

PUBLICATIONS DE L'INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE

Jacques QUIBLIER

---

**PROPAGATION DES ONDES  
EN GÉOPHYSIQUE  
ET EN GÉOTECHNIQUE**

Modélisation  
par méthodes de Fourier

**1**

EDITIONS TECHNIP

# Table des matières

## TOME 1 DÉVELOPPEMENTS ET EXEMPLES

### *Première partie* *Propagation en milieu stratifié*

<b>Chapitre 1</b>	<b>Généralités et notations</b>	3
1.1	Choix d'un repère et définition d'un milieu stratifié	3
1.2	Rappel concernant les matrices	5
1.3	Déplacements, déformations	10
1.4	Coefficients élastiques et contraintes	12
1.5	Définition mécanique des milieux	13
1.6	Atténuation et vitesses complexes	18
1.7	Les équations de l'élastodynamique	21
1.8	Transformations intégrales	21
<b>Chapitre 2</b>	<b>Milieu stratifié (résolution formelle)</b>	29
2.1	Le problème de la sismique terrestre	29
2.2	Conditions physiques aux interfaces du milieu stratifié	31
2.3	Équations physiques du problème	31
2.4	Changements de variables et de constantes	33
2.5	Équations transformées	34
2.6	Résolution du problème dans une couche donnée	36
2.7	Propagation dans le milieu stratifié	37
2.8	Valeurs propres de la matrice $C$	38
2.9	Vecteurs propres de la matrice $C$	41
2.10	Résolution du problème dans le cas des fréquences positives	41
2.11	Résolution du problème dans le cas des fréquences négatives	44
<b>Chapitre 3</b>	<b>Milieu stratifié (résolution pratique)</b>	45
3.1	Calcul des déterminants mineurs de la matrice $\Phi$	45
3.2	Réalisation du développement de Laplace	47

3.3	Réduction de la matrice des mineurs . . . . .	48
3.4	Pourquoi utiliser le développement de Laplace ? . . . . .	50
3.5	Lien entre méthodes par propagateurs et méthodes de réflectivité . . . . .	53
3.6	Solution du problème homogène (cas $\omega > 0$ ) . . . . .	55
3.7	Solution du problème homogène (cas $\omega < 0$ ) . . . . .	57
3.8	Étude des limites des fonctions de transfert du milieu semi-infini . . . . .	58
3.9	Quelques vérifications internes des calculs . . . . .	60
3.10	Étude des limites des fonctions de transfert d'un milieu stratifié lorsque $\omega$ et/ou $k_r$ tendent vers l'infini . . . . .	60
3.11	Allure générale des fonctions de transfert . . . . .	62
3.12	La notion d'hyperbole de convergence . . . . .	65
3.13	Conséquences pratiques de la convergence asymptotique vers le milieu homogène . . . . .	66
3.14	Retour en espace et en temps (transformations inverses) . . . . .	68
3.15	Réalisation numérique des transformations de Hankel inverses . . . . .	71
3.16	Réalisation numérique des transformations de Fourier inverses . . . . .	74
<b>Chapitre 4</b>	<b><i>Sismique marine</i></b> . . . . .	83
4.1	Position du problème . . . . .	83
4.2	Mise en équation . . . . .	85
4.3	Solution dans le cas d'une couche liquide semi-infinie . . . . .	87
4.4	Solution du problème complet . . . . .	88
4.5	Solution d'un problème simplifié (milieu solide homogène) . . . . .	93
4.6	Similitude entre l'onde de Scholte donnée par notre formule et sa forme classique . . . . .	95
4.7	Retour à la variable physique $r$ . . . . .	96
4.8	Retour à la variable physique $t$ . . . . .	100
<b>Chapitre 5</b>	<b><i>Sismique oblique</i></b> . . . . .	101
5.1	Définition du problème . . . . .	101
5.2	Observations préalables à la mise en équations du problème . . . . .	102
5.3	Construction d'un processus de détermination des déplacements de proche en proche . . . . .	104
5.4	Cas particulier d'un milieu homogène . . . . .	106
5.5	Aspects pratiques du calcul . . . . .	107
<b>Chapitre 6</b>	<b><i>Exemples d'application</i></b> . . . . .	109
6.1	Tests de contrôle . . . . .	109
6.2	Test de la couche mince . . . . .	118
6.3	Test du milieu comportant un ensemble de couches minces . . . . .	126
6.4	Modèle à 5 couches . . . . .	131

