

# Table des matières

Avant-propos	5
Table des matières	19
Table des figures	24
Liste des tableaux	25
<b>1 Cinématique des milieux continus</b>	<b>27</b>
1.1 Définition d'un milieu continu - Hypothèses de base	27
1.1.1 Notion de particule	27
1.1.2 Hypothèse de continuité	28
1.2 Repérage des milieux continus	28
1.2.1 Configuration de référence et configuration actuelle	29
1.2.2 Relation entre les configurations actuelle et de référence : la transformation du milieu continu	31
1.2.3 Transformation linéaire tangente	32
1.2.4 Jacobien de la transformation	36
1.2.5 Champ des déplacements et champ des vitesses	39
1.3 Descriptions lagrangienne et eulérienne	40
1.3.1 Trajectoires, lignes de courant, lignes d'émission	40
1.3.1.1 Définitions	40
1.3.1.2 Cas d'un mouvement permanent	42
1.3.2 Point de vue lagrangien et point de vue eulérien	43
1.4 Dérivée matérielle	43
1.4.1 Définition	43
1.4.2 Champ des accélérations	45
1.4.3 Dérivées matérielles du gradient et du jacobien de la transformation	47
1.4.4 Dérivées d'intégrales sur des domaines matériels	49
1.4.4.1 Dérivée d'une intégrale de volume	49
1.4.4.2 Dérivée d'une intégrale de surface	50
1.4.4.3 Dérivée d'une intégrale curviligne	53
1.5 Équations de conservation de la masse	54

1.5.1	Point de vue eulérien . . . . .	54
1.5.2	Point de vue lagrangien . . . . .	56
1.6	Récapitulatif des formules essentielles . . . . .	58
1.6.1	Repérage des milieux continus . . . . .	58
1.6.2	Descriptions lagrangienne et eulérienne . . . . .	58
1.6.3	Dérivée matérielle . . . . .	59
1.6.4	Équations de conservation de la masse . . . . .	59
1.7	Exercices et problèmes . . . . .	60
1.7.1	Énoncés des exercices . . . . .	60
E1.1	Potentiel des accélérations . . . . .	60
E1.2	Théorème de Lagrange . . . . .	60
E1.3	Théorème de Lord Kelvin . . . . .	60
E1.4	Écoulement sphérique d'un fluide incompressible . . . . .	60
E1.5	Écoulement plan autour d'un pilier cylindrique . . . . .	61
E1.6	Traction-torsion d'une barre cylindrique . . . . .	61
E1.7	Transformations infinitésimales . . . . .	62
E1.8	Tassement d'un sol incompressible . . . . .	62
1.7.2	Énoncés des problèmes . . . . .	63
P1.1	Écoulement plan de fluide incompressible : fonction de courant . . . . .	63
P1.2	Étude d'un écoulement plan . . . . .	64
P1.3	Roulement sans glissement d'un disque indéformable . . . . .	64
P1.4	Un modèle de houle : la houle trochoïdale . . . . .	65
1.7.3	Indications et éléments de réponse . . . . .	65
E1.1	Potentiel des accélérations . . . . .	65
E1.2	Théorème de Lagrange . . . . .	65
E1.3	Théorème de Lord Kelvin . . . . .	66
E1.4	Écoulement sphérique d'un fluide incompressible . . . . .	66
E1.5	Écoulement plan autour d'un pilier cylindrique . . . . .	66
E1.6	Traction-torsion d'une barre cylindrique . . . . .	66
E1.7	Transformations infinitésimales . . . . .	67
E1.8	Tassement d'un sol incompressible . . . . .	67
P1.1	Écoulement plan de fluide incompressible : fonction de courant . . . . .	67
P1.2	Étude d'un écoulement plan . . . . .	67
P1.3	Roulement sans glissement d'un disque indéformable . . . . .	69
