

UNIVERSITÉ DE LIÈGE
Faculté des Sciences

Détection des sauts de cycles en mode multi-fréquence pour le système Galileo

Sous la direction du
PR. WARNANT R.

Mémoire présenté par
Laura VAN DE VYVERE

pour l'obtention du titre de
Master en sciences géographiques
orientation géomatique et géométrie

Année académique 2014-2015

” La théorie, c’est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c’est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi.”

– Albert Einstein

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier mon promoteur, le Professeur Warnant, pour sa disponibilité et l'encadrement de qualité qu'il m'a fourni tout au long de cette année, dans une constante bonne humeur.

Je remercie également d'avance mes lecteurs, MM. Demoulin et Wautelet.

Je tiens aussi à remercier Matthieu et Gilles, pour leurs précieux conseils.

Ce travail n'aurait certainement pas été le même sans l'intervention de l'équipe de chez M3 Systems Belgium. Olivier, Agnès, et Thibaut, je vous remercie pour vos nombreux encouragements et vos questions pertinentes.

Merci à ma famille et à mes proches pour l'aide qu'ils m'ont fournie et pour leur compréhension, apportant chacun leur pierre à l'édifice.

Enfin, merci à toi, Jean-Paul, pour ton soutien inconditionnel et pour la patience dont tu as fait preuve tout au long de cette année.

Table des matières

1	<i>Global Navigation Satellite System</i>	1
1.1	Du militaire au <i>smartphone</i>	1
1.2	Principe du positionnement par satellite	2
1.2.1	Le signal GNSS	3
1.2.2	Mesure du temps de parcours	4
1.2.3	Les segments GNSS	5
1.3	Sources d'erreurs	5
1.3.1	Les erreurs atmosphériques	5
1.3.2	Le multi-trajet	8
1.3.3	Erreurs dues aux émetteurs ou récepteurs	9
1.3.4	Le bruit	9
1.4	Modèle mathématique	9
1.4.1	Mesures de codes	9
1.4.2	Mesures de phases	10
1.5	Les différentes méthodes de positionnement	10
1.5.1	Le positionnement absolu, différentiel, et relatif	11
1.5.2	Le positionnement statique et cinématique	11
1.5.3	Le positionnement en temps réel et en post-traitement	11
1.6	Les différents GNSS, signaux, et services	12
1.6.1	Les systèmes globaux	12
1.6.2	Les systèmes de navigation régionaux et systèmes d'augmentation	21
1.7	Sauts de cycles	21
1.7.1	Fonctionnement d'un récepteur	21
1.7.2	Les sauts de cycles	24
1.7.3	Causes des sauts de cycles	25
1.7.4	Traitement des sauts de cycles	26
1.8	GNSS : les défis actuels	27
1.8.1	Disponibilité	27
1.8.2	Précision et exactitude	28
1.8.3	Continuité	31
1.8.4	Intégrité	32
1.8.5	Résistance au <i>jamming</i> et <i>spoofing</i>	32
1.9	Conclusion	34
2	Cadre de travail, hypothèses et méthodologie	35
2.1	Introduction	35
2.2	Méthode de positionnement concernée	36
2.3	Historique du traitement des sauts de cycles	36

2.3.1	Tri-fréquence et quadri-fréquence	37
2.3.2	Activité ionosphérique	38
2.4	Hypothèse	38
2.5	Méthodologie	39
2.6	Conclusion	40
3	Données	41
3.1	Introduction	41
3.2	Format des données	41
3.3	Répartition spatiale	42
3.4	Précision des observables	42
3.5	Modification des données	44
3.5.1	Choix des jours de données de tests	45
3.5.2	Choix des époques d'insertion de sauts	46
3.5.3	Insertion de sauts	47
3.6	Conclusion	49
4	Détection : les principes	51
4.1	Introduction	51
4.2	Quantité-test	51
4.2.1	Différentes propriétés	53
4.2.2	Mono-fréquence	55
4.2.3	Bi-fréquence	57
4.2.4	Tri-fréquence	63
4.2.5	Comparaison des quantités-tests	65
4.3	Méthode de détection	66
4.3.1	Quantité-test : brute ou différenciée	66
4.3.2	Détection de la discontinuité	67
4.3.3	Seuils	69
4.3.4	Fenêtre d'analyse statistique	70
4.3.5	Méthode hybride	71
4.4	Conclusion	74
5	Détection bi-fréquence	75
5.1	Introduction	75
5.2	Choix des quantités-tests	75
5.3	Passage 1 : Combinaison Hatch-Wübenna-Melboune	79
5.3.1	Choix de la méthode d'analyse	79
5.3.2	Choix des seuils	79
5.3.3	Performances globales	89
5.3.4	Confrontation avec les données réelles	89
5.3.5	Discussion	95
5.4	Passage 2 : Combinaison Geometry-Free	96
5.4.1	Choix de la méthode d'analyse	98
5.4.2	Choix des seuils	98
5.4.3	Performances globales	104
5.4.4	Confrontation avec les données réelles	106
5.4.5	Discussion	115
5.5	Conclusion	116

6	Détection tri-fréquence	119
6.1	Introduction	119
6.2	Choix des quantités-tests	119
6.3	Passage 1 : Combinaison de Simsky	120
6.3.1	Choix de la méthode d'analyse	120
6.3.2	Choix des seuils	120
6.3.3	Performances globales	126
6.3.4	Confrontation avec les données réelles	127
6.3.5	Discussion	133
6.4	Passage 2 : Combinaison Geometry-Free	135
6.4.1	Choix de la méthode d'analyse et des seuils	135
6.4.2	Performances globales	137
6.4.3	Confrontation avec les données réelles	139
6.4.4	Discussion	141
6.5	Conclusion	142
7	Détection quadri-fréquence	145
7.1	Introduction	145
7.2	Choix des quantités-tests	145
7.3	Passage 1 : Combinaison de Simsky	146
7.3.1	Choix de la méthode et des seuils	146
7.3.2	Performances globales	147
7.3.3	Confrontation avec les données réelles	148
7.3.4	Discussion	149
7.4	Passage 2 : Combinaison Geometry-Free	150
7.4.1	Choix de la méthode et des seuils	150
7.4.2	Performances globales	151
7.4.3	Confrontation avec les données réelles	151
7.4.4	Discussion	152
7.5	Conclusion	152
8	Validation	153
8.1	Introduction	153
8.2	Interface graphique conviviale	153
8.3	Données de validation	155
8.4	Résultats obtenus	156
8.5	Analyse des résultats	157
8.5.1	Sauts simultanés sur toutes les fréquences et pour tous les satellites	158
8.5.2	Faux négatifs et faux positifs sur la combinaison Geometry-Free . .	160
8.5.3	Faux positifs sur la combinaison de Simsky	161
8.5.4	Évènement ionosphérique extrême	163
8.5.5	Pourcentage d'époques pour lesquelles les sauts de faibles amplitudes ne sont pas détectables	165
8.6	Conclusion	166
9	Conclusion	169
9.1	Apport des méthodes 3f et 4f	169
9.1.1	Sauts isolés et simultanés d'amplitudes différentes	169
9.1.2	Sauts simultanés de mêmes amplitudes	170

9.1.3	Remarques générales	171
9.1.4	Validation	171
9.2	Limitations et améliorations	172
10	Applications et perspectives	173
10.1	Applications	173
10.1.1	Industrie	173
10.1.2	Recherche	174
10.2	Perspectives	175
10.2.1	Fréquence d'échantillonnage	175
10.2.2	Exploitation de nouvelles quantités-tests	177
10.2.3	Correction	178
10.2.4	Validation tri-fréquence pour d'autres constellations	179
A	Mauvaise configuration	181
B	Loi Normale	183
C	Validation et performances	185

Table des figures

1.1	Principe du positionnement par satellites	3
1.2	Le signal GNSS	4
1.3	Le multi-trajet	8
1.4	Galileo : Densité spectrale (DSP) des signaux [Hofmann-Wellenhof et al., 2008] 15	
1.5	Galileo : relation entre le segment spatial et le segment terrestre	17
1.6	Galileo : localisation des infrastructures de contrôle au sol [Hofmann-Wellenhof et al., 2008] 18	
1.7	Récepteur : architecture	22
1.8	Récepteur : comparaison du signal reçu et de la réplique	23
1.9	Impact d'un saut de cycle sur la mesure de phase	25
1.10	Précision et exactitude	29
1.11	Influence de la géométrie sur la qualité du positionnement	31
3.1	Localisation des stations utilisées dans le cadre de ce travail	42
3.2	Précision des mesures de code [Springer and Schönemann, 2013]	43
3.3	Précision des mesures de phase [Springer and Schönemann, 2013]	44
3.4	Irrégularités journalières - GMSD - DOY 134/14 [www.gnss-ulg.be]	46
3.5	Délais ionosphériques entre E1 et E5a - GMSD - DOY 134/14	47
4.1	Méthode de détection hybride	71
5.1	Saut d'un cycle sur E1 (ép. 1540 & 2074) : <i>Code-Phase</i> E1	76
5.2	Saut d'un cycle sur E1 (ép. 1540 & 2074) : <i>Hatch-Wübenna-Melbourne</i> E1-E5a	76
5.3	Saut d'un cycle sur E1 (ép. 1540 & 2074) : <i>Geometry-free</i> E1-E5a	78
5.4	Faux positifs détectés sur la Hatch-Wübenna-Melbourne <i>E1-E5a</i> après les deux étapes	93
5.5	Faux positif détecté sur la Geometry-Free E1-E5a	109
5.6	Faux positifs détectés sur les Geometry-Free <i>E5a-E5b</i> et <i>E5a-Ea+b</i>	111
6.1	Saut d'un cycle sur E1 (ép. 1540 & 2074) : <i>Simsky</i> E1-E5a-E5b	120
6.2	Faux positif sur la combinaison de Simsky <i>E1-E5a-E5a+b</i>	128
6.3	Faux positif sur la combinaison de Simsky <i>E1-E5b-E5a+b</i>	130
8.1	Interface sous MatLab	154
8.2	Problème du récepteur à l'époque 1224 (NKLG - DOY 7/14)	159
8.3	Faux et vrais positifs dans la GF : DOY 13/14 - E12 - per 1	160
8.4	Faux et vrais positifs détectés dans les combinaisons de Simsky	162
8.5	Cas extrêmes : sauts sur les combinaisons de Simsky	165

