

Table des matières

Avant-propos	xiii
1 La mesure du temps	1
1.1 La réalisation de la seconde	1
1.1.1 Le postulat de reproductibilité	2
1.1.2 Le temps propre	3
1.2 Fréquence, phase et temps d'un oscillateur	3
1.3 Fréquence et accroissement de temps propre	6
1.4 Exactitude et stabilité de fréquence	7
1.5 Mesure de l'instabilité des oscillateurs	10
1.5.1 Définition théorique de la variance d'Allan	10
1.5.2 Incertitudes de prédiction	11
1.5.3 Calculs de la variance d'Allan	12
1.5.4 Variance d'Allan en présence d'effets systématiques	14
1.5.5 Variance d'Allan et densité spectrale de puissance	15
1.6 Différents types d'oscillateurs	16
1.7 L'échelle de temps	17
1.7.1 Réalisation d'une échelle de temps atomique intégrée	17
1.7.2 Propriétés d'une échelle de temps	18
1.7.3 L'échelle de temps TAI	18
1.7.4 L'échelle de temps universel UT	18
1.7.5 Le temps universel coordonné UTC	20
2 Les signaux et messages des systèmes GPS et Galileo	23
2.1 Les deux concepts de transmission de signaux de navigation : CDMA/FDMA	24
2.2 Lien satellite et récepteur	25
2.3 La modulation en quadrature	26
2.4 La modulation de phase	27
2.4.1 La modulation de phase BPSK	27
2.4.2 La modulation de phase BOC	29
2.4.3 Reconstruction de l'information par le récepteur	31
2.5 Les codes des signaux GPS et Galileo	31
2.5.1 Les registres à décalages et retours linéaires	33
2.5.2 Propriété des codes PRN	39
2.5.3 Caractéristiques des codes PRN	40
2.5.4 Les codes publics GPS (Coarse Acquisition)	41
2.5.5 Les codes cryptés GPS P(Y)	41
2.5.6 Le code militaire GPS	42
2.6 Les informations de navigation des systèmes GPS et Galileo	43

2.6.1	Les codes de convolution	46
2.7	Le message de navigation du système GPS	49
2.7.1	Format du message L/NAV	49
2.7.2	L'accès au temps GPS (GPST)	51
2.8	Le message de navigation du système Galileo	51
2.8.1	Format du message F/NAV	52
2.8.2	Format du message I/NAV	54
2.8.3	L'accès au temps Galileo (GST)	56
2.9	Encodage des signaux de navigation : le cas GPS	57
2.10	Traitement des signaux de navigation par le récepteur	59
2.11	Limitation du débit de transfert des données de navigation	61
2.12	Résumé	62
3	La mesure de code	65
3.1	Le principe de base du positionnement par GNSS	65
3.2	Le calcul du temps de propagation du signal	66
3.3	La modélisation de la mesure de code	71
3.3.1	Variation temporelle de la distance géométrique	73
3.3.2	Le rôle de la référence de temps dans les systèmes de navigation	73
3.3.3	Corrélation entre la position du satellite et son horloge dans la mesure de pseudo-distance	74
3.4	Mesures de codes délivrées par le système GPS et produites par les récepteurs	75
3.5	Événement de prise de mesure et datation par le récepteur	75
3.6	Résumé	76
4	La mesure de Doppler	79
4.1	Effet Doppler classique	79
4.2	La mesure du Doppler dans le récepteur	84
4.2.1	Dérive en fréquences	85
4.2.2	La modélisation de la mesure Doppler	85
5	La mesure de phase	87
5.1	Concept général	87
5.2	Les biais de phase	91
5.3	L'accumulation de Doppler	92
5.4	L'enroulement de phase	92
5.5	Résumé	94
6	Les effets des erreurs système sur les mesures GNSS	97
6.1	Les centres de phases	98
6.2	Effet des erreurs d'orbite et d'horloge sur la mesure de pseudo-distance	99
6.2.1	Corrélation entre la direction radiale du satellite et l'horloge	105