6.5	Modèle à 117 couches . . . . .	137
6.6	Simulation d'une couche supérieure altérée . . . . .	139
6.7	Sismique oblique (application du chapitre 5) . . . . .	141
6.8	Sismique marine (application du chapitre 4) . . . . .	145

## *Deuxième partie*

### *Propagation dans les puits*

<b>Chapitre 7</b>	<b><i>Déplacements et contraintes dans les coques cylindriques</i></b> . . . . .	153
7.1	Définition des milieux stratifiés annulairement . . . . .	153
7.2	Équations fondamentales de l'élastodynamique . . . . .	154
7.3	Introduction des potentiels . . . . .	155
7.4	Équations vérifiées par les potentiels . . . . .	156
7.5	Solutions dans le domaine de Fourier . . . . .	157
7.6	Détermination des constantes pour certaines géométries particulières du milieu isotrope . . . . .	160
7.7	Écriture des potentiels dans le milieu anisotrope . . . . .	161
7.8	Expression des dérivées des potentiels . . . . .	163
7.9	Expression finale des déplacements . . . . .	164
7.10	Expression finale des contraintes . . . . .	166
7.11	Dérivées des contraintes . . . . .	173
<b>Chapitre 8</b>	<b><i>Assemblage de couches cylindriques</i></b> . . . . .	175
8.1	Interface liquide-solide isotrope . . . . .	175
8.2	Interface liquide-solide anisotrope . . . . .	178
8.3	Interface entre deux liquides . . . . .	181
8.4	Interface entre deux solides isotropes . . . . .	182
8.5	Interface solide isotrope - solide anisotrope . . . . .	187
8.6	Assemblage de modèles complets . . . . .	192
8.7	Comptage des équations . . . . .	193
8.8	Intervention des sources . . . . .	194
8.9	Décomposition et recombinaison impulsionnelles des sources et des solutions . . . . .	196
8.10	Architecture du calcul numérique dans le domaine de Fourier . . . . .	197
<b>Chapitre 9</b>	<b><i>Retour dans le domaine physique</i></b> . . . . .	199
9.1	Solutions dans le domaine de Fourier en un récepteur donné . . . . .	199
9.2	Décomposition impulsionnelle des sismogrammes reçus par un capteur donné . . . . .	201
9.3	Étude des symétries dans le domaine de Fourier . . . . .	202