A.1	Alentours de l'antenne à la station GMSD (Japon) [Source : IGS]	181
A.2	Station GMSD (Japon) : combinaisons E1-E5a-E5b - satellite 12 - période 2182	

Liste des tableaux

1.1	Précision des mesures GPS	13
1.2	Précision des mesures Glonass [Springer and Schönemann, 2013]	14
1.3	Précision des mesures Galileo [Springer and Schönemann, 2013]	18
1.4	Précision des mesures Compass-Beidou	19
1.5	Fréquences communes aux différents systèmes globaux	20
3.1	Insertions de sauts simultanés d’amplitudes différentes pour GMSD - DOY 134/14	48
3.2	Insertions de sauts simultanés de même amplitude pour GMSD - DOY 134/14	49
4.1	Précision de la combinaison Code-Phase	56
4.2	Précision de la combinaison Hatch-Wübenna-Melbourne	59
4.3	Précision de la combinaison Geometry-free	60
4.4	Précision de la combinaison <i>Phase Ionospheric Residual</i>	61
4.5	Coefficients des différentes combinaisons de Simsky	63
4.6	Précision de la combinaison de Simsky	65
4.7	Différences temporelles (D’après [Hofmann-Wellenhof et al., 2008])	67
5.1	Combinaison Hatch-Wübenna-Melbourne différenciée [<i>cycle</i>]	80
5.2	Performances HWM différenciées dans la détection d’un saut d’un cycle - Seuil relatif	82
5.3	Performances HWM différenciées dans la détection d’un saut de plusieurs cycles - Seuil relatif	84
5.4	Performances HWM différenciées dans la détection d’un saut d’un cycle - Seuil absolu	85
5.5	Performances Hatch-Wübenna-Melbourne différenciées dans la détection d’un saut d’un cycle	86
5.6	Combinaison Hatch-Wübenna-Melbourne brute [<i>cycle</i>]	86
5.7	Performances Hatch-Wübenna-Melbourne brute dans la détection d’un saut d’un cycle	88
5.8	Seuils utilisés pour la détection bi-fréquence de sauts isolés ou de sauts simultanés d’amplitudes différentes	89
5.9	Performances bi-fréquences pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d’amplitudes différentes	89
5.10	Sauts isolés d’un cycle	90
5.11	Sauts simultanés d’amplitudes différentes	95
5.12	Combinaison Geometry-free différenciée dans la détection de sauts simul- tanés de mêmes amplitudes	97
5.13	Combinaison Geometry-free différenciée au 4e ordre [<i>m</i>]	98

5.14	Performances Geometry-free dans la détection de sauts simultanés d'un cycle - seuil relatif	99
5.15	Performances de la Geometry-free dans la détection de sauts simultanés d'amplitudes supérieures à 1 cycle	101
5.16	Performances de la Geometry-free dans la détection de sauts simultanés d'un ou plusieurs cycles - seuil absolu	103
5.17	Seuils pour la détection bi-fréquences de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes	104
5.18	Performances bi-fréquences pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes	104
5.19	Effet des variations ionosphériques - Halloween Storm (5 TECU / 30sec)	105
5.20	Performances réelles pour la détection de sauts simultanés de mêmes amplitudes (de 1 à 5 cycles)	107
6.1	Combinaison Simsky différenciée $[m]$	121
6.2	Influence du plus petit saut sur la combinaison de Simsky $[m]$	121
6.3	Performances de la QT Simsky différenciée dans la détection d'un saut d'un cycle	122
6.4	Performances de la QT Simsky différenciée dans la détection d'un saut d'un cycle	124
6.5	Performances tri-fréquences pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes : Etape 1	125
6.6	Combinaison Simsky brute $[m]$	125
6.7	Performances de la QT Simsky brute dans la détection d'un saut d'un cycle	126
6.8	Seuils utilisés pour la détection tri-fréquence de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes	126
6.9	Performances tri-fréquence pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes	127
6.10	Sauts isolés d'un cycle	127
6.11	Sauts simultanés d'amplitudes différentes	133
6.12	Combinaisons GF possibles en détection tri-fréquence	135
6.13	Choix des combinaisons GF utilisées en détection tri-fréquence	137
6.14	Performances tri-fréquences pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes	138
6.15	Sauts simultanés de mêmes amplitudes (de 1 à 5 cycles)	140
7.1	Performances tri-fréquences pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes	146
7.2	Combinaisons et seuils utilisés dans la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes dans la méthode de détection quadri-fréquence	147
7.3	Performances quadri-fréquences théoriques pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes	147
7.4	Sauts isolés d'un cycle	148
7.5	Sauts simultanés d'amplitudes différentes	149
7.6	Choix des combinaisons et des seuils GF utilisés pour la détection quadri-fréquence	150
7.7	Performances quadri-fréquences pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes	151

7.8	Sauts simultanés de mêmes amplitudes (de 1 à 5 cycles)	151
C.1	Validation : DOY 6 à DOY 32	185
C.2	Validation : DOY 175 à DOY 200	186

Chapitre 1

Global Navigation Satellite System

1.1 Du militaire au *smartphone*

Dès la fin des années 1950, les premières techniques de positionnement par satellites virent le jour avec le développement du système militaire Transit. Le positionnement par satellites, tel qu'on le connaît aujourd'hui à une échelle globale, est apparu au cours des années 1980, suite à une course à l'espace entre les Américains et les Russes. Dans ce contexte de Guerre Froide, des coordonnées de haute précision étaient requises pour un meilleur guidage de missiles de longue portée, ce que ne pouvaient offrir les précédents systèmes de positionnement. En effet, pour atteindre un point d'impact précis, il était nécessaire de connaître la position précise du lanceur, ce qui n'était pas évident, à l'époque, lorsque le missile était lancé d'un sous-marin par exemple.

Le système américain (GPS, *Global Positioning System*) fut opérationnel le premier, causant le déclin du programme russe jusqu'à la reprise de son financement, début des années 2000.

Le terme GNSS (*Global Navigation Satellite System*) désigne l'infrastructure permettant à un utilisateur de déterminer sa position, sa vitesse, et son temps local, à tout moment et tout endroit sur Terre, par le traitement de données provenant de satellites. Pour ce faire, il est nécessaire pour l'utilisateur de posséder un appareil compatible contenant un récepteur GNSS. Si GPS et Glonass sont les seuls GNSS totalement opérationnels à l'heure actuelle (et en cours de modernisation), d'autres constellations sont en cours de développement : Galileo (Europe), et Compass-Beidou (Chine). S'ajoutent à ces systèmes globaux des systèmes locaux, comme QZSS pour le Japon et IRNSS pour l'Inde, et des systèmes d'augmentation (SBAS, *Satellite-Based Augmentation Systems*), dont le but est d'améliorer localement la couverture satellitaire : EGNOS (Europe), WAAS (Amérique du Nord), et MSAS (Japon).

A l'origine établi dans un but militaire, le positionnement par satellite s'est depuis lors étendu au grand public : ce n'est pas moins de 4 milliards d'appareils avec récepteurs GNSS qui sont aujourd'hui utilisés à travers le monde, dont les trois quarts sont des *smartphones*. Il est également intéressant de voir que cette croissance concerne toutes les régions du globe [European Global Navigation Satellite Systems Agency, 2015].

Le marché du GNSS couvre aujourd'hui des domaines extrêmement variés. Le plus évident

est sans doute celui des **services de localisation** classiques (navigation, réseaux sociaux, cartographie et SIG, services d'urgence, etc.). Avec le domaine du **transport routier**, ils totalisent plus de 90% des parts du marché GNSS. Dans ce domaine du transport routier, on retrouve, en plus de la traditionnelle navigation, des applications telles que la gestion du trafic¹, ou encore le suivi du transport des biens dangereux. Notons également le développement croissant de véhicules autonomes, pour lesquels le récepteur GNSS est souvent utilisé en hybridation avec d'autres capteurs afin de permettre une navigation précise et en toute sécurité². A côté de cela, le domaine de l'**aviation** utilise également des données GNSS, principalement en tant qu'aide à la navigation (aussi bien en vol qu'aux abords des aéroports), ainsi que dans les dispositifs émetteurs de localisation en cas d'urgence. Les signaux GNSS ouvrent également de nouvelles possibilités dans le domaine du **rail**, quant à la gestion et au contrôle du trafic ferroviaire³. Dans le domaine **maritime**, on retrouve des applications GNSS aussi bien pour la navigation que pour le positionnement, en mer comme au sein des voies navigables : gestion du trafic, contrôle accru des bateaux de pêche en zones protégées, aide aux opérations portuaires, etc. Le domaine de l'**agriculture** de précision regorge lui aussi d'applications GNSS : guidage de machines, semis automatique, ou encore monitoring de champs, de la biomasse, et de l'état des sols⁴. Les **études topographiques** (cadastre, construction) sont également de grandes consommatrices de données GNSS. Enfin, le domaine de la mesure du temps et de la **synchronisation** utilise désormais les GNSS pour leurs horloges atomiques très précises. Par exemple, les banques utilisent le temps GNSS pour dater et synchroniser leurs transactions financières. Le domaine de la finance est loin d'être le seul concerné : le temps précis fourni par le GNSS est également utilisé dans le domaine de l'énergie.

Les applications GNSS concernent donc aussi bien le marché de masse que le professionnel. Selon l'objectif poursuivi, différentes techniques de positionnement de traitements des données brutes peuvent être mises en place. En effet, des applications de *Search and Rescue* n'auront pas les mêmes exigences que celles de navigation de véhicule.

