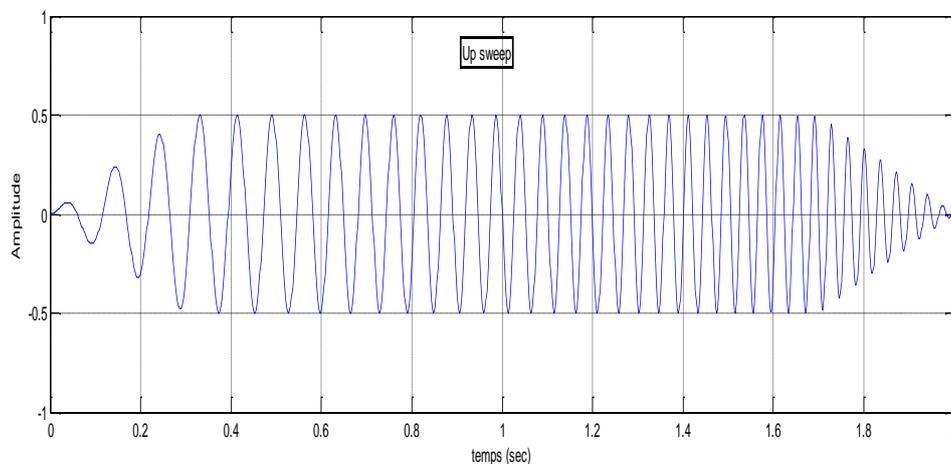


Figure II.9 : Un modèle d'un Up-sweep

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

$$S_2(t) = a_1(t) \cdot \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{B}{2T}t \right) t \right] \quad (\text{II.15})$$

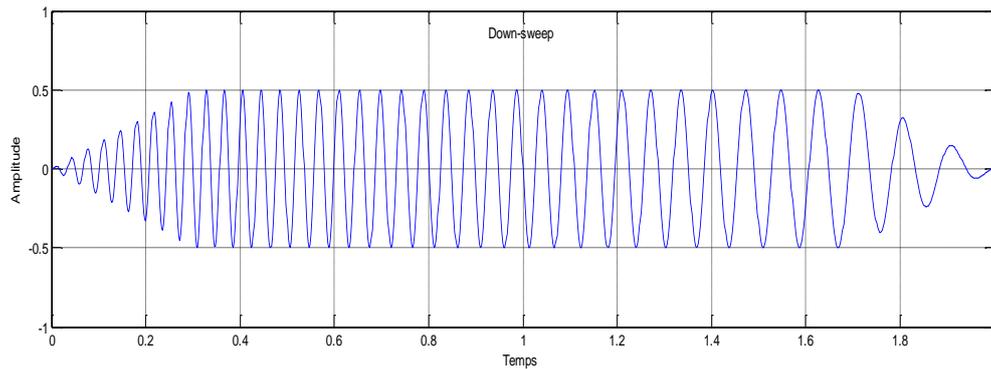


Figure II.10 : Un modèle d'un Down-sweep

2. **Longueur :** elle est de plusieurs secondes. Dans un enregistrement vibrosismique, 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 informative 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 on va 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 :

$$\mathbf{S/B = 20 \log_{10} N.G (n.C.B.T)^{0.5}} \quad (\text{II.16})$$

- Tel que: **N** : Nombre de vibrateurs ;
G : Peak Force appliqué ;
n : Nombre de sweep par VP ;
C : Couverture multiple ;
B : Bande de fréquences ;
T : Longueur du sweep en temps.

La figure (II.11) représente deux sweeps de longueurs différentes (bleue : 8 sec ; rouge : 12sec) de même bande fréquentielle, on voit clairement que le spectre d'amplitude du signal est plus long et plus riche en énergie que celui avec une longueur inférieure.

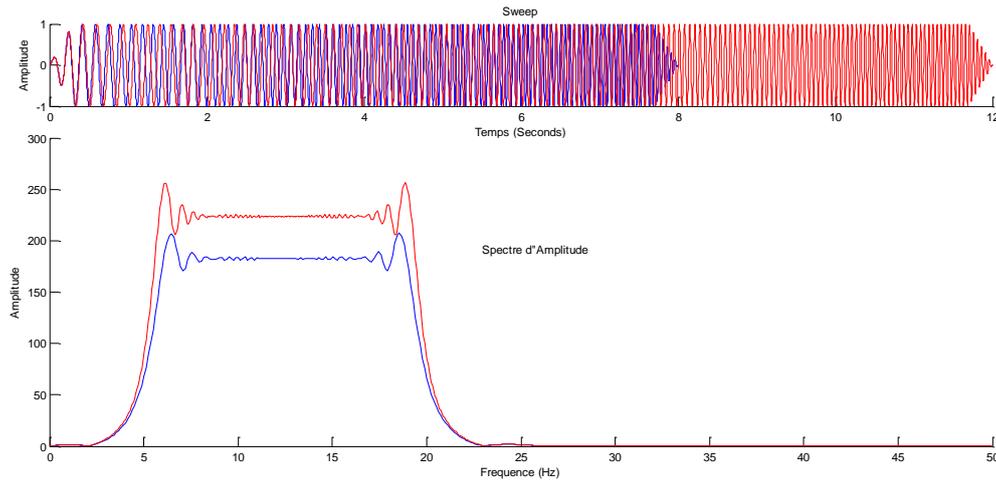


Figure II.11 : effet de la longueur du sweep, en haut : deux sweep de différentes longueurs, en bas : les spectres d'amplitudes des deux sweeps.

3. Bande fréquentielle : Elle représente la bande de fréquence contenue dans le sweep et injectée 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 $\mathbf{B} = [f_0 - f_m]$.(figure II.6)

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

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

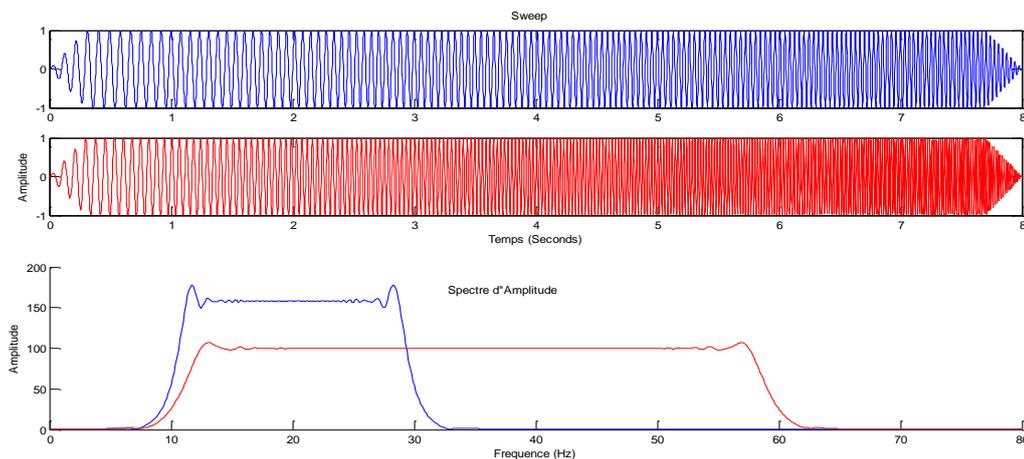


Figure II.12 : effet de la bande fréquentielle sur le spectre d'amplitude sur un sweep

La figure (II.12) 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.

4. Loi de variation des fréquences : renseigne sur le type de sweep (up-sweep ; down-sweep ; linéaire sweep ; logarithmique : exponentielle...).

5. Loi de variation des amplitudes (enveloppe) : en applique la même loi pour tous les sweeps.

6. L'effilement (tapering) : En réalité, le sweep commence et se termine en fuseau, il consiste à pondérer de façon symétrique le sweep brut par une fonction d'apodisation pouvant prendre l'une des formes suivantes :

$$- \text{ linéaire : } a(t) = \begin{cases} \frac{t}{T_1} & 0 \leq t \leq T_1 \\ 1 & T_1 \leq t \leq T - T_1 \\ -\frac{t}{T_1}(t-T) & T - T_1 \leq t \leq T \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

$$- \text{ Sinusoïdale : } a(t) = \begin{cases} \text{Sin}\left(\frac{\pi t}{2T_1}\right) & 0 \leq t \leq T_1 \\ 1 & T_1 \leq t \leq T - T_1 \\ \text{Sin}\left(\frac{\pi t}{2T_1}(t-2T_1)\right) & T - T_1 \leq t \leq T \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

$$- \text{ Cosinusoïdale : } a(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi t}{T_1}\right) & 0 \leq t \leq T_1 \\ 1 & T_1 \leq t \leq T - T_1 \\ \frac{1}{2} (1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T_1}(t - T)\right)) & T - T_1 \leq t \leq T \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

On utilise un taper pour deux raisons :

1. Les amplitudes des vibrations de la plaque pulsante doivent passer de zéro (repos) au régime permanent (amplitude constante), de manière progressive ;

2. Les amplitudes des lobes secondaires de l'autocorrélation seront atténuées.

En opérant pour un sweep pondéré, on minimise deux effets gênants qui se présentent lors de l'utilisation d'un sweep ayant une forme rectangulaire :

Dans le domaine temporel, l'autocorrélation d'un sweep rectangulaire aura des lobes secondaires latéraux qui sont liés à la grandeur d'oscillation. Si on corrèle la trace brute avec le sweep de référence, les lobes secondaires de la fonction d'autocorrélation (FAC) vont se superposer dans les zones des arrivées proches. Ce manque de résolution détériorera

l'efficacité de la méthode de corrélation, qui est un outil important pour la détection des signaux noyés dans les bruits.

Dans le domaine fréquentiel, le spectre d'amplitude du sweep sera affecté par les oscillations de Gibbs aux voisinages des fréquences extrêmes.

L'application d'une fonction de pondération dite " taper " aux extrémités du sweep réduira les lobes secondaires de la fonction d'autocorrélation (FAC) et par suite de minimiser les oscillations de Gibbs dans le spectre d'amplitude avec une dégradation minimale de la bande de fréquences.

La figure (II.13) présente trois sweeps de même longueur ($T= 8\text{sec}$) et de même bande fréquentielle ($B = [8 - 80\text{Hz}]$). Le sweep en "Noir" n'est soumis à aucune loi de pondération. On applique sur le sweep en "Bleue" un taper linéaire de longueur de 0.3sec, sur le sweep en "Rouge" un taper sinusoïdal de longueur 0.3sec et sur le "Vert", on applique un taper cosinoïdal. On remarque sur le spectre d'amplitude du sweep sans taper l'apparition des oscillations de Gibbs sur toute la bande passante qui disparaissent avec l'application du taper.

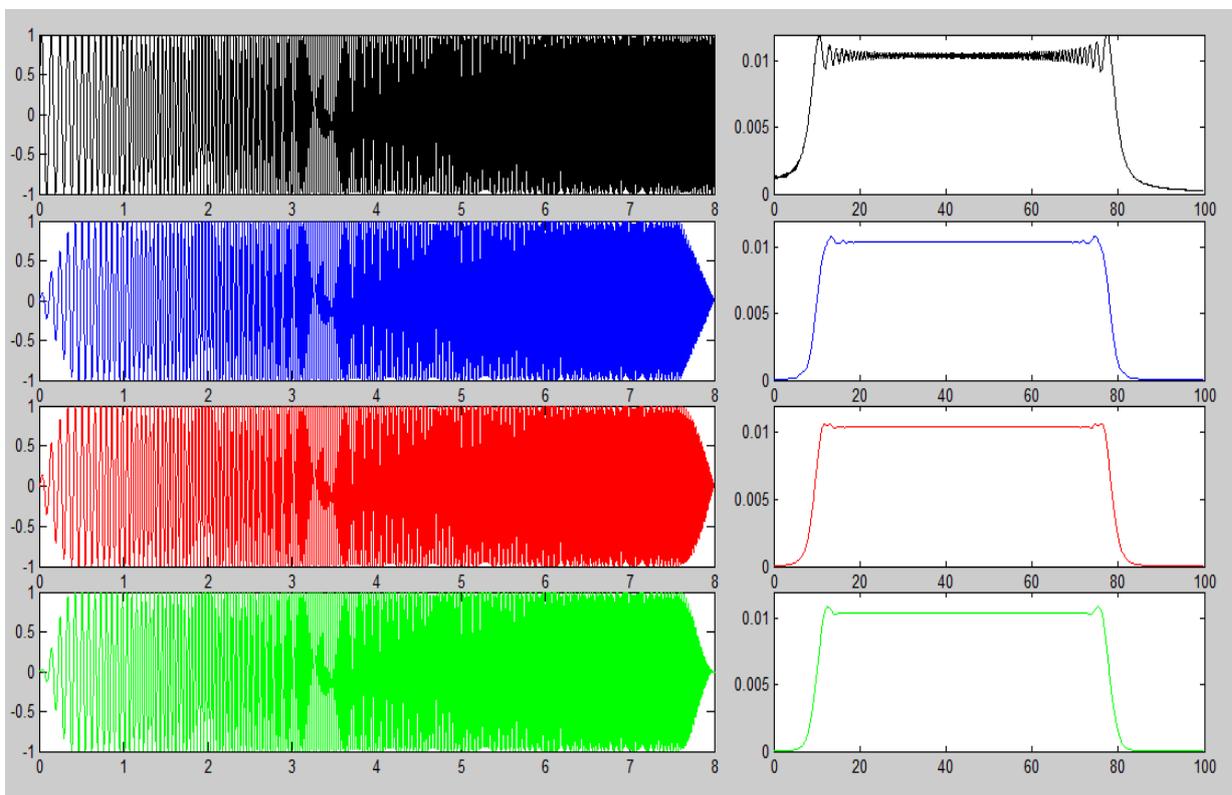


Figure II.13: effet de la loi de pondération. A gauche : différents sweeps avec différents types de taper, à droite : leurs spectres d'amplitude.

La Figure (II.14) montre l'effet de la longueur de tapering. Pour une longueur de 0.3 sec, les lobes secondaires restent énergiques ce qui peut masquer les réflexions très profondes. En augmentant progressivement la longueur du taper, on tend à réduire les lobes secondaires, en conséquent, on réduit le contenu fréquentielle des réflexions, jusqu'à la longueur de 3sec où les lobes secondaires se trouvent fortement atténués et l'obtention des réflexions très basse fréquences. Ainsi, on remarque la naissance d'un phénomène qui accompagne la longueur du tapering qui est la dégradation de la **définition du signal**. Donc, il faut trouver un compromis raisonnable entre la longueur du tapering et la définition.

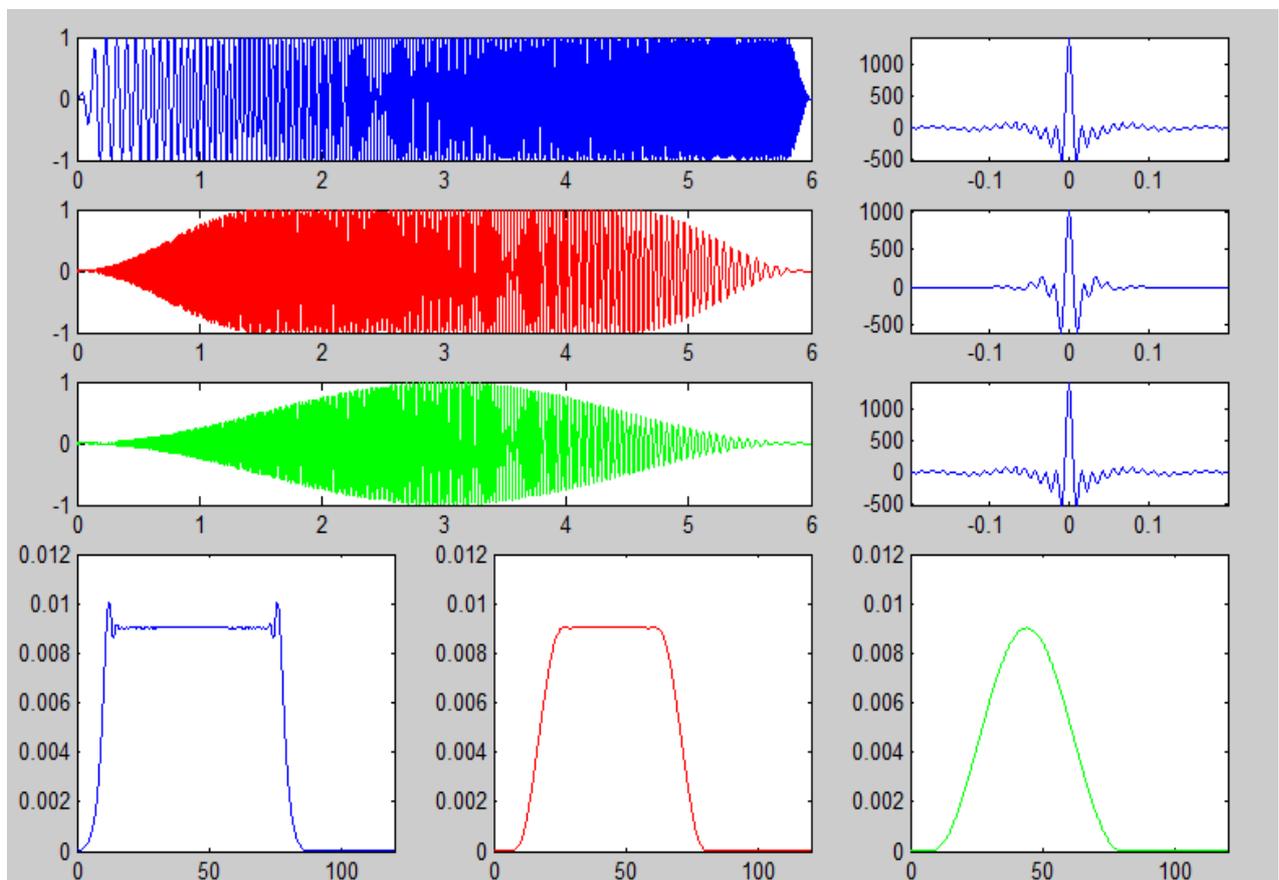


Figure II.14 : effet de la longueur du taper sur le sweep d'amplitude et sur la f.

11. Technique de la corrélation en vibrosismique :

11.1 Procédé de corrélation :

Le sismographe du vibroseis (vibrogramme) ne peut pas être pointé directement, il doit être transformé par un processus mathématique appelé **procédé de corrélation**, en un

sismogramme plus court, qui est similaire à celui obtenu par les méthodes explosives. Qualitativement, le procédé de corrélation pourrait être décrit comme une mesure de similarité (cohérence) entre deux signaux.

Désignons par $s(t)$ le signal enregistré par $e(t)$ le train d'impulsion émise :

$$s(t) = \sum_i \lambda_i e(t - \tau_i) \quad (\text{II.20})$$

Un début de traitement consisterait à procéder à la cross-corrélation de ces deux types de signaux ;

$$\Phi_{es}(t) = e(-t) * s(t)$$

$$\Phi_{es}(t) = e(-t) * \sum_i \lambda_i e(t - \tau_i)$$

$$\Phi_{es}(t) = \sum_i \lambda_i (e(-t) * e(t - \tau_i))$$

$$\Phi_{es}(t) = \sum_i \lambda_i (e(-t) * (t - \tau_i)) * \delta(t - \tau_i)$$

$$\Phi_{es}(t) = \sum_i \lambda_i \Phi_{ee}(t - \tau_i) \quad (\text{II.21})$$

La cross- corrélation permet ‘‘ compression’’ du signal.

Un signal de phase nulle à des temps d'arrivée propre τ_i , dans le domaine spectral,

Si $\Phi_{es}(f) = \text{TF} [\Phi_{es}(t)]$

$$\Phi_{es}(f) = \sum_i \lambda_i \Phi_{ee}(f) \cdot e^{-2\pi j f \tau_i}$$

$$\Phi_{es}(f) = \Phi_{ee}(f) \cdot \sum_i \lambda_i e^{-2\pi j f \tau_i} \quad (\text{II.22})$$

Dans le domaine temporel, la fonction d'autocorrélation n'a de valeur significative que sur un intervalle de déplacement donné, il est donc possible d'éliminer le recouvrement produit par le passage d'un signal long dans le sol.

Si l'enregistrement vibroseis est cross-corrélé avec le sweep pilote, des valeurs maximales de corrélation (similarité maximale) apparaissent quand le signal pilote se reconnaît. Dans ce cas, le procédé de corrélation, le signal sismique détecte toutes les réflexions et les situe spatialement grâce à la position de l'ondelette de corrélation. Ces ondelettes différeront en termes d'amplitude, de polarité et de temps d'arrivée en fonction des propriétés physiques de la subsurface à étudier. Alors que les méthodes de traitement et d'interprétation connues dans le cas de l'acquisition par sources impulsives peuvent être appliquées

- Le temps de première arrivée (time break ou temps nul) est obtenu par autocorrélation du signal d'entrée
- La technique de corrélation peut être perçue comme une opération de filtrage, elle détecte les périodicités cachées dans un signal
- La procédure de cross-corrélation permet d'effectuer une discrimination vis-à-vis des bruits non-cohérents et peut représenter presque une fenêtre passe-bande rectangulaire idéale.
- Un problème majeur dans la technique de vibroseis est posé par le couplage base-plat/sol .Des incidences non-linéaires peuvent naître de cette imperfection et se manifeste par l'apparition d'harmonique par exemple à côté d'un sweep situé entre 10 Hz et 40 Hz, un second harmonique entre 20 Hz et 80 Hz peuvent être générés.
- Dans la phase de corrélation, le sweep original caractérisé par son propre contenu fréquentiel sera corrélé non seulement avec lui-même mais aussi avec certaines parties des différents harmoniques, générant ainsi les amplitudes relativement importantes comparées au pic principal de la corrélation effective.

11.2 Résidus de corrélation :

Dans la pratique, le film corrélé diffère légèrement du film classique, car le signal obtenu après corrélation n'est pas une vraie fonction d'autocorrélation, symétrique, à cause des effets suivants :

- Les pics secondaires de l'autocorrélation parfaite restent peu énergiques, et peuvent être gênants s'ils viennent à interférer avec des réflexions voisines peu énergétiques par rapport à la réflexion qui les génère (cas pour les traces proches du point vibré)
- En dehors des parasites liés au principe de la corrélation, il en existe d'autres liés aux déformations du signal par filtrage sélective :
 - 1- Dans la zone altérée (WZ), le filtrage terrain n'est pas linéaire et déforme le signal émis en fonction de la fréquence, on peut dire que le signal émis après avoir traversé la WZ n'est plus identique au signal de référence qui servira à la corrélation.
 - 2- Par mauvais couplage de la plaque vibrante au sol, spécialement dans les basses fréquences, appelés **distorsions harmoniques** qui ont l'effet d'ajouter une longue oscillation au corrélogramme du sweep. Cette distorsion peut être reconnue visuellement sur l'enregistrement non corrélé.

11.3 L'autocorrélation du sweep :

L'ondelette "Klauder" : représente l'autocorrélation du sweep, elle est calculée comme suit :

$$K(t) = \Phi_{ss}(t) = s(-t) * s(t) \quad (II.23)$$

Les paramètres essentiels du sweep (cités dessous) ont un rapport avec certaines caractéristiques physiques, pouvant être obtenu à partir de l'ondelette de Klauder.

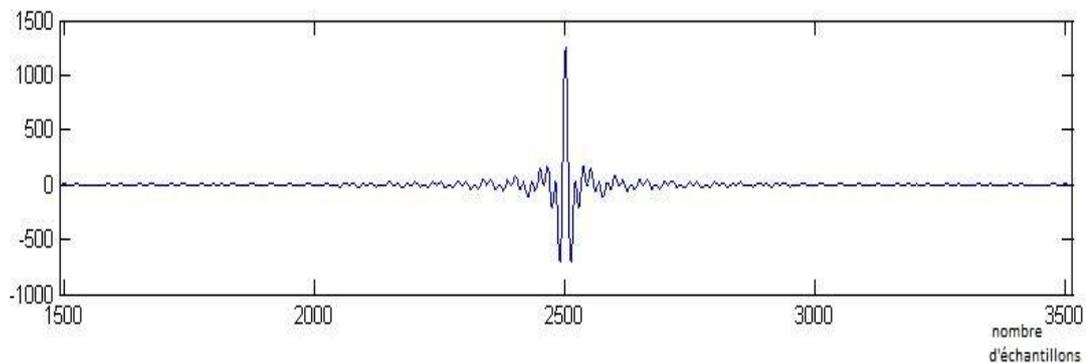


Figure II.15 : Klauder d'un Sweep de T= 5sec.

11.4 Caractéristiques physiques d'un "Klauder" :

a) Définition :

C'est le rapport entre l'amplitude du pic maximal et celle du pic adjacent. Elle caractérise l'aptitude à bien identifier une réflexion sur des données vibroseis. Plus la bande fréquentielle du sweep est large, plus la définition est grande. la définition d'un Klauder est donnée comme suit :

$$\text{Définition} = \frac{A_0}{A_1} \quad (II.24)$$

Avec :

A_0 : Amplitude du pic principal

A_1 : Amplitude du pic secondaire adjacent

La figure (II.16) illustre les paramètres de la définition d'un Klauder.

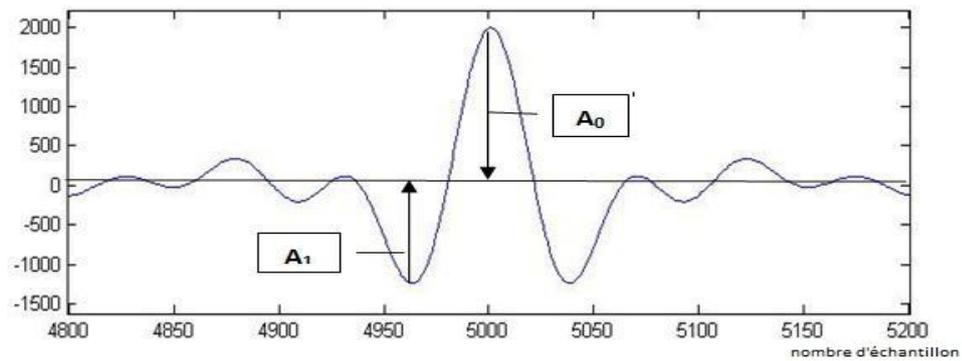


Figure II.16 : Paramètres de définition d'un Klauder

b) Résolution et largeur :

Par son spectre " convolutif ", l'autocorrélation a pour effet un allongement du signal ; comme l'émergence d'un pic central dominant par rapport aux pics secondaires ne se manifeste que s'il y a un "raccourcissement" valable, il est alors souhaitable que l'autocorrélation aboutisse à une concentration de l'énergie doublée d'une annulation de la phase spectrale.

La mise en évidence du pic centrale est fonction du contraste des fréquences extrêmes f_1 et f_2 .

Cette émergence variera comme le rapport :

$$\frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} = \frac{B}{2f_c} \quad (\text{II.25})$$

La résolution est définie comme la largeur du lobe central c'est-à-dire l'écart temporel entre les deux premiers zéros de part et d'autre du pic central. Elle caractérise l'aptitude à discerner deux événements adjacents .plus le contenu HF dans la bande fréquentielle du sweep est grand plus cet écart est petit. Elle est alors traduite par l'exigüité du pic.

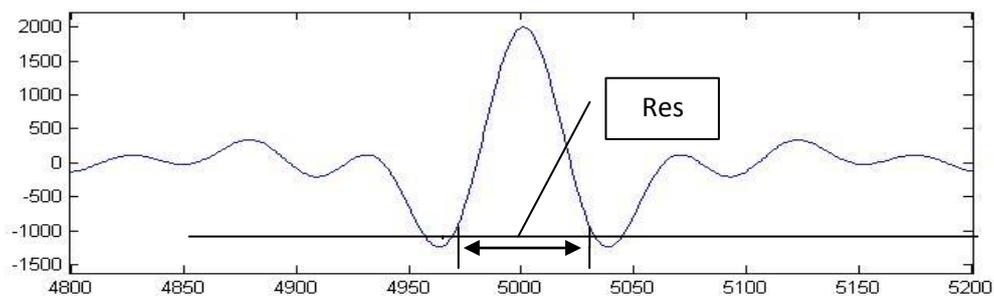


Figure II.17 : Facteur influant sur la résolution

La résolution, elle-même dépend du contraste des fréquences f_1 et f_2 conformément à la figure II.18.

Nous remarquons que la résolution fréquentielle est fonction de la largeur de la bande B, qui elle-même, dépend de la borne supérieure f_2 . Plus la bande fréquentielle est large, plus le pic central est "comprimé". La résolution se trouve alors améliorée.

Cependant, il faut noter que si le contraste des fréquences extrêmes est petit, l'émergence se trouve réduite.

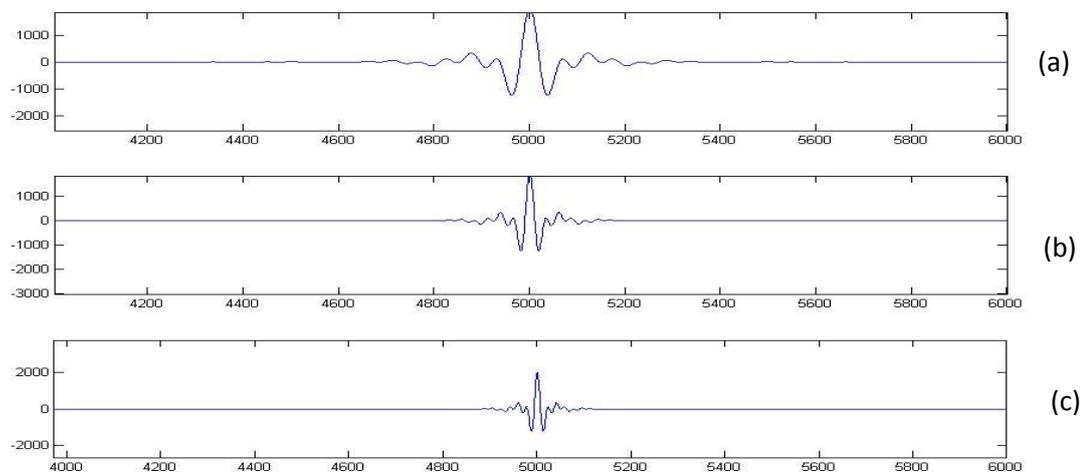


Figure II.18 : Effet de la largeur de la bande fréquentielle sur la résolution.

(a) : $B = [10, 40 \text{ Hz}]$

(b) : $B = [10, 60 \text{ Hz}]$

(c) : $B = [10, 80 \text{ Hz}]$

12. Avantages et inconvénients de la méthode vibrosismique :

A la fin nous citons ci-dessus quelques avantages et quelques inconvénients propres à la méthode vibrosismique

a) Avantages de la méthode :

- 1) La méthode vibrosismique permet d'éviter l'utilisation des sources explosives ce qui rend le système utilisable même en milieu urbain et pour d'autres considérations environnementales
- 2) La méthode utilise des signaux étalés dans le temps ce qui permet le contrôle de la durée de la source ainsi que le contrôle de l'énergie émise dans le sol
- 3) Le système vibroseis s'avère plus économique que les sources explosives

- 4) La vibrosismique ne nécessite pas des forages
- 5) Suppression des stockages des explosives qui représentait un énorme soucis pour l'ancienne méthode
- 6) Le lien entre le procédé de corrélation avec le balayage fréquentiel fournit un effet de filtrage. Le procédé de corrélation permet d'éliminer tous les bruits dont les fréquences ne sont pas incluses dans la bande fréquentielle du signal émis, le film corrélé aura un contenu fréquentielle similaire à celui du sweep utilisé pendant la corrélation. Par conséquent la Ground Roll peut être atténuée soit par filtrage spatial comme en sismique impulsionnelle, soit en faisant déplacer la fréquence minimale du sweep émis vers les HF de sorte que la fréquence de celui-ci soit rejetée en dehors de la bande fréquentielle émise.

a) Inconvénients de la méthode :

En contrepartie, la méthode vibrosismique présente quelque inconvénient tels que :

- 1) La nécessité d'un accès le long du profil aussi continu que possible
- 2) La faiblesse relative de l'énergie mise en jeu, donc nécessité de sommer plusieurs vibrations pour compenser la faible énergie sismique de chaque vibreur
- 3) La nécessité de traiter mathématiquement les enregistrements en vue d'obtenir un signal comparable à celui obtenu avec la méthode impulsionnelle
- 4) Une forte présence des ondes de surface générées par les vibreurs
- 5) Présence des effets non linéaire affectant le signal émis
- 6) Une possibilité d'introduire en erreur l'interpréteur sur le fait que les harmoniques fantômes peuvent être perçus comme des réflexions
- 7) La cherté du mécanisme hydraulique sophistiqué
- 8) Les inévitables bruits introduits par le procédé de corrélation dus au fait que le signal émis n'est pas parfaitement identique à celui utilisé pour la corrélation
- 9) Le temps d'enregistrement est relativement long (temps d'écoute + longueur du sweep).

1. Introduction :

Lors de l'acquisition vibrosismique, le camion vibreur (Vibroseis) engendre des distorsions harmoniques dans le Sweep pilote (sweep de référence) que l'on souhaiterait générer. Ces distorsions sont considérées comme des bruits parasitant le traitement et l'interprétation des données sismiques.

2. Origine des distorsions harmoniques :

La distorsion harmonique est principalement due à la présence de la non-linéarité des systèmes suivants :

2.1 Principe de fonctionnement du système Servo-valve et inconvénients :

Dans le circuit hydraulique, les oscillations de la force initiée par la base-plate sont produites par la transmission discontinues de l'huile par le Servo-valve, la valve s'ouvre et se referme discontinuellement, par conséquent son mouvement peut introduire des distorsions sur le signal de la force appliquée. Ainsi que le système (LVDT) qui est un système causal, réagit uniquement à l'événement il ne peut pas être prédit. Ceci implique que les distorsions harmoniques ne peuvent être éliminées par le système de contrôle du Servo-valve et sont souvent présentes sur les enregistrements des opérations de la sismique de surface utilisant un modulateur mécanique de fréquence (figure III.1).

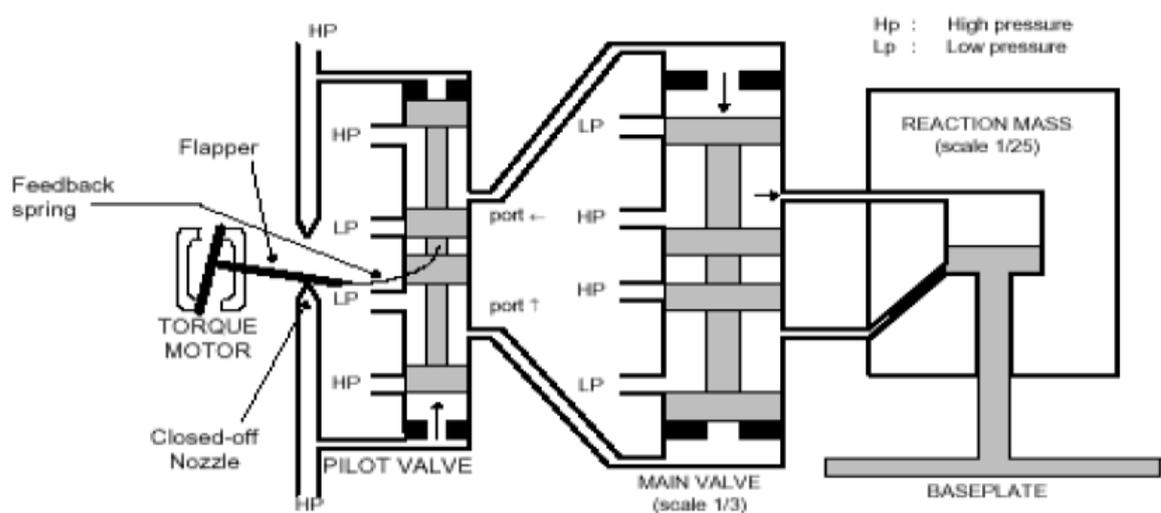


Figure III.1 : Schéma de principe du fonctionnement du Servo-valve

2.2 Mauvais couplage avec le sol :

La non linéarité due au mauvais couplage de la base plate au sol qui est représentée par une forte réponse non linéaire, est causée par la différence de rigidité entre les phase de compression et de traction (figure III.2).