P1.4	Un modèle de houle : la houle trochoïdale . . . . .	70
<b>2</b>	<b>Déformations</b>	<b>73</b>
2.1	Considérations intuitives . . . . .	73
2.2	Tenseurs des déformations . . . . .	74

2.2.1	Tenseurs de Cauchy à droite et de Green-Lagrange . . . . .	75
2.2.1.1	Tenseur de Cauchy à droite . . . . .	75
2.2.1.2	Tenseur de Green-Lagrange . . . . .	77
2.2.1.3	Décomposition en fonction du champ des déplacements . . . . .	78
2.2.2	Tenseurs de Cauchy à gauche et d'Almansi-Euler . . . . .	79
2.2.2.1	Tenseur de Cauchy à gauche . . . . .	79
2.2.2.2	Tenseur d'Almansi-Euler . . . . .	80
2.2.2.3	Décomposition en fonction du champ des déplacements . . . . .	81
2.2.3	Décomposition polaire de la transformation linéaire tangente . . . . .	83
2.2.4	Variations de longueur d'un vecteur matériel élémentaire . . . . .	86
2.2.5	Variations d'angle entre les directions de deux vecteurs matériels élémentaires . . . . .	90
2.2.6	Variations de volume matériel élémentaire . . . . .	93
2.2.7	Variations d'aire d'une surface matérielle élémentaire . . . . .	94
2.3	Dérivées matérielles des tenseurs de déformation . . . . .	97
2.3.1	Tenseurs des taux de déformation et de rotation . . . . .	97
2.3.2	Dérivées matérielles des tenseurs de déformation . . . . .	99
2.3.2.1	Tenseurs lagrangiens . . . . .	99
2.3.2.2	Tenseurs eulériens . . . . .	100
2.3.2.3	Tenseurs mixtes . . . . .	101
2.4	Cas des transformations infinitésimales . . . . .	102
2.4.1	Définitions . . . . .	102
2.4.2	Tenseurs des petites déformations et des petites rotations . . . . .	104
2.4.3	Variations de longueur . . . . .	108
2.4.4	Variations d'angle droit . . . . .	110
2.4.5	Variations de volume . . . . .	112
2.4.6	Variations d'aire . . . . .	114
2.4.7	Déviateur des déformations . . . . .	116
2.4.8	Représentations géométriques d'un état de déformation plane . . . . .	117
2.4.8.1	Cercle de Mohr des déformations planes . . . . .	119
2.4.8.2	Ellipse de Lamé des déformations planes . . . . .	121
2.4.9	Équations de compatibilité des petites déformations . . . . .	122
2.5	Récapitulatif des formules essentielles . . . . .	126
2.5.1	Tenseurs des déformations . . . . .	126
2.5.2	Dérivées matérielles des tenseurs de déformation . . . . .	127
2.5.3	Cas des transformations infinitésimales . . . . .	127
2.6	Exercices et problèmes . . . . .	129
2.6.1	Énoncés des exercices . . . . .	129
E2.1	Transformations linéaires planes . . . . .	129

E2.2	Déformations en coordonnées cylindriques et sphériques . . . . .	129
E2.3	Déformation d'un tube épais . . . . .	130
E2.4	Quadriques directrices des dilatations . . . . .	130
E2.5	Ellipse de Lamé et cercle de Mohr des déformations planes . . .	131
E2.6	Effet transversal dans une jauge d'extensométrie . . . . .	131
E2.7	Extensométrie par jauges électriques . . . . .	132
E2.8	Écoulement irrotationnel de fluide incompressible . . . . .	133
E2.9	Petites ou grandes transformations? . . . . .	133
E2.10	Mouvement de corps rigide . . . . .	134
2.6.2	Énoncés des problèmes . . . . .	134
P2.1	Expansion plane homogène . . . . .	134