1.2 Principe du positionnement par satellite

Le principe du positionnement par satellite est le suivant : mesurer le temps de propagation d'une onde électromagnétique entre un satellite émetteur, de position connue, et un récepteur, dont on cherche à déterminer la position (FIGURE 1.1) . Connaissant la vitesse de propagation de l'onde, en l'absence d'erreurs de synchronisation et en suppo-

1. Par exemple, le projet wallon UrbanZen utilise les données de positions provenant de récepteurs GNSS de poids lourds, afin de déterminer la congestion des axes urbains et de proposer à ses utilisateurs contribuant particulièrement à cet encombrement des itinéraires alternatifs en accord avec les plans de mobilité fournis par les autorités.

2. Par exemple, dans le projet européen TaxiSAT, le module de localisation comprend un récepteur GPS/EGNOS et des capteurs EDAS, INS, et Video. Une sécurité anti-collision est également mise en place, à l'aide de scanners lasers et de capteurs ultrasons.

3. Un des 5 programmes d'innovation proposés par le Master Plan européen Shift2Rail comprend l'intégration du GNSS aux techniques de positionnement actuelles des trains, afin d'améliorer la précision de celles-ci, et de réduire les coûts annexes liés aux infrastructures actuelles. Le projet wallon INOGRAMS s'inscrit d'ailleurs dans cette perspective.

4. Par exemple, le projet européen MISTRAL a pour but de mesurer l'humidité du sol par réflectométrie GNSS, à l'aide de récepteurs Galileo embarqués sur un drone.

sant que les signaux électromagnétiques émis par les satellites se propagent dans le vide en l'absence de toute réflexion parasite, la distance entre le satellite et le récepteur est déterminée (Eq (1.1)).

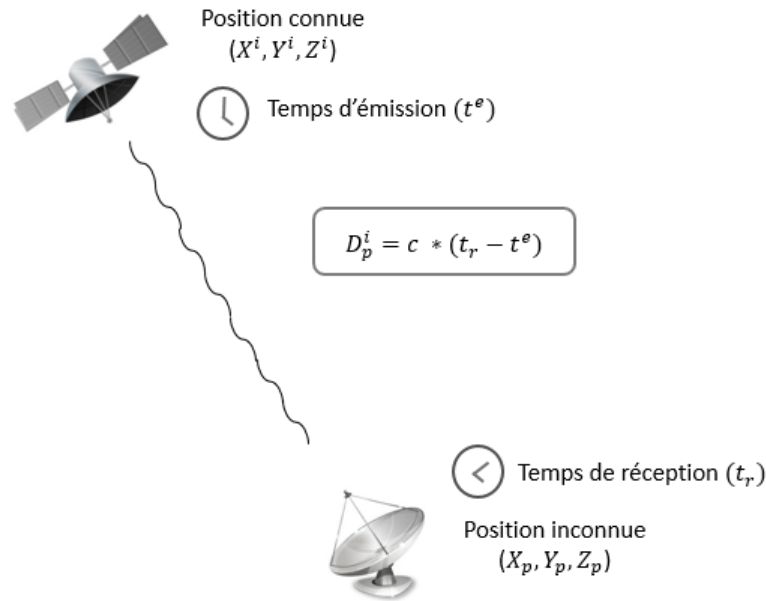


FIGURE 1.1 – Principe du positionnement par satellites

$$c * (t_r - t^e) = D_p^i = \sqrt{(X_p - X^i)^2 + (Y_p - Y^i)^2 + (Z_p - Z^i)^2} \quad (1.1)$$

1.2.1 Le signal GNSS

Le signal GNSS possède plusieurs composantes : le *ranging code*, le message de navigation, et la fréquence porteuse (FIGURE 1.2). Elles définissent les différentes couches du modèle d'émission du signal, à savoir respectivement la couche *ranging code*, la couche *data-link*, et la couche physique.

Le *ranging code* correspond à une suite d'états logiques 0 ou 1 (aussi appelés *chips*), se succédant selon un ordre et un intervalle de temps bien définis. Chaque code est également caractérisé par une fréquence et une période propre.

A titre d'exemple, GPS proposait à l'origine deux types de codes. Le code GPS C/A (*Coarse/Acquisition*, disponible en *open service*), correspond à une succession de 1023 chips, répétée toutes les millisecondes (fréquence de 1.023 MHz). En comparaison, le code GPS P (dit *de précision*), lui aussi non-classifié, est de 6.1871×10^{12} chips et n'est répété que toutes les semaines (fréquence de 10.23 MHz).

Le code P transmis par chacun des satellites est différent et n'est en réalité qu'une portion du *master code* P dont la longueur est d'environ 2.35×10^{14} chips. Par la suite, le code P fut également proposé en version cryptée (nommée P(Y)), par modulation avec un code W, de composition inconnue. Cela permet de fournir à des clients autorisés un code de précision protégé d'éventuelles interférences malicieuses (propriété d'*anti-spoofing*).

Avec la modernisation du système GPS, un nouveau code a vu le jour et s'est ajouté à

ses deux prédécesseurs : le code M (militaire). Son but est d'améliorer la résistance au *jamming* et ainsi en sécuriser son accès. Contrairement au code crypté P(Y), le code M est directement accessible au positionnement, grâce à ses algorithmes de cryptage améliorés. Enfin, il peut être transmis à plus haute puissance que les autres codes.

Le message de navigation, quant à lui, contient les paramètres d'orbite du satellite, le modèle de la dérive d'horloge de ce dernier, et enfin une information sur la santé du satellite.

La fréquence porteuse ne servait à l'origine, comme son nom l'indique, qu'à transporter le code et le message de navigation du satellite au récepteur, par modulation de phase. Actuellement, les porteuses ne servent plus uniquement de support à l'information mais sont également utilisées pour déterminer la distance satellite-récepteur, permettant un positionnement de meilleure précision qu'avec les codes uniquement.

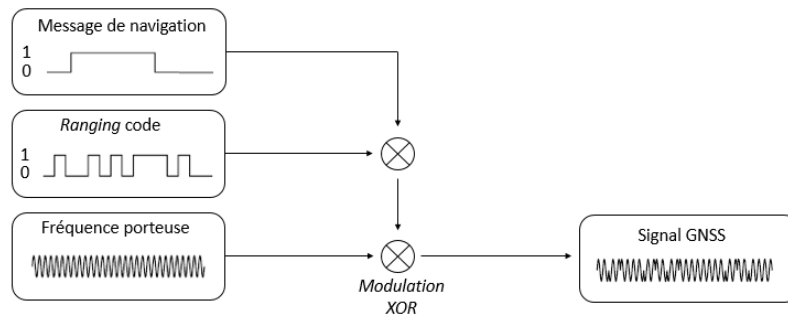


FIGURE 1.2 – Le signal GNSS

1.2.2 Mesure du temps de parcours

La mesure du temps de parcours entre le satellite et le récepteur peut s'effectuer via des mesures de codes ou de phases. Elle se base sur la comparaison du signal reçu avec une réplique de celui-ci, générée par le récepteur.

La mesure de code correspond au *décalage* entre le code émis par le satellite, reçu par le récepteur, et la réplique de ce code générée par ce récepteur. La mesure de phase, quant à elle, correspond au *déphasage* entre la porteuse émise par le satellite, reçue par le récepteur, et la réplique de cette porteuse (en phase avec le satellite, voir SECTION 1.7.1).

Deux horloges différentes sont impliquées dans la mesure du temps de parcours : celle du satellite, et celle du récepteur. Si ces deux horloges se réfèrent toutes deux à l'échelle de temps du GNSS concerné, il est physiquement impossible qu'elles soient en parfaite synchronisation, aussi bien avec l'horloge de référence qu'entre elles. C'est ce que l'on appelle l'erreur d'horloge.

La dérive de l'horloge du satellite, par rapport au temps de référence du GNSS concerné, est modélisée par les stations de référence terrestres (voir SECTION 1.2.3) et transmise aux utilisateurs via le message de navigation. Par contre, l'erreur d'horloge du récepteur reste une inconnue à part entière du problème à résoudre.

Avec les coordonnées 3D du récepteur, le système d'équations à résoudre totalise quatre

inconnues. Il est donc nécessaire pour un utilisateur d'observer au minimum quatre satellites simultanément afin de déterminer sa position absolue.

1.2.3 Les segments GNSS

Chaque GNSS est composé de trois segments : le segment spatial, le segment terrestre, et le segment utilisateur.

Le segment spatial est constitué des satellites en orbite.

Le segment terrestre est constitué de stations au sol dites *de contrôle*. La mission de celles-ci est triple : contrôler le bon fonctionnement des satellites, maintenir l'échelle de temps propre au GNSS, et enfin, calculer l'orbite et la dérive de l'horloge de chaque satellite. La communication entre ces stations et les satellites est bi-directionnelle, puisque, après analyse des signaux reçus, la station envoie le résultat de ses actions de contrôle aux satellites. Ces éléments seront à leur tour transférés aux utilisateurs par les satellites, via le message de navigation.

Le segment utilisateur est constitué des récepteurs GNSS. Ceux-ci sont capables d'interpréter les signaux reçus afin de déterminer leur position, mais n'envoient aucune information aux satellites. Ils sont qualifiés de *passifs*. Il existe quantité de types de récepteurs, différant selon les mesures qu'ils sont capables d'effectuer.

1.3 Sources d'erreurs

Si, jusqu'ici, nous avons considéré qu'il suffisait de multiplier le temps de parcours mesuré par c , la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide, pour obtenir la distance géométrique entre le satellite et le récepteur, la réalité est plus complexe. En effet, le signal est affecté par différentes erreurs, dues d'une part aux émetteurs et au récepteurs, et d'autre part au trajet de l'onde entre ceux-ci. Pour cette raison, la mesure n'est pas appelée *distance* mais est qualifiée de *pseudo-distance*.