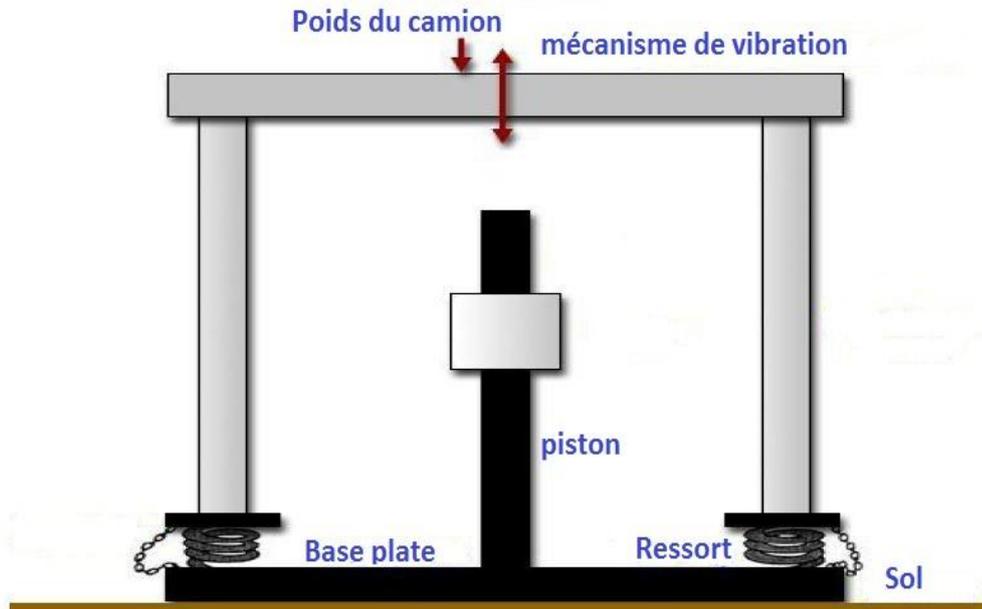


Figure III.2 : Couplage: base plate-sol

3. Distorsion harmonique :

L'effet de la distorsion harmonique est d'ajouter une longue queue oscillatoire au corrélogramme. Dans le cas d'un up-sweep, l'effet de la distorsion apparaît comme des réverbérations antérieures et dans le cas d'un down-sweep, elles sont postérieures.

L'expression mathématique du $k^{\text{ième}}$ harmonique s'écrit comme suit :

$$s_k(t) = a_k(t) \cdot \sin(\phi_k(t)) \quad (\text{III.1})$$

Avec:

$a_k(t)$: Loi d'amplitude

$\phi_k(t) = k\phi_k(t)$: loi de phase

La fréquence de cet harmonique a pour expression :

$$f_k(t) = kf(t)$$

	Sweep fondamental	Harmonique d'ordre k
Amplitude	a(t)	a _k (a(t))
Durée	T	T
Fréquence initiale	f ₁	k. f ₁
Fréquence finale	f ₂	k. f ₂
Bande fréquentielle	B = f ₁ - f ₂	k. B

Tableau III.1 : caractéristiques du sweep fondamental et de son k^{ème} harmonique.

Le sweep émis dans le sous sol S(t) est un sweep affecté par les harmoniques, donc il est présenté sous forme d'une somme qui est égale :

$$S(t) = \sum_{k \geq 1} S_k(t)$$

$$S(t) = S_1(t) + \sum_{k \geq 2} S_k(t) \tag{III.2}$$

S₁(t) : représente le sweep fondamentale

$\sum_{k \geq 2} S_k(t)$: représente l'ensemble des harmoniques qui interviennent dans l'effet de distorsion d'un sweep.

L'effet de la distorsion harmonique sur un sweep dépend de la nature du mécanisme de distorsion (amplitude, phase ...) aussi bien que du taux de changement de la fréquence instantanée **f_i**. Si on suppose que la **df_i/dt** soit petite et que la **k^{ème}** distorsion harmonique de ce sweep aura l'effet d'addition sur le sweep principal.

La **figure III.3** présente un down-sweep, up-sweep de même bande fréquentielle B= [80,8Hz] et même durée T= 8sec, avec leurs spectres d'amplitude et leurs représentations dans le domaine temps-fréquence. Dans le domaine temporelle, on ne peut pas distinguer le fondamental des harmoniques, alors que la projection temps-fréquence permet cette séparation.

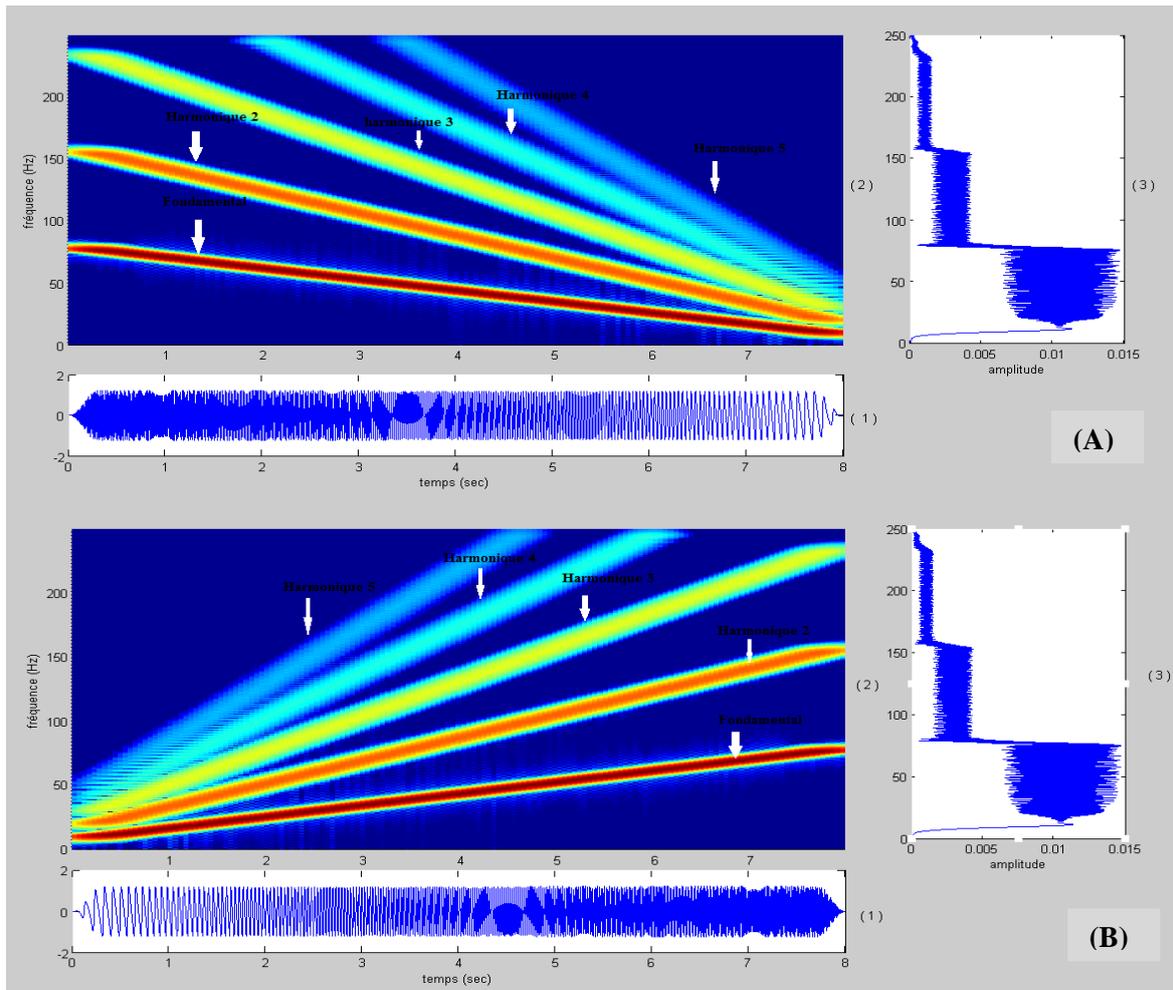


Figure III.3 : différentes représentations de sweep avec harmoniques.

A : (1) Down-sweep, $B = [80 - 8]$ et $T = 8\text{sec}$. (2) Représentation temps-fréquence de (1)
 (3) Spectre d'amplitude de (1).

B : (1) Up-sweep $B = [8 - 80]$ et $T = 8\text{sec}$. (2) Représentation temps-fréquence de (1)
 (3) spectre d'amplitude de (1).

4. Effet des harmoniques sur la crosscorrélation :

Si l'enregistrement terrain contient un signal distordu de la forme $S(t)$ la cross-corrélation avec $S_1(t)$ produira une somme de termes :

$$\Phi(t) = S(\tau) * S_1(-\tau) \tag{III.3}$$

$$\Phi(t) = S(\tau) * S_1(-\tau)$$

$$\Phi(t) = [S_1(\tau) + \sum_{k \geq 2} S_k(\tau)] * S_1(-\tau) = [S_1(\tau) * S_1(-\tau)] + [\sum_{k \geq 2} S_k(\tau) * S_1(-\tau)]$$

$$\text{Or: } \Phi_{s_1 s_1}(t) = S_1(\tau) * S_1(-\tau) \quad (\text{III.4})$$

$$\Phi_{s_k s_1}(t) = \sum_{k \geq 2} S_k(\tau) * S_1(-\tau) \quad (\text{III.5})$$

Avec : $S(t)$: sweep émis

$S_1(t)$: le sweep fondamental (de référence)

$S_k(t)$: les composantes harmoniques

τ : le shift temporel

Le premier terme (III.4) représente l'autocorrélation du sweep $S_1(t)$

Les termes restants de la somme (III.5) sont la cross-corrélation du $k^{\text{ième}}$ harmonique avec le sweep de référence. Ces termes constituent des perturbations indésirables sur les enregistrements sismiques corrélés. Ces derniers apparaissent dans le corrélogramme comme des réverbérations antérieures pour un up-sweep et ainsi ils pourront masquer les réflexions à faible énergie d'où la diminution du rapport S/B.

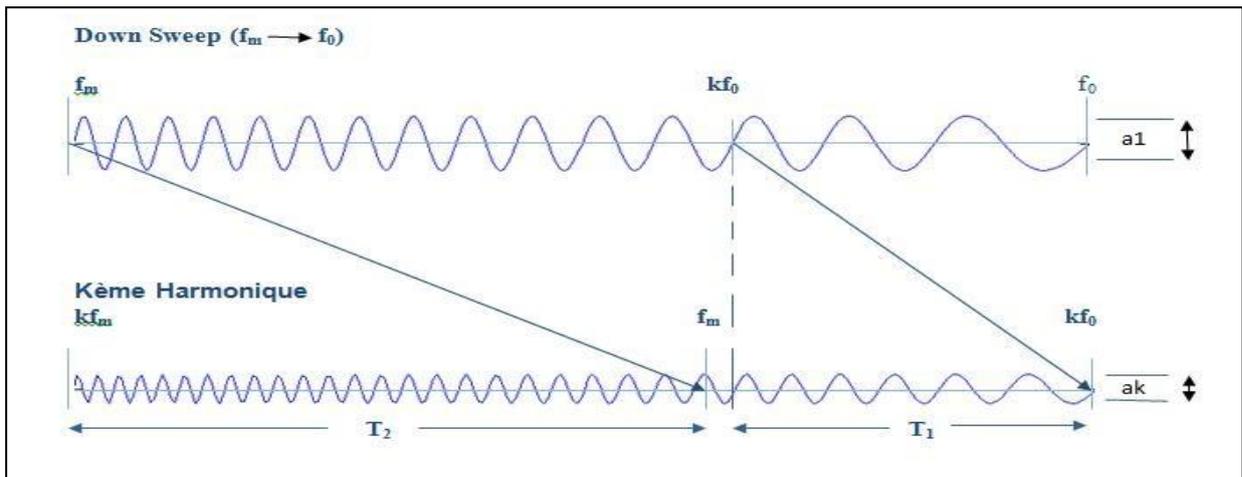


Figure III.4: down-sweep montrant le fondamental et le kième harmonique

La **figure (III.4)** illustre un down-sweep de bande fréquentielle $[f_m, f_0]$ et son $k^{\text{ième}}$ harmonique de bande fréquentielle $[kf_m, kf_0]$, on peut voir que la bande fréquentielle qui s'étend de f_m à kf_0 est commune entre les deux signaux, le fondamental et l'harmonique, uniquement si $kf_0 < f_m$.

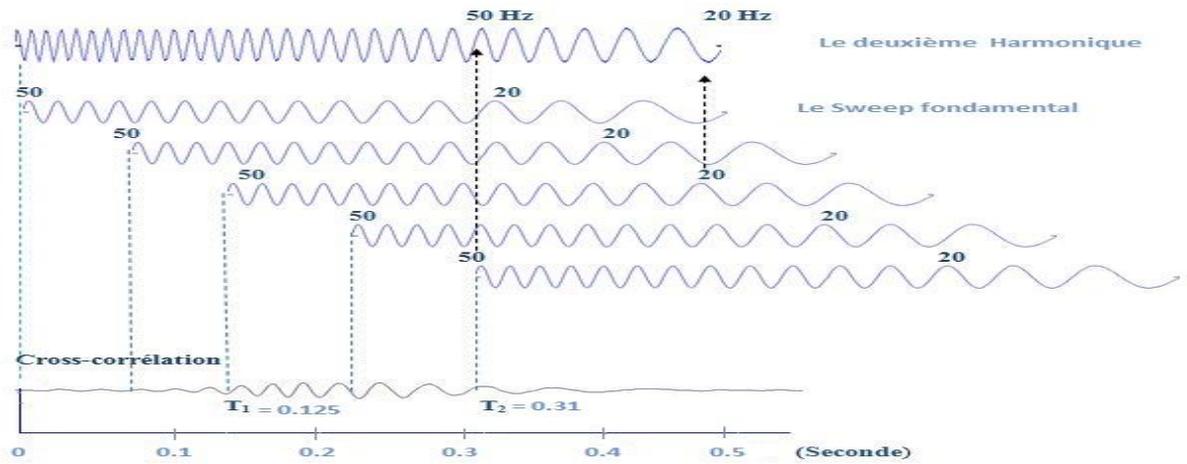


Figure III.5 : illustration de la cross-corrélation d'un sweep de longueur de 0.5sec et de bande fréquentielle [50, 10Hz] avec sa seconde harmonique.

La **figure (III.5)** montre l'effet de la bande de fréquence commune sur la trace sismique lors de la cross-corrélation avec une limitation de l'intervalle d'apparition des harmoniques entre T_1 et T_2 . Les valeurs de la cross-corrélation sont très petites pour tous les décalages pour lesquels les portions multipliées et additionnées sont des sinusoïdes de fréquences différentes. Cependant, des valeurs relativement grandes sont obtenues lorsque les décalages produisent des coïncidences de portions ayant les mêmes fréquences. Le décalage le plus petit pour lequel l'apparition des harmoniques dans la cross-corrélation est possible à partir de T_1 est le déplacement pour lequel le segment de fréquence kf_0 du fondamental coïncide avec celui de l'harmonique. Juste après, la cross-corrélation prend à peu près la forme d'une sinusoïde de fréquence kf_0 . Comme le déplacement augmente de T_1 à T_2 la fréquence augmente graduellement, de même pour les valeurs de la cross-corrélation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur f_m au temps T_2 . Pour des décalages plus grands que T_2 la cross-corrélation redeviendra petite.

La trace en bas dans la **figure (III.5)** représente les résidus de la cross-corrélation, le temps zéro (0) correspond au décalage pour lequel les deux signaux se superposent; il est aussi le temps où le pic fondamental de l'autocorrélation se produit. L'amplitude de la trace est relative à ce pique. Comme le sweep de référence est décalé à droite, l'amplitude de la cross-corrélation commence à augmenter graduellement à partir de T_1 , elle est presque constante jusqu'à T_2 et décroît juste après. Si on fait le décalage du sweep vers la gauche (cas d'un down sweep) aucune coïncidence de fréquences ne sera observée. En effet, on conclue que la distorsion harmonique produit des réverbérations de cross-corrélation sur seulement un seul côté du pic de l'autocorrélation. Ces distorsions harmoniques apparaissent comme des

réverbérations postérieures pour une down-sweep et antérieures pour un up-sweep, elles se situent entre deux temps T_1 et T_2 par au pic de l'autocorrélation du sweep fondamental, la figure III.6 illustre le processus :

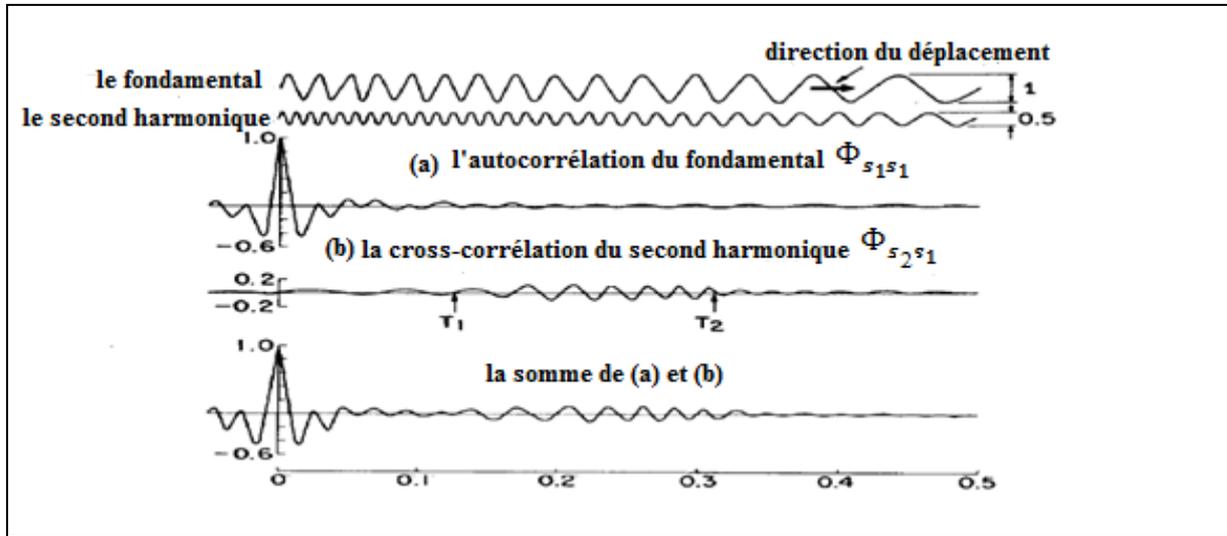


Figure III.6 : Corrélogramme correspondant à l'exemple présenté dans la figure III.5 (A. J. SERIFF* AND W. H. KIM *)

5. Estimation de l'intervalle de la distorsion (temps d'occurrence) :

Comme indiqué précédemment, La partie significative de l'amplitude de la cross-corrélation apparait entre deux temps T_1 et T_2 , dans l'intervalle $[T_1 ; T_2]$ pour le down-sweep et dans $[-T_1 ; -T_2]$ pour le up-sweep.

T_1 et T_2 sont données par les expressions suivantes :

$$T_1 = \frac{(k-1)Tf_0}{B} \quad (III.6)$$

$$T_2 = \frac{(k-1)Tf_m}{kB} \quad (III.7)$$

Où T_1 correspond au temps d'apparition de kf_0 , c'est le déplacement du fondamental par rapport à l'harmonique qui portera la fréquence kf_0 à se coïncider dans les deux signaux (l'harmonique et le fondamental). De même, T_2 est le déplacement permettant à f_m dans le fondamental de rencontrer la même fréquence dans l'harmonique.

Démonstration

-Expression de T_1 :

$$f = f_0 + \frac{t}{T} (f_m - f_0) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Pour } t=0 \quad f = f_0 \\ \text{Pour } t=T \quad f = f_m \end{array} \right. \quad (III.8)$$

Ainsi, pour $f = 2f_0$ (harmonique 2), on calcule le temps correspondant à T_1 :

$$2 f_0 = f_0 + \frac{t_1}{T} (f_m - f_0)$$

$$T_1 = \frac{T f_0}{f_m - f_0}$$

En généralisant, on obtient :

$$T_1 = \frac{(k-1)Tf_0}{B} \tag{III.9}$$

-Expression de T_2 :

$$f_m = k \left(f_0 + \frac{t_2}{T} B \right)$$

$$f_m - k f_0 = k \frac{B}{T} t_2$$

$$t_2 = \frac{T}{kB} (f_m - k f_0)$$

$$T_2 = T - \frac{T}{kB} (f_m - k f_0)$$

Donc

$$T_2 = \frac{(k-1)Tf_m}{kB} \tag{III.10}$$

Il est important de noter qu'aucune distorsion harmonique significative n'est observée pour un up-sweep ou un down-sweep si $kf_0 > f_m$ ou si $(k-1)f_0 > B$, c'est-à-dire quand la largeur de la bande fréquentielle du sweep fondamental est inférieure à $(k-1)f_0$.

On examine les variations de T_1 et T_2 en fonction de la bande de fréquence B du sweep fondamental (**figure III.6**):

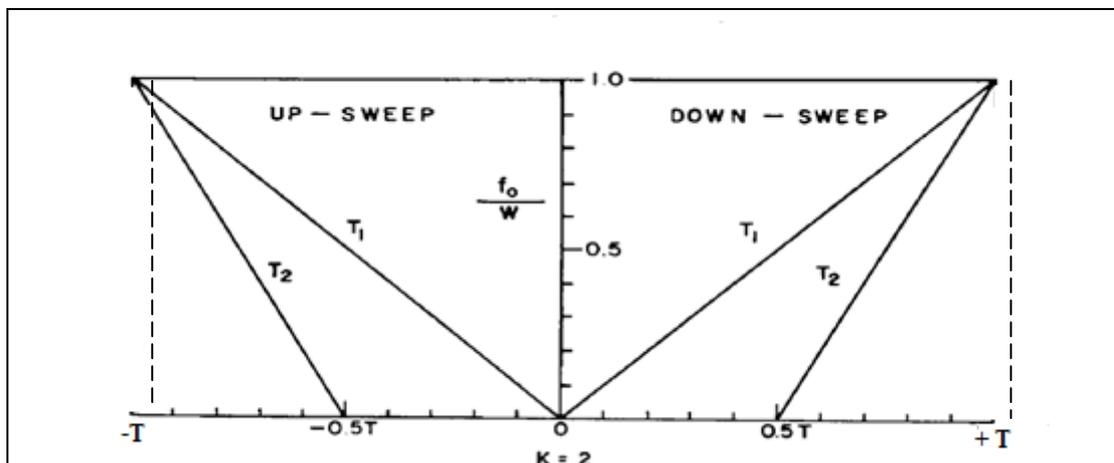


Figure III.6: Représentation graphique de T_1 et de T_2 en fonction de $\frac{f_0}{B}$ et T pour $k = 2$

T_1 et T_2 sont des fractions de T pour différentes valeurs de $\frac{f_0}{B}$. Pour $\frac{f_0}{B} = 1$ $T_1 = T_2$, pour $\frac{f_0}{B}$ supérieur à 1, aucune distorsion significative n'est produite. Comme exemple, on considère un sweep 60 – 20Hz qui dure 7 sec, comme $\frac{f_0}{B} = 0.5$, on détermine de la figure précédente $T_1 = 0.5 T = 3.5\text{sec}$ et $T_2 = 0.75 T = 5.25\text{sec}$, ici la queue de la première arrivée peut interférer avec des réflexions au delà de 3.5 sec. Dans certains cas, ce délai est suffisant pour valider l'utilisation d'un down-sweep sans considération de la taille de la distorsion. Pour un sweep de bande [50 – 10 Hz] avec $T_1 = 1.8 \text{ sec}$ et $T_2 = 4.4\text{sec}$, la distorsion couvre la majorité de l'intervalle de réflexion.

Puisque l'harmonique d'ordre 2 étant très énergétique, il faut prendre des précautions lors du choix du sweep à utilisé :

a) choix de l'ondelette ou largeur de bande :

Afin d'éviter l'enregistrement de la harmonique d'ordre 2 en même temps que le signal réflexion, il faudrait qu'il arrive à la fin d'enregistrement ou à la rigueur à la fin du sweep, c'est-à-dire il faut que :

$$T_1 > T \longrightarrow \frac{T_1}{T} = \frac{f_0}{B} \geq 1 \quad B \leq f_0$$

b) choix de la longueur du sweep :

On choisit une longueur de sweep de telle sorte que l'harmonique d'ordre 2 arrive postérieurement à tout objectif géologique déclaré. Pour atteindre ce but, une augmentation de la longueur du sweep peut être bénéfique.

6. L'utilisation du signal émis (Ground Force) pour la corrélation :

Une fois qu'on connaît que le signal émis du vibrateur peut ne pas avoir la même forme du signal pilote, on pense que c'est plus logique d'utiliser le sweep émis pour le processus de la crosscorrélation au lieu du sweep pilote.

Afin de voir l'effet qu'aura l'utilisation du signal émis pour la corrélation, on ne considère que le cas du second harmonique pour des raisons de simplification

$$S(t) = S_1(t) + S_2(t)$$

Tel que :

$S(t)$: signal émis (GF)

$S_1(t)$: signal fondamental

$S_2(t)$: second harmonique

Si on note $\Phi(t)$ la corrélation de $S(t)$ avec lui-même, on peut écrire :

$$\Phi(t) = S(\tau) * S(-\tau)$$

$$\Phi(t) = S_1(\tau) * S_1(-\tau) + S_2(\tau) * S_2(-\tau) + S_1(\tau) * S_2(-\tau) + S_2(\tau) * S_1(-\tau)$$

$$\Phi(t) = \Phi_{s_1s_1}(t) + \Phi_{s_2s_2}(t) + \Phi_{s_1s_2}(t) + \Phi_{s_2s_1}(t)$$

L'effet de l'utilisation de $S(t)$ au lieu de $S_1(t)$ en tant que signal de corrélation est d'ajouter les termes $\Phi_{s_2s_2}(t)$ et $\Phi_{s_2s_1}(t)$ à ceux précédemment considérés. Il n'y a que des termes nécessaires pour permettre de donner la forme de l'autocorrélation à $\Phi(t)$. Tous ces termes sont illustrés dans la **figure III.7**:

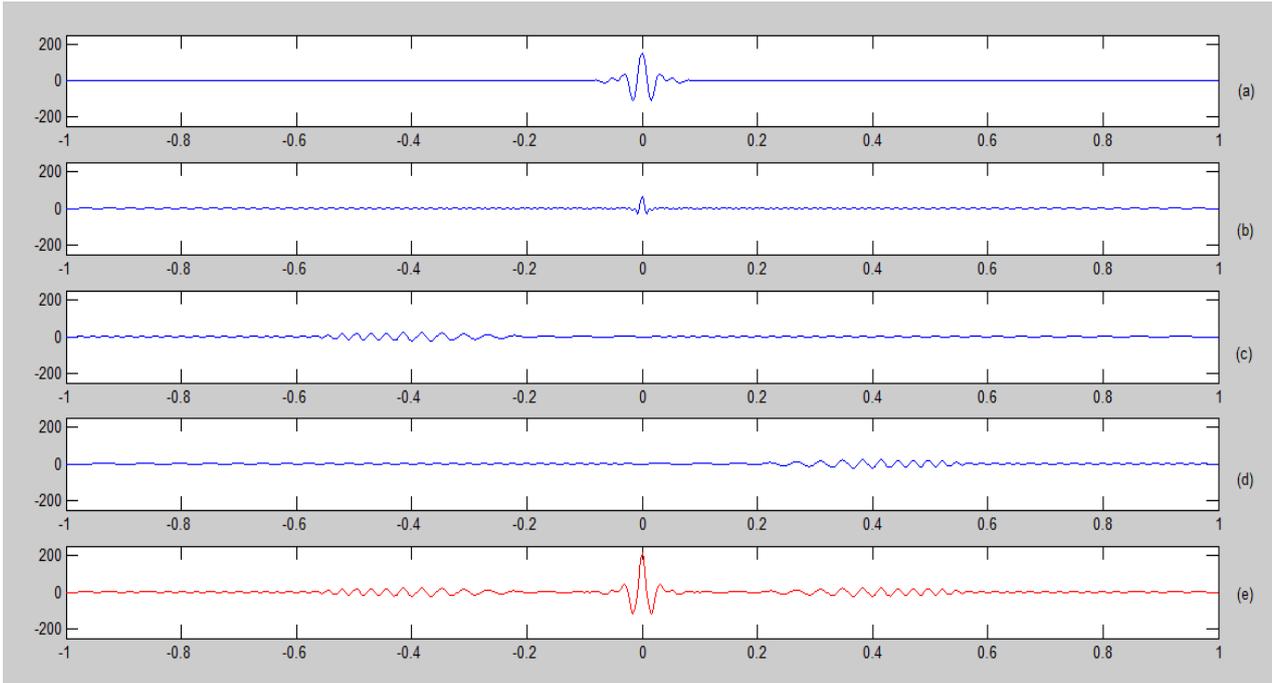


Figure III.7 : Les termes survenant lors de la corrélation d'un sweep distordu avec le GF.

- (a) l'autocorrélation du sweep fondamental $\Phi_{s_1s_1}$,
- (b) l'autocorrélation de l'harmonique d'ordre 2 $\Phi_{s_2s_2}$,
- (c) la cross-corrélation de l'harmonique $\Phi_{s_2s_1}$
- (d) la cross-corrélation de l'harmonique $\Phi_{s_1s_2}$ et
- (e) somme de (a) (b) (c) et (d).

À partir de la relation ci-dessus, la base pour les commentaires suivants peut être vue :

1) Le signal émis, après avoir été corrélé avec une copie de lui-même donne une forme symétrique constitué d'une queue de distorsion $\Phi_{s_1s_2}(t)$ et un précurseur $\Phi_{s_2s_1}(t)$ en plus de termes symétriques $\Phi_{s_1s_1}(t)$ et $\Phi_{s_2s_2}(t)$. La queue et précurseur apparaîtront ensemble pour les deux down-sweeps and up-sweeps.

2) Le pic de corrélation est augmenté par $\Phi_{s_2s_2}(t)$ à savoir :

$$\Phi(0) = \Phi_{s_1s_1}(0) + \Phi_{s_2s_2}(0)$$

$$\Phi(\mathbf{0}) = \left(1 + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2\right) \Phi_{s_1 s_1}(\mathbf{0}) \quad (\text{III.11})$$

On remarque que l'amplitude de la distorsion varie avec $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ pendant que le pic de la corrélation varie avec $1 + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2$. Un aiguisage graduel de la corrélation près de son centre se manifeste avec une augmentation de $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$, est représenté par la plus grande contribution de $\Phi_{s_2 s_2}(\mathbf{0})$ et par un élargissement de la bande fréquentielle efficace. Par contre, les distorsions restent relativement inchangées.

A la fin, on conclue que la corrélation avec le sweep distordu n'est pas désirable si on est concerné par l'élimination des distorsions harmoniques.

7. Méthodes d'atténuation des harmoniques :

La présence des distorsions harmoniques sur l'enregistrement généré par le vibreur peut avoir une influence considérable sur le rapport signal sur bruit, donc, l'élimination de ces distorsions est une étape primordiale. Pour cela, on peut augmenter la longueur T du sweep pour rejeter les distorsions en dehors de la zone d'intérêt. Cependant l'augmentation de la longueur dans l'enregistrement augmente le coût de corrélation. Une autre possibilité existe, consistant à déterminer la fréquence où les harmoniques sont très forts afin de réduire l'amplitude de vibration, ce qui entraîne la diminution d'énergie qui influe sur la résolution. Pour ces raisons d'autres méthodes sont mises en œuvre, dont on cite :

- Variphase
- Sweeps en cascade

1. La variphase :

Les distorsions harmoniques dues aux effets non linéaires sont observées lors de la corrélation des sismogrammes enregistrés. Ces harmoniques génèrent un train de bruit très perturbant surtout dans le cas d'un down sweep. La méthode de la variphase ; développée par **Rietsch en 1981** permet d'éliminer les harmoniques de différent ordre. La variphase est une technique de réduction des harmoniques jusqu'à l'ordre (N+1), en utilisant N sweeps déphasés l'un par rapport à l'autre de $\frac{2\pi}{N}$.

N dépend de l'ordre maximal que l'on désire supprimer.

Si on prend $N=4$, la rotation de phase est égale à $\Delta\Phi = \frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2}$

D'où: S1 \longrightarrow null (0) S2 \longrightarrow $\frac{\pi}{2}$
 S3 \longrightarrow π S4 \longrightarrow $\frac{3\pi}{2}$

1.1 Description de la méthode :

La présentation générale d'un sweep est :

$$S_1(t) = A_1(t) \sin(\Phi(t))$$

Où : $A_1(t)$: l'amplitude qui reste constante que si on applique un taper

$\Phi(t)$: Phase instantanée du sweep.

Le pas de changement de fréquences est contrôlé par $\Phi(t)$.

A cause de la non-linéarité, des harmoniques sont générés et s'additionnent au signal émis pour donner un signal distordu dont la formule est comme suit :

$$S(t) = A_1(t) \sin(\Phi(t)) + A_2(t) \sin(2\Phi(t)) + \dots + A_n(t) \sin(n\Phi(t))$$

$$S(t) = A_1 S_1(t) + A_2 S_2(t) + \dots + A_n S_n(t)$$

Où: A_1 : l'amplitude du sweep de référence ;

$A_2 \dots A_n$: les amplitudes des harmoniques ;

$\Phi(t)$: la phase instantanée $\Phi(t) = 2\pi [f_0 t + (f_0 - f_m)t^2 / 2T]$.

Avec une phase décalé de $2\pi(m-1) / M$, le mouvement de la plaque vibrante est décrit comme suit :

$$S(t) = \sum_{k=1}^m A_n \sin[k(\Phi + \Delta\Phi)]$$

$$S(t) = \sum_{k=1}^m A_n \sin[k\Phi + 2\pi k(m-1)/M]$$

$$S(t) = A_1 \sin[\Phi + 2\pi(m-1)/M] + A_2 \sin[k\Phi + 2\pi k(m-1)/M] + \dots + A_n \sin[k\Phi + 2\pi k(m-1)/M]$$

Tel que :

$\Delta\Phi$: le déphasage

M : le nombre total de sweeps par base ;

$S(t)$: le sweep émis distordu ;

- k : l'ordre d'harmonique si $k=1$ \longrightarrow le sweep fondamental
 $k > 1$ \longrightarrow composantes harmoniques
 m \longrightarrow l'ordre maximal des harmoniques.