P2.2	Concentration plane homogène . . . . .	135
P2.3	Transformation tridimensionnelle homogène . . . . .	137
P2.4	Transformation finie d'un tube épais . . . . .	138
2.6.3	Indications et éléments de réponse . . . . .	139
E2.1	Transformations linéaires planes . . . . .	139
E2.2	Déformations en coordonnées cylindriques et sphériques . . . . .	139
E2.3	Déformation d'un tube épais . . . . .	139
E2.4	Quadriques directrices des dilatations . . . . .	140
E2.5	Ellipse de Lamé et cercle de Mohr des déformations planes . . .	140
E2.6	Effet transversal dans une jauge d'extensométrie . . . . .	140
E2.7	Extensométrie par jauges électriques . . . . .	140
E2.8	Écoulement irrotationnel de fluide incompressible . . . . .	141
E2.9	Petites ou grandes transformations? . . . . .	142
E2.10	Mouvement de corps rigide . . . . .	142
P2.1	Expansion plane homogène . . . . .	143
P2.2	Concentration plane homogène . . . . .	144
P2.3	Transformation tridimensionnelle homogène . . . . .	147
P2.4	Transformation finie d'un tube épais . . . . .	149
<b>3</b>	<b>Contraintes</b> . . . . .	<b>153</b>
3.1	Considérations intuitives . . . . .	153
3.1.1	Fluide au repos . . . . .	153
3.1.2	Poutre en traction simple . . . . .	155
3.2	Efforts intérieurs et tenseurs des contraintes . . . . .	156
3.2.1	Classification des actions mécaniques . . . . .	156
3.2.1.1	Actions mécaniques extérieures . . . . .	157
3.2.1.2	Actions mécaniques intérieures : Définition du vecteur contrainte . . . . .	158

3.2.2	Tenseurs des contraintes . . . . .	161
3.2.2.1	Tenseur des contraintes de Cauchy . . . . .	161
3.2.2.2	Tenseurs des contraintes de Boussinesq et de Piola-Kirchhoff . . . . .	167
3.2.3	Relation fondamentale de la dynamique . . . . .	170
3.2.3.1	Équations indéfinies eulériennes du mouvement . . . . .	171
3.2.3.2	Équations indéfinies lagrangiennes du mouvement . . . . .	173
3.2.3.3	Symétrie des tenseurs des contraintes de Cauchy et de Piola-Kirchhoff . . . . .	175
3.3	Dérivées matérielles des contraintes . . . . .	178
3.3.1	Dérivées matérielles des tenseurs des contraintes . . . . .	178
3.3.2	Dérivée matérielle du vecteur contrainte . . . . .	179
3.4	Étude du tenseur des contraintes de Cauchy . . . . .	181
3.4.1	Théorème de Cauchy . . . . .	181
3.4.2	Directions principales des contraintes . . . . .	182
3.4.3	Déviateur des contraintes . . . . .	184
3.4.4	Invariants scalaires du tenseur des contraintes . . . . .	185
3.4.5	Représentations géométriques d'un état de contrainte plane . . . . .	189
3.4.5.1	Ellipse de Lamé des contraintes planes . . . . .	190
3.4.5.2	Cercle de Mohr des contraintes planes . . . . .	191
3.4.6	Représentations géométriques d'un état de contrainte tridimensionnel . . . . .	194
3.4.6.1	Ellipsoïde de Lamé des contraintes . . . . .	195
3.4.6.2	Tricercle de Mohr des contraintes . . . . .	195
3.5	Récapitulatif des formules essentielles . . . . .	200
3.5.1	Efforts intérieurs et tenseurs des contraintes . . . . .	200
3.5.2	Dérivées matérielles des contraintes . . . . .	200
3.5.3	Étude du tenseur des contraintes de Cauchy . . . . .	201