6.2.2	Majorant des erreurs d'orbites et d'horloge dans la pseudo-distance	106
6.2.3	Corrélation spatiale des erreurs d'orbites	107
6.2.4	Corrélation spatiale des erreurs d'horloge	109
6.3	Les biais instrumentaux – TPG	109
6.3.1	Les biais de code et de phase différentiels (DCB, DPB, IFB)	113
6.4	La déformation de la forme d'onde	115
7	Les effets de propagation dans l'atmosphère sur les mesures GNSS	117
7.1	Les effets ionosphériques	117
7.2	Les effets troposphériques	119
7.2.1	Modélisation des effets atmosphériques dans les mesures GNSS	120
7.3	Effet de l'environnement sur la mesure de pseudo-distance . . .	121
7.4	Le filtrage du code par la phase	121
8	Les différentes combinaisons de mesures GNSS	125
8.1	Le modèle standard des mesures de code et de phase	125
8.2	Combinaison ionosphérique	126
8.3	Combinaison en longueur d'onde équivalente étroite (narrowlane)	127
8.4	Combinaison en longueur d'onde équivalente large (widelane) .	128
8.5	Combinaison de Melbourne-Wübbena	129
8.6	Combinaison géométrique	129
9	La diffusion des biais d'horloge satellite dans le message de navigation	133
9.1	La diffusion des biais d'horloge dans le message de navigation .	133
9.2	La diffusion des biais I1-I2 dans le message de navigation, T _{GD} , BGD	137
9.3	Utilisation des signaux civils	141
9.4	Le calcul du délai ionosphérique	142
10	Les références d'espaces	143
10.1	Changement de base et transformations de coordonnées	144
10.2	Mouvements de l'axe de rotation de la Terre	147
10.2.1	La sphère céleste, pôles et origines	149
10.2.2	Origine non tournante	150
10.3	Référentiel terrestre et céleste	152
10.3.1	Notions de système et repères de référence	152
10.3.2	Référentiel terrestre	153
10.3.3	Référentiel céleste	154
10.3.4	Les transformations entre les référentiels céleste et terrestre	154

10.3.5	Les référentiels pour le calcul du positionnement par GNSS	160
11	Positionnement avec le système GPS	163
11.1	Le calcul du temps d'émission	165
11.2	Le calcul de la position des satellites GPS et Galileo au temps d'émission	167
11.3	Le calcul de la position et du temps du récepteur	175
11.3.1	Positionnement en événement récepteur	176
11.3.2	Positionnement en événement satellite	182
11.4	Calculs dans le repère WGS84	188
11.5	Calcul des erreurs d'estimation	191
11.6	L'ellipsoïde de confiance	195
12	Positionnement en combinant les systèmes GPS et Galileo	197
12.1	Le GPS/Galileo Time Offset – GGTO	197
12.2	Les biais inter systèmes – ISB	198
12.3	La résolution du positionnement avec les systèmes GPS et Galileo	200
13	La théorie de la relativité restreinte	203
13.1	Introduction : relativité galiléenne et relativité einsteinienne	203
13.2	La relativité galiléenne	204
13.2.1	Les référentiels inertiels	204
13.2.2	Les transformations de Galilée	204
13.3	La relativité einsteinienne	205
13.3.1	La chronogéométrie de Minkowski	206
13.3.2	Temps propre et temps-coordonnée	207
13.3.3	La relativité sans la lumière	208
13.4	Quelques précisions sur la genèse de la relativité restreinte	209
13.4.1	Les expériences pour détecter des variations dans la vitesse de propagation de la lumière	210
13.4.2	Le problème théorique posé par les lois de l'électromagnétisme	211
14	Les nouveaux effets physiques sur le temps prédits par la relativité restreinte	213
14.1	Relativité de la simultanéité	213
14.2	La désynchronisation cinématique des horloges parfaites	214
14.3	La dilatation des temps	218
14.4	La contraction des longueurs	219
14.5	L'effet Doppler relativiste	219
14.5.1	Effet Doppler transverse	221
14.5.2	Application en navigation	222
14.6	L'effet Sagnac	222
14.6.1	Déduction relativiste de l'effet Sagnac optique à partir du référentiel du laboratoire	222