La technique de polarité est applicable si le nombre de sweep M par base est pair et supérieur ou égale à 2, pour être plus spécifique le sweep mentionné au début est considéré comme le premier sweep de la série. Les deux signaux consécutifs se diffèrent d'une phase de $\frac{2\pi(m-1)}{M}$.

Comme il a été mentionné les vibrogrammes élémentaires sont générés par un même sweep mais de différentes phases.

Par exemple si on utilise deux sweeps par base [$M = 2$], le deuxième sweep généré sera décalé d'une phase égale à π . Afin de compenser ce déphasage on applique une inversion de polarité pendant l'enregistrement.

Pour $M > 2$, l'application de la méthode de la variphase est bien expliquée sur l'organigramme de la **Figure (III.8)**, où la génération des sweeps doit être de cette séquence : **1, $M/2 + 1, 2 ; \dots ; M$**

Pour mieux expliquer le déroulement de la méthode, on prend un nombre de sweeps $M = 4$ et $m = 6$. Le vibreur commence à générer le $S1(t)$ de phase $\Phi = 0$ puis il génère le sweep de numéro

$$m = \frac{M}{2+1} = 3 \text{ de phase } \pi \text{ ainsi de suite.}$$

D'où :

$$\begin{aligned} S1(t) &= s_1(t) + s_2(t) + s_3(t) + s_4(t) + s_5(t) + s_6(t) & \Delta\Phi &= 0 \\ S3(t) &= -s_1(t) + s_2(t) - s_3(t) + s_4(t) - s_5(t) + s_6(t) & \Delta\Phi &= \pi \\ S2(t) &= Hs_1(t) - s_2(t) - Hs_3(t) + s_4(t) + Hs_5(t) - s_6(t) & \Delta\Phi &= \frac{\pi}{2} \\ S4(t) &= -Hs_1(t) - s_2(t) + Hs_3(t) + s_4(t) - Hs_5(t) - s_6(t) & \Delta\Phi &= \frac{3\pi}{2} \end{aligned}$$

H est le filtre de quadrature.

$S5(t)$ et $S6(t)$ sont définis comme suit:

$$\begin{aligned} S5(t) &= S1(t) - S3(t) = 2s_1(t) + 2s_3(t) + 2s_5(t) \\ S6(t) &= S2(t) - S4(t) = 2Hs_1(t) - 2Hs_2(t) + 2Hs_3(t) \end{aligned}$$

Et puis on construit $S7(t)$, en déphasant $S6(t)$ par $(-\pi/2)$; ça donne :

$$S7(t) = 2 s_1(t) - 2 s_3(t) + 2 s_5(t)$$

Ensuite on fait la sommation de $S7(t)$ et $S5(t)$; on obtient $S8(t)$:

$$S8(t) = 4 s_1(t) + 4 s_5(t)$$

On Remarque que cette technique atténue les harmoniques jusqu'à l'ordre $M+1$ et renforce le signal utile.

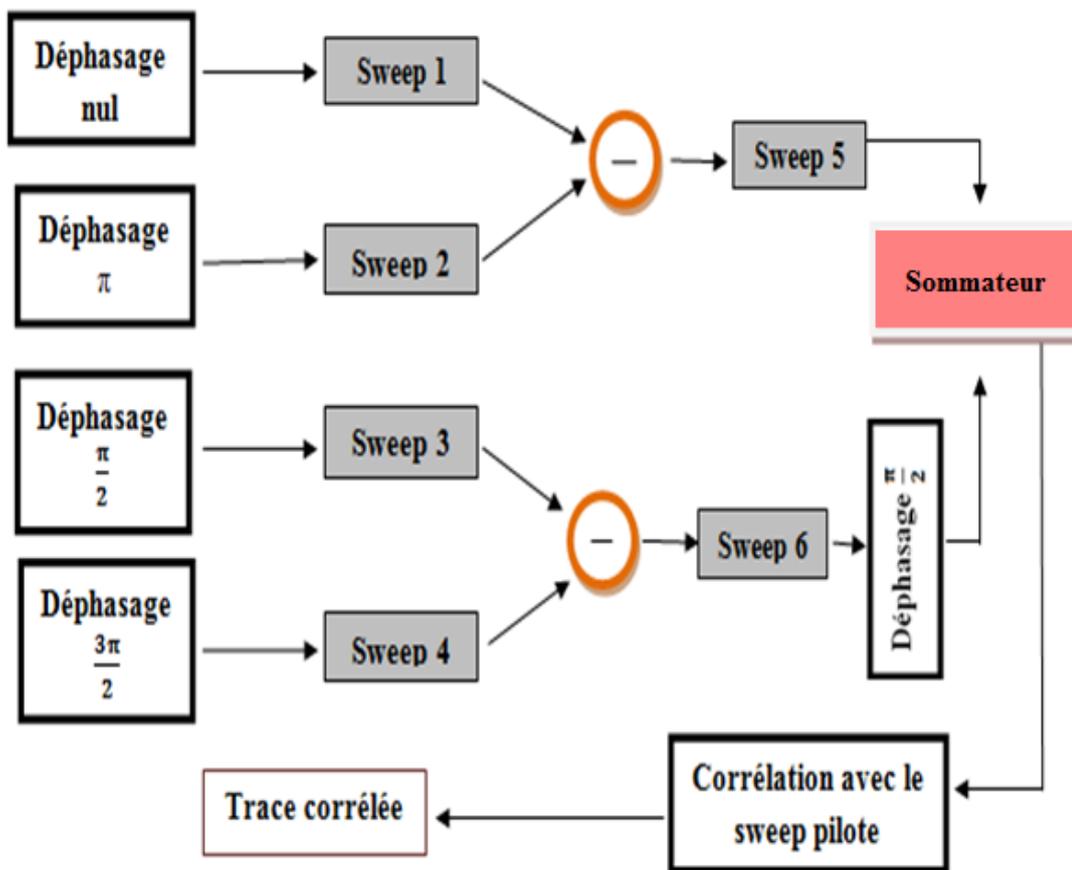


Figure III.8 : Organigramme de la réalisation de la variphase pour $M = 4$

Application de la méthode :

Afin de mieux expliquer cette méthode, on a réalisé sous **Matlab** des exemples synthétiques qui permettent d'illustrer l'efficacité de cette méthode. On programme quatre sweeps de mêmes paramètres et de phase différente. Ensuite, on fait une cross-corrélation de chaque sweep avec le pilote. A la fin, on somme les quatre sweeps corrélés.

Paramètres utilisés:

Nombre de sweep : $M = 4$

Longueur de sweep : $SL = 12$ sec

Type de sweep : up-sweep

Fréquence initiale $f_1 = 8$ Hz

Fréquence finale $f_2 = 80$ Hz

Temps taper = 0.3 sec

Type du taper = linéaire

Ordre maximal des harmoniques : $m = 6$

Amplitudes des harmoniques = [1 0.8 0.5 0.25 0.2 0.1]

On présente les figures suivantes:

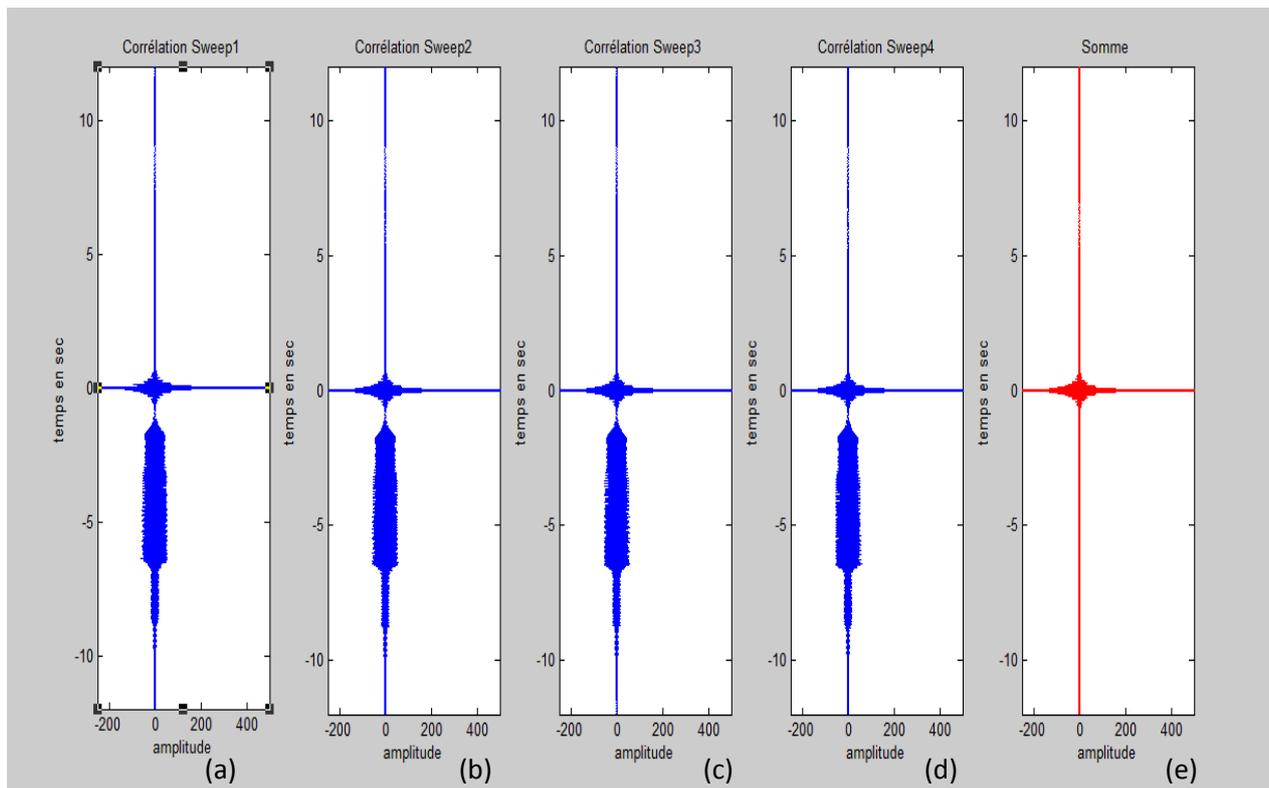


Figure III.9 : des traces synthétiques générées à partir de sweep affecté par des harmoniques, les quatre sweeps sont identiques ($T = 12$ sec ; $B = [8 - 80\text{Hz}]$) avec différentes phases

- (a) Cross-corrélation du sweep $\Phi=0$ avec le pilote
- (b) Cross-corrélation du sweep $\Phi=\frac{\pi}{2}$ avec le pilote
- (c) Cross-corrélation du sweep $\Phi=\frac{\pi}{2}$ avec le pilote
- (d) Cross-corrélation du sweep $\Phi = \frac{3\pi}{2}$ avec le pilote
- (e) trace somme des quatre sweeps (a) (b) (c) et (d).

Sur la **Figure III.9**, on voit clairement les distorsions harmoniques sur les corrélations des sweeps générés qui n'apparaissent pas sur la trace somme. Ce qui prouve l'efficacité de cette méthode dans l'élimination des harmoniques de différents ordres.

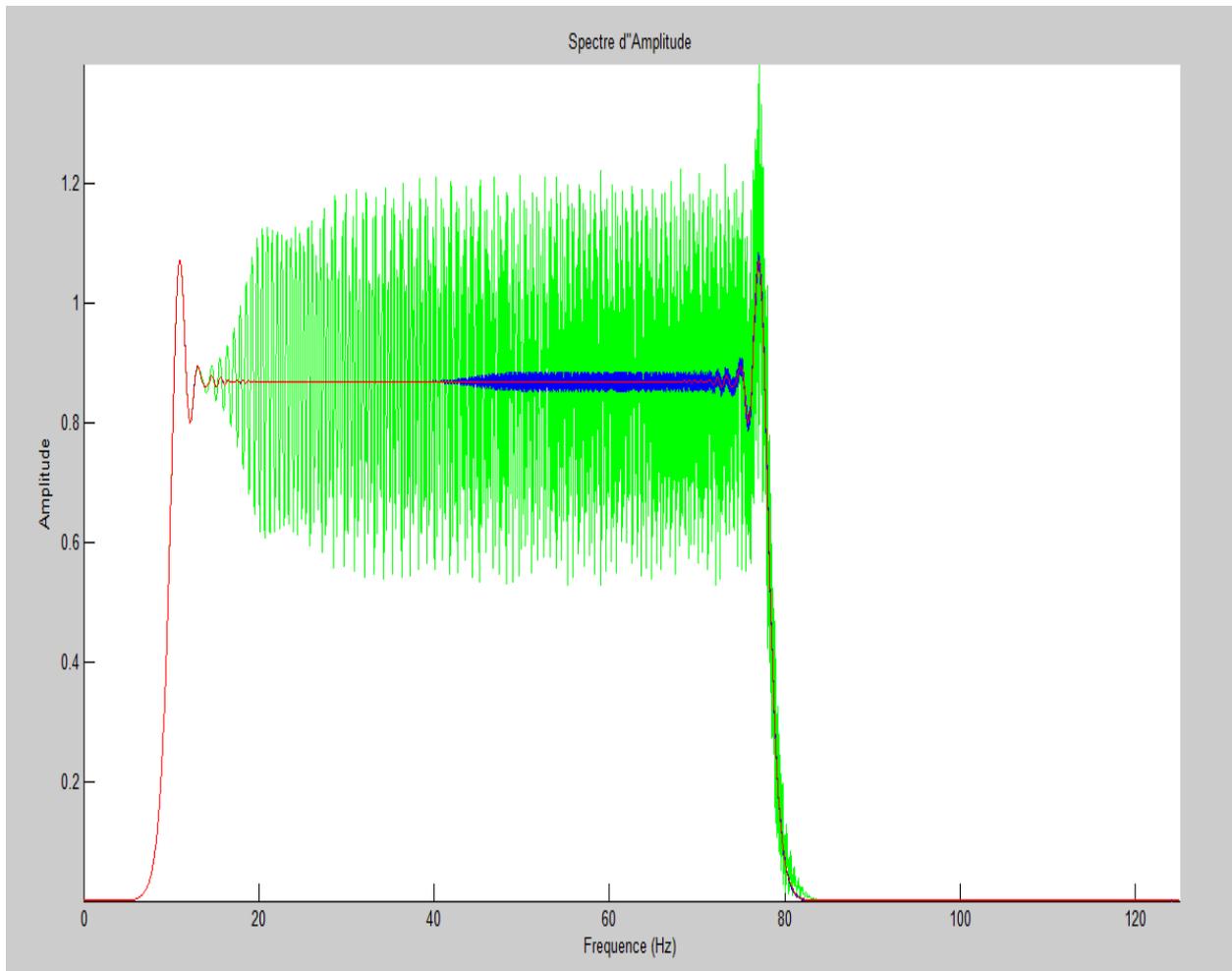


Figure III.10 : différents types spectres d'amplitude

- : Spectre d'amplitude d'un sweep distordu (avec harmoniques de différents ordres)
- : Spectre d'amplitude du sweep pilote (sweep de référence sans harmonique)
- : Spectre d'amplitude de la somme des sweeps après l'application de la méthode variphase.

On remarque que le spectre de la somme est presque similaire à celui du sweep pilote. Les distorsions harmoniques ont été efficacement atténuées.

Afin de mieux voir l'efficacité de la variphase dans l'atténuation des harmoniques, on fait une projection dans le domaine F-T des différents sweeps (**Figure III.11**).

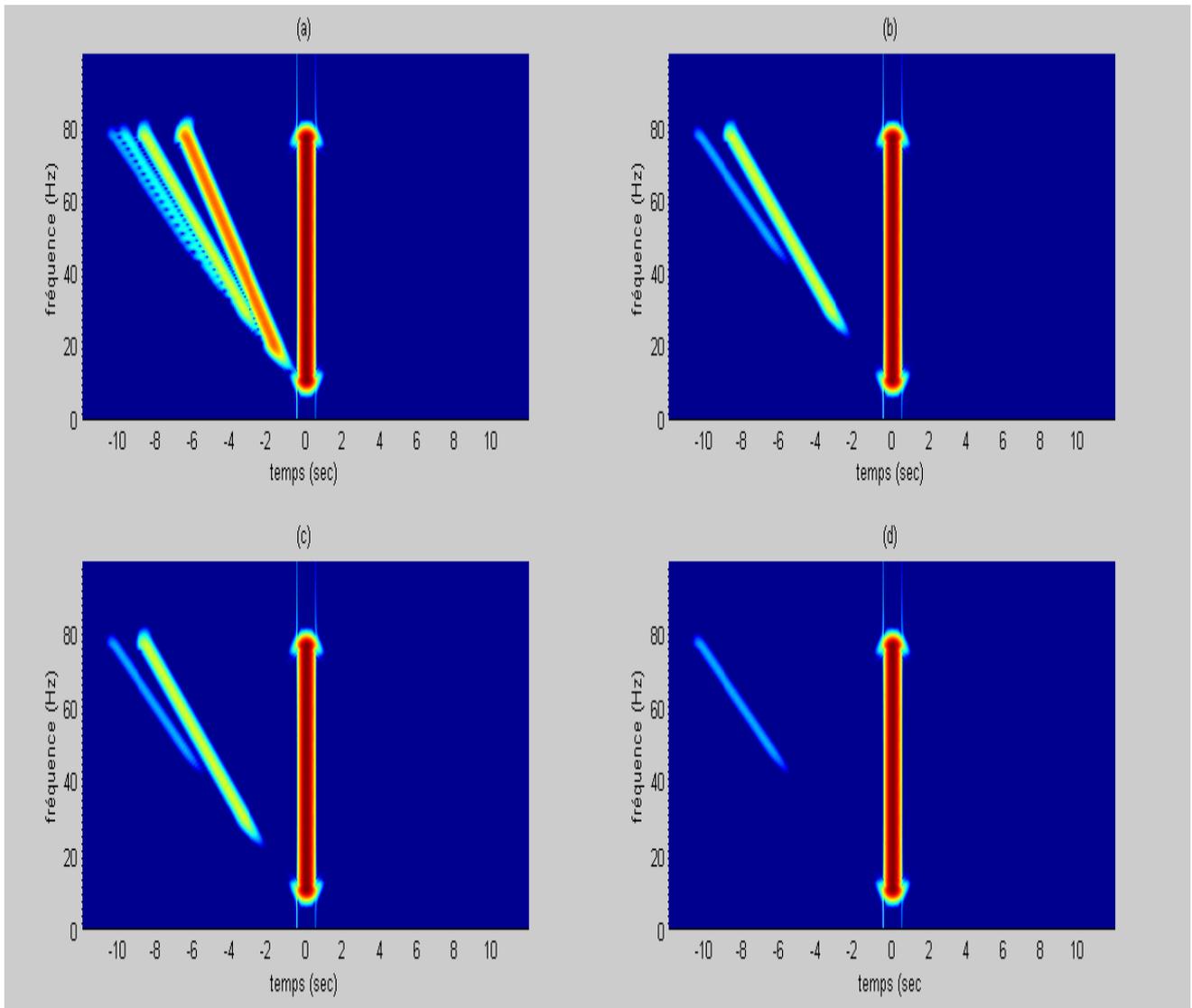


Figure III.11 : les projections **temps-fréquence** de :

- (a) sweep distordu $S1(t)$,
- (b) la différence de $S1(t) - S3(t)$,
- (c) la différence de $S2(t) - S4(t)$,
- (d) la somme finale.

La **Figure III.11** confirme l'efficacité de la méthode, on remarque la disparition presque totale des harmonique sur le sweep somme à part quelques résidus très faibles.

Conclusion :

Pour pallier au problème de la distorsion harmonique, on fait appel à la méthode décrite précédemment car elle a donné des résultats satisfaisants et a montré son efficacité pour l'atténuation des harmoniques de différents ordres.

2. Sweep en cascade (Cascaded sweeps):

Les efforts à déployer pour atténuer les harmoniques en utilisant les méthodes de Sorkin (1972) et **Rietsch (1981)** (souvent appelées méthodes de Variphase) est le temps d'acquisition supplémentaire due à la série requise de sweeps consécutifs. Cependant, seulement dans certaines circonstances, la profondeur de la cible, le décalage maximum, l'absorption attendue et le rapport signal sur bruit nécessitent la transmission d'une grande quantité d'énergie à l'intérieur de la terre, par conséquent plusieurs sweeps sont exigés afin d'accélérer l'acquisition en préservant les propriétés d'atténuation des distorsions harmoniques. Andersen (1994) a proposé la méthode du sweeps en cascade. Cette dernière élimine le temps d'écoute en concaténant un certain nombre de segments. Les sous-sweeps, qui couvrent toute la gamme de fréquence sont identiques avec des phases initiales différentes dont elles incrémentent consécutivement par $2\pi / M$, où M est le nombre de segments de sweep.

Le temps d'écoute est éliminé entre les premiers segments et ajouté seulement après le dernier. Afin d'atténuer les bruit harmonique de corrélation causés par cette méthode, le sweep de corrélation a un segment supplémentaire dont la phase et la position dans les sweeps en cascade sont choisis pour éliminer les harmoniques jusqu'à un certain ordre qui dépend de M.

2.1 Principe de la méthode :

- Générer une séquence de N segments de sweeps en cascade liés de bout en bout.
- Générer une deuxième séquence semblable à la première mais contenant un segment complémentaire \longrightarrow (N+1) segments.
- Utiliser l'une des séquences comme Sweep de référence (pour la corrélation).
- Utiliser l'autre séquence comme Sweep émis.

Dans La méthode d'acquisition conventionnelle, on utilise un jeu de vibrateurs centrés sur un point vibrant et on génère l'énergie sismique à chaque vibrateur en utilisant un sweep prédéfini. La durée du cycle de vibration est la somme de la longueur du sweep, le temps d'écoute et le temps de réinitialisation du système.

On pose **ST** : le temps du sweep, **LT** : temps d'écoute et **RT** : temps de réinitialisation du système, un cycle temps pour un seul sweep ou segment est :

$$T_{\text{cycle}} = ST + LT + RT \quad (\text{III.8})$$

Si N segments sont générés, le temps total consacré pour chaque point de vibrant est:

$$T_{\text{cycle}} = N*(ST + LT + RT) \quad (\text{III.9})$$

Dans la méthode « Cascaded - sweep », le temps total consacré pour chaque point vibrant va être réduit en réduisant par concaténation le temps d'écoute et le temps de réinitialisation du système entre les N sweeps, de cette façon, pour un « Cascaded sweeps » composé de N segments, le temps total par point vibrant devient :

$$T_{\text{cycle cascaded sweeps}} = N*ST + LT + RT \quad (\text{III.10})$$

Le nombre de segments sélectionnés pour la méthode « Cascaded- sweeps » est une fonction du plus grand ordre de l'harmonique susceptible de provoquer des distorsions et qui doit être supprimée, durant le processus de corrélation. Le nombre de segments est également une fonction du rapport signal-bruit dans la région. Par exemple, si, basée sur l'évaluation de l'énergie de l'harmonique dans une certaine zone, il est supposé que la deuxième, troisième, et quatrième harmonique doit être supprimée, un segment de quatre « Cascaded- sweep » pourrait être utilisé.

Si S_0 , S_{90} , S_{180} , S_{270} sont les rotations de phases des sweeps correspondant à chaque segment, la séquence de la méthode « Cascaded- Sweep » est : (figure III.16)

$$\text{Séquence émise} = S_0 \mathbf{U} S_{90} \mathbf{U} S_{180} \mathbf{U} S_{270}$$

Où l'opération marquée par \mathbf{U} signifie que les deux sweeps sont concaténées, sur la séquence de référence de corrélation, on ajoute un segment supplémentaire à la fin du quatrième sweep identique au premier:

$$\text{Séquence de corrélation} = S_0 \mathbf{U} S_{90} \mathbf{U} S_{180} \mathbf{U} S_{270} \mathbf{U} S_0$$

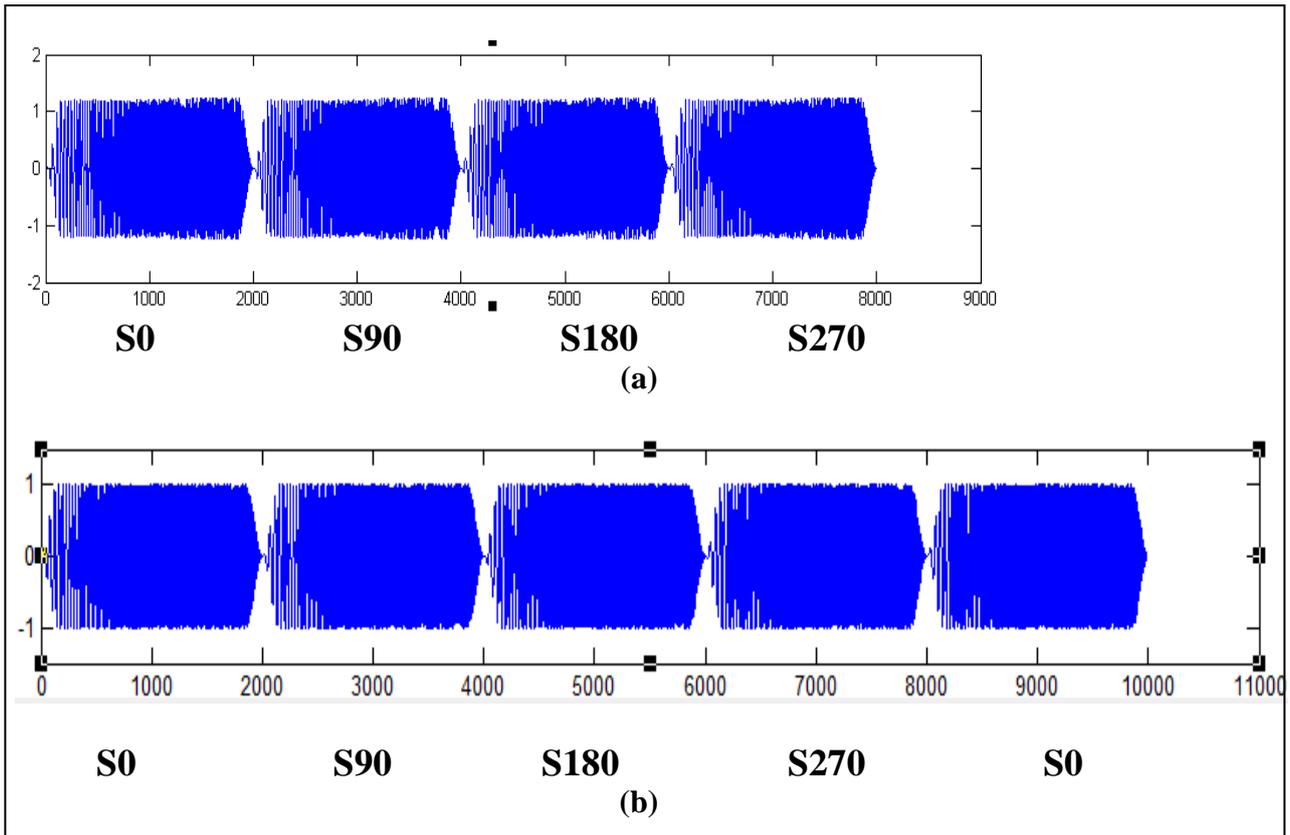


Figure III.12 : Séquences utilisées dans la méthode cascaded sweep
 (a) Séquence du sweep pilote, (b) Séquence de corrélation

Hypothèses de la méthode Cascaded sweep :

Trois hypothèses de base doivent être respectées dans la cette méthode :

- Le nombre de sweep doit être supérieur à l'ordre de la plus haute harmonique qui doit être éliminée.
- La longueur du segment doit être plus grande que le temps d'écoute
- Le signal et les harmoniques sont répétitifs d'un segment à un autre.

Emplacement du sweep complémentaire :

Le choix de la position du segment de sweep a ajouté dépend de la nature du sweep, pour :

a) **Up sweep** : deux options se présentent :

Option 01:

le segment complémentaire est placé dans la séquence de Sweeps de référence (Sweep pilote), dans ce cas le segment complémentaire est identique au dernier segment(N), et il est placé au début de la séquence (**figure III.13**).

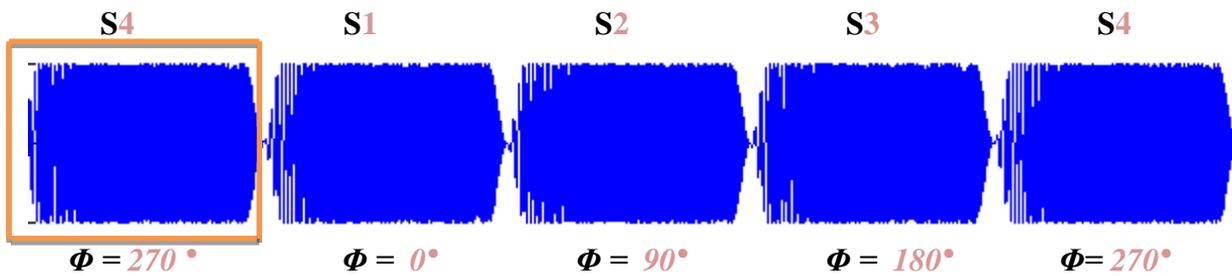


Figure III.13 : séquence de sweep de référence (up sweep),
S4 étant le segment de sweep supplémentaire ajouté au début de la séquence

Option 02:

Le segment complémentaire est placé dans la séquence du sweep émis. Dans ce cas, ce segment est identique au premier segment (01), et il est placé à la fin de la séquence (**figure III.14**).

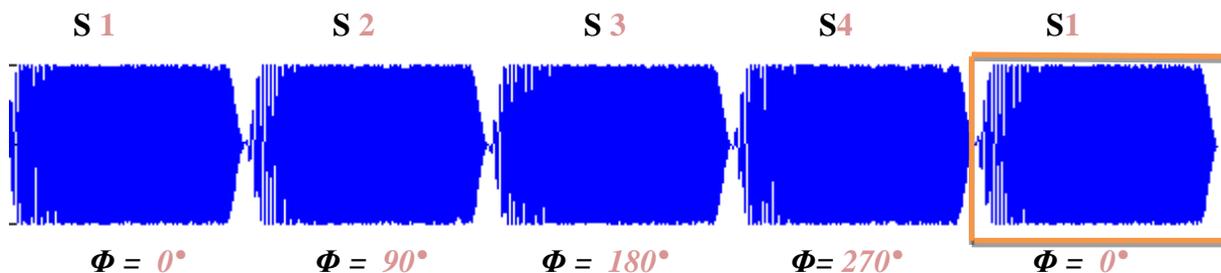


Figure III.14 : séquence du sweep émis (up sweep),
S1 étant le segment de sweep supplémentaire ajouté à la fin de la séquence

b) Down sweep: comme précédemment, nous avons deux options:

Option 01 :

Le segment complémentaire est placé dans la séquence du sweep de référence (sweep pilote). Dans ce cas, ce segment est identique au Premier segment(01), et il est placé à la fin de la séquence (**figure III.15**).

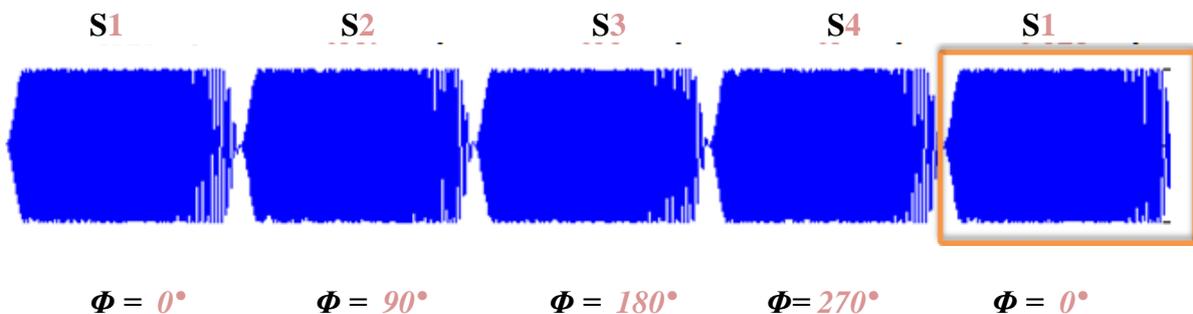


Figure III.15 : séquence du sweep de référence (down-sweep),
S1 étant le segment de sweep supplémentaire ajouté à la fin de la séquence

Option 02 :

Le segment complémentaire est placé dans la séquence du sweep émis. Dans ce cas, il est identique au dernier segment (N), et il est placé au début de la séquence (**figure III.16**).

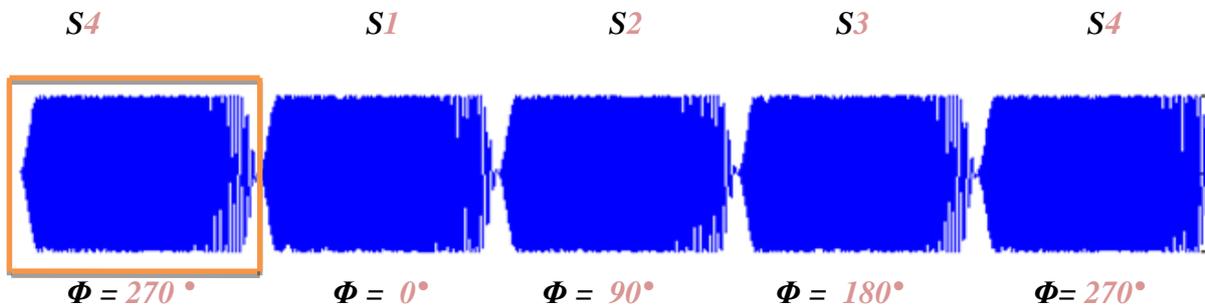


Figure III.16 : séquence du sweep émis (down-sweep), S4 étant le segment de sweep supplémentaire ajouté au début de la séquence

Avantages de la méthode :

A côté de la réduction des distorsions harmonique cette méthode permet aussi d'améliorer la productivité.

Dans l'acquisition conventionnelle le temps mis par un point vibré est :

$$T_{vp,conv} = N (SL + LT + RT) + DL$$

Dans l'acquisition Sweeps en cascade :

$$T_{vp,cascade} = N . SL + LT + RT + DL$$

Le temps gagné par point de tir est de :

$$T_{Gain} = (N-1). (LT + DL + RT).$$

Elle présente un gain quotidien de 20 à 40 % par apport à la méthode conventionnelle.

Application de la méthode :

Afin de visualiser l'efficacité de la méthode Cascaded sweep dans l'atténuation des distorsions harmoniques, on a réalisé, **sous Matlab**, un sweep de longueur de 16sec et de bande fréquentielle [8 ; 80Hz], composé de quatre segments de longueur 4sec chacun, on présente sur les figures suivantes les différents résultats obtenus :

Paramètre des segments de sweep :

Longueur de segment = 4sec

Bande fréquentielle = [8, 80Hz]

Temps de taper = 0.3sec

Type taper = linéaire

Amplitudes des harmoniques = [1 0.8 0.5 0.25 0.2].