3.6	Exercices et problèmes . . . . .	202
3.6.1	Énoncés des exercices . . . . .	202
E3.1	Solide d'isocontrainte . . . . .	202
E3.2	Essai de traction monoaxiale . . . . .	202
E3.3	États types de contrainte plane . . . . .	203
E3.4	Utilisation d'une plaque fissurée . . . . .	203
E3.5	État homogène de contrainte plane . . . . .	203
E3.6	Quadriques directrices des contraintes normales . . . . .	204
E3.7	Contrainte normale et contrainte tangentielle octaédriques . . . . .	204
E3.8	Contraintes au parement amont d'un barrage . . . . .	205
E3.9	Boîte de Casagrande . . . . .	205
3.6.2	Énoncés des problèmes . . . . .	206
P3.1	Contraintes dans une chaudière . . . . .	206

	P3.2	Contraintes dans un câble de précontrainte . . . . .	207
	P3.3	Contraintes dans une poutre en potence . . . . .	208
3.6.3		Indications et éléments de réponse . . . . .	209
	E3.1	Solide d'isocontrainte . . . . .	209
	E3.2	Essai de traction monoaxiale . . . . .	209
	E3.4	Utilisation d'une plaque fissurée . . . . .	209
	E3.5	État homogène de contrainte plane . . . . .	210
	E3.6	Quadriques directrices des contraintes normales . . . . .	210
	E3.7	Contrainte normale et contrainte tangentielle octaédriques . . . . .	211
	E3.8	Contraintes au parement amont d'un barrage . . . . .	211
	E3.9	Boîte de Casagrande . . . . .	211
	P3.1	Contraintes dans une chaudière . . . . .	211
	P3.2	Contraintes dans un câble de précontrainte . . . . .	211
	P3.3	Contraintes dans une poutre en potence . . . . .	212
<b>4</b>		<b>Prolégomènes à la rhéologie des corps continus</b>	<b>213</b>
4.1		Considérations intuitives . . . . .	213
4.1.1		Exemples de comportements de milieux solides . . . . .	214
	4.1.1.1	Comportement élastique . . . . .	214
	4.1.1.2	Comportement élastoplastique . . . . .	215
4.1.2		Exemples de comportements de milieux fluides . . . . .	216
	4.1.2.1	Fluide parfait . . . . .	216
	4.1.2.2	Fluide visqueux . . . . .	217
4.2		Élasticité linéaire isotrope . . . . .	218
	4.2.1	Approche en déformations . . . . .	219
	4.2.2	Approche en contraintes . . . . .	224
	4.2.3	Synthèse des deux approches . . . . .	226
	4.2.4	Thermoélasticité linéaire isotrope . . . . .	230
	4.2.5	Exemple de sollicitation thermomécanique . . . . .	230
4.3		Notion de critère de limite élastique . . . . .	232
	4.3.1	Exemples de critères indépendants de la contrainte moyenne . . . . .	233
		4.3.1.1 Critère de Tresca . . . . .	233
		4.3.1.2 Critère de Von-Mises . . . . .	236
	4.3.2	Exemples de critères dépendants de la contrainte moyenne . . . . .	237
		4.3.2.1 Critère de Mohr-Coulomb . . . . .	237
		4.3.2.2 Critère de Drucker-Prager . . . . .	242
4.4		Fluide visqueux newtonien . . . . .	243
	4.4.1	Relations de comportement . . . . .	243
	4.4.2	Application . . . . .	244

4.5	Un exemple de couplage rhéoptique : l'effet photoélastique . . . . .	246
4.5.1	Matériaux photoélastiques . . . . .	247
4.5.1.1	Polarisation rectiligne d'une onde lumineuse plane . . . . .	247
4.5.1.2	Matériaux parfaitement photoélastiques . . . . .	247
4.5.2	Photoélasticimétrie plane . . . . .	249
4.5.2.1	Analyse rectiligne . . . . .	249