14.6.2	Déduction de l'effet Sagnac universel à partir du référentiel du laboratoire	224
14.6.3	Raisonnement physique à partir de la multiplicité des temps propres	225
14.6.4	Déduction de l'effet Sagnac par le calcul différentiel et les transformations de Lorentz	227
14.6.5	Déduction relativiste de l'effet Sagnac dans le référentiel tournant	229
14.7	Rôle de la relativité restreinte dans les systèmes de navigation par satellites	232
15	La théorie de la gravitation de Newton	235
15.1	Les deux lois de la théorie newtonienne de la gravitation . . .	235
15.2	La loi fondamentale de la dynamique newtonienne	235
15.3	La force de gravitation newtonienne	236
15.4	Une hypothèse supplémentaire : l'universalité de la chute libre	236
15.5	Les lois de Kepler conséquences de la théorie de Newton . . .	237
16	La théorie de la gravitation d'Einstein	239
16.1	Analyse critique de la théorie newtonienne de la gravitation .	239
16.2	Le principe d'équivalence locale entre accélération et gravitation	240
16.3	Un nouvel effet prédit grâce au principe d'équivalence locale entre accélération et gravitation	240
16.4	Le principe des géodésiques	243
16.5	Une première théorie métrique de la gravitation fondée uniquement sur la courbure temporelle	244
16.6	Les équations générales du champ gravitationnel	246
16.7	Les deux lois de la théorie de la gravitation d'Einstein	247
16.8	La métrique de Schwarzschild	247
16.8.1	Une solution du vide de l'équation d'Einstein	248
16.8.2	La coordonnée radiale	248
16.8.3	Le temps-coordonnée	249
16.8.4	Courbure temporelle et courbure spatiale	249
16.9	La métrique de Kerr	250
16.10	La toile en caoutchouc : une analogie presque entièrement fausse	251
16.10.1	La chute de mon stylo d'Aristote à Einstein	253
17	Les nouveaux effets physiques sur le temps prédits par la relativité générale	255
17.1	La désynchronisation gravitationnelle des horloges parfaites .	255
17.1.1	Vérifications expérimentales	257
17.2	L'effet Einstein (décalage spectral gravitationnel)	257
17.2.1	L'universalité de l'effet Einstein	259
17.2.2	Une erreur fréquente à éviter	259

17.2.3	Vérifications expérimentales	260
17.3	L'effet Shapiro	261
17.3.1	Deux erreurs fréquentes	262
17.3.2	Vérifications expérimentales	262
18	Les expériences sur la désynchronisation	
	des horloges parfaites	265
18.1	L'expérience de Hafele et Keating	265
18.1.1	L'hypothèse de l'horloge	265
18.1.2	De combien nos horloges sont-elles censées se décaler ?	266
18.1.3	La dépendance selon la direction et la faisabilité de l'expérience	267
18.1.4	Le compteur d'intervalles de temps	267
18.1.5	Pourquoi quatre horloges atomiques embarquées ? . . .	268
18.1.6	Un dérèglement commun aux quatre horloges ?	269
18.1.7	Comparaison entre les valeurs théoriques et les valeurs mesurées	269
18.1.8	En quoi l'expérience de Hafele et Keating se démarque-t-elle des précédentes ?	270
18.1.9	Le pseudo-paradoxe des jumeaux	271
18.1.10	Pourquoi l'expérience de Hafele et Keating peut être qualifiée de cruciale	271
18.2	L'expérience de Carroll Alley	272
18.2.1	Le transfert de temps par lien laser (T2L2)	273
18.2.2	De combien nos horloges sont-elles censées se décaler ?	274
18.2.3	Comparaison entre les valeurs théoriques et les valeurs mesurées	275
18.2.4	Une expérience cruciale ?	276
18.2.5	Des incompréhensions chroniques	276
18.3	Expériences ultérieures	277
19	Effets relativistes sur le temps pour la	
	géolocalisation par satellites	279
19.1	Première approche (principales contributions)	279
19.2	Synchronisation des horloges GPS avec les horloges terrestres .	281
19.2.1	Temps terrestre et temps atomique international	282
19.2.2	Désynchronisation des horloges terrestres par rapport au temps-coordonnée selon leur altitude	284
19.2.3	Temps-coordonnée géocentrique et temps propre d'un satellite GPS	284
19.2.4	Temps terrestre et temps propre GPS	285
19.3	Compensation des effets relativistes dans les systèmes de navigation	287
19.3.1	Biais en fréquence des horloges à bord	287
19.3.2	L'effet de l'excentricité des orbites GPS	288