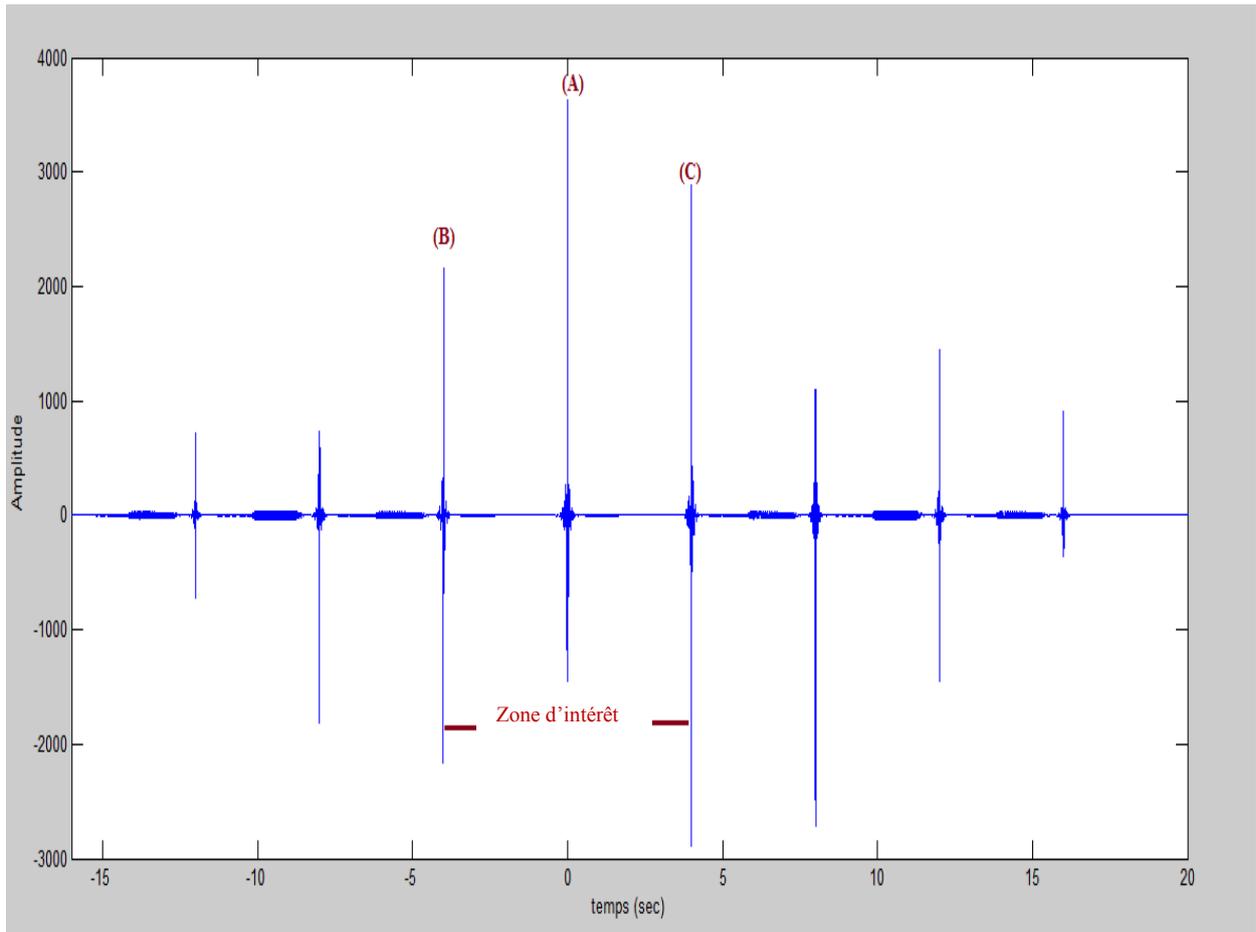


Figure III.17 : la cross-corrélation du sweep émis composé de quarte segment avec le sweep de corrélation

Le segment complémentaire a été ajouté sur la séquence de référence (de corrélation, on remarque que les harmoniques placés sur la zone d'intérêt ont été fortement atténués.

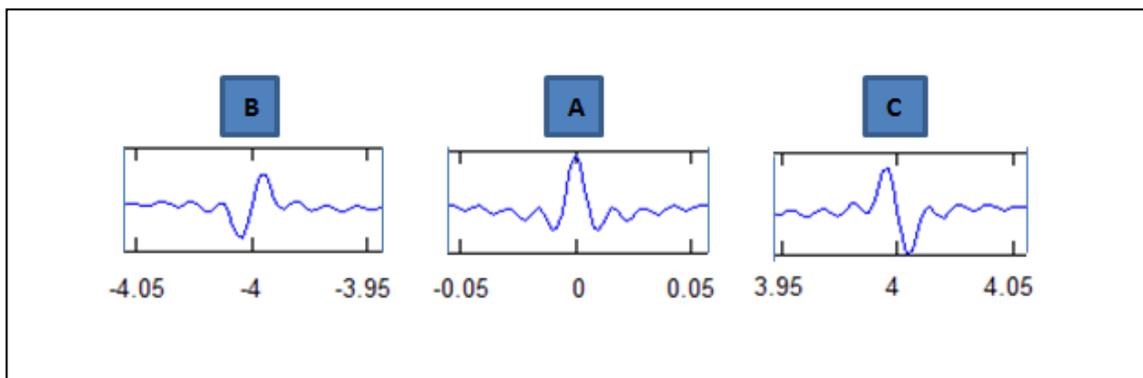


Figure III.18 : Zoom sur les pics des autocorrélations aux temps -4, 0, 4 (zone d'intérêt) de A, B et C respectivement.

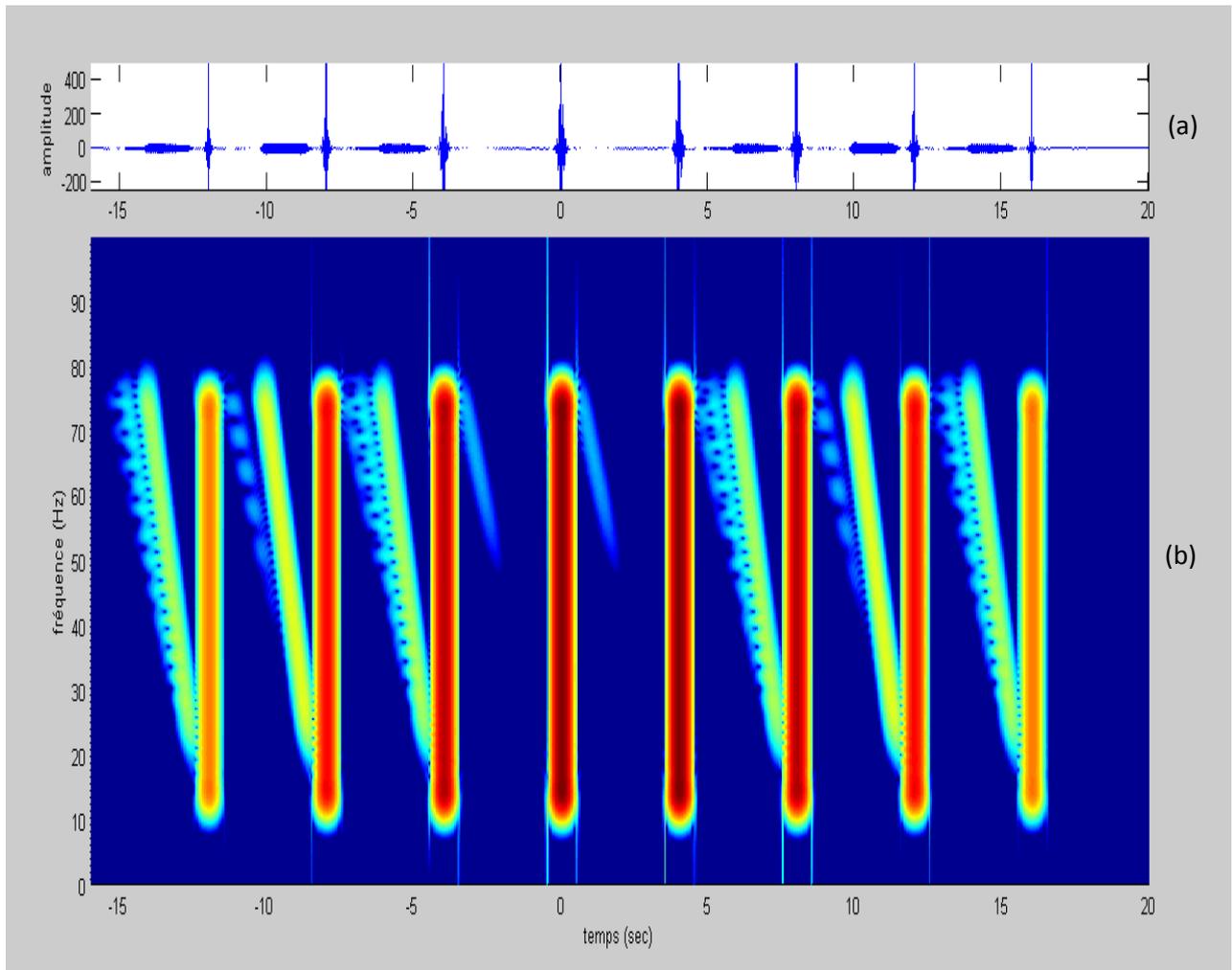


Figure III.19 : projection dans le domaine temps-fréquence de la cross-corrélation
(a) Trace corrélée (b) projection temps-fréquence de (a).

Cette figure confirme l'atténuation des harmoniques sur notre zone d'intérêt, alors qu'il n'en reste que quelques résidus de très faible énergie.

Conclusion :

La méthode sweep en cascade a prouvé son efficacité dans l'atténuation des distorsions harmoniques, elle est très utilisée en pratique.

1. Introduction:

L'amélioration de la productivité lors de la prospection vibroseis a longtemps représenté un souci pour les géophysiciens. Ceci a conduit à la mise au point de diverses techniques telles que la mise en œuvre de plusieurs groupes de vibreurs, fonctionnant soit en mode simultané ou en mode flip flop. Plus récemment, **Petroleum Development Oman (PDO)** a mis au point et a promu une nouvelle technique d'exploration vibrosismique appelée slip-sweep qui devrait considérablement augmenter la productivité en termes économiques. L'idée de base est de mettre en œuvre la prochaine flotte de vibrateurs avant la fin de l'acquisition en cours qui est effectuée par la flotte de vibrateurs précédente. Aujourd'hui, dans les zones désertiques, la production moyenne de plusieurs groupes de Vibroseis peut dépasser un millier de points vibrés (VP) par jour.

Avec la méthode du slip-sweep, un gain de 50% en termes de productivité pourrait être une cible réaliste, dans les zones où les obstacles ne ralentissent pas les déplacements des groupes de vibrateurs. La combinaison de la technologie avancée dans les équipements d'acquisition sismique et dans les systèmes de contrôle des vibrateurs a permis d'intégrer pleinement la capacité slip-sweep sans aucune contrainte .

1. Méthodes de haute productivité dans l'acquisition vibrosismique:

Plusieurs méthodes ont été développées dans les 25 dernières années pour faire progresser l'acquisition vibrosismique, ces méthodes sont classées selon trois catégories : tirs simultanés (Simultaneous Shooting), sweeps en cascade (Cascaded sweep) et le Slip sweeps. On va tenter de résumer les caractéristiques principales pour chaque méthode.

a) Independent Simultaneous Sweeping (ISS) :

Lors de la convention SEG 2008 à Las Vegas (Howe, Allen, Jack et al SEG 2008), une nouvelle technique d'acquisition appelé ISS a été mise en œuvre.

Dans cette méthode, tous les vibrateurs fonctionnent d'une façon indépendante, sans aucune tentative de synchroniser leur activité en effectuant des enregistrements continuellement, le principe est que toute interférence entre sources est traitée comme «bruit». Le bruit est aléatoire, autant que possible, plusieurs méthodes d'élimination de bruits sont appliquées pendant l'étape de traitement.

b) Distance Separated Simultaneous Sweeping (DS³):

La technique DS³, c'est une des nouvelles méthodes développées par British Petroleum (BP), à Bouska en 2008, cette technique produit des enregistrements discrets et indépendants. Cette méthode offre une efficacité très importante dans l'acquisition vibrosismique sans compromettre la qualité des data sismiques à l'absence de la contamination par l'interférence des sources simultanées, par conséquent elle nécessite aucun traitement.

c) Sweeps en cascade (Cascaded sweeps):

C'est une méthode introduite par (Anderson 1995, Moreing et Al. 2001) dans la dernière décennie dans le but d'augmenter la productivité dans la méthode d'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.

d) Slip sweep :

Technique mise en œuvre par Rozemund en 1996, dans cette technique plusieurs groupes de vibreur sont utilisés. Où un groupe est lancé sans attendre que le groupe précédent s'arrête produisant ainsi des chevauchements de signaux. Cette technique sera développée le long de ce chapitre.

1. Slip-sweep naissance:

Cette méthode a été mise au point par **Rezmound (1996)** et testée par PDO (Petroleum Development Oman)

En **1995**, la première expérience a été menée sur un groupe de **Geco-Prakla** à Oman, en enregistrant des salves non corrélées de deux groupes de vibreurs avec des sweeps qui se chevauchent. La Corrélation et la séparation d'enregistrements effectués à l'étape de traitement ont démontré que les sections finales slip-sweep étaient équivalentes à celles de l'acquisition conventionnelle. Une année plus tard, par la fusion de deux équipes en 3D, **Rees Geophysics Oman** a effectué un test de la logistique slip-sweep. Cela a été suivi par **CGG** qui a acquis des données de terrain slip-sweep aux champs de Makarem Oman, enregistrant **8** points de vibration (VPs) par salve, en utilisant des ressources combinés de CGG-1 et CGG-3. Ces différents tests ont prouvé la faisabilité opérationnelle de la technique slip-sweep dans les opérations Vibroseis. **Sercel (1998)** a annoncé la première option murie et prête à utiliser le logiciel slip-sweep intégré dans son système d'acquisition SN388.

2. Principe de la méthode Slip-sweep :

L'idée derrière l'enregistrement slip-sweep est très simple: un groupe de vibreurs commence à vibrer sans attendre que la vibration du groupe précédent soit achevée. Après La corrélation, qui agit comme un filtre dans le domaine temps-fréquence, résulte un long enregistrement. En découpant l'enregistrement mère corrélé aux temps appropriés (TBs) réellement utilisés, on peut séparer les enregistrements individuels.

Les **Figures IV.1** et **IV.2**, illustrent le principe de la méthode conventionnelle et de la méthode slip sweep.

La **Figure IV.1** représente un enregistrement classique avec un up-sweep linéaire de 12sec normales et un temps d'écoute de 4sec. La longueur totale de l'enregistrement non corrélé sera 16 secondes, qui correspondent au cycle de vibration minimum théoriquement réalisable avec une acquisition conventionnelle. A tout moment, seulement un nombre limité de fréquences est «dans le système» et au cours d'enregistrement. Par exemple, à $t = 12$ secondes seulement les hautes fréquences de la bande fréquentielle du sweep arrivent au système d'enregistrement.

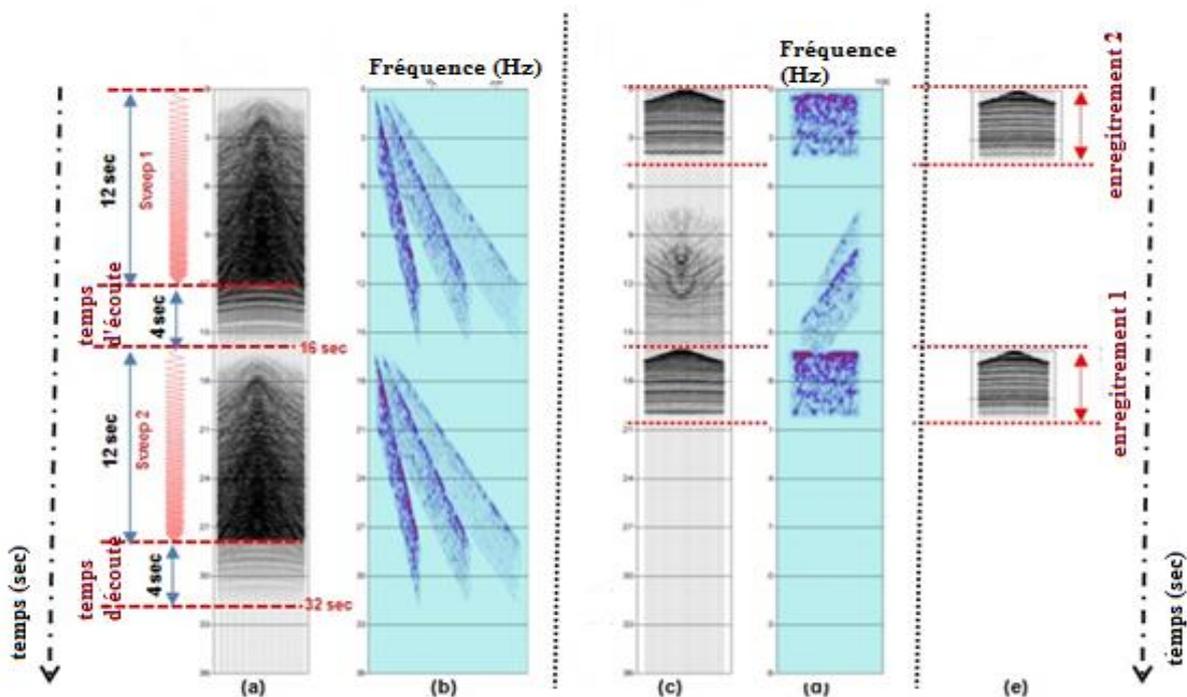


Figure IV.1: Acquisition conventionnelle

- (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.

Notons Les zones représentées en gris clair qui correspondent à des espaces libres dans le domaine temps-fréquence, c'est-à-dire des fréquences qui, à un instant donné, ne sont pas utilisées.

La **Figure IV.2** montre la technique slip-sweep. Un nouveau sweep commence aussitôt que la fréquence de départ du sweep précédent s'est éteinte, ce qui serait idéalement après le temps d'écoute (6s). Tant qu'on utilise le même sweep pour tous les groupes de vibreurs, il n'y aura aucun chevauchement dans le domaine temps-fréquence. Ici, Il est supposé que toute énergie s'est éteinte après le temps d'écoute, ou autrement dit, le temps d'écoute a été choisi pour capturer toute l'énergie émise.

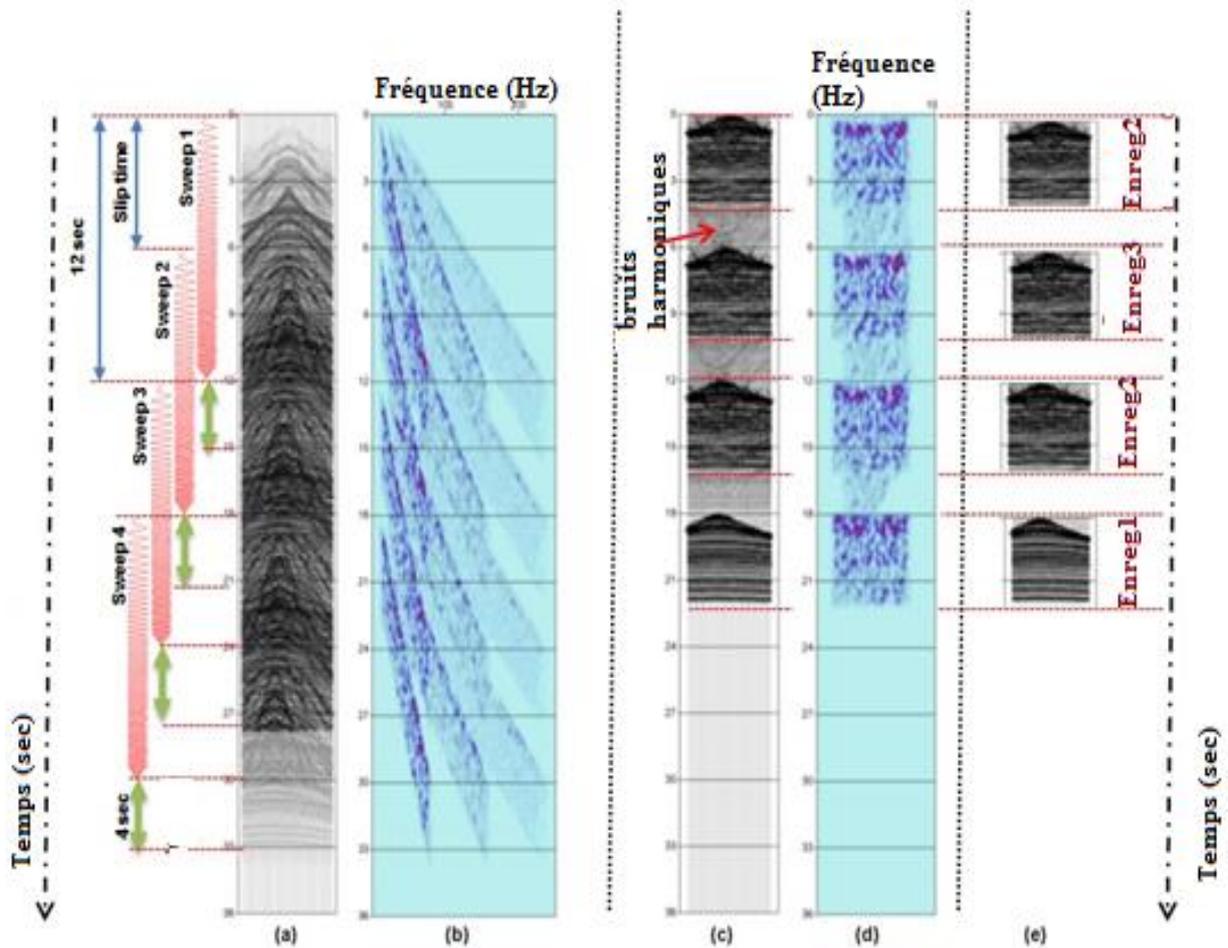


Figure IV.2 : Acquisition vibrosismique de type slip sweep

- (a) enregistrement mère non corrélée compose 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.

Bien qu'à première vue, un filtre passe-bande complexe à temps variable semble nécessaire pour séparer les différents enregistrements à partir de l'enregistrement mère (Mother-gather) non corrélé. En réalité, il suffit juste de corréler l'enregistrement mère avec le sweep pilote pour obtenir un enregistrement "Mother-gather" corrélé. celui-ci représentera des enregistrements corrélés des sweeps individuels mis l'un après l'autre. Autrement dit, les enregistrements des différents points de tir seront extraits en coupant simplement l'enregistrement corrélé aux temps appropriés, temps de première arrivée (TBs).

A présent, on sait qu'il y a aucune différence entre l'enregistrement obtenu par la méthode slip sweep et celui obtenue par la méthode vibrosismique classique. Ainsi un nouveau sweep peut être lancé dès que le temps d'écoute du sweep précédent s'est écoulé.

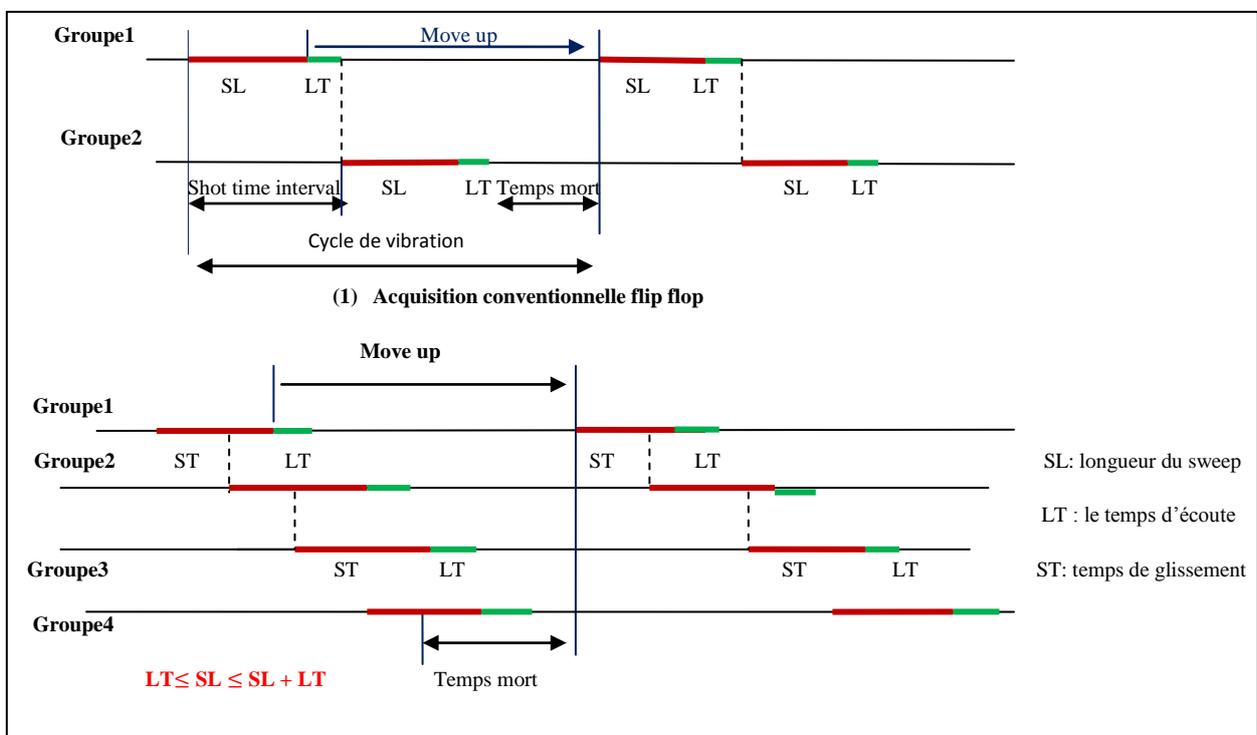


Figure IV.3: Comparaison entre l'acquisition conventionnelle et l'acquisition en mode slip sweep

Pour pouvoir faire une comparaison entre les deux méthodes (**Figure IV.3**), on calcule le nombre de point vibré par heure pour chaque méthode :

On suppose un sweep de longueur : $SL = 14\text{sec}$, un temps d'écoute : $LT = 5\text{sec}$ et le temps mis par le vibreur pour arrivé au prochaine point : $\text{Move-up} = 40\text{sec}$.

Le cycle conventionnelle (mode flip flop) est égale à $(SL + \text{Move-up}) / 2 = 27\text{sec} / \text{VP} \Rightarrow 133 \text{ VP/ heure}$.

Le cycle Slip sweep (cas de 4 groupe de vibrateurs) est : $(SL + \text{move-up}) / 4 = 13.5\text{sec} / \text{VP} \Rightarrow 266 \text{ VP/ heure}$.

Si on réduit le move-up jusqu'à 20sec (le minimum) :

Le cycle conventionnel atteindra son maximum 19sec / VP (SL + LT) => 189 VP/ heure qui reste loin du nombre de VP /heure dans la méthode slip sweep avec un move-up plus grand. Ces chiffres, à titre d'exemple, reflète l'impact de la méthode slip sweep sur l'augmentation de la productivité. La **Figure IV.4** présente cette relation, on note une augmentation considérable de la productivité avec le nombre de groupe. Le move-up dépend de la nature du terrain et de l'accessibilité. Plus grand est le move-up plus grand est le cycle de vibration, plus la productivité est petite.

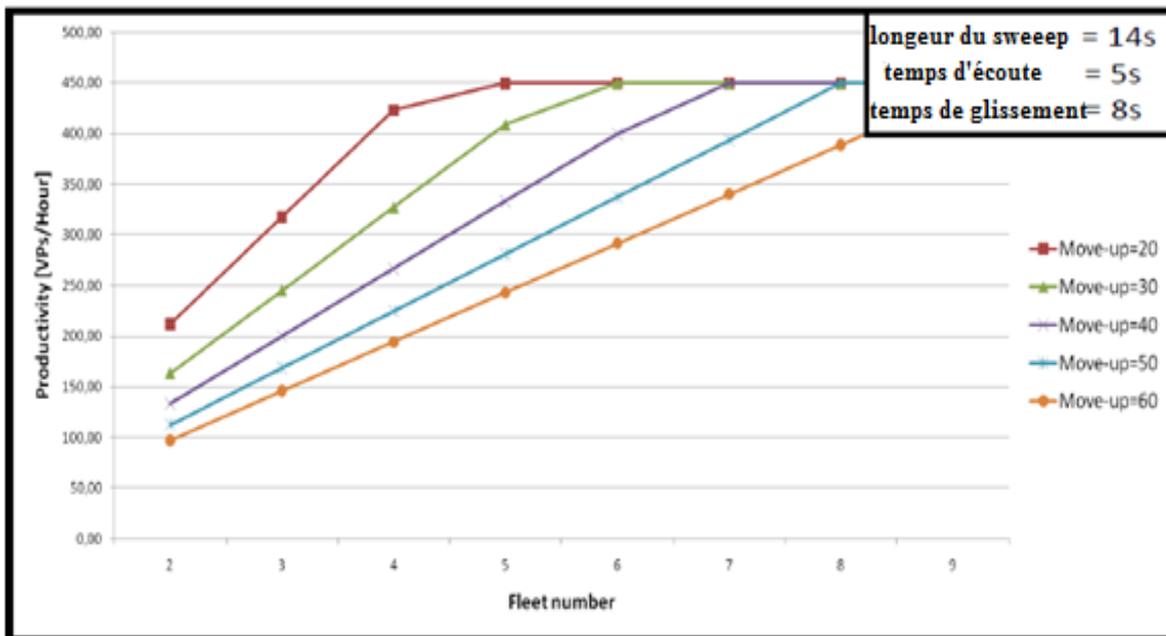


Figure IV.4 : la productivité en fonction de nombre de groupe de vibroseis et de move-up

Les principaux avantages de l'utilisation de la méthode slip sweep sont :

- Le cycle de vibration peut être spectaculairement réduit et de là la productivité peut être doublée, triplée ou même quadruplée.
- Des vibrateurs supplémentaires seraient nécessaires pour réaliser une telle augmentation, mais les avantages dépassent toujours de loin les dépenses supplémentaires.
- Un autre avantage est la possibilité d'une nouvelle automatisation de la procédure d'acquisition...

Il est important de noter qu'une augmentation de productivité ne se réalisera pas seulement dans des circonstances idéales (comme les terrains plats d'Oman), mais aussi dans des terrains

plus complexes comme les zones urbaines ou les terrains accidentés, où le flux d'acquisition est moins régulier.

Le seul inconvénient de cette méthode, d'après son auteur, est la contamination par les distorsions harmoniques. L'impact négatif de cela et les solutions proposées seront examinés un peu plus loin dans ce travail.

3. Modifications Proposées aux systèmes d'acquisition :

Si la méthode du slip-sweep devait être employée dans une étude de productivité, des modifications doivent être apportées au système d'acquisition afin d'accommoder la technique.

La modification de base nécessaire est que le système d'acquisition doit continuellement enregistrer les données (et de préférence corrélérer continuellement).

Afin d'assurer une meilleure flexibilité et une augmentation de productivité, nous devons laisser les groupes de vibrateurs "décider" du déclenchement du sweep : les vibrateurs transmettront un signal '**prêt**' à l'emploi aussitôt que tous les vibrateurs sont dans la position avec la base plate en bas. L'instrument (système) activera à cette étape ; d'une façon automatiquement 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 ne doit pas être nécessairement constant, tant qu'un délai minimum (l'équivalent du temps d'écoute dans l'enregistrement conventionnel) est appliqué.

Il est clair que les modifications proposées ci-dessus exigent le meilleur matériel en termes de capacité et de gestion de la mémoire, de la vitesse de corrélation, de la communication automatisée avec les vibrateurs, des taux de transmission de données rapides et de consommation d'énergie optimisée. Cependant, aucunes des ces modifications ne semble impossible avec la technologie actuelle.

4. Problème de la méthode slip sweep :

La technique slip sweep offre un bon potentiel pour l'amélioration de la productivité dans la méthode vibroseis. Néanmoins, cette technique souffre d'une dégradation de la qualité des datas causée par la contamination des bruits harmoniques générés par cette méthode. Quand le vibrateur génère la fréquence f , et à cause des imperfections du mécanisme du vibroseis et le couplage de la base plate au sol, il génère aussi une fréquence d'harmonique $2f$, $3f$ nf .

Traditionnellement, le procédés de corrélation projette les harmoniques du up-sweep dans les temps négatifs. Les harmoniques seront éliminées par simple troncature de l'enregistrement à $t = 0$.

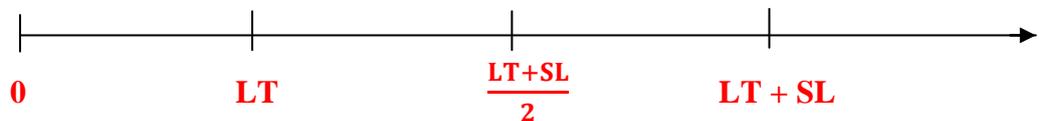
Le problème des distorsions harmoniques dans la méthode slip sweep est que le long enregistrement d'un enregistrement continu " le mother gather " contient plusieurs sweeps.

Dans ce cas, la troncature ne peut pas supprimer les harmoniques car ces harmoniques contaminent l'enregistrement des sweeps précédents.

La contamination croit avec le temps de glissement (slip time), si ce dernier est trop court il ne peut pas empêcher l'interférence avec le signal. Cependant, la partie la plus affectée du point vibré (VP) 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 sur il aurait pu influencer le coût de la productivité.

Naturellement, la technique slip-sweep exige qu'aucune sommation ne soit faite, ce qui pose des problèmes d'énergie dans certaines circonstances (ex : zones dunaires absorbantes).

Condition à respecter dans la méthode Slip-sweep :



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

Figure IV.5 : degré de contamination en fonction de LT.

En analysant les données slip-sweep corrélées avec la présence de distorsion harmonique, il devient clair comment peut on réduire l'effet des harmoniques: soit par l'augmentation du slip time, l'augmentation de la largeur de bande de fréquence, en diminuant la longueur du sweep, ou par rapprochement des groupes de vibreurs.

De ces alternatives, l'augmentation du slip time serait la solution la plus simple; mais elle aurait un impact négatif en termes de productivité.

La volonté d'optimiser la productivité conduit à rechercher des intervalles de temps entre les vibrations aussi courts que possible (un slip time très proche du temps d'écoute). Dans ces conditions, les enregistrements obtenus présentent un rapport signal sur bruit dégradé par rapport à celui qui serait obtenu en utilisant le procédé classique. Un filtre passe-bande simple serait pas distingué l'énergie fondamentale et harmonique. Par conséquent, nous devons concevoir une méthode de traitement permettant la réduction du bruit harmonique.

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.

2. Comparaison entre la méthode conventionnelle et la méthode slip sweep:

Dans l'étape de corrélation, les enregistrements acquises en mode d'acquisition conventionnelle, sont corrélées les uns après les autres utilisant le pilote, tandis que dans le mode slip sweep, les enregistrements sont continus. Ils sont coupés en enregistrements individuels en se basant sur les premières arrivées.

L'effet de l'harmonique dans le mode d'acquisition conventionnelle est totalement indépendant, par conséquent le spectre des harmoniques d'un sweep donné ne chevauche pas sur le spectre du deuxième sweep. Par contre dans le slip sweep, les harmoniques d'un sweep donné chevauchent sur les réflexions (signal utile) du sweep suivant, ce qui pose un problème au niveau de traitement.

Faire appel à la méthode slip sweep pour optimiser la productivité, présente des inconvénients. Les enregistrements obtenus présentent un rapport S/B dégradé par rapport à celui de la méthode conventionnelle, à cause du bruit harmonique. Un simple filtre passe-bande ne peut discriminer entre l'énergie "fondamentale" et L'énergie "harmonique". D'où la nécessité de concevoir un procédé de traitement permettant la réduction du bruit harmonique seul.