Une partie des erreurs systématiques peut être réduite, voire éliminée, par l'utilisation de combinaisons d'observables. Certaines de ces combinaisons seront détaillées dans les chapitres suivants.

1.3.1 Les erreurs atmosphériques

Comme toute onde électromagnétique, les ondes radios sont perturbées lors du passage au travers de milieux de densités différentes. Dans le cas des signaux GNSS, il s'agira des différentes couches l'atmosphère. Celles-ci affecteront la direction et la vitesse de propagation des signaux, ainsi que leur amplitude. Ces effets seront d'autant plus importants que la couche traversée sera épaisse. L'élévation jouera donc un rôle clé dans cette détérioration du signal, puisque plus le satellite sera bas sur l'horizon, plus la distance parcourue dans l'atmosphère, et par conséquent la perturbation en résultant, seront grandes. Pour cette raison, il sera nécessaire d'appliquer un facteur d'obliquité.

Concrètement, la modification de la direction de propagation des signaux sera jugée négligeable en dessous de 15° d'élévation. Au niveau de l'amplitude du signal, plus celle-ci

sera diminuée, et plus la part de bruit dans le signal sera importante. L'effet principal réside dans la modification de la vitesse de propagation.

On distingue deux types de milieux : les milieux dispersifs et non-dispersifs. Dans les milieux dispersifs, comme l'ionosphère, la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dépendra de sa fréquence (et donc de sa longueur d'onde). Au contraire, dans les milieux non-dispersifs, comme la neutrosphère, toutes les ondes se déplaceront à même vitesse, quelle que soit la fréquence. Les délais engendrés par l'atmosphère seront donc dispersifs ou non-dispersifs, selon la couche concernée.

Ionosphère

L'ionosphère désigne la couche supérieure de l'atmosphère. Elle se situe entre 50 et 1000 kilomètres au dessus de la surface terrestre. Contrairement aux couches inférieures, l'ionosphère est caractérisée par la présence d'électrons libres en quantité suffisante pour affecter la propagation des ondes radios. Le *Total Electron Content* (TEC) est le principal paramètre permettant de quantifier l'influence de l'ionosphère sur les signaux GNSS. Il s'agit de l'intégrale de la densité d'électrons libres sur le chemin satellite-récepteur.

La quantité d'électrons libres présents dans l'ionosphère est fortement variable dans l'espace et dans le temps car elle dépend de nombreux paramètres : activité solaire, activité géomagnétique, latitude, heure de la journée, saison,... Elle est donc très difficile à modéliser.

Temporellement, l'activité solaire est caractérisée par plusieurs cycles superposés : un cycle d'environ 11 ans et un cycle de 27 jours (correspondant à la période de rotation du soleil sur lui-même). Le TEC subit également des variations saisonnières et journalières essentiellement dues à l'ensoleillement.

Géographiquement, l'activité ionosphérique varie en fonction de la latitude géomagnétique. On distingue trois régions : les régions polaires, où le TEC est faible mais très sensible aux variations géomagnétiques (les particules chargées issues de vent solaire entrant préférentiellement par les pôles), les régions de latitude moyenne, où l'ionosphère est moins variable, et la région équatoriale, où l'on observe les valeurs et les gradients de TEC les plus élevés. Localement, on observe des phénomènes tels que les scintillations ionosphériques, des *Travelling Ionospheric Disturbances* (TIDs), ou encore du bruit ionosphérique [Wautelet, 2013]. Ces phénomènes peuvent être présents à toutes latitudes.

En plus de ces tendances globales, des perturbations événementielles affectent l'ionosphère. Ainsi, les éruptions solaires, si elles sont dirigées vers la Terre, peuvent engendrer de fortes perturbations. L'exemple le plus célèbre est sans doute celui de l'*Halloween Storm* (octobre 2003). Une éruption solaire a perturbé le champ magnétique terrestre avec une telle intensité que le service d'augmentation américain WAAS fut hors tolérance pendant plus de 11 heures, rendant par exemple impossible l'aide à l'atterrissage des avions [GPS World Staff, 2013].

Le délai ionosphérique I est fonction du TEC ainsi que de la fréquence de la porteuse (milieu dispersif). Tenant compte des hautes fréquences utilisées par les GNSS et, partant, négligeant les termes dépendant de f^{-3} et f^{-4} , le délai ionosphérique engen-

dré sur une fréquence porteuse particulière peut être approché par la formule suivante [Hofmann-Wellenhof et al., 2008] :

$$I \approx \frac{40.3 TEC}{f^2} \quad (1.2)$$

Où

I correspond au délai ionosphérique, exprimé en mètres, sur une fréquence particulière f est la fréquence porteuse concernée, exprimée en Hertz

Il existe plusieurs modèles ionosphériques permettant de prédire la valeur de l'erreur ionosphérique I . Le plus connu est le modèle empirique de Klobuchar (1986), le modèle de correction ionosphérique de Galileo. Plus récemment, le modèle de correction ionosphérique NeQuick, a vu le jour. Il est utilisé par le système de navigation européen, Galileo. La modélisation se heurte cependant à plusieurs limitations.

Le meilleur des modèles n'est pas en mesure de corriger parfaitement les variations ionosphériques lors d'évènements météorologiques spatiaux extrêmes.

Il est également intéressant de remarquer que l'ionosphère a un effet de sens opposé sur la propagation des codes et des porteuses : elle ralentit la propagation des codes mais accélère celle des porteuses. Le délai ionosphérique a cependant la même valeur absolue.

Enfin, puisque l'ionosphère affecte la transmission des signaux GNSS, il est, à l'inverse, possible d'utiliser ces signaux pour observer l'activité ionosphérique (voir combinaison de phase *geometry-free* SECTION 4.2.3).

Neutrosphère

La couche d'atmosphère neutre regroupe la troposphère, la tropopause, et la stratosphère [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]. La troposphère est la principale contributrice à l'effet neutrosphérique, d'où l'abus de langage entre effet *troposphérique* et *neutrosphérique*.

Comme l'ionosphère, la neutrosphère affecte principalement la vitesse de propagation des signaux GNSS. La valeur du délai engendré dépend de plusieurs facteurs : le profil en altitude de la pression atmosphérique (composante sèche), de la température et de la pression partielle en vapeur d'eau (composante humide). La détermination systématique et opérationnelle de ces paramètres sur l'ensemble du trajet parcouru par l'onde dans l'atmosphère neutre n'est pas réalisable. Les modèles de corrections s'inspireront donc soit des valeurs au sol interpolées, soit de représentations empiriques de la réfractivité. Si la composante sèche est relativement bien évaluée par les modèles de correction, la composante humide est elle particulièrement sujette à des variations imprévisibles (orages violents, fortes précipitations). Sa modélisation sera donc délicate.

Le milieu n'étant pas dispersif, les signaux GNSS seront affectés par des délais neutrosphériques similaires, quelles que soient la fréquence porteuse ou l'observable concernée.

1.3.2 Le multi-trajet

On parle de multi-trajet lorsqu'un récepteur reçoit, en plus du signal direct provenant d'un satellite donné, un ou plusieurs signaux réfléchis provenant d'un même satellite (FIGURE 1.3). Ces signaux indirects peuvent avoir été réfléchis par différentes surfaces (sol, mur, objet, ...). La trajectoire de l'onde réfléchie entre le récepteur et le satellite étant indirecte, le temps de parcours de ce signal sera supérieur. Il arrivera donc avec un certain retard au récepteur et interférera sur le signal initial.

Cet effet est également spécifique aux géométries du lieu d'observation et des satellites par rapport à l'utilisateur. Premièrement, le multi-trajet dépendra de l'environnement du récepteur (situation des surfaces réfléchissantes aux alentours de celui-ci). Deuxièmement, il est évident que plus l'élévation du satellite sera faible, plus les signaux seront sujets à des réflexions parasites. Enfin, si le multi-trajet est souvent considéré comme limité aux abords du récepteur, le signal peut aussi être réfléchi par le satellite lors de son émission.

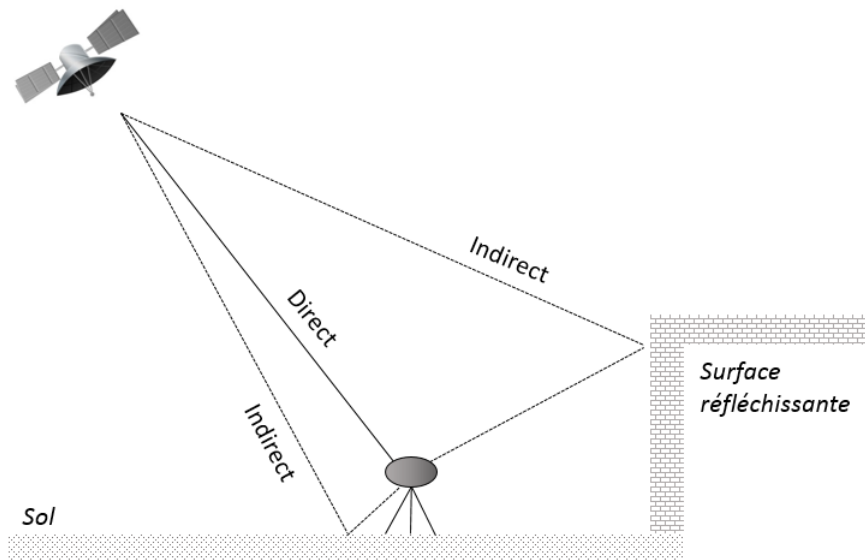


FIGURE 1.3 – Le multi-trajet

Si le multi-trajet est difficile à corriger, il existe cependant des méthodes permettant de limiter celui-ci [Warnant, 2014]. Premièrement, au niveau du choix du site, il convient d'éviter les surfaces et objets réfléchissants. Deuxièmement, l'utilisation d'antennes au design adapté, telles que les antennes choke-ring employées à la station d'observation GNSS ULG0⁵, permet de réduire l'influence du multi-trajet. Troisièmement, certains récepteurs emploient des méthodes de traitement du signal particulières afin de limiter, voire d'éliminer, une partie de ces effets. Enfin, il est également possible d'utiliser des méthodes d'acquisition permettant de mettre en évidence d'éventuels multi-trajets (longue durée d'observation, corrélation entre jours successifs) ainsi que des combinaisons d'observables pouvant l'estimer, voire le réduire.