4.5.2.2	Analyse circulaire . . . . .	251
4.6	Récapitulatif des formules essentielles . . . . .	255
4.6.1	Élasticité linéaire isotrope . . . . .	255
4.6.2	Notion de critère de limite élastique . . . . .	255
4.6.3	Fluide visqueux newtonien . . . . .	256
4.7	Exercices et problèmes . . . . .	257
4.7.1	Énoncés des exercices . . . . .	257
E4.1	Massif de sol pesant uniformément chargé . . . . .	257
E4.2	Coin élastique . . . . .	257
E4.3	Traction monoaxiale d'une poutre élastique hétérogène . . . . .	258
E4.4	Sollicitation thermomécanique d'une poutre élastique hétérogène . . . . .	259
E4.5	Écoulement laminaire d'un fluide visqueux newtonien incompressible . . . . .	259
E4.6	Vernis craquelant . . . . .	260
E4.7	Critères de Tresca et de Von-Mises en contraintes planes . . . . .	261
E4.8	Rhéomètre de Couette . . . . .	262
E4.9	Distorsion pure . . . . .	263
E4.10	Expansion plane . . . . .	264
4.7.2	Énoncés des problèmes . . . . .	264
P4.1	Torsion et sollicitation thermique d'un cylindre creux . . . . .	264
P4.2	Torsion pure d'un cylindre . . . . .	265
P4.3	Matériau composite . . . . .	267
P4.4	Barrage poids . . . . .	268
P4.5	Fluide de Bingham . . . . .	270
4.7.3	Indications et éléments de réponse . . . . .	271
E4.1	Massif de sol pesant uniformément chargé . . . . .	271
E4.2	Coin élastique . . . . .	271
E4.3	Traction monoaxiale d'une poutre élastique hétérogène . . . . .	271
E4.4	Sollicitation thermomécanique d'une poutre élastique hétérogène . . . . .	272
E4.5	Écoulement laminaire d'un fluide visqueux newtonien incompressible . . . . .	272

E4.6	Vernis craquelant . . . . .	273
E4.7	Critères de Tresca et de Von-Mises en contraintes planes . . . . .	273
E4.8	Rhéomètre de Couette . . . . .	274
E4.9	Distorsion pure . . . . .	274
E4.10	Expansion plane . . . . .	274
P4.1	Torsion et sollicitation thermique d'un cylindre creux . . . . .	275
P4.2	Torsion pure d'un cylindre . . . . .	276
P4.3	Matériau composite . . . . .	277
P4.4	Barrage poids . . . . .	278
P4.5	Fluide de Bingham . . . . .	279
<b>5</b>	<b>Principes généraux et leurs applications</b>	<b>281</b>
5.1	Principes généraux . . . . .	281
5.1.1	Rappels de résultats précédemment énoncés . . . . .	282
5.1.1.1	Équation eulérienne de conservation de la masse . . . . .	282
5.1.1.2	Équations indéfinies eulériennes du mouvement . . . . .	282
5.1.2	Théorème d'Euler . . . . .	283
5.1.2.1	Forme locale . . . . .	283
5.1.2.2	Forme globale . . . . .	284
5.1.2.3	Application . . . . .	285
5.1.3	Puissances virtuelles et énergie cinétique . . . . .	287
5.1.3.1	Théorème des puissances virtuelles . . . . .	287
5.1.3.2	Théorème de l'énergie cinétique . . . . .	290
5.1.4	Théorème des travaux virtuels . . . . .	290
5.2	Application aux fluides . . . . .	295
5.2.1	Hydrostatique . . . . .	295
5.2.2	Fluide parfait en mouvement — Théorème de Bernoulli . . . . .	296
5.2.3	Fluide visqueux newtonien - Équations de Navier-Stokes . . . . .	298
5.3	Application aux solides élastiques linéaires isotropes . . . . .	300
5.3.1	Équations de Lamé-Navier . . . . .	300