La **Figure V.1** présente les différents enregistrements acquis en mode conventionnel et en mode slip sweep, avant et après corrélation. En mode conventionnel, on remarque qu'il n'y a pas de chevauchement de signaux avant ou après corrélation, contrairement aux données de la méthode slip sweep. Avant corrélation, la contamination est plus forte, on remarque le chevauchement du 2ème et du 3ème harmonique, qui sont très énergiques avec la composante fondamentale du tir précédent. Après corrélation, cette contamination est toujours présente mais affecte moins fortement le signal utile.

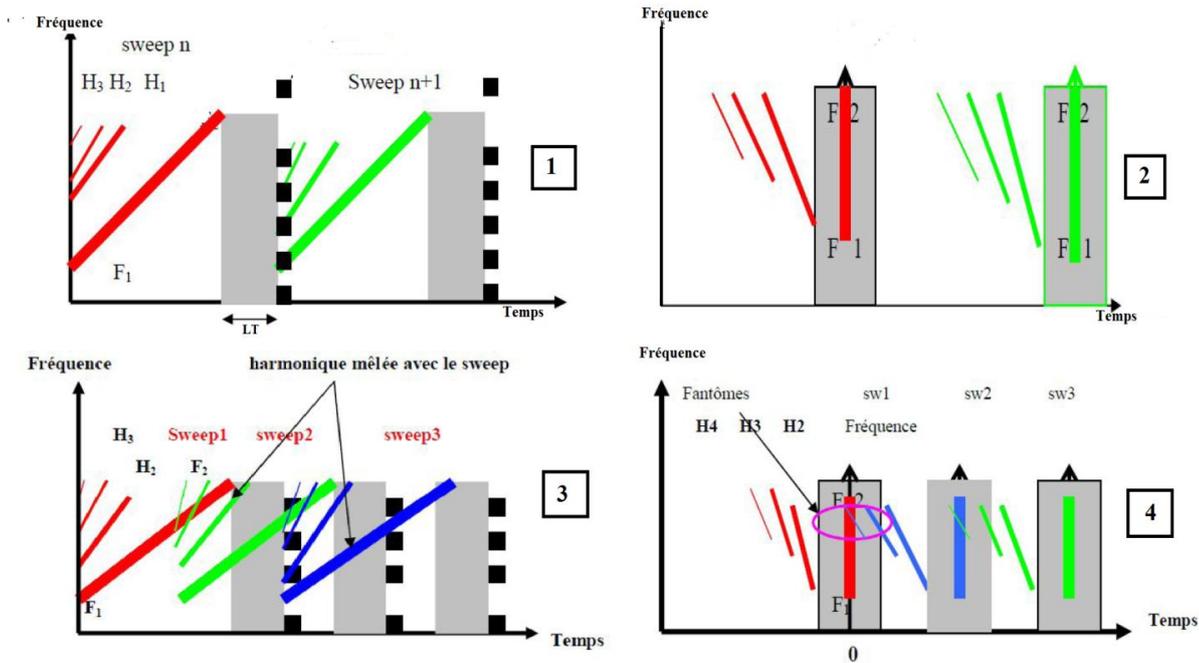


Figure V.1 : représentation temps-fréquence des harmoniques avant et après corrélation dans le mode conventionnel et le mode slip sweep. **1 :** harmoniques avant corrélation en mode conventionnel, **2 :** harmonique après corrélation (conventionnel), **3 :** harmoniques avant corrélation en mode slip sweep, **4 :** harmoniques après corrélation (slip sweep).

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.

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), elle est présentée par la formule (V.2) :

Cas théorique : signal émis pilote : $S(t) = R(t) * F(t)$ (V.1)

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

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

Fondamentale Harmoniques

Avec : * : convolution

R(t) : réflectivité

F(t) : composante fondamentale du sweep

H(t) : composantes fondamentales du sweep

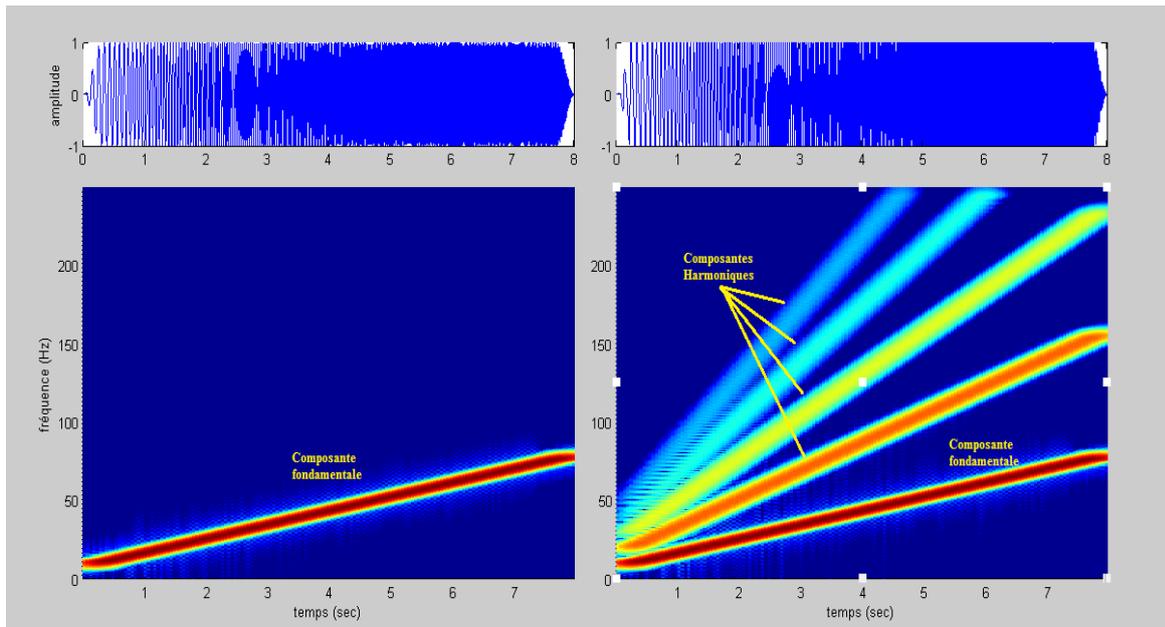


Figure (V.2) : A gauche : un up-sweep linéaire qui représente le sweep pilote et sa projection sur le plan F-T (sans présence d’harmonique)

A droite : un up-sweep linéaire avec distorsion qui représente le signal émis et sa projection sur le plan F-T

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**)

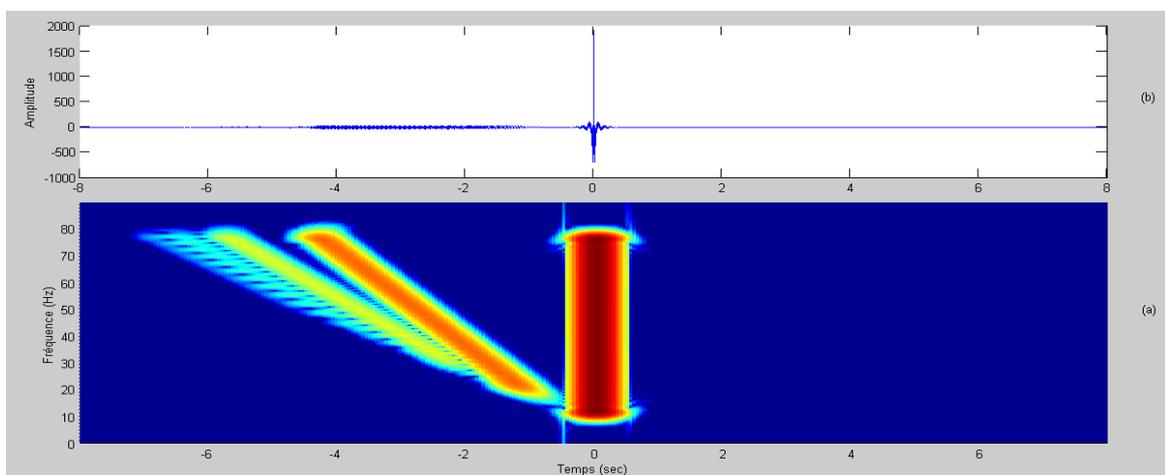


Figure V.3 : les harmoniques après corrélation, (a) cross-corrélation d’un up-sweep avec le pilote, (b) projection temps-fréquence de (a).

3. Analyse mathématique des harmoniques dans la technique slip sweep :

Dans ce qui suit, nous examinons quantitativement l’effet de corrélation sur des données slip-sweep en présence de distorsions harmoniques. Nous étendons les théories établies à ce sujet en étudiant l’effet de la corrélation sur ces données slip sweep.

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 :

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

Avec :

f : fréquence correspondante 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.

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 (**Figure V.3**). Par conséquent, ils interfèrent avec les réflexions des sweeps précédents (**Figure V.4**). Les fréquences initiale et finale du sweep inverse sont kf_0 et f_m , respectivement. L'emplacement de l'harmonique corrélée pour un événement sismique bidirectionnel de temps de transit τ est calculé pour le cas général où plusieurs enregistrements de sweeps sont acquis. Entre chaque cycle i , un slip time ST_i (égal ou supérieur au temps d'écoute (LT)) est ajouté avant le début du prochain sweep. L'origine des temps ($t = 0$) est située au départ du sweep 1. Nous considérons un événement (avec un temps de transit τ) dans l'enregistrement n . Tout d'abord, nous introduisons **le temps de transit prolongé** $\bar{\tau}$, ce qui est tout simplement le temps d'arrivée de l'événement à compter de l'origine des temps (le départ du sweep 1). Ce temps de transit prolongé noté $\bar{\tau}$, est donné par :

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

Ensuite, nous définissons la ligne dans le domaine F-T qui caractérise la distorsion harmonique générée par cet événement. La ligne d'harmoniques dans ce domaine est donnée par l'équation (*P. Ras*, M. Daly and G. Baeten, Schlumberger*):

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

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 F-T(temps de contamination par la fréquence f).

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

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

L'équation (V.5) est l'équation fondamentale d'évaluation de l'impact de l'harmonique d'un certain événement sur tous les enregistrements précédents

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

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

pour d'autres auteurs

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

Les relations (V.7 / V.8) 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 TL pour (V.8). La partie de données non affectée par les bruits harmoniques est alors limitée dans la fréquence par f_0 et f_s .

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

L'équation (V.9) décrit le temps fixé t_{lim} au-delà duquel les données sismiques seront affectées par l'harmonique d'ordre k.

Les équations (V.7) (V.8) et (V.9) 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 :

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

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

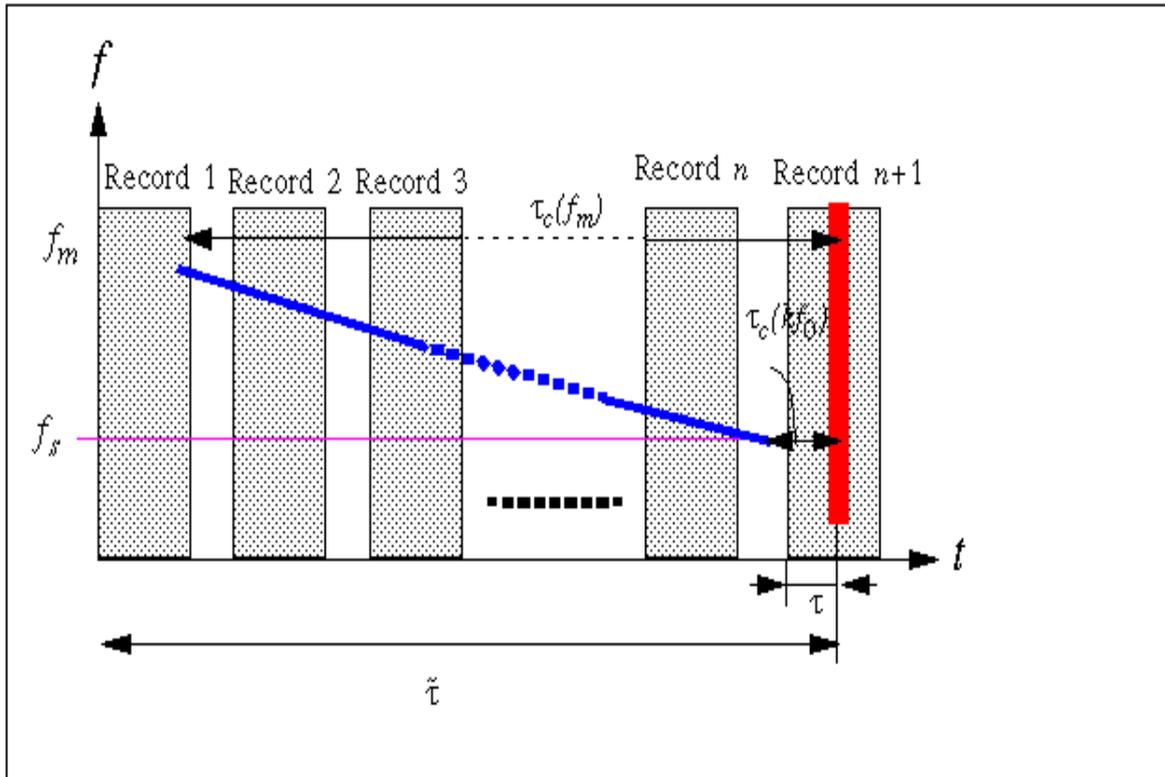


Figure (V.4): un événement dans l’enregistrement n (zone rouge) crée des harmoniques, qui après corrélation sont présentés par la ligne bleue (P. Ras*, M. Daly and G. Baeten, Schlumberger).

L’harmonique peut interférer avec un nombre d’enregistrements précédents. La ligne qui représente la projection dans le domaine F-T de la $k^{i\text{ème}}$ harmonique est calculée à partir de l’équation (V.7).

4. Techniques de réduction des bruits harmoniques :

Il devient clair maintenant comment nous pouvons réduire l’effet des harmonique, à savoir en augmentant la fréquence de début des bruits f_s et le temps limite de contamination t_{lim} . Nous avons examiné les différentes techniques de réduction des bruits harmoniques :

a. 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; après sommation, pour un sweep linéaire [8-80 Hz] de longueur de 12seconds. Les bruits harmoniques restent au-dessous de -50 dB même avec un slip-time aussi court que 6 seconds. Les bruits des harmoniques augmentent lorsque f_m diminue (pour la même longueur de sweep) et que la longueur de sweep est réduite (pour un f_m donné).

b. Slip-time aléatoire (comme proposé par Rozemond)

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

c. Codage de phase (Rotation de phase d'enregistrements consécutifs)

Cette technique n'a pas montré d'amélioration significative.

d. Sweeps non-linéaires :

Un changement de la loi temps-fréquence du sweep (linéaire → logarithmique) résulte à un changement de l'intervalle et l'amplitude de contamination par les bruits harmoniques. Ce qui atténuera la contamination.

5. Analyse graphique des harmoniques dans la technique slip sweep :

Afin de clarifier le problème des harmoniques dans l'acquisition en mode slip sweep, on a programmé sous matlab une data synthétique "Mother gather" composé de 120 traces de up sweep de longueur de 18 secondes et de bande fréquentielle 8-80Hz. Le mother gather était créé en corrélant les sweeps synthétiques distordus qui ont quatre ordres d'harmonique avec une amplitude de [0.8-0.5 -0.4-0.3] respectivement, avec la réponse terrestre "réflectivité". On considère une réflectivité avec 50 coefficients de réflexion. Le premier pic de réflexion est le plus large de la série. Ce modèle de data synthétique est cross-corrélé avec le sweep pilote. Dans le cas d'un up-sweep, les bruits harmoniques générés par de fortes réflexions vont couvrir les réflexions de faible amplitude générées par les événements sismiques profonds existant dans les temps négatifs.

Paramètres récepteur :

Nombre de trace : 120
 Inter-trace : 50 mètres
 Position de la première trace : 0 mètre

Paramètres source :

Nombre de point source : 4
 Inter-VP : 200 mètres
 Position du premier VP : 2475 mètres
 Offset maximum : 3000 mètres
 Offset minimum : - 3000 mètres
 Longueur de l'enregistrement "mother gather" : 120 secondes
 Le pas d'échantillonnage "dt" : 0.002 seconde

Paramètres sweep :

Type sweep : linéaire
 Le temps d'écoute "LT" : 5 seconde
 La bande fréquentielle : [8 ; 80Hz]
 La longueur du sweep "SL" : 18 seconde
 Temps Taper : 0.3 seconde
 Type taper : linéaire
 Nombre des harmoniques : 4

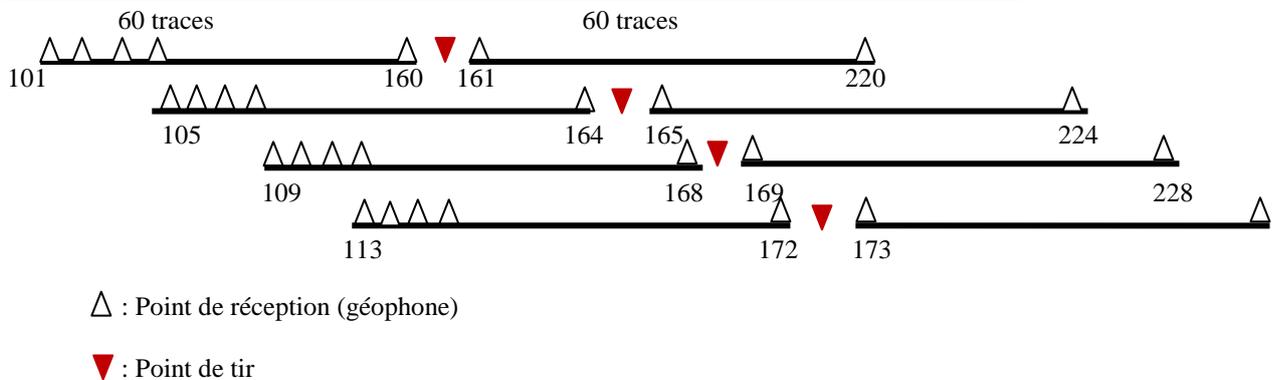


Figure V.5 : géométrie des nappes

Le slip time est le paramètre qu'on varie pour pouvoir distinguer son influence. La **Figure V.6** présente un enregistrement Mother gather avec différent slip time :

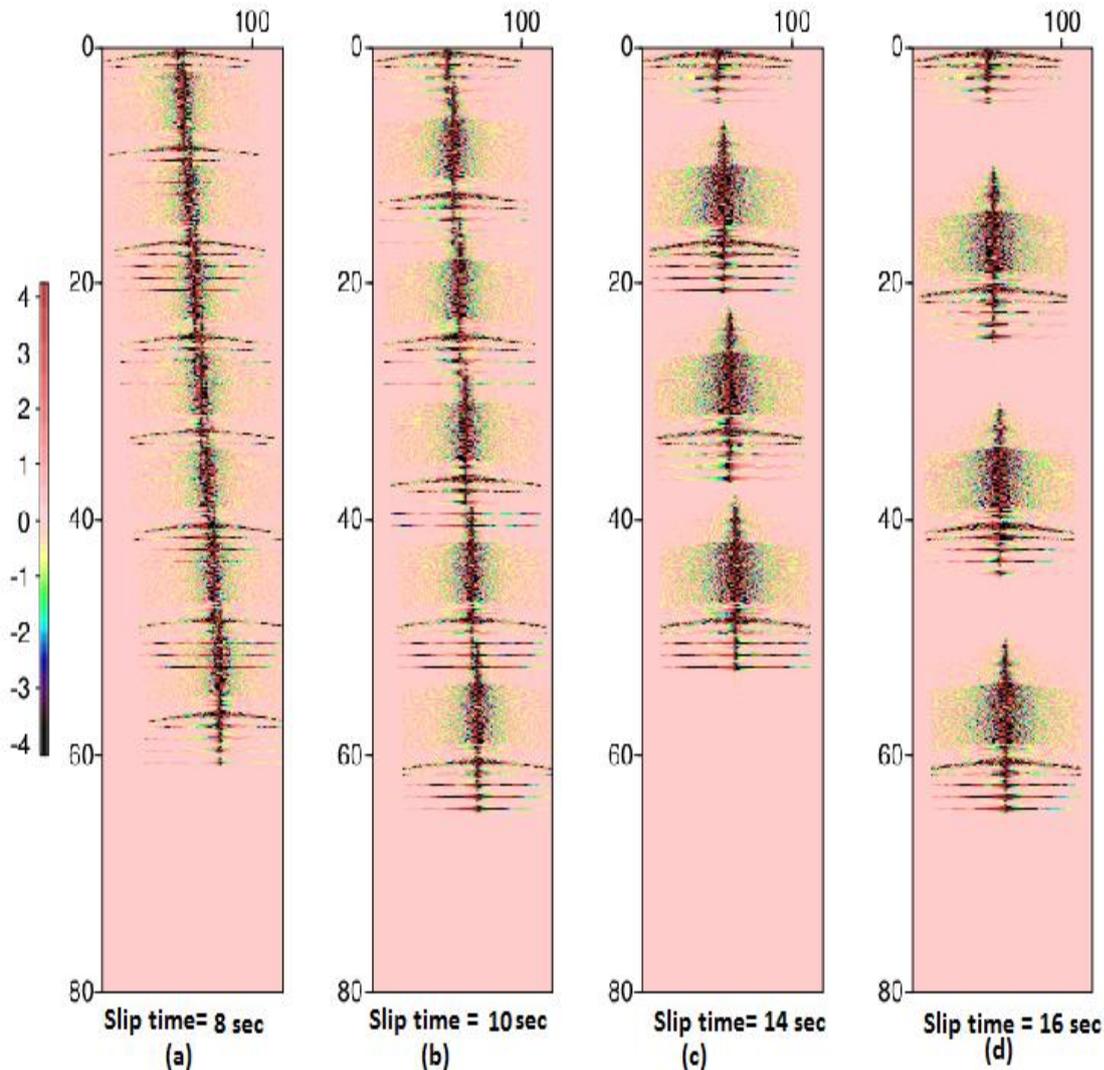


Figure (V.6) : effet du slip time sur l'enregistrement

Pour des raisons de productivité, on cherche des slip times de plus en plus courts. Or cela a un effet nuisible sur l'enregistrement. D'après la figure (V.4), plus le slip time est petit plus la contamination est grave, pour un $ST = 8$ sec (a) les harmoniques du, par exemple VP_4 entre en interférence même avec les réflexions du VP_2 : cas d'un slip sweep agressif. Si on utilise un slip time moins faible (10sec (b) ou 14sec (c)), les harmoniques interfèrent uniquement avec les réflexions du VP précédent. (d) représente le cas conventionnel où $ST = SL + LT$, aucune contamination ne se présente.

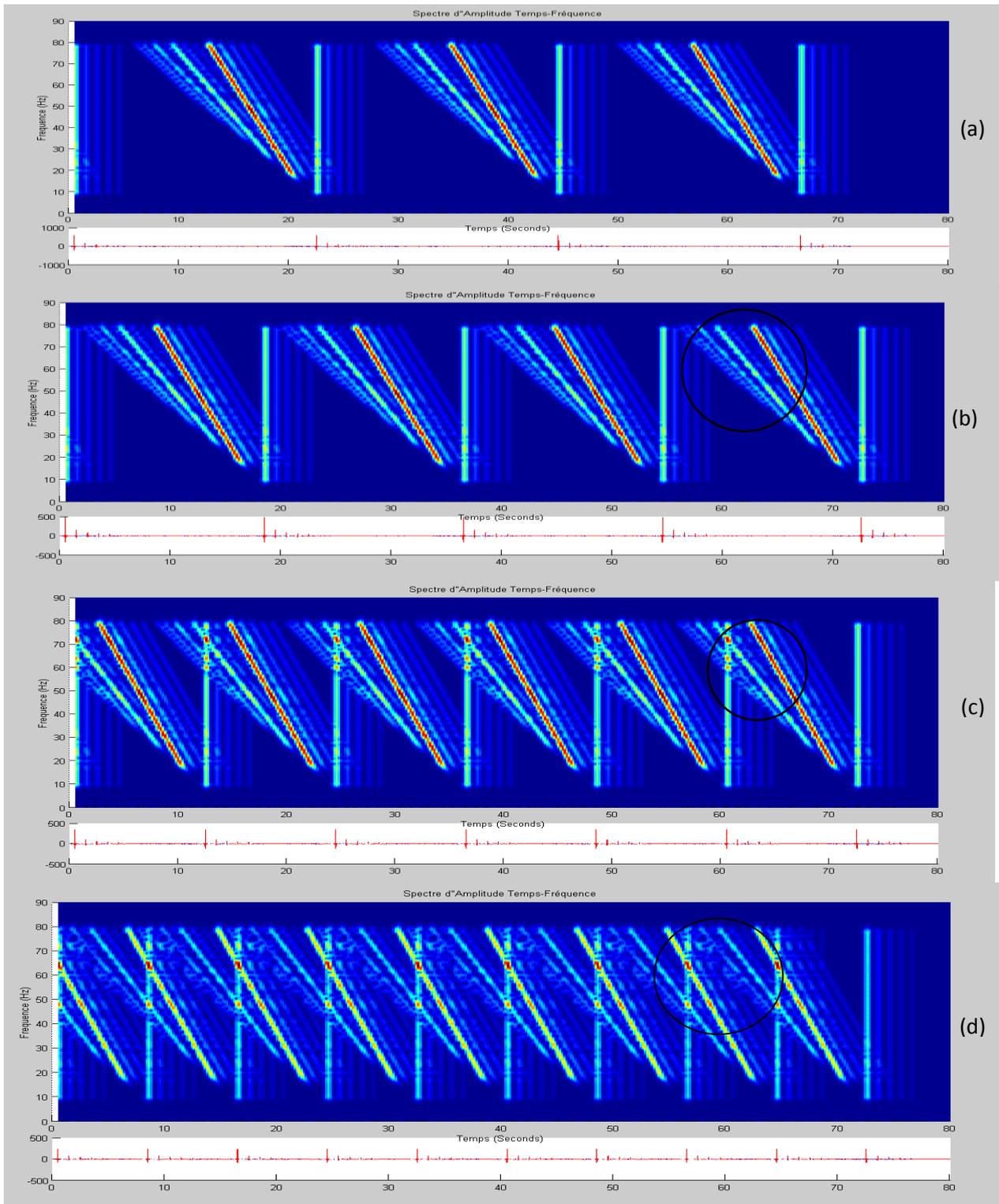


Figure (V.7) : la projection T-F d'une trace des VPs avec différents slip time

(a) Projection F-T d'une trace tiré d'un VP conventionnel **(b)** Projection F-T d'une trace tiré d'un VP slip sweep avec ST= 16sec **(c)** Projection F-T d'une trace tiré d'un VP slip sweep avec ST= 12sec **(d)** Projection F-T d'une trace tiré d'un VP slip sweep avec ST= 8sec.

Les zones entourées d'un cercle dans la **Figure V.7** représentent les harmoniques de différents ordres. On remarque sur cette figure le gain de productivité apporté par la technique slip sweep qui devient plus important chaque fois qu'on diminue le slip time mais ce dernier joue aussi sur la qualité des datas.

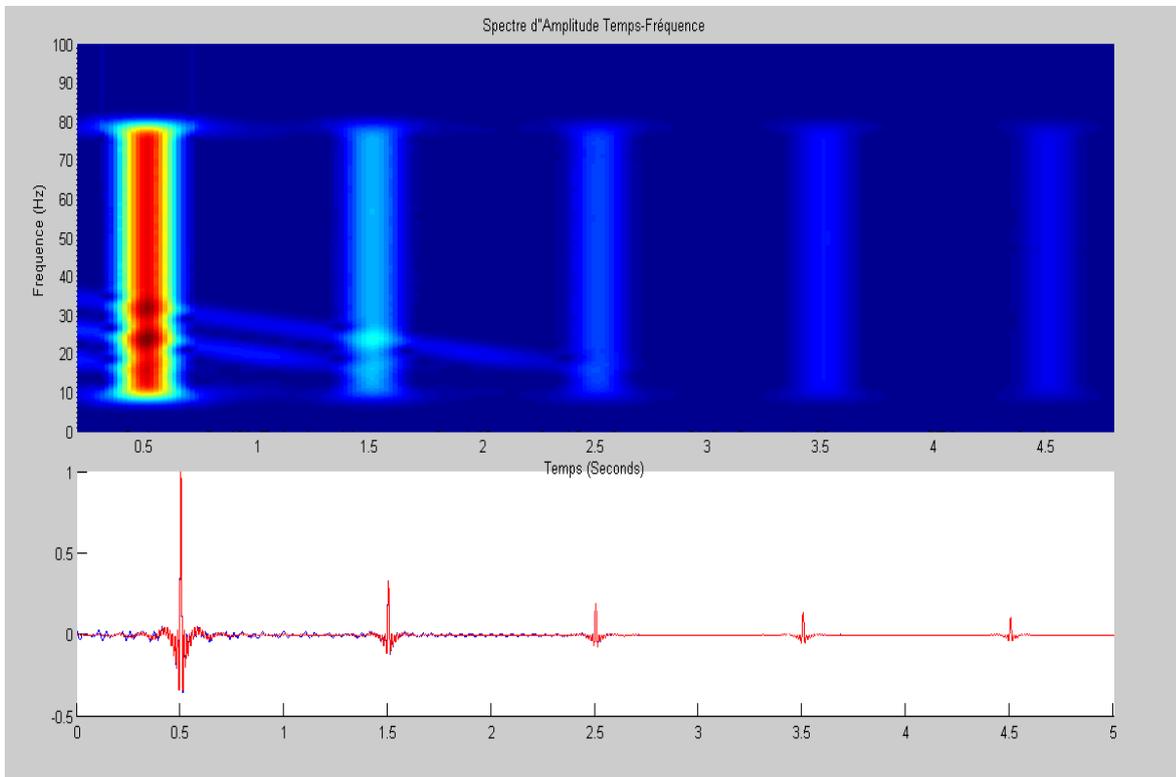


Figure (V.8) : Projection T-F d'un VP en mode conventionnel.

On remarque sur **Figure (V.8)** une distorsion harmonique très faible qui ne peut pas gêner les réflexions. Comme on voit sur la cross-corrélation avec le pilote représenté en bas, où on distingue facilement les réflexions même de faibles amplitudes.

La **Figure V.9** montre un cas où le slip time est inférieur à $SL + LT$ et qui est pris égale à 18sec, les harmoniques commencent à interférer avec les réflexions en dehors des valeurs suivantes :

- La fréquence maximale (calculée à partir de l'équation V.8) à partir de laquelle la contamination des harmoniques de différents ordres commence:

Harmonique d'ordre 2 → $fs_{.2} = 104\text{Hz}$

Harmonique d'ordre 3 → $fs_{.3} = 87.75\text{Hz}$

Harmonique d'ordre 4 → $fs_{.4} = 69.33\text{Hz}$

Harmonique d'ordre 5 → $fs_{.5} = 65\text{Hz}$.

Les temps limites où la contamination commence :

Harmonique d'ordre 2 → $t_{im-2} = 8 \text{ sec}$

Harmonique d'ordre 3 → $t_{im-3} = 4.7 \text{ sec}$

Harmonique d'ordre 4 $\rightarrow t_{lim,4} = 3 \text{ sec}$

Harmonique d'ordre 5 $\rightarrow t_{lim,5} = 2 \text{ sec}$

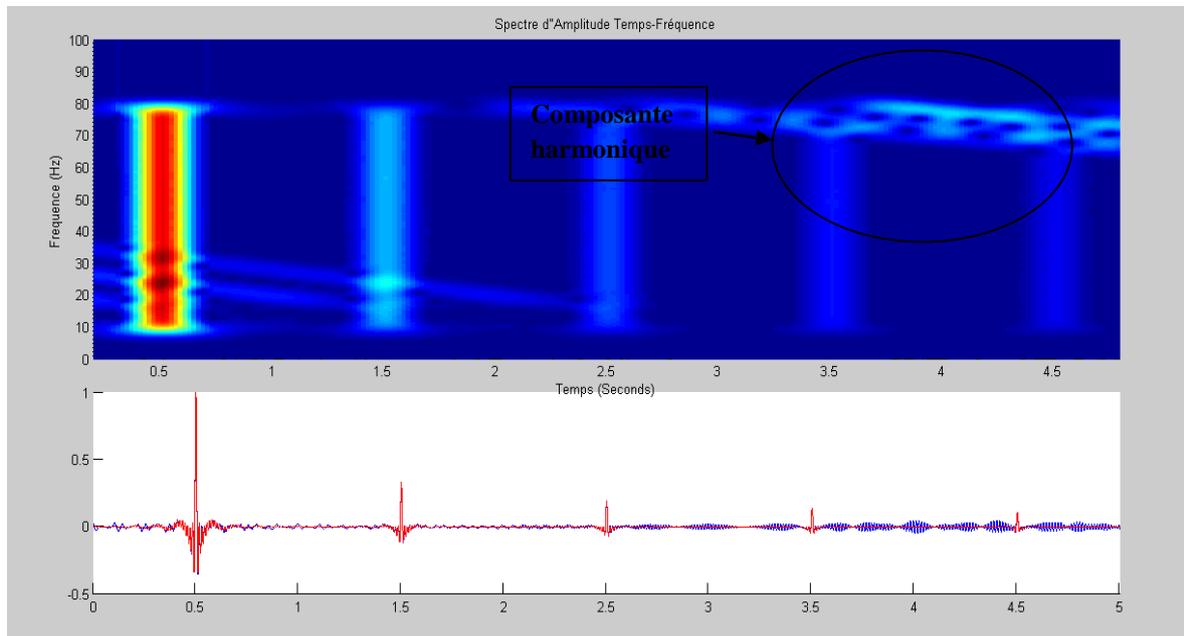


Figure (V.9) : Projection T-F d'un VP en mode slip sweep avec un slip time de 18sec.

Plus on réduit le slip time, plus la qualité des datas diminue. Sur la **Figure (V.10)**, on utilise un slip time de 12sec (A) et de 8sec (B), le VP est fortement affecté par les harmoniques surtout dans le cas (B) slip time très petit, la contamination par les harmoniques est plus marquée, certaines réflexions n'apparaissent pas, elles sont complètement noyées dans les harmoniques.

- La fréquence maximale dans le cas de ST = 12 est :

Harmonique d'ordre 2 $\rightarrow f_{s,2} = 56 \text{ Hz}$

Harmonique d'ordre 3 $\rightarrow f_{s,3} = 47.25 \text{ Hz}$

Harmonique d'ordre 4 $\rightarrow f_{s,4} = 37.33 \text{ Hz}$

Harmonique d'ordre 5 $\rightarrow f_{s,5} = 35 \text{ Hz}$.

Les temps limites où commence la contamination sont:

Harmonique d'ordre 2 $\rightarrow t_{lim,2} = 2 \text{ sec}$

Harmonique d'ordre 3 $\rightarrow t_{lim,3} = - 1.3 \text{ sec}$

Harmonique d'ordre 4 $\rightarrow t_{lim,4} = - 3 \text{ sec}$

Harmonique d'ordre 5 $\rightarrow t_{lim,5} = - 4 \text{ sec}$

- La fréquence maximale dans le cas de ST = 8 sec est :

Harmonique d'ordre 2 $\rightarrow f_{s,2} = 24 \text{ Hz}$

Harmonique d'ordre 3 → $f_{s.3} = 18 \text{ Hz}$

Harmonique d'ordre 4 → $f_{s.4} = 16 \text{ Hz}$

Harmonique d'ordre 5 → $f_{s.5} = 15 \text{ Hz}$.