19.3.3	Raccordement des temps systèmes GPS et Galileo au temps UTC	290
19.4	Effet Shapiro pour les signaux de navigation	291
19.4.1	Équation de propagation en temps terrestre	293
19.5	Le rôle de la relativité dans le GPS : une légende urbaine ?	293
20	Transfert de temps et transfert de fréquence	297
20.1	Transfert de fréquence	297
20.1.1	La méthode à une voie	297
20.1.2	La méthode à deux voies	301
20.2	Transfert de temps	301
20.2.1	La méthode à une voie	301
20.2.2	La méthode à deux voies	302
20.3	Le transfert de temps avec les signaux GPS	303
20.3.1	Repères inertiels et repère terrestre	303
20.3.2	L'effet Sagnac dans les systèmes GNSS	304
20.3.3	Le transfert de temps avec les signaux GPS	305
20.3.4	Intégration implicite de l'effet Sagnac dans le positionnement en événement récepteur	310
21	Principes généraux de la restitution d'orbite GPS par moindres carrés	313
21.1	Introduction au principe de la détermination d'orbite par moindres carrés	313
21.2	Le principe des moindres carrés	317
21.2.1	Dynamique des satellites	318
21.2.2	Génération des mesures théoriques et calcul des résidus de mesures	322
21.2.3	La pondération des mesures	325
21.2.4	Filtrage par estimation paramétrique	326
21.2.5	Les résidus de mesures	329
21.2.6	Les erreurs d'identifications	330
21.3	Algorithme général	335
21.4	Prise en compte de contraintes	336
21.5	Traitement des informations a priori	337
21.6	La restitution des orbites et horloges des satellites GPS	339
21.6.1	Dynamique appliquée pour les GPS	339
21.6.2	Modélisation de la mesure GPS	341
21.6.3	Filtrage du problème GPS	346
21.7	Le besoin de synchronisation du temps dans les algorithmes de navigation	353
21.7.1	Observation d'un biais d'horloge récepteur	353
21.7.2	Observation d'un biais d'horloge satellite	354
21.7.3	Observation simultanée de biais d'horloge satellite et station	354

21.7.4	Effet d'une dérive d'horloge satellite sur un réseau sol dont la prise de mesure est dispersée . . .	355
21.8	La datation des mesures	355
21.9	Traitement des mesures de phase en ambiguïtés entières . . .	357
21.9.1	Combinaisons simples et doubles différences	358
21.9.2	Le cas zéro-différence	359
22	Les systèmes d'augmentation par satellites	365
22.1	Le rôle d'un système SBAS	365
22.2	Les standards applicables	366
22.3	Architecture des systèmes SBAS	367
22.4	Les budgets d'erreurs de mesures pris en compte dans le standard MOPS	369
22.5	Génération des corrections SBAS L1	371
22.6	Application des corrections SBAS L1	372
22.6.1	Application de la correction d'horloge : calcul du temps d'émission et construction de la pseudo-distance	374
22.6.2	Correction de la pseudo-distance	375
22.6.3	Correction de l'orbite du satellite au temps d'émission corrigé	375
22.7	Compensation partielle des erreurs d'orbites et d'horloges . .	376
22.8	Application des marées terrestres	377
22.9	La correction du retard ionosphérique d'EGNOS	378
22.10	La notion d'intégrité	381
22.10.1	UDRE	382
22.10.2	GIVE	384
22.10.3	Caractérisation de l'intégrité	385
22.11	La construction des volumes de protection	387
22.12	Les performances d'un système SBAS	391
22.12.1	Précision	391
22.12.2	Disponibilité	392
22.12.3	Intégrité	393
22.12.4	Continuité	395
22.13	Introduction au SBAS bi-fréquence multi-constellations (DFMC)	396
	Épilogue : La géolocalisation par satellites, système relativiste par excellence	399
	Glossaire	401
	Bibliographie	415