9.4	Classification des sources de puits usuelles	203
9.5	Retour dans le domaine physique avec une source de première catégorie	204
9.6	Cas d'une source de seconde espèce	210
9.7	Indications pratiques pour le retour en espace	212
9.8	Indications pratiques sur le retour en temps	217
9.9	Indications pratiques sur la sommation des harmoniques	219
9.10	Indications pratiques concernant le choix des sources à introduire dans le modèle	220
9.11	Rappel sur les avantages et les inconvénients de la modélisation du puits par méthodes de Fourier	222
<b>Chapitre 10 Exemples d'applications de la modélisation du puits</b>		223
10.1	Tests de cohérence interne	223
10.2	Calage externe du modèle	225
10.3	Essai de modèle à basse fréquence	227
10.4	Cas d'une source haute fréquence	245
10.5	Évocation d'un modèle plus complexe	251
10.6	Autre exemple	252
<b>Chapitre 11 Énergie mécanique des ondes propagées</b>		259
11.1	Définitions relatives à l'énergie mécanique	259
11.2	Modèle, source et récepteurs choisis pour un test	261
11.3	Illustration de quelques fonctions intermédiaires	262
11.4	Bilan énergétique sur une surface fermée entourant le puits	265
11.5	Bilan énergétique dans le puits	268
11.6	Modélisation des flux énergétiques	269
<b>Chapitre 12 Interaction entre une onde plane et un puits</b>		275
12.1	Description du problème et généralités	275
12.2	Mise en équation de la source	277
12.3	Transport de la source dans le domaine de Fourier (cas d'une onde P)	286
12.4	Transport de la source dans le domaine de Fourier (cas d'une onde S)	295
12.5	Calculs dans le domaine de Fourier	299
12.6	Retour dans le domaine physique (méthodologie)	299
12.7	Retour dans le domaine physique pour les ondes P (résultats finals)	308
12.8	Retour dans le domaine physique pour les ondes S (résultats finals)	313

12.9	Quelques aspects pratiques du calcul . . . . .	318
12.10	Remarque importante . . . . .	319
<b>Chapitre 13 Interaction entre une onde plane et un puits : exemple d'application . . . . .</b>		
13.1	Description du modèle et du dispositif de réception . . . . .	321
13.2	Description de la source . . . . .	322
13.3	Considérations préliminaires et déductions a priori . . . . .	322
13.4	Résultats à la paroi du puits ( $r = 8$ cm) . . . . .	325
13.5	Résultats à un mètre de l'axe du puits . . . . .	328
13.6	Résultats à dix mètres de l'axe du puits . . . . .	332
13.7	Remarques diverses . . . . .	339
<b>Chapitre 14 Cas de plusieurs puits parallèles . . . . .</b>		
14.1	Généralités . . . . .	341
14.2	Les diverses étapes du calcul . . . . .	344
14.3	Étape 1 : calculs de base relatifs au puits émetteur . . . . .	346
14.4	Étape 2 : restriction du calcul au centre du puits récepteur . . . . .	347
14.5	Étape 3 : calcul des déplacements et des contraintes en tout point de la paroi du puits récepteur . . . . .	348
14.6	Étape 4 : transport dans les coordonnées du puits récepteur . . . . .	349
14.7	Étape 5 : décomposition en série de Fourier sur l'azimut du puits récepteur . . . . .	350
14.8	Étape 6 : source agissant sur le puits récepteur . . . . .	356
14.9	Étape 7 : résolution du problème du puits récepteur . . . . .	364
14.10	Retour en espace et en temps . . . . .	374
14.11	Problème impliquant trois puits ou plus . . . . .	379
<b>Chapitre 15 Exemple de modélisation de plusieurs puits . . . . .</b>		
15.1	Présentation du cas traité . . . . .	381
15.2	Puits émetteur seul (champ incident) . . . . .	385
15.3	Puits récepteur (perturbation du champ incident) . . . . .	387
15.4	Problème à trois puits . . . . .	394

### **Troisième partie** **Puits horizontal en milieu stratifié**

<b>Chapitre 16 Généralités, architecture du calcul, assimilation du puits à une source . . . . .</b>		
16.1	Structure générale du calcul . . . . .	401