5. Située sur le toit du bâtiment B5 (Université de Liège) au Sart Tilman.

1.3.3 Erreurs dues aux émetteurs ou récepteurs

Les erreurs d'horloge

Les horloges, qu'elles soient du satellite ou du récepteur, présentent toutes deux un décalage par rapport au temps de référence du GNSS concerné (voir SECTION 1.2.2).

Les délais *hardware*

Les délais *hardware* sont engendrés par le passage du signal à travers les circuits physiques des chaînes d'émission et de réception. Dans les deux cas, sont concernés le câble reliant l'antenne à l'émetteur (resp. récepteur), ainsi que le parcours au sein même de l'émetteur (resp. récepteur). Les délais *hardware* diffèrent selon la fréquence ainsi que l'observable considérée.

1.3.4 Le bruit

Enfin, le signal GNSS est affecté par un facteur bruit, principalement dû au trajet satellite-récepteur et au parcours du signal à l'intérieur du récepteur. Le bruit sur les mesures de codes est plus élevé que celui sur les mesures de phases. Il diffère également selon la constellation, la fréquence porteuse, ainsi que selon la méthode de modulation utilisée [Caelen, 2014].

1.4 Modèle mathématique

Après avoir abordé les différentes sources d'erreurs et de délais, il nous est possible de construire le modèle mathématique des deux observables de bases. Comme nous l'avons vu précédemment, les GNSS fournissent différents types d'observables : les mesures de codes et les mesures de phases. Une troisième observable est parfois considérée. Il s'agit du décalage Doppler.

Les indices suivants seront utilisés dans la suite du travail :

- i fait référence au satellite
- p fait référence au récepteur
- f_k fait référence à une fréquence porteuse particulière
- m fait référence à la mesure de code
- φ fait référence à la mesure de phase

1.4.1 Mesures de codes

Tenant compte des différentes sources d'erreurs abordées dans le paragraphe précédent, les mesures de pseudo-distances effectuées grâce aux codes peuvent être modélisées de la manière suivante [Hofmann-Wellenhof et al., 2008] :

$$P_p^i = D_p^i + T_p^i + I_{p,f_k}^i + M_{p,f_k,m}^i + c\Delta t^i(t^e) - c\Delta t_p(t_r) + \Delta t_{p,f_k,m} + \Delta t_{f_k,m}^i + \varepsilon_{p,f_k,m}^i \quad (1.3)$$

où

P_p^i	est la mesure brute de code
D_p^i	est la distance géométrique entre satellite et récepteur
T_p^i	est l'erreur troposphérique
I_{p,f_k}^i	est l'erreur ionosphérique
$M_{p,f_k,m}^i$	est l'erreur due au multi-trajet
$c\Delta t^i(t^e)$	est l'erreur d'horloge du satellite au temps d'émission
$c\Delta t_p(t_r)$	est l'erreur d'horloge du récepteur au temps de réception
$\Delta t_{p,f_k,m}$	est l'erreur due au délai hardware du récepteur (code)
$\Delta t_{f_k,m}^i$	est l'erreur due au délai hardware du satellite (code)
$\varepsilon_{p,f_k,m}^i$	est l'ensemble du bruit présent sur le signal à la sortie du récepteur

1.4.2 Mesures de phases

Les mesures de pseudo-distances effectuées grâce aux porteuses (mesures de phases) peuvent être modélisées comme suit [Hofmann-Wellenhof et al., 2008] :

$$\Phi_p^i = D_p^i + T_p^i - I_{p,f_k}^i + M_{p,f_k,\varphi}^i + \lambda N_{p,f_k}^i + c\Delta t^i(t^e) - c\Delta t_p(t_r) + \Delta t_{p,f_k,\varphi} + \Delta t_{f_k,\varphi}^i + \varepsilon_{p,f_k,\varphi}^i \quad (1.4)$$

où

$M_{p,f_k,\varphi}^i$	est l'erreur due au multi-trajet
$\lambda N_{p,f_k}^i$	est l'ambiguïté initiale (voir SECTION 1.7.1)
$\Delta t_{p,f_k,\varphi}$	est l'erreur due au délai hardware du récepteur (phase)
$\Delta t_{f_k,\varphi}^i$	est l'erreur due au délai hardware du satellite (phase)
$\varepsilon_{p,f_k,\varphi}^i$	est l'ensemble du bruit présent sur le signal à la sortie du récepteur

1.5 Les différentes méthodes de positionnement

Comme mentionné précédemment, le positionnement utilisait à l'origine uniquement la mesure de code. De nos jours, la mesure de phase est également exploitée, particulièrement dans le cadre d'applications nécessitant une grande précision. Si la mesure de phase présente un avantage considérable en terme de précision (millimétrique contre une précision centimétrique des codes), son utilisation nécessite de résoudre l'ambiguïté initiale. De plus, la mesure de phase est sujette aux sauts de cycles (SECTION 1.7). Ces deux types de mesures peuvent également être utilisés en combinaison.

En plus du choix des observables utilisées, les méthodes de positionnement peuvent se différencier de par leur dépendance ou non à un autre récepteur (ou réseau), par la mobilité ou non du récepteur, ou encore par l'instantanéité du traitement des données ou non.

1.5.1 Le positionnement absolu, différentiel, et relatif

Le positionnement est dit absolu lorsque le récepteur agit seul pour déterminer sa propre position.

Il est dit différentiel lorsque le récepteur utilise des informations provenant de station(s) de référence proche(s) de lui afin de corriger ses propres mesures et d'obtenir une position de meilleure qualité. Plus la station de référence sera proche du récepteur itinérant, plus le parcours des signaux au travers des couches atmosphériques sera semblable, et donc meilleure sera la correction différentielle. Il est ainsi possible s'affranchir d'une partie des erreurs dues au passage au travers de l'ionosphère et de la troposphère. De plus, les erreurs d'orbites ainsi que l'erreur d'horloge du satellite seront elles aussi éliminées. Ce type de positionnement est utilisé par le *Differential GPS* (DGPS), pour les mesures de codes, ou du *Real Time Kinematic* (RTK), pour les mesures de codes et de phases.

Enfin, le positionnement est relatif lorsque des données provenant d'un second récepteur, de coordonnées connues, sont utilisées par le récepteur principal en combinaison avec ses propres données : à partir des signaux provenant d'un même satellite et observés simultanément aux deux stations, une simple différence peut être effectuée, permettant de s'affranchir de la partie commune des erreurs atmosphériques, des erreurs d'orbites, ainsi que de l'erreur d'horloge du satellite. Si ces stations observent simultanément deux satellites communs, une double différence, différence de deux simples différences, est calculée. Cette dernière permet, en plus des erreurs déjà éliminées dans la simple différence, de s'affranchir des erreurs d'horloges des récepteurs. Enfin, une triple différence, temporelle, peut également être effectuée. Elle est utilisée dans certaines méthodes de détection des sauts de cycles puisqu'elle élimine le terme d'ambiguïté initiale (CHAPITRE 4). La distance séparant les deux récepteurs est appelée ligne de base. C'est cette dernière qui est mesurée, et qui permettra de déterminer les coordonnées du récepteur de position inconnue.

1.5.2 Le positionnement statique et cinématique

Le positionnement est dit statique si l'antenne de réception est immobile. C'est par exemple le cas des stations de références, telles qu'ULG0. Si l'utilisateur et son récepteur sont en mouvement, on parlera de positionnement cinématique. Le cas typique est celui du GPS de voiture.

Combinées au positionnement relatif, les méthodes cinématiques sont souvent utilisées par les géomètres pour leur précision [Warnant, 2014].

1.5.3 Le positionnement en temps réel et en post-traitement

Le positionnement en temps réel utilise les données obtenues aux époques précédentes ainsi que les données de l'époque d'observation courante afin de déterminer la position de l'observateur. Le post-traitement permet au contraire de se baser sur l'ensemble des

données enregistrées et de bénéficier de corrections supplémentaires. Cela s'avérera particulièrement utile dans la détection des sauts de cycles (CHAPITRE 4).

1.6 Les différents GNSS, signaux, et services

1.6.1 Les systèmes globaux

Il existe à l'heure actuelle quatre systèmes de positionnement par satellites globaux. Le système américain GPS et le russe GLONASS sont totalement opérationnels et en cours de modernisation. Plus récemment, le système européen Galileo et le chinois Compass-Beidou ont vu le jour. Ils sont encore en phase de déploiement et leurs constellations totales respectives sont toutes deux prévues pour 2020.

Ce travail sera principalement orienté sur Galileo et proposera quelques comparaisons avec GPS. Les constellations Glonass et Beidou seront donc peu détaillées dans cette section.

GPS

GPS, le système de positionnement américain, est officiellement considéré comme opérationnel depuis 1995. Si le premier satellite de test a été lancé en 1978, il a fallu attendre 1989 pour le lancement des satellites totalement opérationnels. A la base développé dans un but militaire, le président américain Ronald Reagan décida qu'un service civil GPS serait proposé à l'échelle mondiale suite à l'incident du Korean Airlines Flight 007 (1983)⁶. GPS propose donc aujourd'hui deux types de services : le Standard Positioning Service (SPS), accessible à tous, et le Precise Positioning Service (PPS), réservé aux utilisateurs autorisés (Forces armées US, agences fédérales US, ainsi que certains gouvernements et forces alliées).

Émettant à l'origine sur deux fréquences porteuses L1 (1575.42 MHz) et L2 (1227.60 MHz), une troisième fréquence porteuse fut proposée lors de la modernisation du système. Depuis le block IIF, dont le premier satellite fut lancé en Mai 2010, GPS émet sur L5 (1176.45 MHz). Il existe actuellement 9 satellites IIF en orbite, et 3 autres sont prévus d'ici janvier 2016.