Les temps limites où la contamination commence est:

Harmonique d'ordre 2 → $t_{\text{lim.2}} = - 2 \text{ sec}$

Harmonique d'ordre 3 → $t_{\text{lim.3}} = -5.33 \text{ sec}$

Harmonique d'ordre 4 → $t_{\text{lim.4}} = - 7 \text{ sec}$

Harmonique d'ordre 5 → $t_{\text{lim.5}} = - 8 \text{ sec}$

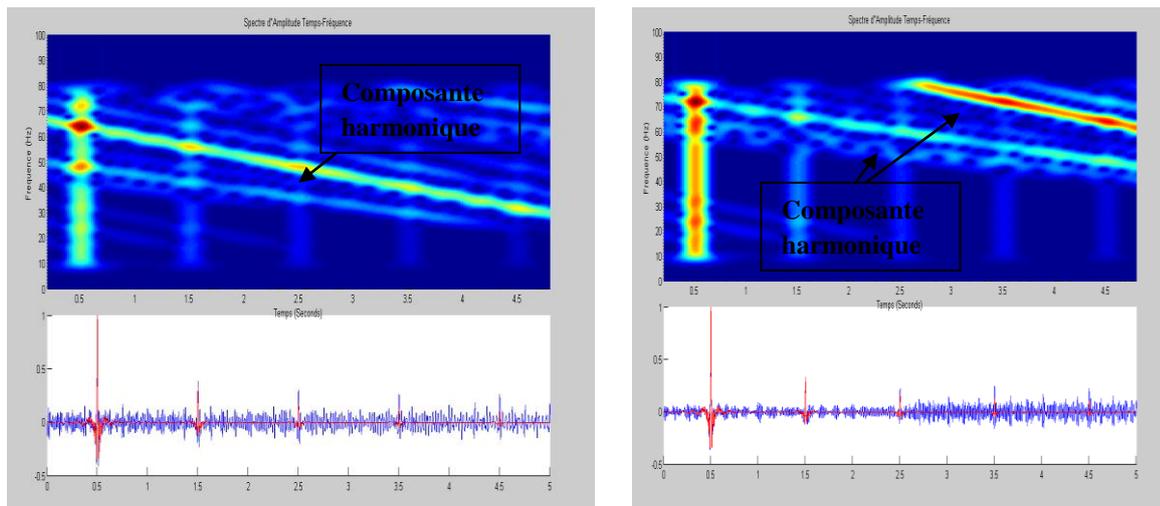


Figure (V.10) : Projection T-F d'un VP en mode slip sweep avec un slip time de $SL= 12 \text{ sec}$ (A) et $SL = 8 \text{ sec}$ (B).

Conclusion :

L'optimisation de la productivité au détriment de la qualité pose un problème auquel on doit y remédier, d'où la nécessité de concevoir un procédé de traitement permettant l'amélioration de la qualité des datas en réduisant les distorsions harmoniques. Ces techniques ont été développées par diverses compagnies et elles sont protégées.

6. Méthode de réduction des bruits harmonique dans la technique slip sweep :

6.1 Introduction :

Ces dernières années, plusieurs techniques de réduction des bruits harmoniques ont été proposées par Fleure (2002), Meunier and Bianchi (2002), Moerig (2007), Moro et al. (2007). Ces techniques sont basées sur : le calcul du rapport spectral (la composante harmonique globale sur la composante fondamentale), l'estimation des fonctions poids spectraux réduits (calcul d'opérateurs) et son application pour l'estimation du bruit harmonique (application des opérateurs) et sa soustraction.

Le problème de la représentativité du filtre est posé dans ces procédés : en effet, l'évaluation d'harmoniques en fonction uniquement d'un opérateur peut être imprécise à cause de la nature de la source du signal (non-stationnaire). La contribution (poids) de chaque harmonique varie d'une trace à l'autre, l'estimation de l'opérateur de plusieurs traces non corrélées (gamme d'offsets), est représentative de la signature de cette gamme, des mesures de GF ne sont pas entièrement représentatives de la signature des traces lointaines.

Tout opérateur unique calculé de cette manière ne fournit pas une estimation précise des harmoniques. D'autres scientifiques ont proposé des améliorations qui ont une solution au problème du chevauchement des harmoniques avec la composante fondamentale du tir précédent, éludé par la première méthode.

Ces améliorations sont basées sur un calibrage du bruit harmonique estimé à partir de l'extérieur de l'intervalle du chevauchement. Mais cela ne va pas résoudre entièrement le problème de la représentativité du filtre pour les mêmes raisons mentionnées ci-dessus.

Par rapport aux méthodes précédentes, qui négligent la variation de l'opérateur pour estimer le bruit harmonique en fonction de l'offset, on propose une nouvelle méthode d'atténuation des bruits harmoniques qui fait des améliorations dans l'estimation du bruit par la mise en œuvre de techniques plus fines de décomposition du signal transmis et un nouveau procédé qui utilise une atténuation variable dans le temps avec un filtre de référence et une bande dynamique limitée.

6.2 Le filtrage par HPVA (High-Productivity Vibroseis Acquisition) :

La solution approchée par la High-Productivity Vibroseis Acquisition (HPVA) du CGG est basée sur la décomposition des données sismiques dans ses composants fondamentales et harmoniques (Meunier, J. et Bianchi, T., 2002).

a) 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 des fonctions de poids c_1, c_2, \dots, c_n . On peut donc écrire :

$$s_k = \sum_{i=1}^n c_i \cdot h_i \quad (\text{V.12})$$

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 :

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi_i}{dt}(t) = f_i(t)$$

D'une 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 .

$$ec_k = r * s_k * hd_1 = r * \left(\sum_{i=1}^n c_i * h_i \right) * hd_1 \quad (\text{V.15})$$

En appliquant la transformée de Fourier, on obtient :

$$EC_k = R.S.HD_1 = R \cdot \left(\sum_{i=1}^n C_i H_i \right) \cdot HD_1 \quad (\text{V.16})$$

Avec : $R = TF[r]$; $H = TF[h]$; $C_i = TF[c_i]$; $H_i = TF[h_i]$ et $HD_i = TF[hd_i]$.

Après une telle corrélation, on peut décomposer le signal résultant en :

Composante fondamentale est:

$$EC_{Fond} = R \cdot C_1 H_1 HD_1 \quad (V.17)$$

Composante harmonique:

$$EC_{Harm} = R \cdot (\sum_{i=2}^n C_i H_i) HD_1 \quad (V.18)$$

qui peut être réécrit comme suit :

$$EC_{Harm} = \frac{\left(\sum_{i=2}^n C_i H_i \right)}{C_1 \cdot H_1} \cdot C_1 \cdot R \cdot H_1 \cdot HD_1 = OP \cdot EC_{Fond} \quad (V.19)$$

Avec

$$OP = \frac{\sum_{i=2}^n C_i H_i}{C_1 H_1} = \frac{\sum_{i=2}^n (C_i / C_1) H_i}{H_1} \quad (V.20)$$

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 . On rappelle qu'une telle corrélation présente les propriétés suivantes :
 - l'autocorrélation de h_i est de phase nulle et est centrée autour du temps zéro;
 - La corrélation de h_i et de h_j rejette l'énergie aux temps positifs lorsque j est supérieur à i et au temps négatif lorsque i est supérieur à j .
- 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 :

$$f_i \approx r * c_i * h_i * hd_i \quad (V.21)$$

Et en passant au domaine de Fourier :

$$F_i = R * C_i * H_i * HD_i, \quad (V.22)$$

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 :

$$CR_i = \frac{C_i}{C_1} = \frac{F_i}{F_1} \times \frac{H_1 * HD_1}{H_i * HD_i} \quad (V.23)$$

Après 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 contaminé (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.

La **figure V.11** présente une comparaison d'enregistrements acquis en mode conventionnel et en mode slip sweep. On note qu'après l'application d'un filtrage par HPVA, les deux enregistrements présentent un niveau équivalent de qualité des datas.

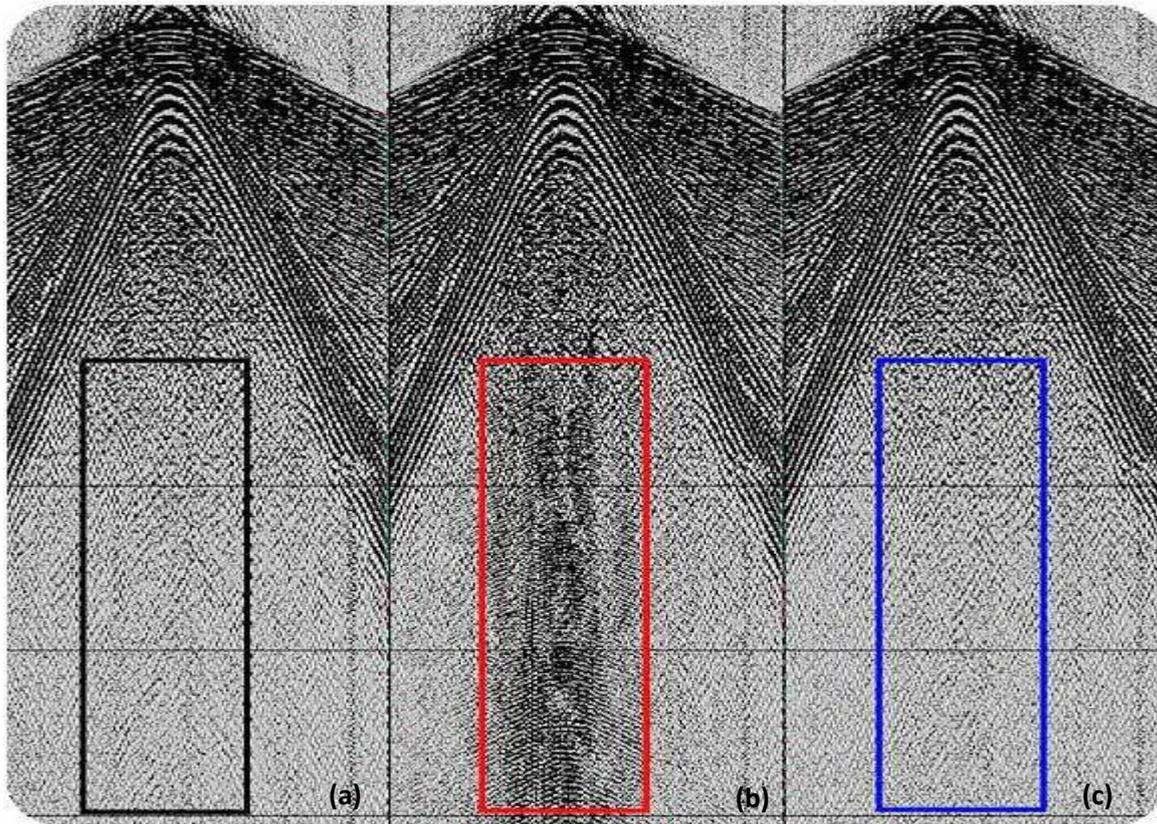


Figure V.11 : Comparaison d'un enregistrement vibrosismique de référence (a) à celui acquis au même endroit avec la technique slip-sweep (b). La contamination de bruit harmonique est clairement visible. Après l'application de HPVA (c) le bruit a été atténué et la qualité des données est comparable à la référence.

6.3 Méthode d'atténuation du bruit harmonique en vibrosismique par filtrage temps variant avec référence (filtrage par ENAGEO-ADVANCE) :

Dans ce qui suit, on va décrire une méthode d'amélioration de la qualité des données vibrosismiques plus précisément celles acquises en mode Slip Sweep. Le principe de base de cette méthode a été mis au point par l'ENAGEO en 2012 afin d'atténuer les harmoniques générés par une source vibratoire. Elle permet d'obtenir une estimation des différentes composantes harmoniques à partir de la composante fondamentale, ce bruit sera par la suite soustrait afin de débruiter les points vibrés (VPs).

6.3.1- Filtre optimal :

Le filtre optimal consiste à trouver le filtre qui permet, pour une entrée $x(t)$, représentant dans ce qui suit le signal 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 la solution de l'équation matricielle suivante :

$$[R_{xx}] \cdot [H] = [r_{dx}] \quad (V.24)$$

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 :

$$y(t) = x(t) * h(t)$$

6.3.2- Estimation du filtre du bruit harmonique à partir du modèle de la trace sismique :

On désigne par $x^k(t)$ le signal enregistré par l'un des géophones G. Ce signal est le résultat de la convolution du signal émis par la base plate de la source S^k (GF), et la fonction de réflectivité $R(t)$ de la terre, qui est la séquence chronologique des différents coefficients de réflexion interfaces géologiques rencontrées :

$$x^k(t) = s^k(t) * r(t) + n(t) \quad (V.25)$$

$$s^k(t) = \sum_{i=1}^n s_i^k(t) \quad (V.26)$$

Où : $s_{1k}(t)$ est la composante fondamentale supposé être très proche du sweep pilote $p(t)$, $s_2(t)$, $s_3(t)$... $s_n(t)$ les composantes harmoniques d'ordre 2, 3, ... , n, contenues dans le sweep émis et $n(t)$ le bruit additif.

Après corrélation avec le sweep pilote, et en négligeant la composante du bruit aléatoire, le signal enregistré devient :

$$Z^k(t) = \sum_{i=1}^n [S_{ik}(t) * p(-t) * r(t)] \quad (V.27)$$

$$z^k(t) = S_1(t) * p(-t) * r(t) + S_2(t) * p(-t) * r(t) + S_3(t) * p(-t) * r(t) + \dots + S_n(t) * p(-t) * r(t)$$

Où : $*$ désigne l'opération de convolution

$z^k(t)$ est un signal non causal car la corrélation donne au sweep de référence, dans le cas d'utilisation d'un Up-Sweep, une carte d'harmoniques pour $i > 1$, situé dans le temps négatif à partir du zéro.

Le système d'enregistrement délivre une trace causale, donc, une grande partie de l'énergie harmonique est éliminée et la trace corrélée obtenu est représentée par:

$$y^k(t) = z^k(t) \cdot U(t) = s_1^k(t) * p(-t) * r(t) \quad (V.28)$$

Où : $U(t)$ désigne la fonction Heaviside.

Afin de réaliser le filtrage avec référence, on présente une méthode basée sur l'extraction des bruits harmoniques sous la forme de sous-ensembles, appelés les classes des harmoniques :

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

Le cas le plus simple est d'estimer les harmoniques, une par une. L'algorithme proposé consiste à déterminer le filtre optimal, à partir de la composante fondamentale, $s_1^k(t) * p(-t) * r(t)$ étant donné le terme $b_i(t)$ la référence correspondant à la classe i , et qui satisfait l'équation :

$$b_i(t) = s_i^k(t) * p(-t) * r(t)$$

Le filtre optimal souhaité, noté par $h_i(t)$ et en utilisant uniquement les composantes du GF (Ground Force), satisfait l'équation suivante :

$$\varphi_{s_1^k, s_1^k}(t) * h_i(t) = \varphi_{s_i^k, s_1^k}(t)$$

(V.29)

Où :

$\varphi_{s_1^k, s_1^k}(t)$: La fonction d'autocorrélation de la composante fondamentale $S_1(t)$

$\varphi_{s_i^k, s_1^k}(t)$: La fonction de cross-corrélation fundamental-harmonique

La version non causale de ce filtre peut être calculée en utilisant l'algorithme de Wiener-Levinson. L'équation précédente accepte dans le domaine fréquentiel, une solution égale au rapport des densités spectrales, dont elle peut être calculée à partir du Transformé de Fourier Rapide, cette solution est la suivante :

$$h_i(f) = \frac{\phi_{s_i^k, s_1^k}(f)}{\phi_{s_1^k, s_1^k}(f)} \quad (V.30)$$

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

$$b_i(t) = y^k(t) * h_i(t) \quad (V.31)$$

L'algorithme décrit ci-dessus présente l'avantage de traiter les harmoniques une par une, ou par bloc. Le bruit estimé (généralisé 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} .

6.3.3- Filtrage par la méthode à entrées/sorties multiples :

Lors de la propagation et à cause de la non-stationnarité du sweep, un phénomène de distorsion non stationnaire 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 de l'offset) par conséquent les filtres calculés de manière conventionnelle à partir des GFs 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, comme signal émis qui élude les imprécisions dues à un manque de répétitivité dans le signal émis ainsi que la réflectivité diffère pour chaque vibrateur du même groupe.

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

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 :

- **Version globale :**

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

- **Version en Cascade :**

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

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

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) (**figure V.12**).

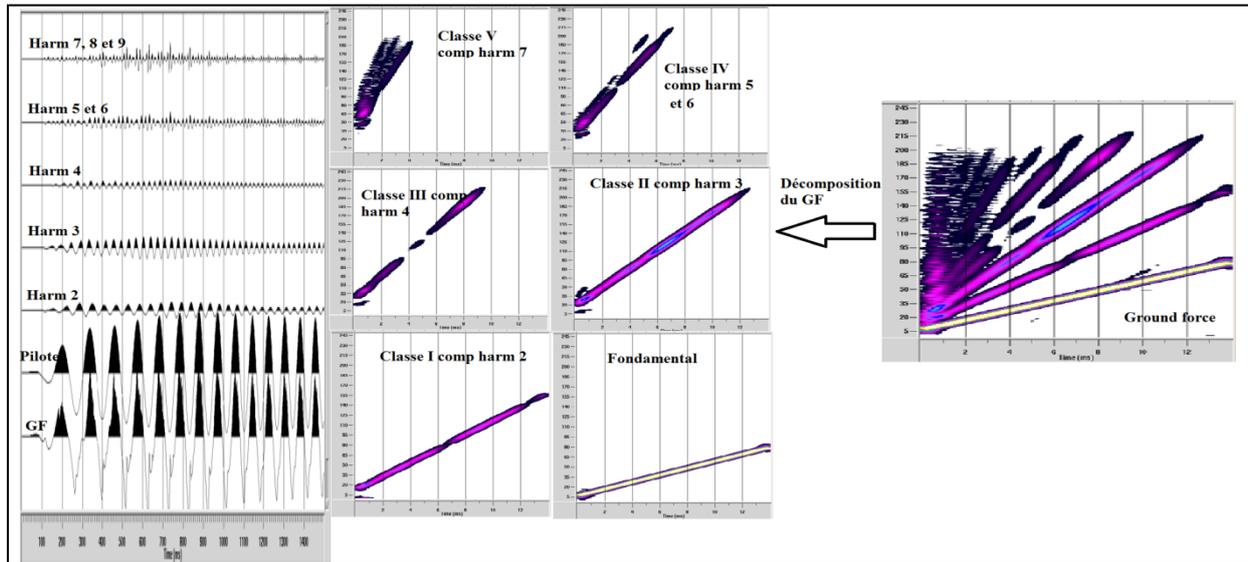


Figure V.12 : Décomposition du GF pour le calcul d'opérateur

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

a) 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 :

$$p_i(t) = a(t) \cdot \cos(i \cdot \phi(t)) \tag{V.32}$$

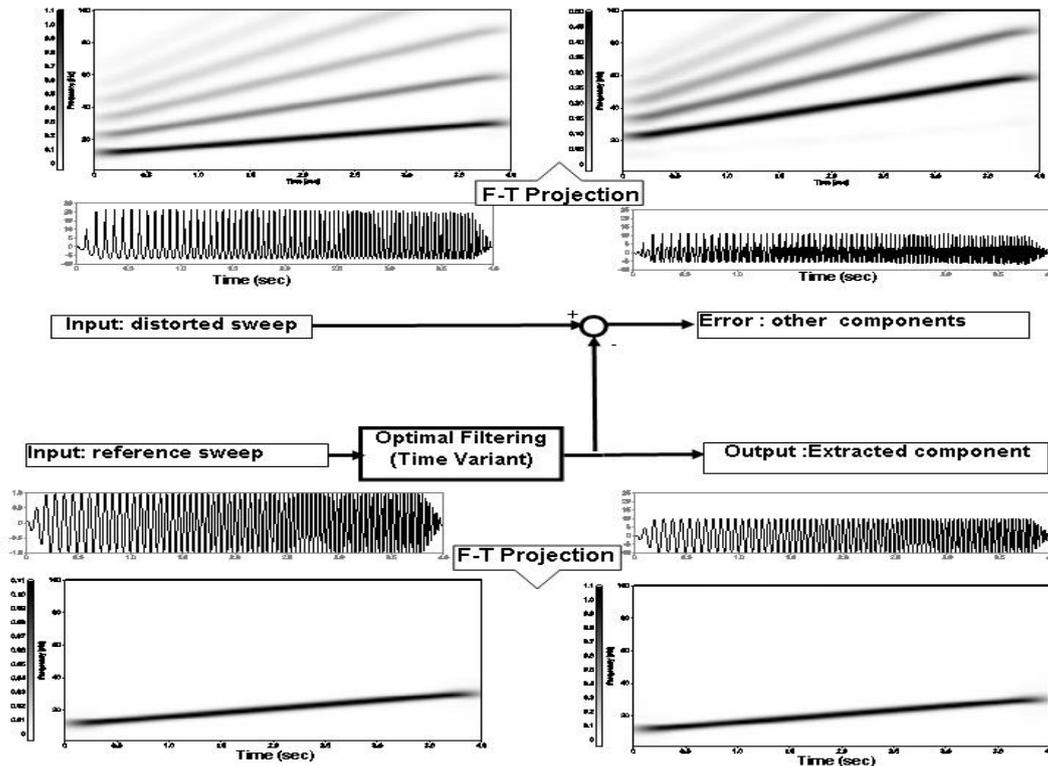
Avec : $a(t)$: l'enveloppe du sweep pilote

$\Phi(t)$: sa phase instantanée.

La **figure V.13** montre le processus d'extraction de l'harmonique d'ordre i , ce processus a comme entrée le sweep distordu dans laquelle on cherche la composante qui semble la meilleure pour le sweep de référence. A la sortie, on a la composante harmonique qui a été extraite avec le résidu du sweep qui représente les autres composantes restantes.

Pour extraire toutes les composantes, on effectue en premier l'extraction de la composante fondamentale (la plus énergétique) à partir du GF, en choisissant comme référence le sweep pilote $p_1(t) = p(t)$.

Pour la composante d'ordre 2, on prend comme sortie le signal résiduel de l'étape précédente comme signal de référence, et le sweep $p_2(t)$ calculé à partir de $p(t)$ par l'équation (V.33).



Figure(V.13) : décomposition de composante harmonique par filtre adaptatif.

b) 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.

En gardant $|S(t,f)|$ l'image d'amplitude du sweep distordu, on applique un masque $M_i(t)$ adapté à la composante d'ordre i qu'on veut séparer et extraire et sans toucher à la phase. 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 **figure V.14** explique le processus de séparation et d'extraction de la composante harmonique d'ordre 1.

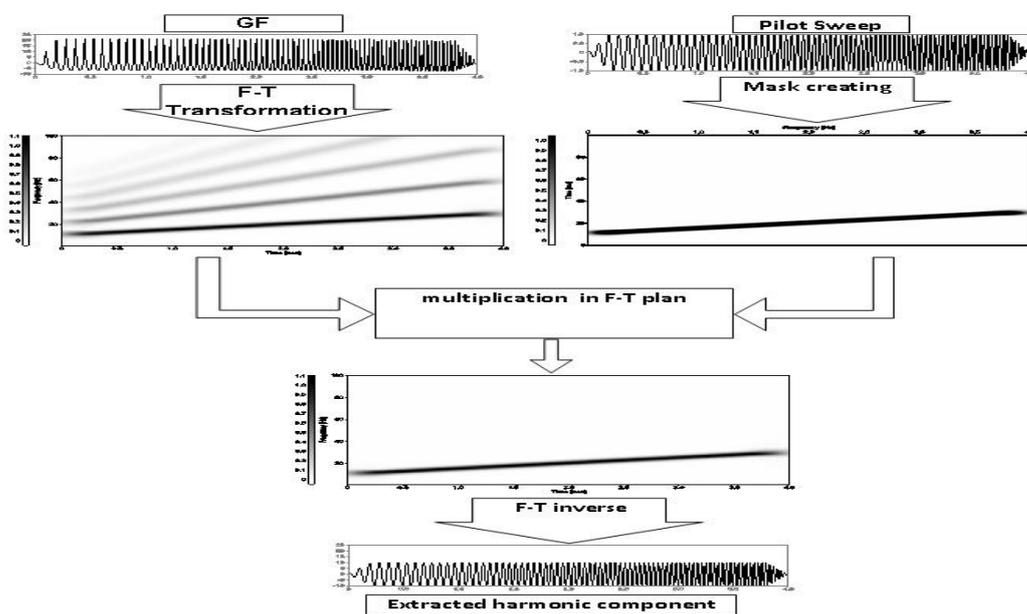


Figure V.14.: décomposition de la composante harmonique dans le domaine temps-fréquence

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 dans un diagramme en cascade, où 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 discrimination entre le nouveau composant à extraire et les composantes restantes.

7. Application sur des données réelles :

Notre stage pratique s'est déroulé à l'ENAGEO de Hassi Messaoud, où on a été affectées à la mission: EGS 210. La mission EGS 210 qui utilise la technique slip sweep.

7.1 Présentation de la région :

Le programme sismique 3D Est Hassi Dzabat est situé dans le périmètre de Hassi Toumiet, Wilaya de Ouargla, qui totalise 122000 VP sur une superficie d'environ 1500 km².

Les coordonnées du camp EGS 210 sont les suivantes :

Coordonnées géographiques :

Latitude : 31° 08' 36.47'' N

Longitude : 5° 56' 01.78'' E

Coordonnées en UTM-31 :

X= 3449207

Y= 779717

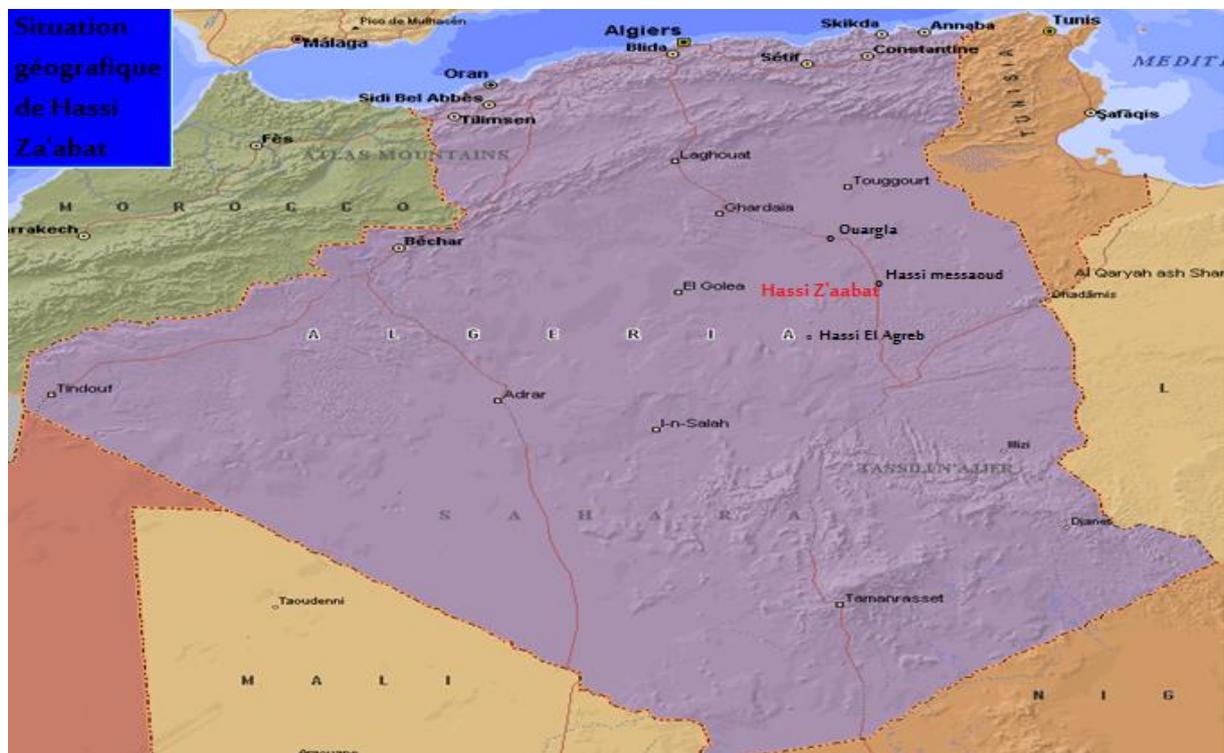


Figure V.14 : zone d'étude

L'objectif pétrolier est relativement profond, il est situé à 3800 mètres de profondeur environ. C'est l'équivalent de 2400 ms environ.

Du point de vue acquisition, la zone d'études est classée moyenne à difficile. Elle est constituée de 43% dunes et 57% de terrain accessible. Les dunes sont sous forme de cordons perpendiculaires 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.

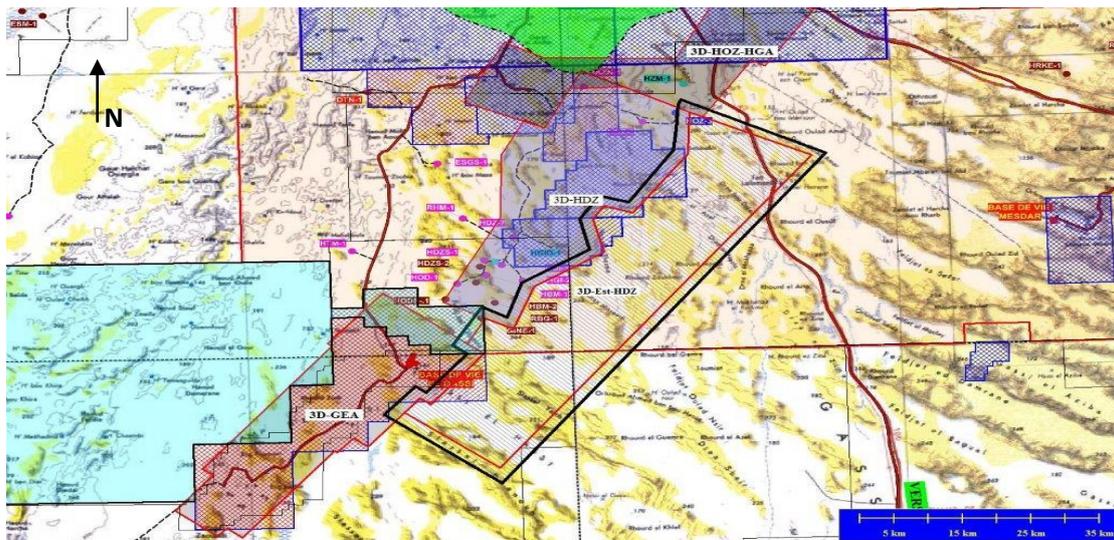


Figure V.15 : nature de terrain

7.2 Choix des paramètres d'acquisition :

Problématique des tests :

La durée prévue pour la réalisation de cette étude était de 13 à 12 mois environ, en utilisant la méthode conventionnelle. L'objectif principal de ce test de démarrage est d'étudier la faisabilité d'utiliser la méthode Slip Sweep afin de ramener la durée du projet entre 7 à 9 mois.

La zone d'études est une extension de l'étude Hassi Dzabat, c'est pour cette raison que le client a gardé les mêmes paramètres d'acquisition que l'étude voisine. Donc il s'agit essentiellement d'un test de paramètres de Sweep et plus précisément

- le nombre de sweep par VP,
- le nombre de vibrateurs par groupe et par conséquent le nombre de groupes de vibrateurs,
- la longueur du Sweep

Un problème d'optimisation s'est posé. D'une part et afin de maximiser la productivité en utilisant la méthode Slip Sweep le nombre de sweeps par VP doit être réduit à un (01) sweep. Cependant, le nombre de vibreurs par groupe doit être réduit au maximum afin de maximiser le nombre de groupes de vibreurs. Sachant que la mission dispose de 15 vibreurs les combinaisons possibles sont :

- 03 sets de 04 Vibs + 3 secours
- 04 sets de 03 Vibs + 3 secours
- 06 sets de 02 Vibs + 3 secours

D'autre part, la réduction du nombre de sweeps et le nombre de vibreurs par groupe impliquent une réduction de l'énergie émise. En contrepartie, on peut augmenter la longueur du sweep pour compenser une partie de l'énergie perdue.

Afin de déterminer les paramètres adéquats, on a réalisé, en mode conventionnel, les tests suivants sur une portion de swaths (350 VPs environ pour assurer la couverture complète sur l'In-line central) :

- 1) 03 sets de 04 Vibs/Groupe : un (01) sweep de 14.
- 2) 03 sets de 04 Vibs/Groupe : deux (02) sweep de 14.
- 3) 04 sets de 03 Vibs/Groupe : un (01) sweep/VP de 14sec.
- 4) 04 sets de 03 Vibs/Groupe : un (01) sweep/VP de 16sec.
- 5) 04 sets de 03 Vibs/Groupe : un (01) sweep/VP de 18sec.

Ces tests ont été réalisés en deux passages.

➤ **Analyse des résultats:**

Une fois les tests réalisés, les données ont été séparées puis traitées en utilisant les mêmes paramètres. Les résultats de traitement sont présentés dans les figures : V.16, V.17, V.18, V.19, et V.20.