5.3.2	Énergie de déformation d'un solide élastique . . . . .	302
5.3.3	Théorème de l'énergie potentielle . . . . .	305
5.3.4	Application . . . . .	309
5.4	Récapitulatif des formules essentielles . . . . .	314
5.4.1	Principes généraux . . . . .	314
5.4.2	Application aux fluides . . . . .	314
5.4.3	Application aux solides élastiques linéaires isotropes . . . . .	315
5.5	Exercices et problèmes . . . . .	316
5.5.1	Énoncés des exercices . . . . .	316

E5.1	Équations indéfinies du mouvement . . . . .	316
E5.2	Théorème d'Archimède . . . . .	316
E5.3	Réservoir cylindrique en rotation . . . . .	316
E5.4	Principe du venturi . . . . .	317
E5.5	Tube de Pitot . . . . .	317
E5.6	Ajutage de Borda . . . . .	318
E5.7	Auget Pelton . . . . .	319
E5.8	Tube de Poiseuille . . . . .	320
E5.9	Viscosimètre plan-plan . . . . .	320
E5.10	Torsion d'un disque annulaire . . . . .	321
E5.11	Sphère creuse sous pression . . . . .	322
E5.12	Vibrations longitudinales d'une poutre . . . . .	323
5.5.2	Énoncés des problèmes . . . . .	324
P5.1	Compression-confinement d'un cylindre creux . . . . .	324
P5.2	Sertissage d'un cylindre . . . . .	325
P5.3	Cylindre creux infini sous pression (pressiomètre) . . . . .	327
P5.4	Stabilité d'une couche pesante reposant sur un plan incliné . . . . .	328
P5.5	Pale d'hélicoptère . . . . .	329
P5.6	Action d'un jet sur un obstacle . . . . .	330
P5.7	Écoulement dans une conduite de section carrée . . . . .	331
P5.8	Fluide visqueux sur un plan incliné . . . . .	332
P5.9	Fluide visqueux non-newtonien . . . . .	334
P5.10	Viscosimètre cône-plan . . . . .	335
5.5.3	Indications et éléments de réponse . . . . .	336
E5.2	Théorème d'Archimède . . . . .	336
E5.3	Réservoir cylindrique en rotation . . . . .	336
E5.4	Principe du venturi . . . . .	336
E5.5	Tube de Pitot . . . . .	337
E5.6	Ajutage de Borda . . . . .	337
E5.7	Auget Pelton . . . . .	337
E5.8	Tube de Poiseuille . . . . .	337
E5.9	Viscosimètre plan-plan . . . . .	338
E5.10	Torsion d'un disque annulaire . . . . .	338
E5.11	Sphère creuse sous pression . . . . .	338
E5.12	Vibrations longitudinales d'une poutre . . . . .	339
P5.1	Compression-confinement d'un cylindre creux . . . . .	339
P5.2	Sertissage d'un cylindre . . . . .	341
P5.3	Cylindre creux infini sous pression (pressiomètre) . . . . .	343
P5.4	Stabilité d'une couche pesante reposant sur un plan incliné . . . . .	343

P5.5	Pale d'hélicoptère . . . . .	344
P5.6	Action d'un jet sur un obstacle . . . . .	346
P5.7	Écoulement dans une conduite de section carrée . . . . .	346
P5.8	Fluide visqueux sur un plan incliné . . . . .	347
P5.9	Fluide visqueux non-newtonien . . . . .	348
P5.10	Viscosimètre cône-plan . . . . .	349
<b>6</b>	<b>Introduction à la méthode des éléments finis</b>	<b>351</b>
6.1	Étude d'un problème modèle : La corde sur fondation élastique . . . . .	352
6.1.1	Le problème initial . . . . .	352
6.1.2	Formulation variationnelle . . . . .	353
6.1.2.1	Un théorème . . . . .	353
6.1.2.2	Une définition . . . . .	355
6.1.3	Méthodes de Galerkin . . . . .	357
6.1.3.1	Écriture abstraite d'un problème variationnel . . . . .	357