16.2	Définition des systèmes de coordonnées utilisés . . . . .	403
16.3	État vibratoire des interfaces (définitions) . . . . .	405
16.4	Phase I : modélisation du puits considéré comme source . . . . .	405
16.5	L'état vibratoire du plan $z = z_s$ . . . . .	422
16.6	Rappel des approximations faites au cours de la phase I du calcul . . . . .	423
<b>Chapitre 17 Phase II : propagation dans le milieu stratifié des ondes émises par le puits . . . . . 425</b>		
17.1	Équations de propagation des ondes dans le domaine de Fourier en coordonnées cartésiennes . . . . .	425
17.2	Expression des grandeurs discontinues aux interfaces . . . . .	427
17.3	Écriture des conditions aux limites . . . . .	427
17.4	Calcul de $V_{s+}$ et de $V_{s-}$ par raccordement des conditions aux limites . . . . .	432
17.5	Calcul de l'état vibratoire continu $V_s$ du plan $z_s$ . . . . .	434
17.6	Expression détaillée du vecteur vibration du plan $z_s$ . . . . .	436
17.7	Étude des symétries du problème par rapport à la variable $\omega$ . . . . .	440
17.8	Rappel des approximations faites au cours de la phase II du calcul . . . . .	442
<b>Chapitre 18 Phase III : état vibratoire créé autour du puits par la réponse du milieu stratifié . . . . . 445</b>		
18.1	Position du problème et étapes du calcul . . . . .	445
18.2	Étape 1 : expression du vecteur vibration à la cote $z$ . . . . .	447
18.3	Étape 2 : passage dans les axes du puits . . . . .	449
18.4	Étape 3 : réduction du vecteur $V^{(t)}$ au pourtour du puits . . . . .	450
18.5	Étape 4 : décomposition en série de Fourier sur l'azimut du puits . . . . .	459
18.6	Étape 5 : calcul des intégrales sur la variable $k_x$ . . . . .	465
18.7	Rappel des approximations faites au cours de la phase III du calcul . . . . .	474
<b>Chapitre 19 Phase IV : mise en œuvre des calculs pour le retour dans le puits . . . . . 475</b>		
19.1	Étape 5 : calcul des intégrales sur la variable $k_x$ (suite) . . . . .	475
19.2	Retour dans le puits . . . . .	487
<b>Chapitre 20 Applications . . . . . 491</b>		
20.1	Premier test . . . . .	491
20.2	Deuxième test . . . . .	500
20.3	Troisième test . . . . .	502
20.4	Quatrième test . . . . .	505
20.5	Cinquième test . . . . .	508

20.6 Conclusions . . . . .	512
<b><i>Bibliographie</i></b> . . . . .	513
<b><i>Table des symboles</i></b> . . . . .	517

# PROPAGATION DES ONDES EN GÉOPHYSIQUE ET EN GÉOTECHNIQUE

Modélisation  
par méthodes de Fourier

J. QUIBLIER

En géophysique et en génie civil, les méthodes de Fourier servent à modéliser la propagation des ondes dans des milieux géométriquement simples (milieux stratifiés, tubes). Cet ouvrage part de ces méthodes connues, y apporte quelques améliorations, puis les étend à des problèmes plus complexes (modèles à deux ou trois puits, en milieu homogène, interactions entre ondes planes et puits). Enfin, une approche de la modélisation du puits horizontal en milieu stratifié est proposée.

Ces calculs ont conduit à mettre au point des méthodes numériques originales permettant de calculer avec une très grande précision et une grande rapidité un certain nombre de fonctions (fonctions de Bessel, fonctions de Bessel modifiées à arguments complexes...), des transformations intégrales (transformations de Hankel, par exemple) et certaines intégrales souvent rencontrées en géophysique et en géotechnique.

Ce livre s'adresse aux géophysiciens pétroliers et universitaires, aux ingénieurs et chercheurs en génie civil, géotechnique et mécanique des roches, et à tous les professionnels concernés par la modélisation des vibrations des terrains et des structures enterrées.

Jacques Quiblier, ingénieur civil des mines, a effectué une thèse au Laboratoire de l'École Polytechnique. Il est aujourd'hui ingénieur en chef au Service Géophysique de l'Institut Français du Pétrole.



9 782710 807117  
PROPAGATION DES ONDES  
98042  
96725 131098  
0001

1  
4  
X  
3



9 782710 807094

ISBN 2-7108-0711-4 (édition complète)  
ISBN 2-7108-0709-2 (Tome 1)