La TABLE 1.1 reprend les fréquences porteuses utilisées par GPS ainsi que la précision (*Root Mean Square*, soit 1σ) des mesures de codes et de phases sur chacune de ses fréquences. Ces valeurs sont celles fournies par l'ESA en 2013 lors de l'*AGU Fall Meeting* [Springer and Schönemann, 2013]. Des informations complémentaires quant à la détermination de ces valeurs ainsi que la raison du choix de cette référence sont abordées dans le CHAPITRE 3.

6. Un vol joignant New York à Séoul dévia de sa route originale, pénétrant alors l'espace aérien soviétique interdit. Il fut abattu par un avion de chasse. Cet incident n'a fait que renforcer la tension entre les Etats Unis et la Russie durant la Guerre Froide.

	Fréquence [MHz]	Code RMS [mm]	Phase RMS [mm]
<i>L 1</i>	1 575.42	380	2.8
<i>L 2</i>	1 227.60	480	1.7
<i>L 5</i>	1 176.45	360	36

TABLE 1.1 – Précision des mesures GPS

Le segment spatial de GPS se compose de 31 satellites en *Medium Earth Orbit* (MEO, 20 200 km au dessus de la surface terrestre) presque circulaire. Parmi ces 31 satellites, 3 satellites du bloc IIA sont encore présents (dont le plus vieux fut lancé en 1990). Leur période de révolution est d'environ 12 heures sidérales. Ils sont répartis sur six plans orbitaux, chacun présentant une inclinaison de 55° avec l'équateur. Une même configuration satellitaire se représente tous les jours sidéraux.

Le segment de contrôle consiste en un ensemble de *master control stations*⁷, de stations de *monitoring*, et d'antennes. Les stations de *monitoring* récoltent les mesures des satellites de manière très précise et continue. Elles produisent des données lissées par intervalle de 15 secondes, et les fournissent à la *master control station*. Cette dernière est en charge du calcul des paramètres d'orbite et de la dérive d'horloge des satellites. Les antennes transmettent ensuite les paramètres calculés aux satellites, qui fourniront ces informations aux utilisateurs via le message de navigation.

Chaque GNSS est basé sur une échelle de temps différente. Le temps GPS est continu. Il a été synchronisé sur le temps *Universal Time Coordinated* (UTC) le 6 janvier 1980 et est maintenant en avance de 16 secondes sur celui-ci, puisqu'il n'intègre pas les secondes intercalaires. Le 30 juin 2015, une nouvelle seconde sera insérée à l'UTC, et le temps GPS passera donc à 17 secondes d'avance. L'ajout de secondes intercalaires est parfois mal supporté par certains récepteurs GNSS [Sampson, 2015], principalement parce qu'il est non-régulier et difficilement prévisible à long terme. Notons que, si le temps GPS présente un décalage non-constant par rapport au temps UTC, il est par contre décalé continuellement du *Temps Atomique International* (TAI) de 19 secondes.

Glonass

Comme mentionné précédemment, le système russe Glonass fut une première fois opérationnel en 1996. Il a ensuite été laissé à l'abandon pendant plusieurs années, par manque de financement. Le développement ne reprit qu'en 2002, pour arriver à une constellation opérationnelle en 2011. Le segment spatial se compose actuellement de 24 satellites en orbite MEO, répartis sur trois plans orbitaux inclinés de 64.8° par rapport à l'équateur. La période de révolution des satellites Glonass est d'environ 11h15, et l'ensemble de la constellation se répète tous les huit jours sidéraux. Comme GPS, le système de positionnement par satellite russe fut développé durant la Guerre Froide dans un but militaire, et a par la suite été étendu au domaine civil.

Glonass utilise un système de codage des transmissions différent des autres systèmes. GPS, Galileo, et Beidou utilisent la méthode *Code Division Multiple Access* (CDMA).

7. Une "officielle" et une de *backup*.

Dans ce cas, une portion différente d'un *Master Code* est assignée à chaque satellite. Le récepteur identifiera donc le satellite grâce au morceau de code qu'il transmet. La portion de code, quelle qu'elle soit, sera modulée sur la même fréquence porteuse pour tous les satellites. Au contraire, les signaux Glonass suivent le procédé *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), où chaque satellite utilise une fréquence porteuse légèrement différente mais où le code modulé est identique.

Glonass utilise deux groupes de fréquences porteuses : G1 ($1\,602\text{ MHz} + k*9/16$) et G2 ($1\,246\text{ MHz} + k*7/16$). Le facteur k est un nombre entier, spécifique au satellite utilisé. Il existe 12 canaux différents (de $k = -7$ à $k = 6$) : le placement de trois satellites sur une même orbite a permis de limiter le nombre de canaux, certains satellites ne pouvant jamais être visibles simultanément à partir de la surface terrestre. Par soucis d'interopérabilité, Glonass prévoit, pour ses futures générations de satellites, l'émission de nouveaux signaux CDMA en plus des signaux FDMA traditionnels. Pour l'instant, deux satellites lancés en 2014 (bloc M) émettent sur une fréquence de 1202.025 MHz en CDMA. Les prochains satellites du bloc M ainsi que du bloc K-1 continueront d'utiliser cette fréquence. Les satellites bloc K-2, en phase de conception, devraient émettre sur deux autres fréquences porteuses supplémentaires en CDMA.

La TABLE 1.2 reprend les fréquences porteuses utilisées par Glonass (FDMA) actuellement ainsi que la précision (*Root Mean Square*) des mesures de codes et de phases pour chacune de ces fréquences.

	Fréquence [MHz]	Code RMS [mm]	Phase RMS [mm]
<i>G 1</i>	$1\,602 + k*9/16$	520	2.8
<i>G 2</i>	$1\,246 + k*7/16$	590	1.7

TABLE 1.2 – Précision des mesures Glonass [Springer and Schönemann, 2013]

Galileo

Le système Galileo est le système de navigation européen. Il est non seulement financé par l'Europe, mais également par des pays étrangers, tels que la Corée du Sud ou encore Israël. De plus, des accords de coopération ont été établis avec les États Unis.

Phases de développement

Le développement de Galileo a été prévu selon quatre phases : les phases de définition, de développement, de déploiement, et enfin, la phase opérationnelle.

Durant la première phase, les caractéristiques et performances globales du système ont été définies.

Les satellites, les composants au sol, et les récepteurs-tests ont quant à eux été définis plus en détails durant la phase de développement. Deux satellites expérimentaux, Giove-A (2005) et Giove-B (2008), ne présentant qu'une partie des services Galileo, ont été mis en orbite afin d'effectuer de premiers tests⁸. Par la suite, quatre autres satellites IOV (*In*

8. Ils furent déclassés en 2012.

Orbit Validation) ont validé le système. Il a ainsi été possible de déterminer les premières positions Galileo en mars 2013.

La phase de déploiement consiste en la mise en orbite des satellites FOC (*Full Operational Capability*). Les deux premiers satellites ont été lancés en août 2014. Injectés sur une mauvaise orbite, ils ont pu être ramenés sur une orbite utilisable en décembre 2014 et mars 2015. Deux autres satellites ont suivi en mars 2015.

Enfin, la phase opérationnelle est attendue pour 2020, avec l'ensemble de la constellation de 27 satellites en orbite MEO.

Les signaux Galileo

Le signal Galileo est réparti sur cinq fréquences porteuses différentes : E1 (1 575.420 MHz), E5a (1 176.450 MHz), E5b (1 207.140 MHz), E5a+b (1 191.795 MHz, aussi appelée E5 ou *AltBOC*), et E6 (1 278.750 MHz).

Sur E5a, E5b, et E5a+b, le signal comprend deux composantes : l'une sera en phase (*I*) et l'autre en quadrature de phase (*Q*). Les fréquences E1 et E6 sont caractérisées par une troisième composante : *A* et *B* sont en phase et *C* est en quadrature de phase. Les composantes du signal en phase, appelées *data*, contiennent les codes ainsi que le message de navigation. Par contre, celles en quadrature de phase, appelées *pilot*, ne transportent que les codes. A l'exception de E1A et de E6A (toutes deux *data*, et correspondant au service PRS), à chaque *data* correspondra un *pilot* (FIGURE 1.4).

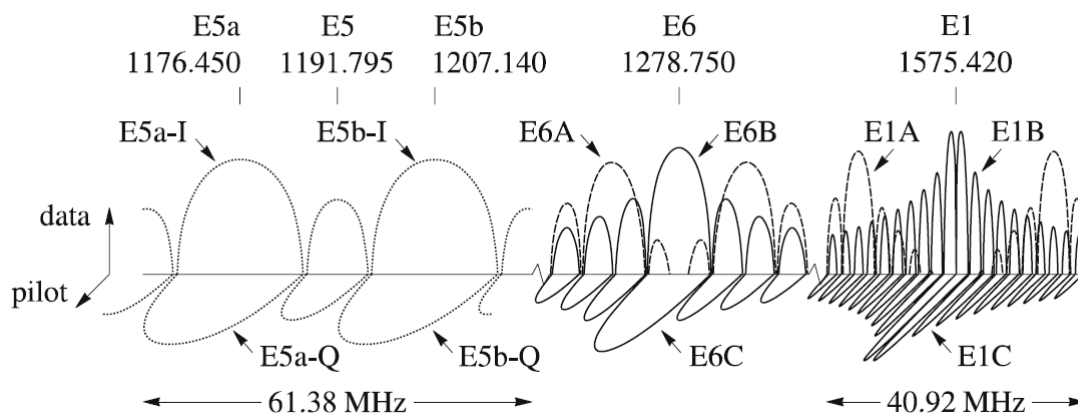


FIGURE 1.4 – Galileo : Densité spectrale (DSP) des signaux [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]

Les services proposés

Le système Galileo propose quatre services différents : l'*Open Service* (OS), le *Commercial Service* (CS), le *Safety of Life* (SoL), et le *Public Regulated Service* (PRS).