6.1.3.2	Formulation variationnelle approchée de Galerkin . . . . .	358
6.1.3.3	Résolution numérique d'un problème approché de Galerkin . . . . .	359
6.1.3.4	Les méthodes de Galerkin . . . . .	360
6.1.4	Construction d'un espace d'éléments finis . . . . .	360
6.1.4.1	Premier outil : définition d'un élément fini . . . . .	361
6.1.4.2	Deuxième outil : triangulation . . . . .	362
6.1.4.3	Troisième outil : matrice de connectivité . . . . .	362
6.1.4.4	Construction finale des fonctions $\psi_i, i \in \{1, \dots, M_h\}$ . . . . .	363
6.1.4.5	Résolution numérique d'un problème de Galerkin par la méthode des éléments finis . . . . .	365
6.2	Étude du problème de l'élastostatique infinitésimale . . . . .	368
6.2.1	Le problème initial . . . . .	368
6.2.2	Formulation variationnelle . . . . .	370
6.2.3	Exemple numérique : équilibre d'un barrage poids élastique . . . . .	372
6.2.3.1	Choix d'un élément fini bidimensionnel . . . . .	373
6.2.3.2	Triangulation . . . . .	374
6.2.3.3	Matrice de connectivité . . . . .	375
6.2.3.4	Expressions locales des déplacements, des déformations et des contraintes . . . . .	377
6.2.3.5	Résolution numérique . . . . .	380
6.3	Exercices . . . . .	386
6.3.1	Énoncés . . . . .	386
E6.1	Essai de compression œdométrique . . . . .	386
E6.2	Pale d'hélicoptère . . . . .	386

E6.3	Poutre en flexion . . . . .	387
6.3.2	Indications et éléments de réponse . . . . .	387
E6.1	Essai de compression œdométrique . . . . .	387
E6.2	Pale d'hélicoptère . . . . .	388
E6.3	Poutre en flexion . . . . .	389
<b>A</b>	<b>Éléments de calcul tensoriel en bases orthonormées</b>	<b>391</b>
A.1	Convention d'indice muet . . . . .	391
A.2	Tenseurs euclidiens en bases orthonormées . . . . .	392
A.3	Tenseurs isotropes . . . . .	394
A.4	Tenseurs gradient et divergence . . . . .	395
A.5	Cas de l'espace $\mathbb{R}^3$ orthonormé . . . . .	396
<b>B</b>	<b>Formulaire</b>	<b>399</b>
B.1	Tenseurs de Kronecker $\delta$ et d'orientation $\epsilon$ . . . . .	399
B.1.1	Caractérisation . . . . .	399
B.1.2	Propriétés . . . . .	400
B.2	Opérateurs différentiels . . . . .	400
B.2.1	Caractérisation . . . . .	400
B.2.2	Propriétés . . . . .	402
B.3	Coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques . . . . .	403
B.3.1	Coordonnées cartésiennes . . . . .	403
B.3.2	Coordonnées cylindriques . . . . .	406
B.3.3	Coordonnées sphériques . . . . .	408
B.4	Unités . . . . .	411
B.4.1	Unités de base et unités supplémentaires . . . . .	411
B.4.2	Unités espace-temps . . . . .	412
B.4.3	Unités de mécanique et unités dérivées . . . . .	412
B.4.4	Symboles des préfixes décimaux . . . . .	413
B.5	Extensométrie par rosettes de trois jauges . . . . .	414
<b>C</b>	<b>Ouvrages de référence</b>	<b>415</b>
C.1	Ouvrages de Mécanique des Milieux Continus et d'Élasticité . . . . .	415
C.2	Ouvrages de Mathématiques : Calcul Tensoriel et Calcul Variationnel . . . . .	416
C.3	Ouvrages sur la Méthode des Éléments Finis . . . . .	416
C.4	Ouvrages sur les Méthodes Expérimentales en Élasticité . . . . .	417
	<b>Index</b>	<b>419</b>