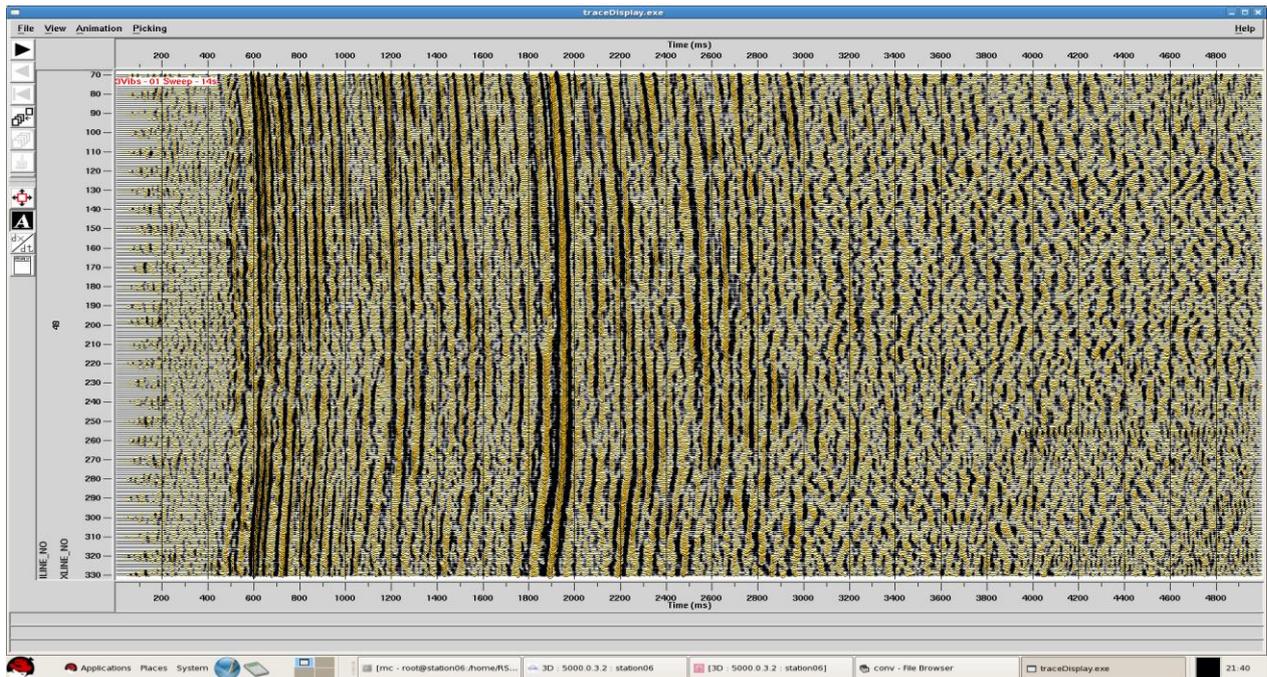


Figure V.16 : stack en couverture complète du premier test avec 03 groupes de 03 Vib/Groupe : un (01) sweep de 14sec

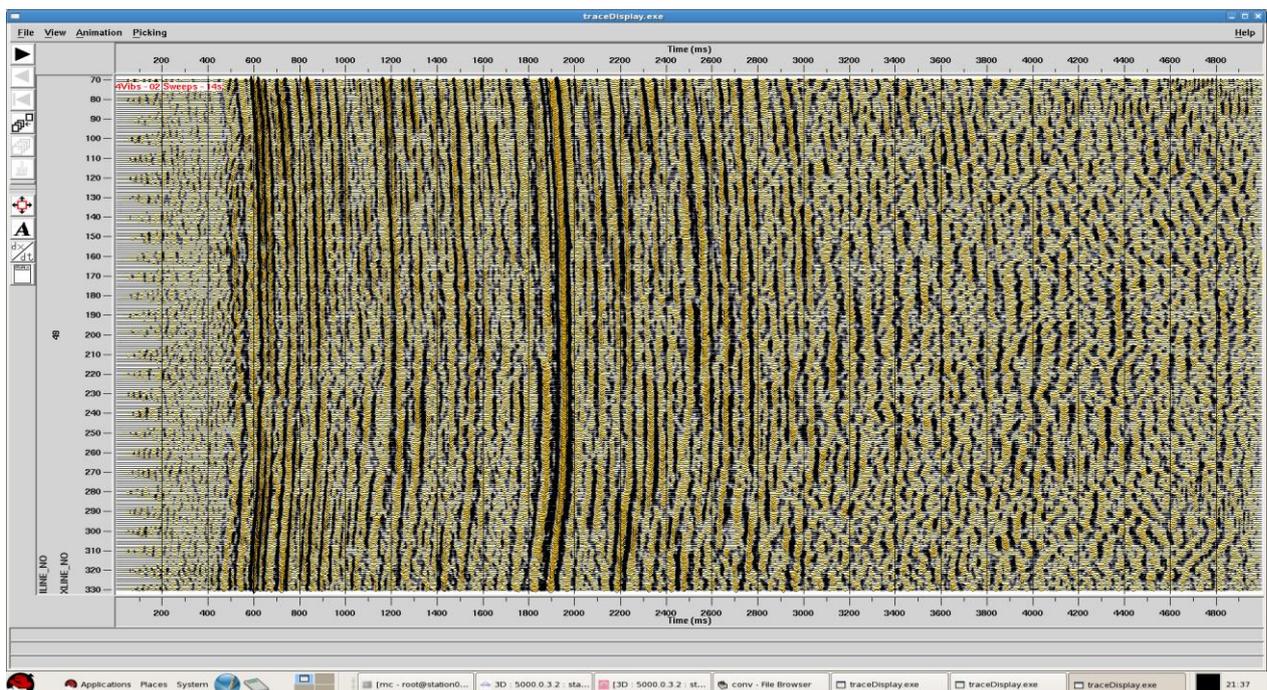


Figure V.17 : stack en couverture complète du deuxième test avec 03 groupes de 04 Vib/Groupe : un (02) sweep de 14sec

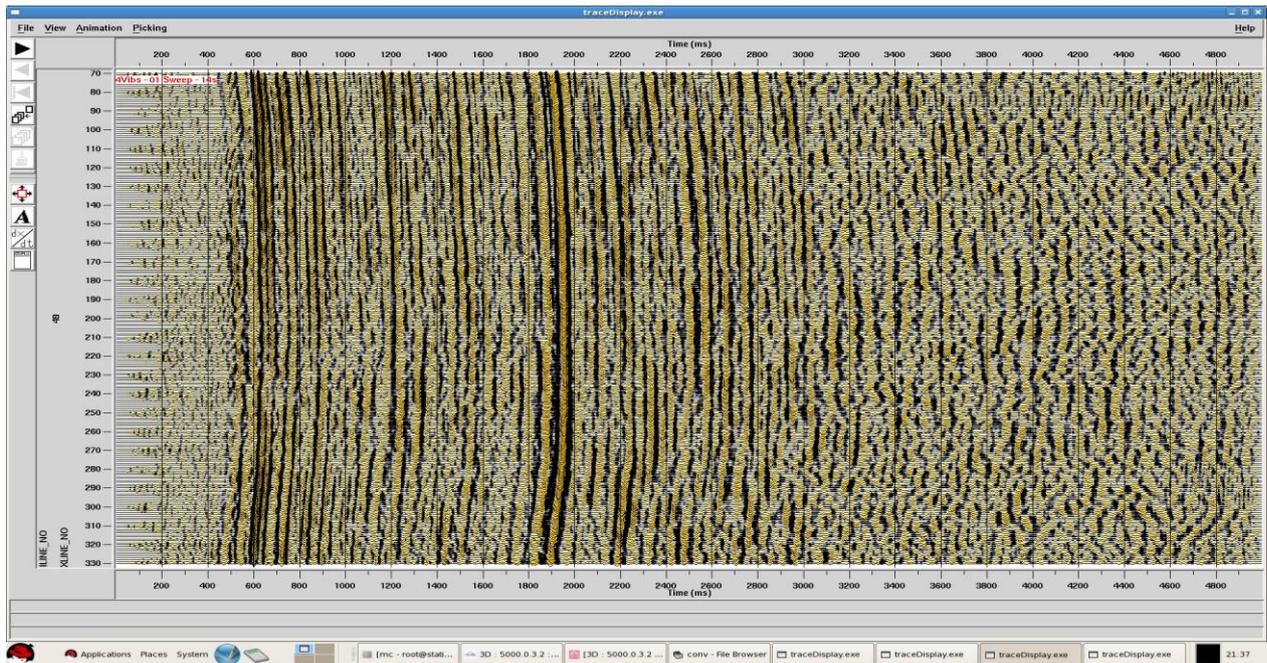


Figure V.18 : stack en couverture complète du troisième test avec 03 groupes de 04 Vib/Groupe : un (01) sweep de 14sec

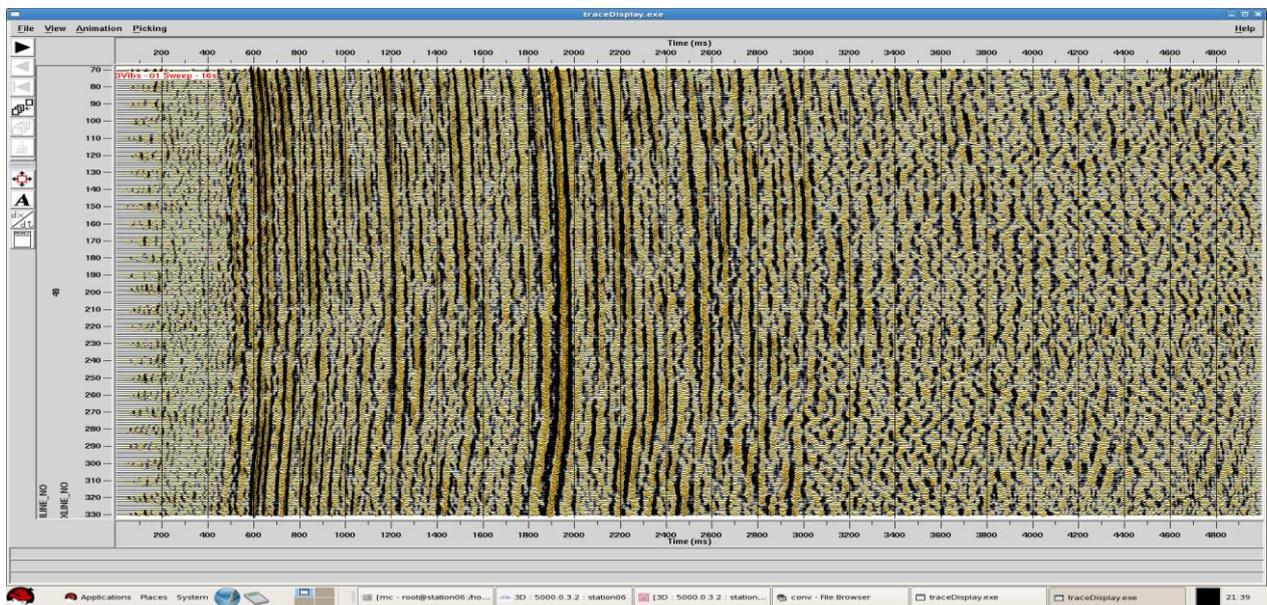


Figure V.19 : stack en couverture complète du quatrième test avec 03 groupes de 03 Vib/Groupe : deux (01) sweep de 16 sec.

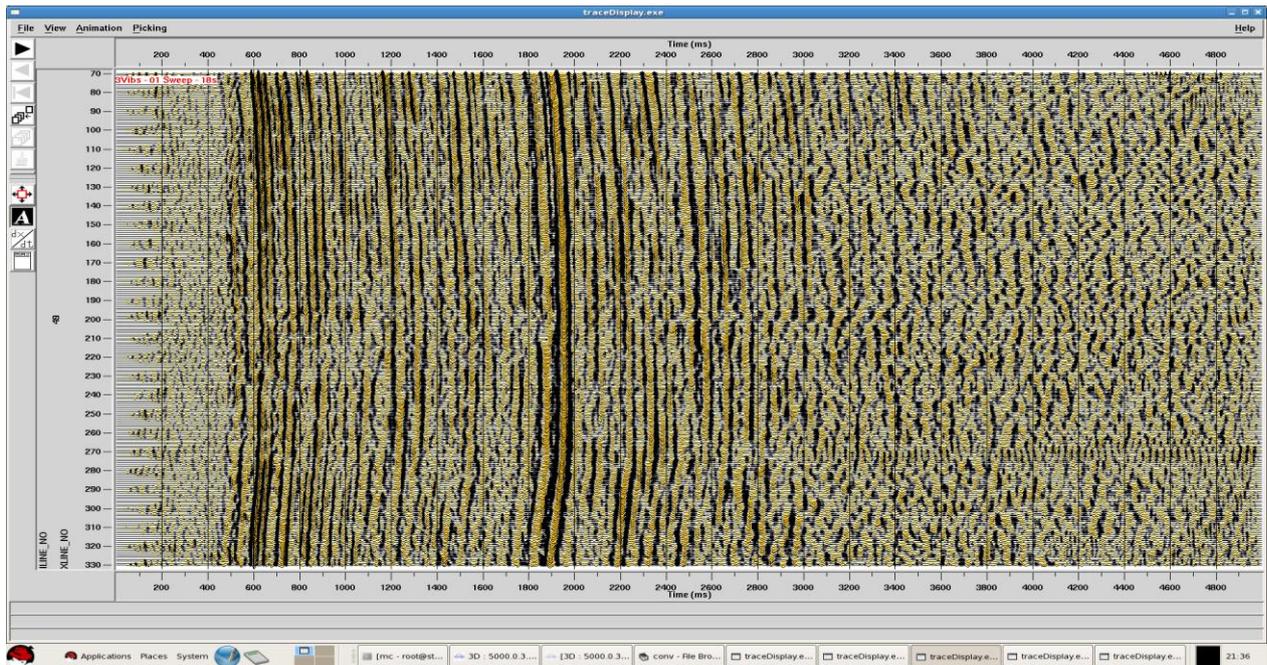


Figure V.20 : : stack en couverture complète du cinquième test avec 04 groupes de 03 Vibs/Groupe : un (01) sweep de 18sec.

➤ **Effet du nombre de sweep.**

Le premier et le deuxième test permettent de déterminer le nombre de sweep par VP. On constate que l'utilisation d'un deuxième sweep de 14s n'a pas d'effet remarquable sur le rapport S/B (Energie du signal émis). Ceci justifie l'utilisation d'un (01) sweep par VP.

➤ **Effet de la longueur de sweep.**

En comparant les stacks du troisième, quatrième et cinquième avec celui du premier test, nous pouvons estimer l'effet de la longueur du sweep avec 03 vibs/Gr par rapport à un sweep de 14sec réalisé avec 04 Vibs/Gr.

On constate que les stacks réalisés avec 03 Vibs/Groupe sont équivalents à celui réalisé avec 04 Vibs/Groupe pour les marqueurs au dessus de 2800 ms (c'est-à-dire la zone d'objectif). Ce qui implique que l'objectif est atteint en utilisant uniquement 03 Vibs/Groupe, ce qui permet d'augmenter le nombre de groupes. Et par conséquent, augmenter la productivité et réduire le coût du projet.

Pour plus de précaution, le client a finalement tranché en faveur de l'option 04 Vibrs/Groupe pour avoir plus d'énergie émise et une longueur de 16sec, particulièrement dans les zones en dehors de la zone de test.

7.2 Application du filtre ADVANCE-ENAGEO sur des données réelles :

D'après les tests, l'adoption de la technique slip sweep sur ce champ est possible. Comme vu précédemment, cette technique offre des datas de rapport signal sur bruit dégradé du à la contamination des enregistrements d'un VP par les harmoniques du VP suivant. Dans ce qui suit, on va vérifier l'efficacité de ce nouveau filtre sur les données réelles.

La **figure (V.21)** présente un enregistrement obtenu sur le terrain :

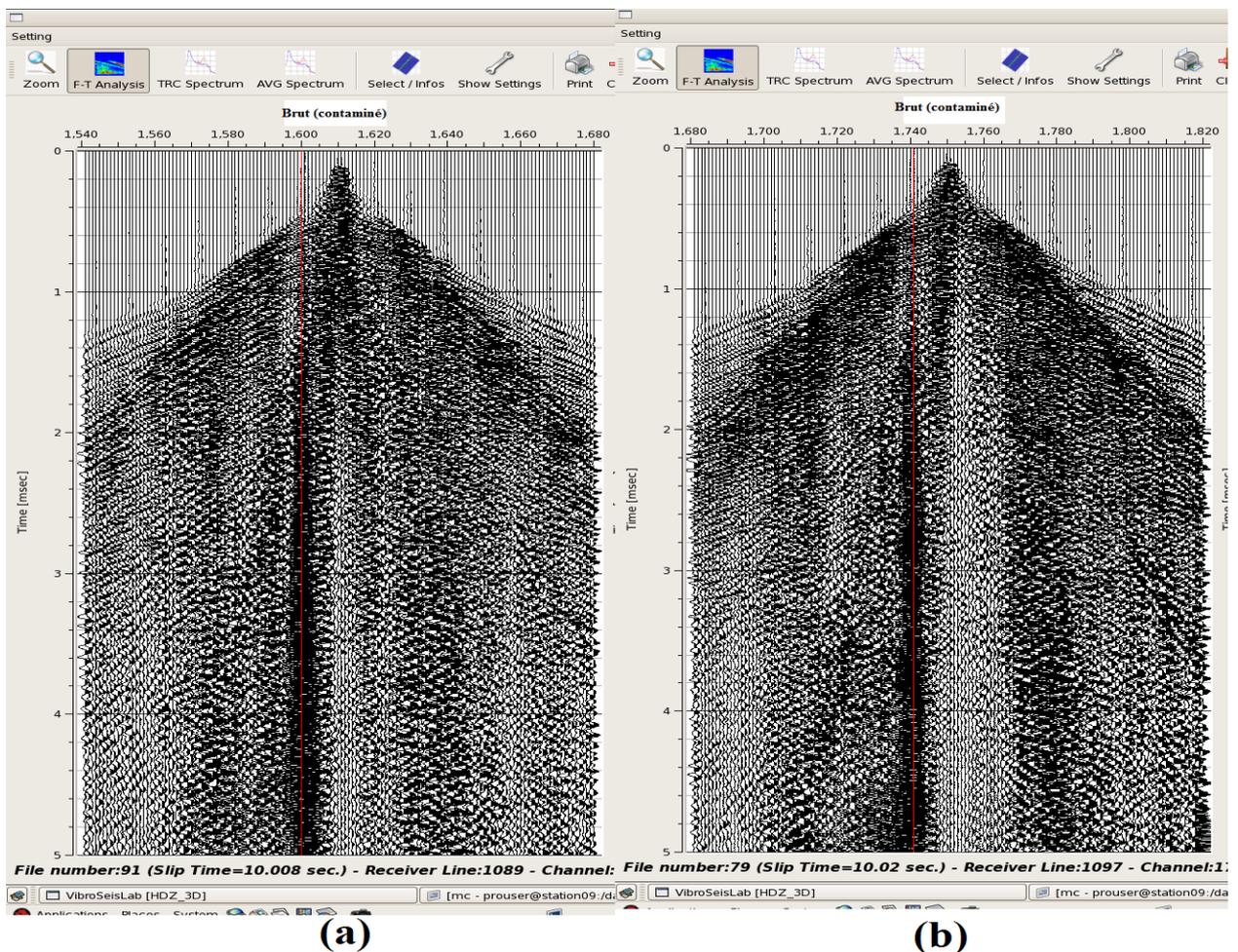


Figure V.21 : Enregistrements terrain corrélés (bruts) (a) enregistrement obtenu avec un slip time **10.008 sec** (b) enregistrement obtenue avec un slip time **10.02 sec**.

7.2.1 Fonctionnalité du logiciel :

ADVANCE-ENAGEO 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 qualité sur les résultats et sur les données de chaque vibreur. 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-répertoires journalier et d’afficher les correspondance entre les VPs , les GFs ainsi que leurs informations.

Il permet aussi l’analyse direct 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’une trace avant et après filtrage et du bruit estimé.

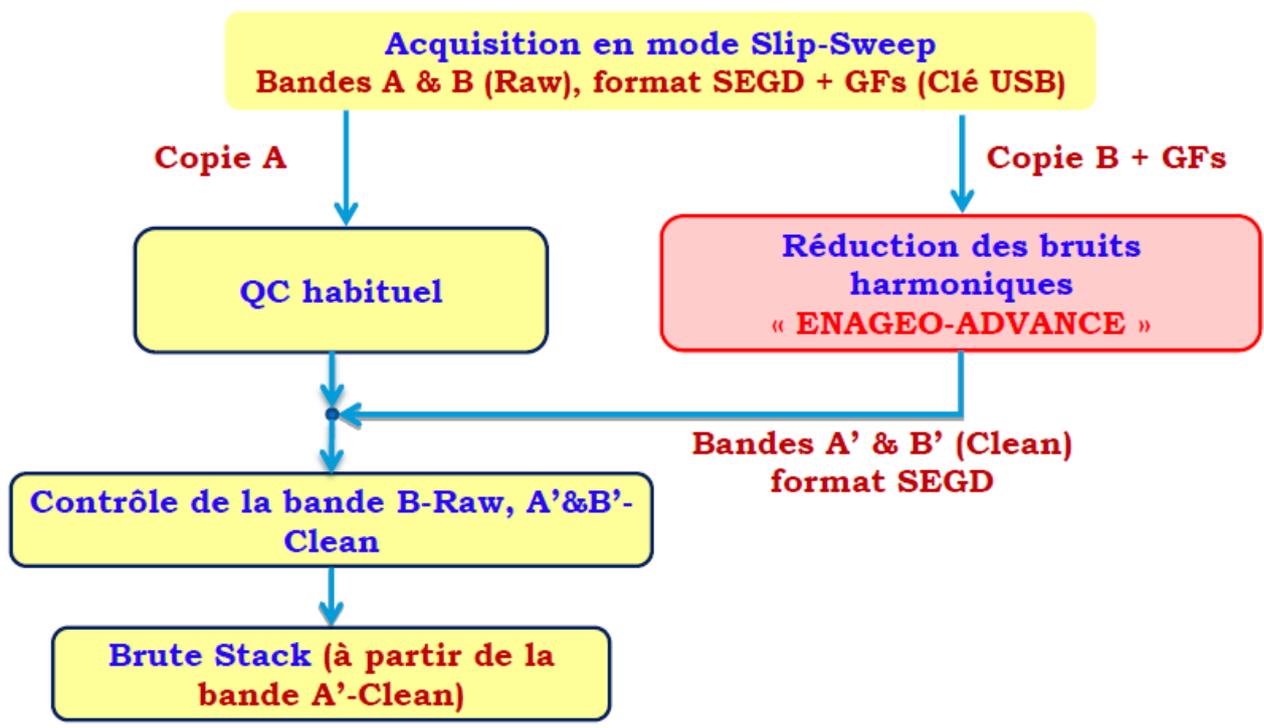


Figure V.22 : Procédure opératoire sur terrain

Après l’application du filtre sur les données dans la **figure V.21**, on obtient des enregistrements nettoyés des harmoniques (**figure V.23**).

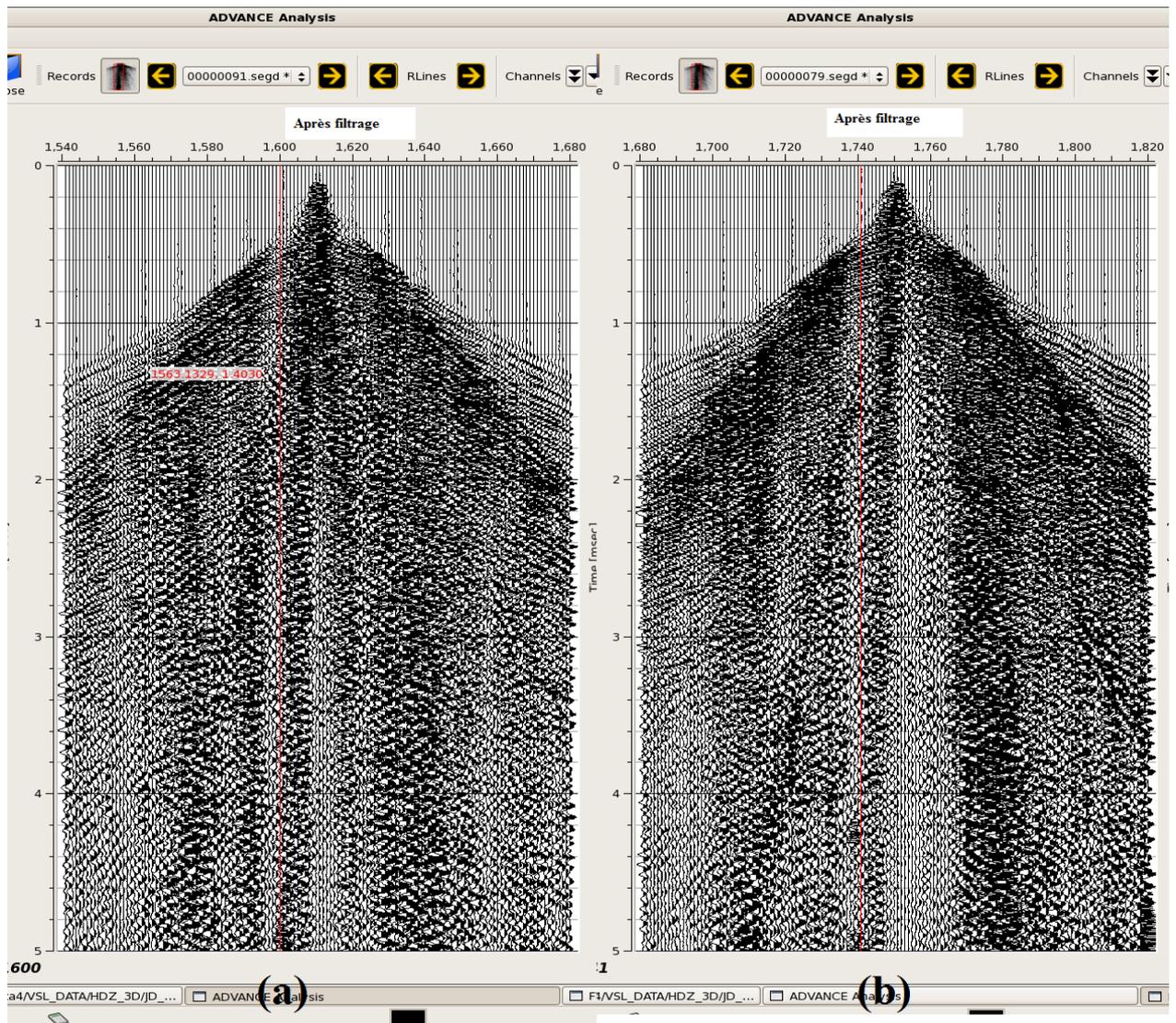


Figure V.23 : Enregistrements terrain corrélés après filtrage (a) enregistrement obtenu avec un slip time 10.008 sec (b) enregistrement obtenu avec un slip time 10.02 sec.

La figure V.23 illustre l'enregistrement terrain de la figure V.21 après le filtrage, les harmoniques enlevés des ces enregistrements sont représentés dans la figure V.24 :

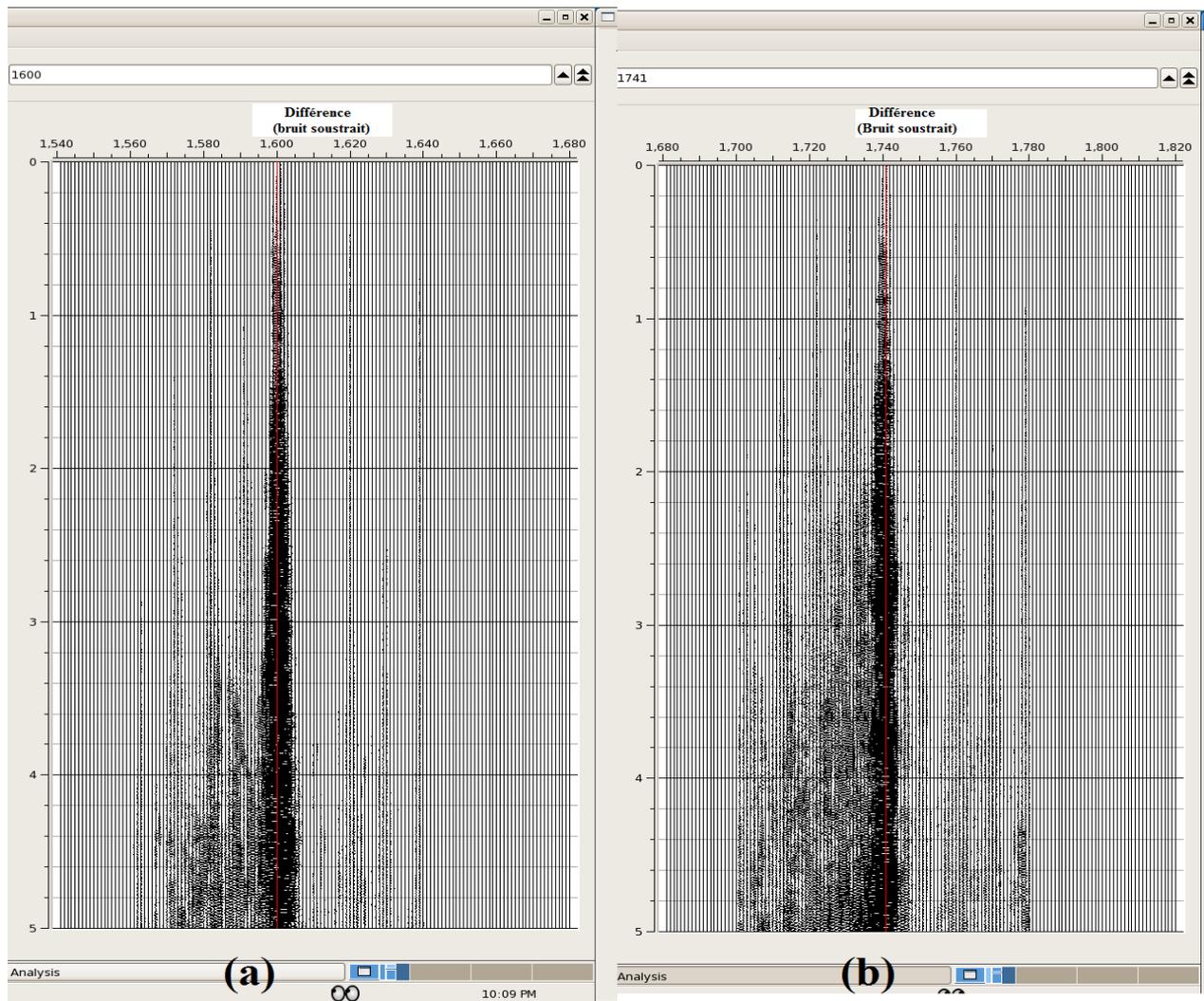


Figure V.24 : Bruits soustraits par le filtrage (a) enregistrement obtenu avec un slip time **10.008 sec** (b) enregistrement obtenue avec un slip time **10.02 sec**.

En comparant ces données avec les données obtenues en acquisition Flip-flop, un gain de productivité de 160% en moyenne, a été atteint avec cette technique avec une détérioration de la qualité de datas. Ce gain a été réalisé avec l'efficacité et la robustesse du nouveau filtre illustré par les figures ci-dessus ce qui a permis la réduction des bruits harmoniques. La **Figure V.25** montre le spectre moyen des mêmes enregistrements représentés figures précédentes, avant et après filtrage. On note que la partie contaminée se trouve dans les hautes fréquences.

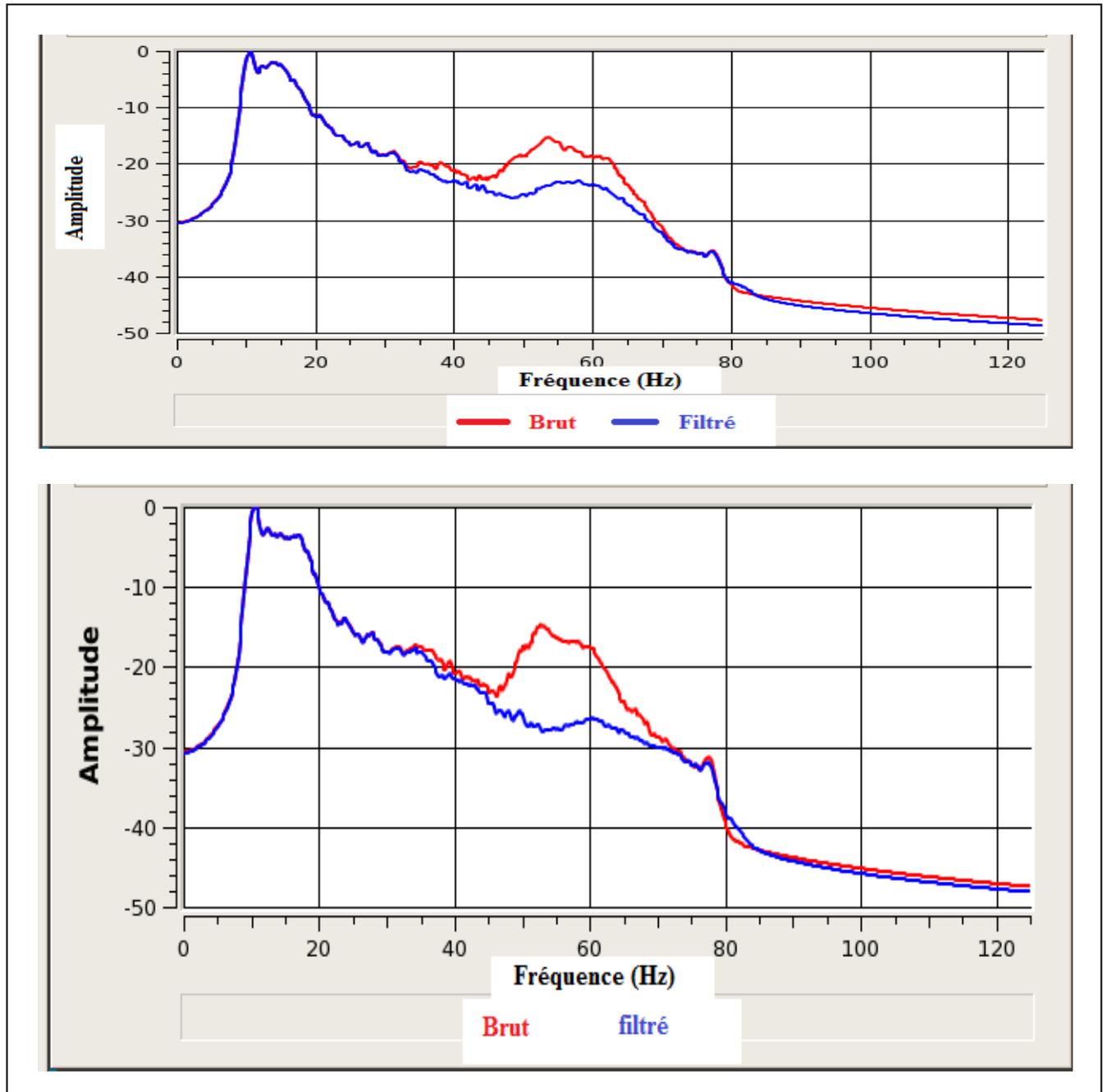


Figure V.25: spectre moyen d'enregistrement corélé

Les bruits harmoniques apparaissent sur le plan F-T comme des lignes inclinées négatives, comme il est montré sur la **figure V.26**, qui présente la projection F-T d'une seule trace (sélectionné en rouge) de l'enregistrent (a) et (b) avant et après le filtrage et un projection de la différence entre la trace brut et filtré. De plus le signal utile est préservé.