L'*Open Service* est, comme son nom le suggère, accessible par tous les utilisateurs. Etant gratuit, ce service ne fournit aucune certification ni garantie quant à son intégrité. Sa principale cible est le marché de masse. Un total de six signaux OS différents sont

modulés sur trois fréquences porteuses, offrant à Galileo un avantage considérable en comparaison avec les autres GNSS, ceux-ci ne proposant pas simultanément autant de signaux et de fréquences pour les usages civils.

Le *Commercial Service* est encore en cours de définition. Ce service étant payant, il devra présenter des avantages par rapport à l'OS qui pourront justifier son prix : par exemple, une garantie concernant la qualité du signal et sa disponibilité, ou encore une résistance accrue aux interférences et autres tentatives malicieuses de piratages. Une des pistes exploitées pour se différencier de l'OS serait de proposer des informations particulières dans les messages de navigation sur toutes les fréquences. Ces messages de navigation seraient cryptés, de manière à contrôler l'accès à l'information aux utilisateurs autorisés.

Le *Safety of Life Service* est semblable à l'OS, à la différence qu'il propose en plus des informations concernant l'intégrité du signal en temps réel. Non seulement ces informations seront insérées aux messages de navigation, mais des avertissements ponctuels concernant d'éventuelles failles du système seront également fournis aux utilisateurs. Ces indications s'avèreront particulièrement importantes lors d'opérations pour lesquelles précision et intégrité du signal sont cruciales. L'exemple des procédures d'approche et d'atterrissage d'avions en est une illustration. Le SoL a été particulièrement développé pour rencontrer les spécifications et demandes des domaines pour lesquels le positionnement relève d'un niveau de sécurité critique et s'intègre aux standards préexistants.

Le *Public Regulated Service* a été conçu pour les infrastructures stratégiques et de sécurité, dans des domaines tels que l'énergie, les télécommunications, ou encore la finance. L'idée est de fournir un service crypté, particulièrement robuste, et qui serait toujours utilisable en situation de crise, alors que les autres services seraient indisponibles ou sous dégradation volontaire.

En plus de proposer ses propres services, Galileo participe également au service *Search and Rescue* (SAR) humanitaire, en coordination avec la Russie, le Canada, et les États Unis. Ce système consiste en la capacité du satellite à pouvoir recevoir un signal d'urgence (procédure d'*uplink*), émis par un usager en détresse, et à la retransmission de cette information par satellite vers les stations SAR au sol (procédure de *downlink*), où elle sera relayée vers les autorités compétentes. Le SAR utilise des bandes de fréquences particulières : l'*uplink* occupe une bande allant de 406.0 à 406.1 MHz (bien inférieure aux fréquences GNSS traditionnelles) et le *downlink* est effectué entre les fréquences 1544.05 et 1545.15 MHz (même gamme que les GNSS⁹).

Les différents segments

Le segment spatial sera à terme composé de 27 satellites répartis sur trois plans orbitaux presque circulaires, inclinés à 56 ° par rapport à l'équateur. La révolution des satellites Galileo est d'environ 14 heures, et l'ensemble de la constellation se répète de manière identique tous les 10 jours.

Les infrastructures du segment terrestre peuvent être classées en deux groupes fonctionnels : le *Ground Control Segment* (GCS) et le *Ground Mission Segment* (GMS).

9. Cette bande est réservée et non assignée à des signaux GNSS classiques par l'ITU.

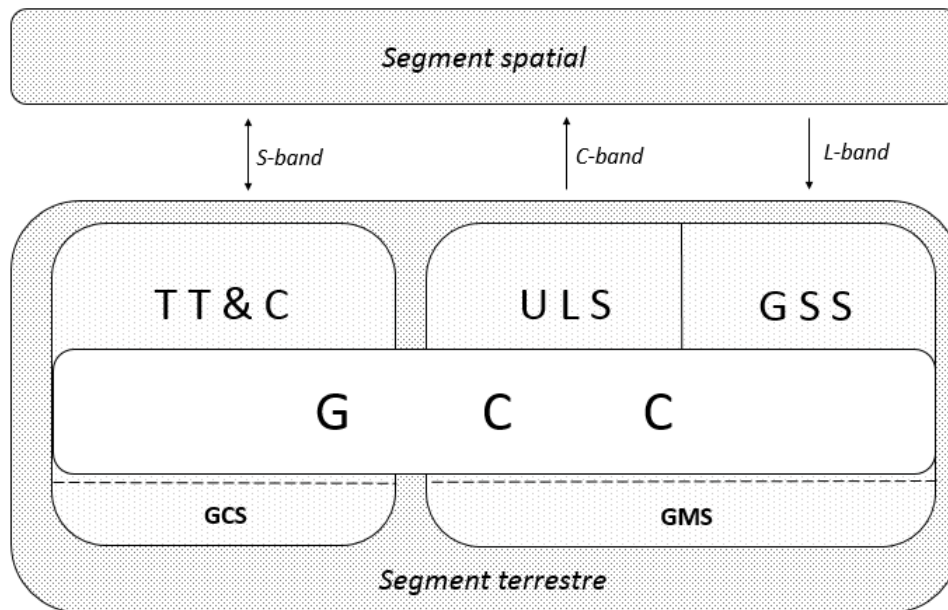


FIGURE 1.5 – Galileo : relation entre le segment spatial et le segment terrestre

Le GCS a pour objectif de contrôler et de commander la constellation. Un ensemble de cinq stations *Telemetry, Tracking & Control* (TT&C) sont en contact constant avec les satellites et sont dédiées à la surveillance de leurs positions. C'est par exemple le GCS qui prendra en charge d'éventuelles corrections de trajectoires si cela s'avère nécessaire.

Le GMS est responsable de l'observation des signaux et de la détermination du message de navigation à fournir aux utilisateurs, pour chacun des satellites. Pour ce faire, quarante *Galileo Sensor Stations* (GSS) observent de manière continue les satellites. Les paramètres d'orbite de ceux-ci ainsi que leur dérive d'horloge sont déterminés, et des modèles prédictifs sont établis. Les GSS analysent également l'état de santé de chacun des satellites. Ces trois composants des messages de navigation (paramètres d'orbite, dérive d'horloge, et santé des satellite) étant déterminés, ils seront alors communiqués aux satellites, via les *Mission Uplink Stations* (ULS, au nombre de 9). Enfin, les GSS sont également responsables de la détermination de l'intégrité des signaux.

En pratique, les GMS et GCS peuvent cohabiter au sein d'une même station. C'est le cas pour les deux *Ground Control Centers* (GCC), situés à Oberpfaffenhofen (Allemagne) et à Fucino (Italie). En réalité, une seule station GCC serait suffisante pour mener à bien la mission, la seconde fait office de *backup*. Les GCC sont en relation avec d'autres acteurs externes, tels que le centre SAR, ou encore le centre de sécurité PRS. Ils sont également en relation avec le segment spatial via les TT&C, ULS et GSS.

La FIGURE 1.5 reprend l'imbrication des différentes infrastructures de contrôle. La FIGURE 1.6 fournit quant à elle leur localisation.

Le *Galileo System Time* (GST) est similaire au temps GPS. Il est donc continu et sera également décalé du temps UTC de 17 secondes le 30 juin 2015.

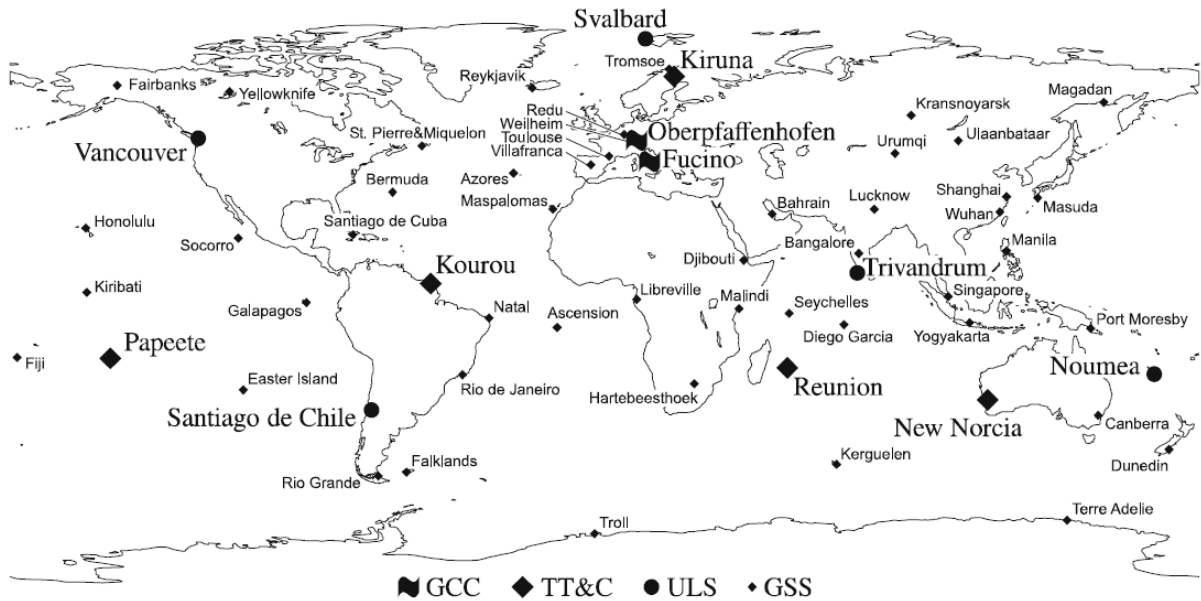


FIGURE 1.6 – Galileo : localisation des infrastructures de contrôle au sol
[Hofmann-Wellenhof et al., 2008]

Les avantages de Galileo sont nombreux. Les principaux sont le grand nombre de signaux et de services proposés, l'utilisation de la technique de modulation *AltBOC* pour les signaux sur E5a+b (permettant des mesures de meilleure précision que les modulations classiques, voir TABLE 1.3), et enfin la présence à bord des satellites des horloges atomiques les plus précises jamais embarquées.