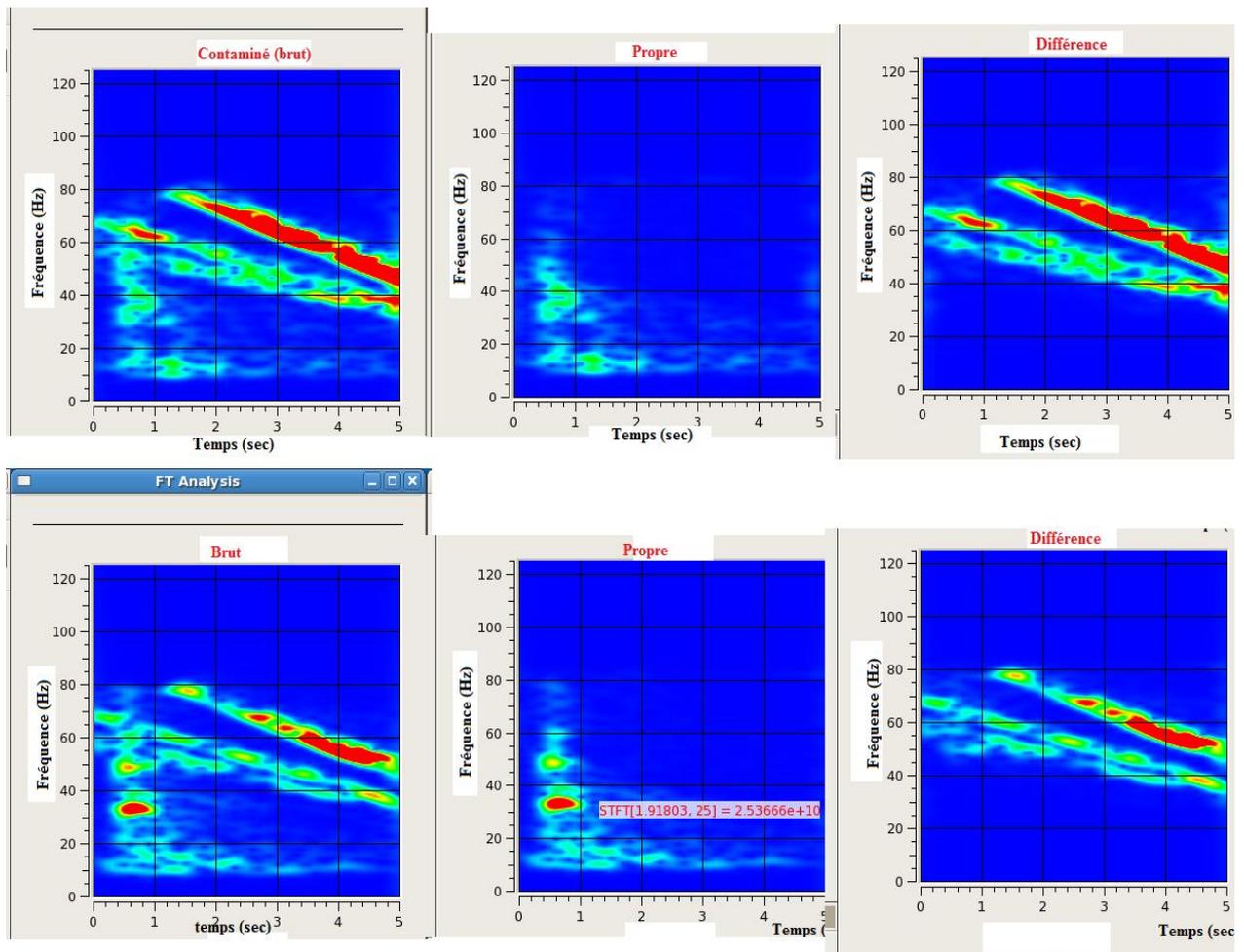


Figure V.26 : projection dans le plan temps-fréquence d’une trace de chaque enregistrement.

7.2.2 Simulation du filtrage d’ADVANCE-ENAGEO :

Dans ce suit, nous avons programmé un enregistrement mère avec obtenu à partir de signaux réels émis par le vibroseis GF, ensuite on va éliminer les bruits harmoniques en utilisant l’algorithme de ADVANCE-ENAGEO.

L’élimination des harmoniques nécessite le calcul de l’opérateur, qui est le rapport des densités spectrales de la composante harmonique et de la composante fondamentale. Il devient essentiel de les séparer et pour cela on fait appel au filtre adaptatif en utilisant la fonction de Matlab ‘adapfilt.rls’, on donne pour entrée le sweep de référence et les GFs et en sortie, nous obtenons le signal fondamental ainsi que des résiduels qui ne sont que les harmoniques, ce filtre utilise la méthode des moindres carrés. La **figureV.27** illustre un sweep pilote, un signal Ground Force réel, le signal fondamental et les composantes harmoniques.

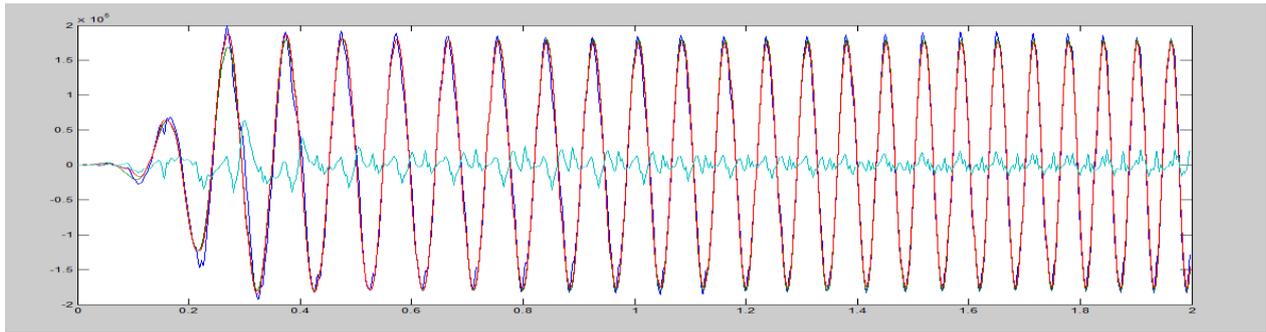


Figure V.27 : Différents sweeps **en rouge** : le sweep pilote **en bleu** : le signal GF **en vert** : le signal fondamentale et **en bleu claire** : la différence entre le signal fondamentale et le GF (composantes harmoniques).

On remarque sur cette figure que le signal réel émis (GF) diffère du signal désiré (pilote) à cause des phénomènes dus à la non-linéarité du système vibroseis. Le signal fondamental est le signal obtenu quand le GF épousera la forme du pilote. La différence entre le GF et le fondamental est représenté par les harmoniques.

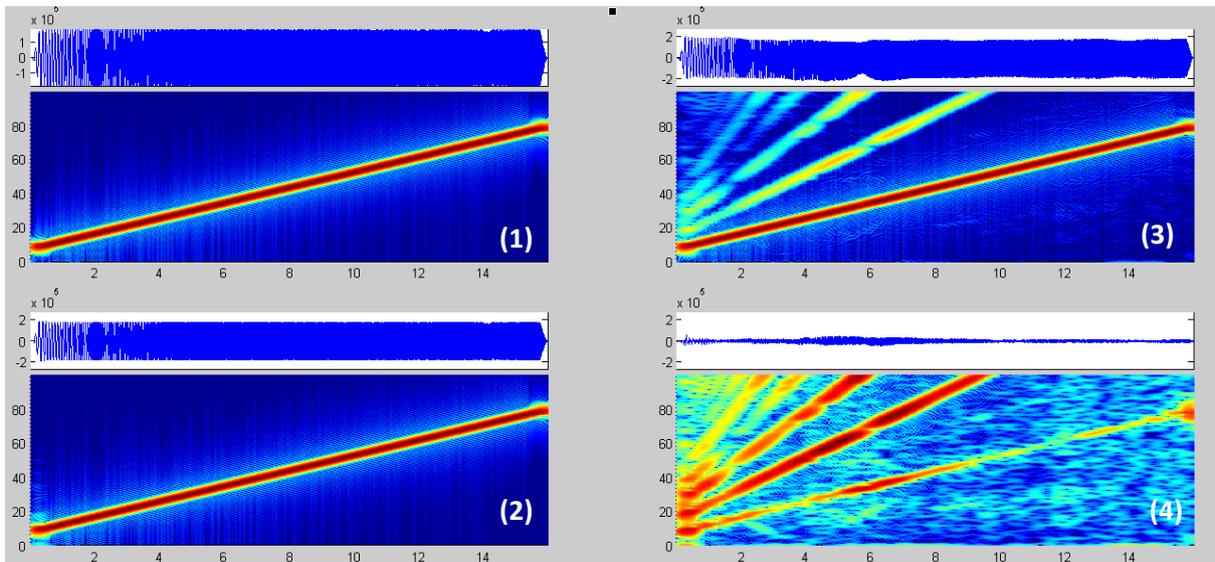


Figure V.28 : représentation F-T de (1) signal fondamental (2) sweep pilote (3) signal GF (4) résidus (harmoniques).

La figure V.28 représente les projections dans le plan F-T des différents signaux utilisés dans la décomposition, on remarque une grande ressemblance entre le pilote et le fondamental à part au niveau d'amplitude où le fondamentale a une amplitude inférieure à celle du pilote ce qui signifie qu'il épouse bien la forme de celui-ci. A part quelques résidus au voisinage de

zéro, ce sont des résidus d'estimation qu'il est possible d'éliminer après corrélation en appliquant un mute inverse.

La **Figure V.29**, montre un sweep pilote et deux signaux GFs de deux vibrateurs et leur représentation sur le plan F-T. On remarque que les GFs diffèrent l'un de l'autre, d'où la nécessité de recalculer à chaque fois un nouvel opérateur pour chaque trace afin d'estimer les harmoniques.

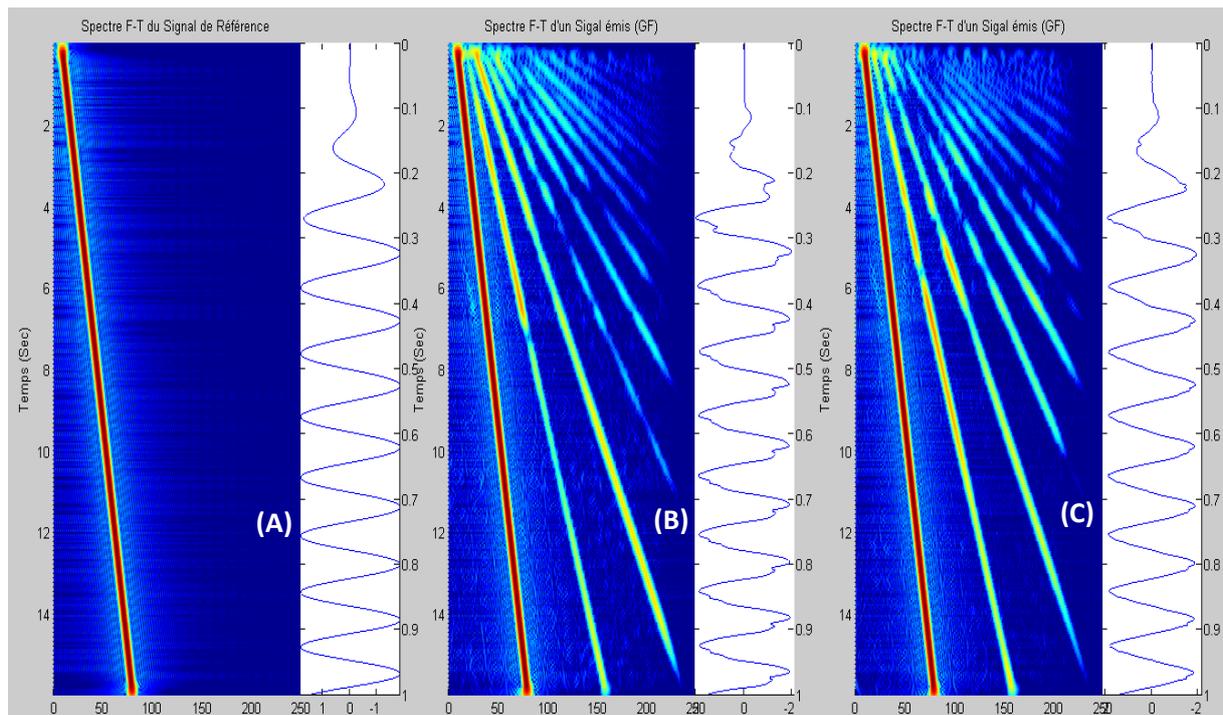


Figure V. 29: représentation F-T de (A) sweep de référence (B) signal GF du vibrateur 1 (C) signal GF du vibrateur 2.

Les bruits harmoniques se retrouvent sur les quatre tirs de l'enregistrement mère (**figure V.30**) Une représentation temps –fréquence d'une trace avant corrélation, montre les interférences entre ce bruit et le signal utile, l'énergie du fondamental ainsi que les harmoniques sont inclinés.

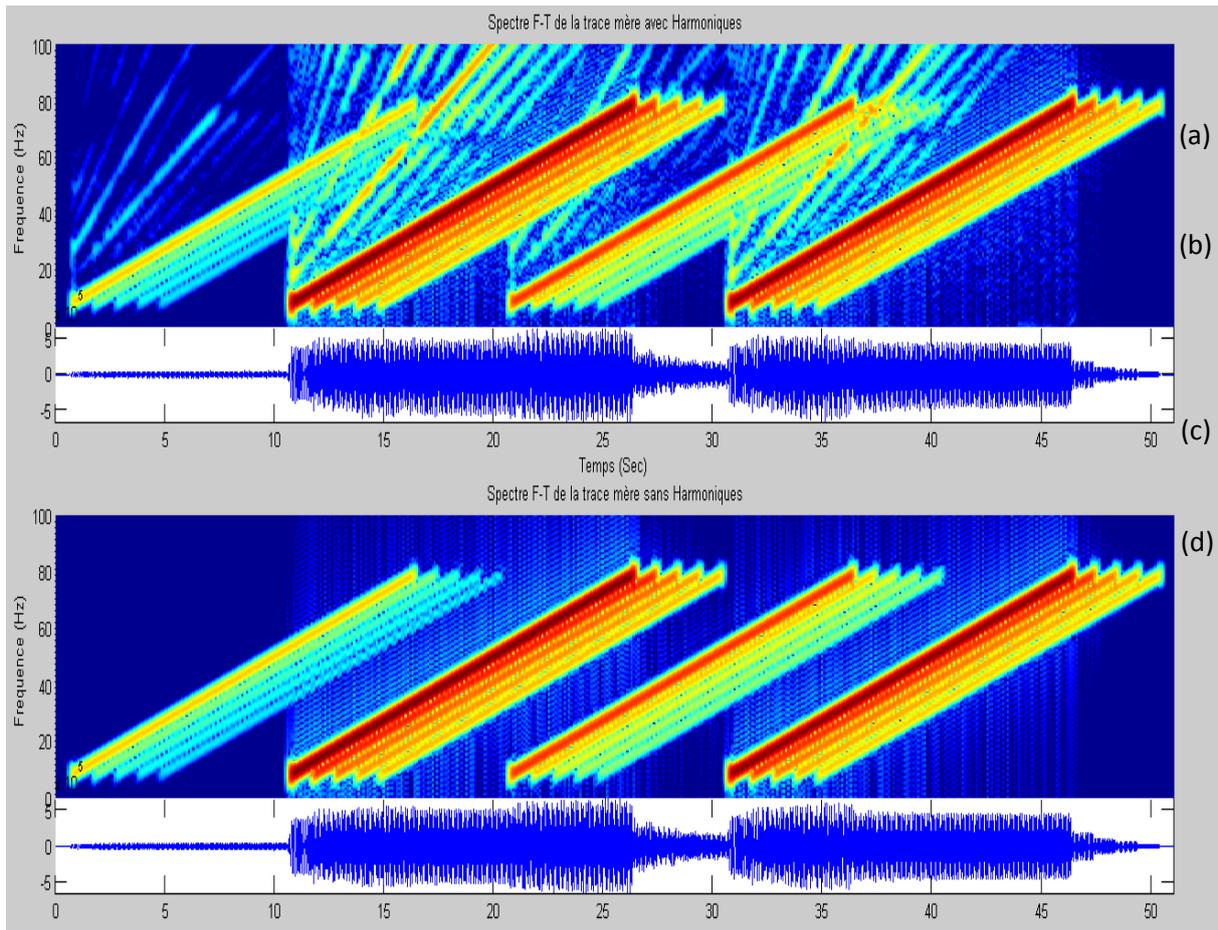


Figure V.30 : Projection sur le plans F-T d'une trace issue d'un enregistrement mère non corrélé avec des GFs réels (a) enregistrement contaminé non corrélé (b) trace non corrélée (c) enregistrement sans harmonique (d) trace sans harmoniques.

L'énergie des harmoniques est proportionnelle à l'énergie du VP qu'il les génère. Par conséquent, les harmoniques générés par l'enregistrement le plus énergétique sont forts et affectent plus les VPs voisins, de plus s'ils présentent une énergie faible : cas du VP 2 qui est très énergétique et dont l'énergie de ses harmoniques est presque égale à l'énergie fondamentale (du signal utile) du VP1. Par conséquent les réflexions du VP 1 seront noyées dans les harmoniques du VP 2 comme on peut le voir sur la trace représentée en dessous. D'où la nécessité de les éliminer.

L'algorithme conçu pour l'élimination de ces harmoniques, présente une grande flexibilité 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 précédent (**figure V.31**). La soustraction faite est une soustraction simple (version globale). 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.

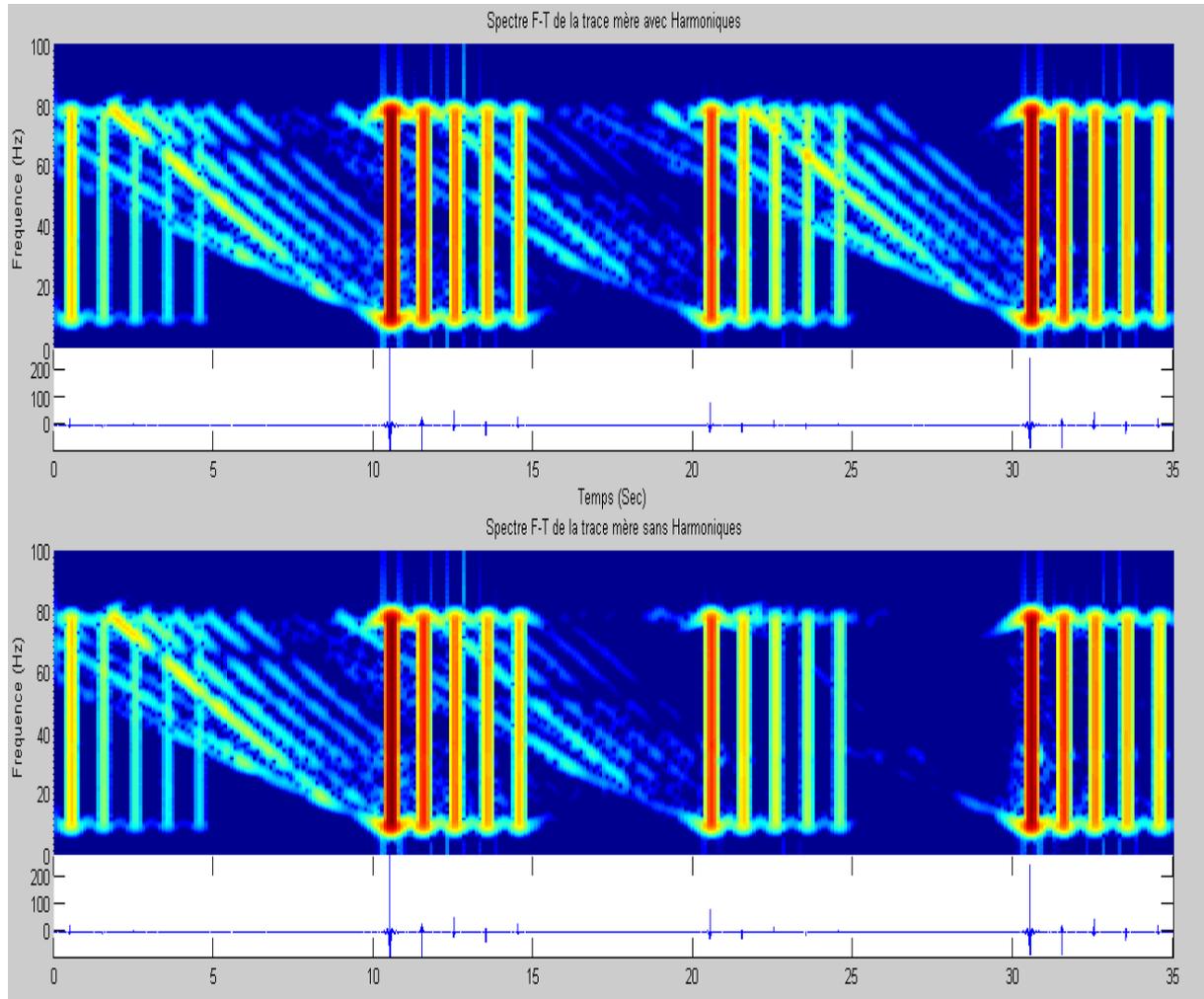


Figure V. 31: première étape du filtrage

On remarque la disparition des harmoniques générés par le dernier VP qui affecte le troisième VP. Sur la trace corrélée présentée en bas, les réflexions même de faibles amplitudes sont devenues visibles. A présent, on utilise ce VP pour nettoyer le deuxième VP (**figure V.32**).

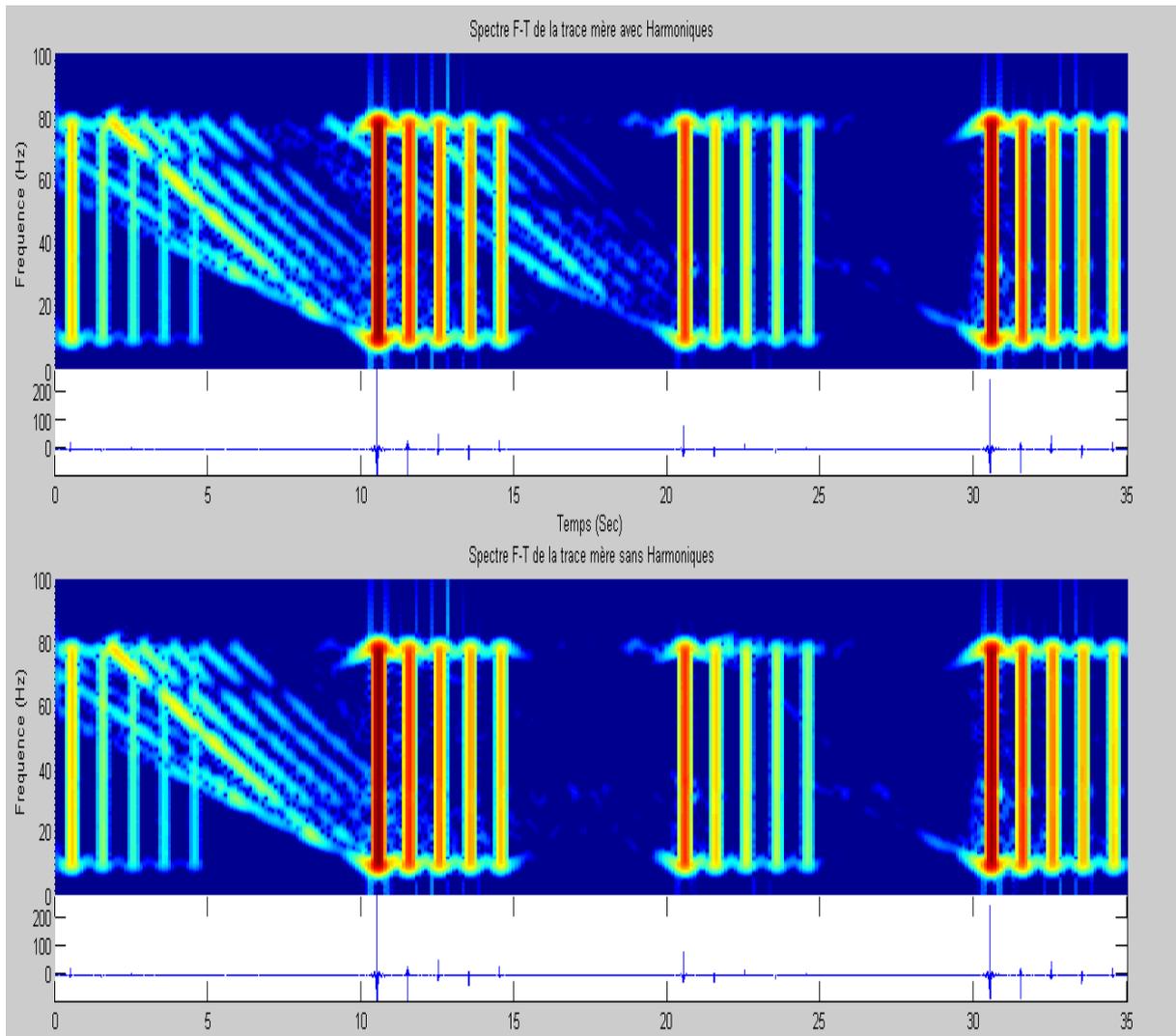


Figure V.32 : deuxième étape du filtrage

Sur la **figure V.32**, on remarque aussi la disparition des harmoniques générés par le troisième VP qui contamine le deuxième VP. Pour désinfecter le premier VP, on utilise le deuxième VP.

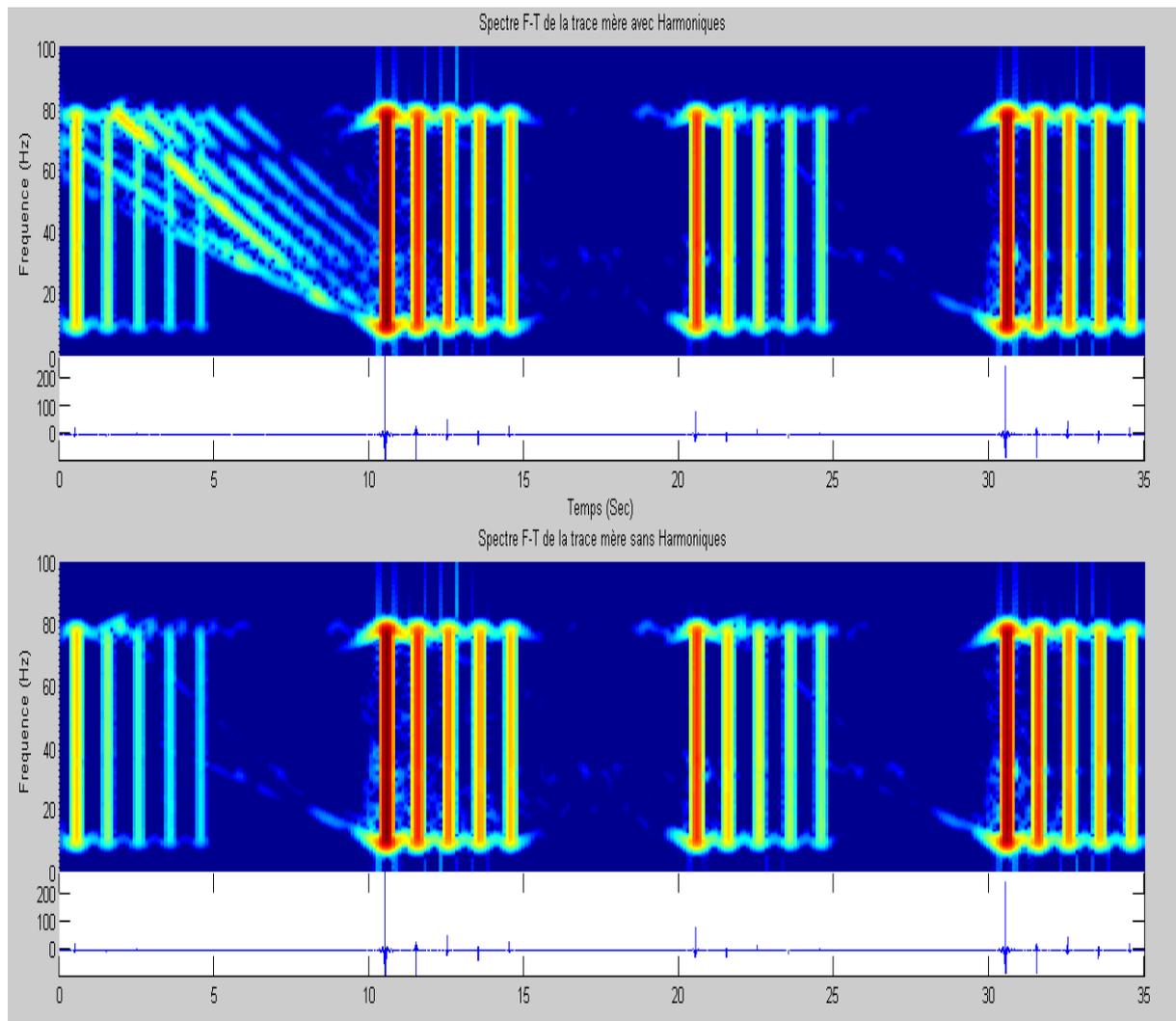


Figure V.33 : troisième étape du filtrage

La dernière étape de filtrage d'un enregistrement à quatre VPs est le filtrage du premier VP réalisé (**figure V.33**). Le deuxième VP étant très énergétique, il génère des harmoniques de fortes amplitudes. Ainsi le premier VP n'est pas trop énergétique. Par conséquent, les réflexions de ce dernier sont complètement recouvertes par les harmoniques (**figure V.34**). Après filtrage, la **définition** de ces réflexions a augmentée.

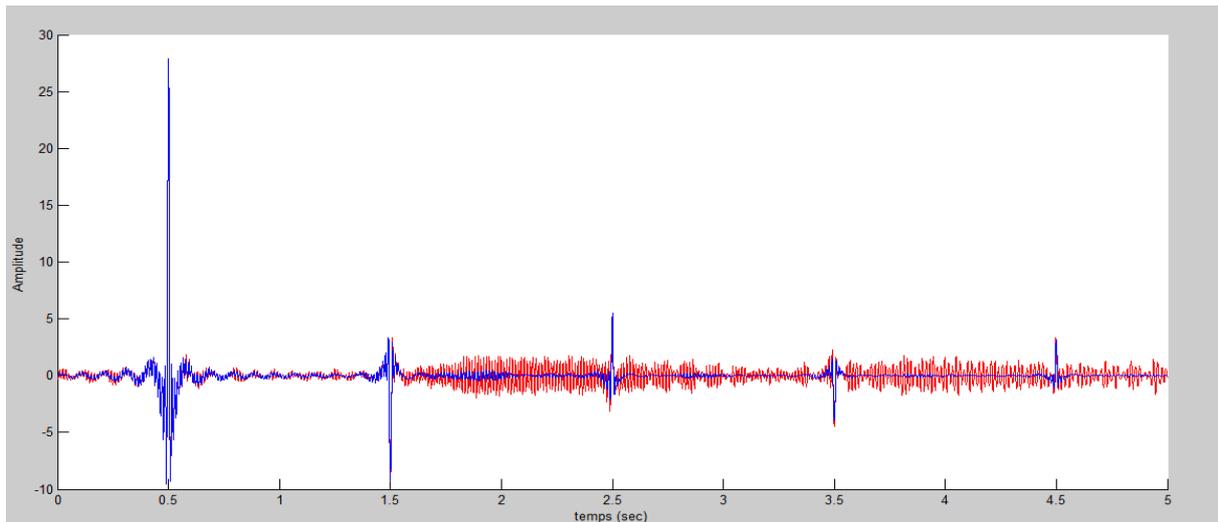


Figure V.34 : trace du premier VP avant l'application du filtre (Bleue : signal utile ; rouge harmoniques)

On remarque quelques résidus autour des VP, ils sont dus au fait que le signal Gf n'est pas vraiment le signal émis dans le sous-sol, ce n'est qu'un signal moyen de quatre points de tir. Afin d'éliminer tous ses résidus on utilise une soustraction adaptative au lieu d'une soustraction simple.

7.3 Conclusion :

Une réduction significative des bruits harmoniques a été obtenue après application du filtre ADVANCE. Ceci permet l'implantation de la méthode slip sweep proprement sans aucune détérioration de la qualité des datas. Donc, on peut considérer les datas obtenues utilisant après l'élimination des bruits harmoniques équivalent aux datas conventionnels. La méthode slip sweep a été achevée avec un gain d'environ 160% dans la productivité sans aucune détérioration des data sismiques.

Conclusion générale :

Dans ce mémoire, on a présenté une des méthodes, qui visent à optimiser la productivité lors de l'acquisition sismique appelée 'slip sweep'. Le principe de cette méthode consiste à la réduction du cycle de temps de vibration en augmentant ainsi le nombre de points vibré produit par conséquent la productivité.

Dans notre étude, une comparaison est faite sur des enregistrements de la région de HASSI ZA'ABAT, acquis en mode classique avec ceux acquis en mode slip sweep. D'une part, on remarque une amélioration remarquable dans la productivité qui a été 300 VPs/heure pour arriver jusqu'à 620 Vp/heurs. D'une autre part, cette technique en étant très utile présente l'inconvénient de la réduction de la qualité des enregistrements due à la présence des distorsions harmoniques. Le nouveau filtre ADVANCE-ENAGEO permet la récupération de la qualité des datas qui présentent un rapport signal sur bruit dégradé et qui devient presque similaire à la qualité des data conventionnels. Ce filtre a montré son efficacité sur les données réelles. On conclut que l'utilisation de la méthode slip sweep offre des datas de même qualité que les datas conventionnels après filtrage mais à un bas coût.

Le gain de productivité est compté par le prix des points vibrés (VP), ce gain peut influencer soit sur l'économie de la compagnie par la minimisation du coût d'un projet soit sur la résolution par l'augmentation de la densité de la production ce qui améliore la qualité des datas pour une meilleur visualisation du sous sol.

On recommande d'utiliser la technique de haute productivité slip sweep pour tous les avantages qu'elle présente vis-à-vis la productivité, surtout dans les zones désertiques non dunaire, 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 les distorsions harmoniques. Cette technique peut être prometteuse sur terrain, si on lui fournit les conditions favorables.

Références bibliographiques

- 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)
- Andersen, [1995], Patent N°5,410,517, Method of cascading sweeps for a seismic vibrator.
- C.BAGAINI, [2006], Overview of Efficient Vibroseis Acquisition Methods Schlumberger Cambridge Research, High Cross-Madingley Road, Cambridge, CB3 0EL, U.K.
- F.Babaia, C.Benchabana, M.Mender et A.Guerchaoui, [2011], ENAGEO ADVENCE: Méthodes d'atténuation des distorsions harmoniques dans les enregistrements vibrosismiques.
- Jean-Noel Martin, [2005], Signaux et systèmes (débiter en traitement numérique du signal)
- H.J.Rozemond, [1996], Slip-sweep acquisition, presented at the 66th SEG annual meeting, Petroleum Development Oman.
- P.Ras*, M.Daly et G.Baeten , [1999], Harmnic distorsion in slip sweep records, SEG Expanded Abstracts, Schlumberger.
- M.Djeddi Elements de base de thèorie et du traitement du signal ,
- M.Benabentos et F.Otigosa, Repsol-YPF, N.Moldoveanu et P.Munoz, WesternGeco, Houston, USA, [2006], Acquisition/Processing, Cascaded sweeps—A method to improve vibroseis acquisition efficiency: A field test.(article).
- Meunier, J. and Bianchi, T. [2002] T. Harmonic noise reduction opens the way for array size reduction in Vibroseis operations. SEG Annual Meeting.
- Moerig et al., [2004], Patent N° US 6,687,619 B2, Method of using cascaded sweeps for source coding and harmonic cancelation.
- Ras.P et al, [1999], ‘‘Harmonic distortion in slip sweep records, 69th SEG Annual Meeting.

- Shang Yongsheng, [2011]Wang Changhui*and Zhang Mugang, BGP, CNPC;Zhou Xuefeng, Li Zhenchun, Li Fenglei et Dong Lieqian, A method for harmonic noise elimination in slip sweep data, SEG.San Antonio 2011 Annual Meeting.
- Sheriff.A.J. et KIM.W.H.,[1970].''The effects of Harmonic Distortion in the Use of Vibratory Surface Sources. Geophysics, 35, 234-246
- T.Dean, P.Kristiansen et P.L.Vermeer (Westerngeo),[2010], High productivity without compromise-The relationship between productivity quality and vibroseis group size.
- Y. Gagou, [2009], Cours de Traitement du Signal