	Fréquence [MHz]	Code RMS [mm]	Phase RMS [mm]
<i>E1</i>	1 575.420	360	3
<i>E5 a</i>	1 176.450	350	1.6
<i>E5 b</i>	1 207.140	340	1.6
<i>E5 a+b</i>	1 191.795	130	0.8

TABLE 1.3 – Précision des mesures Galileo [Springer and Schönemann, 2013]

Compass-Beidou

Le système Beidou proposera quatre types de services : un service ouvert, un service à l'accès restreint (sous autorisation), un service d'augmentation différentielle (dont la première mise en service est prévue pour fin 2015), et enfin un service de *short message*. Beidou est le premier système de navigation à proposer ce dernier service. Il fut particulièrement bien accueilli par les industries [China Satellite Navigation Office, 2015].

Compass-Beidou émet sur trois fréquences porteuses : B1 (1561.098 MHz), B2 (1207.140 MHz), et B3 (1268.520 MHz). La TABLE 1.4 reprend les fréquences porteuses utilisées par BeiDou (CDMA) ainsi que la précision (*Root Mean Square*) des mesures de codes et de phases pour chacune de ces fréquences.

	Fréquence [MHz]	Code RMS [mm]	Phase RMS [mm]
<i>B 1</i>	1 561.098	510	2.6
<i>B 2</i>	1 207.140	380	1.8
<i>B 3</i>	1 268.520	340	2

TABLE 1.4 – Précision des mesures Compass-Beidou

Le segment spatial de Beidou est différent des autres systèmes globaux. En effet, tous les satellites ne seront pas positionnés sur une orbite MEO : sur un total de 35 satellites, cinq seront placés sur une orbite géostationnaire (GEO), et 5 sur une orbite géosynchrone inclinée (IGSO).

Le segment terrestre est assez semblable à celui de GPS, puisque sont présentes des *Master Control Stations*, des stations de *monitoring*, et des stations d'*uplink*.

Compatibilité et interopérabilité

Le développement de plusieurs systèmes globaux indépendants a soulevé plusieurs questions. Tout d'abord, comment gérer la cohabitation de ces différents systèmes, utilisant tous des ondes radios dans une gamme de fréquences similaire (1-1.5 GHz), sans que ceux-ci se nuisent mutuellement ? Ensuite, comment pourrait-on tirer profit de la présence de ces multiples satellites, dont les spécificités varient selon la constellation associée, afin d'améliorer les services fournis aux utilisateurs ?

La première question fait appel à la notion de compatibilité entre les systèmes. L'ICG (*International Committee on GNSS*) définit la compatibilité comme étant la capacité des systèmes globaux, locaux, ou d'augmentation, à être utilisés, ensemble ou séparément, sans causer d'interférences inacceptables et/ou d'autres dommages à un système ou service individuel [International Committee on GNSS, 2015].

La seconde question concerne l'interopérabilité entre les systèmes, définie comme la capacité à utiliser ensemble les différents systèmes de navigation globaux, nationaux, d'augmentation, ainsi que les services fournis par ceux-ci, afin de fournir de meilleures performances à l'utilisateur que celles qui lui seraient fournies par un seul de ces systèmes [International Committee on GNSS, 2015].

Ces deux concepts ont parfois tendance à être confondus. Les mesures pour les mettre en œuvre peuvent pourtant être contradictoires.

Par exemple, du point de vue de la compatibilité, l'utilisation de bandes de fréquences se superposant entre les différents systèmes devrait être limitée, et une séparation spectrale claire devrait être mise en œuvre. Ces mesures permettraient de limiter d'éventuelles interférences entre les systèmes.

Au contraire, du point de vue de l'interopérabilité, la grande diversité de fréquences entre les différentes constellations rend le design du *RF Front End* difficile : dans la SECTION 1.7.1, nous verrons que, pour une meilleure efficacité, il est préférable de diviser le bloc fonctionnel du *RF Front-End* en plusieurs sous-circuits, gérant chacun une fréquence porteuse particulière. La largeur de bande passante de chacun de ces sous-circuits devrait

être limitée à celle des signaux modulés sur la fréquence concernée. Dans un récepteur multi-constellation, le nombre de fréquences différentes à considérer est bien supérieur à celui des traditionnels récepteurs mono-constellations. Le coût hardware du *RF Front-End* s'en ressent. Si, entre plusieurs systèmes de positionnement, certaines fréquences porteuses sont les mêmes (ou sont assez proches), il est alors possible de les traiter dans un seul et même circuit du *RF-Front End*, tout en gardant la sélection d'une largeur de bande restreinte. Du point de vue de l'interopérabilité, c'est l'utilisation de fréquences proches ou communes qui serait donc bénéfique.

La tendance actuelle va dans ce sens : par exemple, Glonass proposera trois fréquences CDMA interopérables sur ses satellites à partir du bloc KM, dont les premiers lancements sont prévus pour 2025. La TABLE 1.5 répertorie les fréquences communes aux différents systèmes globaux.

Fréquence [MHz]	GPS	GLONASS	Galileo	Beidou
1 575.42	L 1	<i>futur</i>	E 1	
1 176.45	L 5	<i>futur</i>	E5a	
1 207.14		<i>futur</i>	E5b	B 2

TABLE 1.5 – Fréquences communes aux différents systèmes globaux

Concernant la compatibilité, des solutions sont en cours de développement afin de limiter les éventuelles interférences entre signaux de fréquence proche ou similaire. Il reste néanmoins des limitations à l'association des différents systèmes, par exemple, la présence de biais inter-systèmes (entre autres, au niveau des horloges).

L'avènement du tri-fréquence

Après un aperçu des différentes constellations et de leurs dernières évolutions, le constat est le suivant : l'ère du positionnement GNSS tri-fréquence est amorcée. Les GNSS en cours de développement proposent au minimum trois fréquences d'émission, sur lesquelles sont modulés des signaux ouverts. Quant aux GNSS en modernisation, ils proposent depuis peu une troisième fréquence d'émission. Cette fonctionnalité est présente sur quelques satellites de dernière génération. La généralisation au positionnement tri-fréquence se fera pas à pas avec le renouvellement des constellations existantes et la complétion des nouvelles constellations.

Le système européen Galileo va déjà un pas plus loin, puisqu'il propose jusqu'à quatre fréquences porteuses différentes, modulées par des signaux civils.

L'utilisation d'un nombre de signaux et de fréquences croissants ouvre la porte à du positionnement de meilleure précision. Cependant, cela augmente également les exigences techniques. En effet, un nombre croissant de canaux au niveau du DSP des récepteurs (voir SECTION 1.7.1) est nécessaire, sous peine de perdre certains signaux pour cause de saturation des canaux. Ce cas de figure s'est déjà présenté à plusieurs reprises à la station ULG avec l'un des récepteurs, proposant un nombre restreint de canaux.

1.6.2 Les systèmes de navigation régionaux et systèmes d'augmentation

En plus de ces systèmes globaux, il existe des systèmes de navigation locaux. C'est par exemple le cas de QZSS (Japon), à la fois complémentaire à GPS et utilisable seul, et IRNSS (Inde).

S'ajoutent à ces systèmes globaux et locaux des systèmes d'augmentation. Les SBAS (Satellite-Based Augmentation System) ont pour but d'améliorer localement les services fournis par les systèmes de navigation globaux. Comme leur nom l'indique, ce type de système d'augmentation est basé sur l'utilisation de satellites complémentaires, généralement géostationnaires.

Trois SBAS sont opérationnels actuellement : WAAS (Amérique du Nord), EGNOS (Europe), et MSAS (Japon). Trois autres sont en cours de développement : GAGAN (Inde), SDCM (Russie), et SNAS (Chine). Enfin, un SBAS est à l'étape inférieure, celle de l'étude de faisabilité. Il s'agit de SACCSA (Amérique du Sud et Caraïbes). A terme, la couverture SBAS devrait être mondiale, à l'exception des pôles.

Les systèmes d'augmentations permettent d'augmenter la précision de la navigation. Ils sont par exemple utilisés pour une guidance verticale plus performante lors d'atterrissage d'avions.

Notons qu'il existe également des GBAS (*Ground-Based Augmentation System*), systèmes d'augmentation basés sur des signaux terrestres (et non pas satellitaires). C'est le cas du système LAAS, des Pseudolites, ou encore d'eLoran.

1.7 Sauts de cycles

Un saut de cycle se produit lorsque le récepteur perd le signal pendant un bref intervalle de temps. Afin de comprendre le phénomène d'un point de vue technique, penchons-nous tout d'abord sur le fonctionnement d'un récepteur. Ensuite, nous verrons plus en détail en quoi consistent les sauts et quelles peuvent en être les causes. Enfin, nous n'aborderons que brièvement leur traitement, puisque cet aspect sera développé dans les prochains chapitres.

1.7.1 Fonctionnement d'un récepteur

Les récepteurs GNSS sont composés de trois blocs fonctionnels : le *radio frequency front-end*, le *digital signal processor* (DSP), et le *navigation processor* (FIGURE 1.7).

Dans la plupart des récepteurs modernes, il existe un bloc *RF front-end* par fréquence porteuse poursuivie^{10 11}. Il a pour but de préparer le signal brut reçu à l'étape de traite-

10. Par exemple, pour un récepteur bi-constellations GPS/Galileo, les fréquences GPS L1 et Galileo E1 partageront un même bloc *front-end*, de même que GPS L5 et Galileo E5a. Les autres fréquences auront chacune leur propre bloc.

11. Dans certains récepteurs, un seul bloc est utilisé pour l'ensemble du signal. La bande passante du bloc doit alors être assez large pour permettre le traitement de données provenant des fréquences

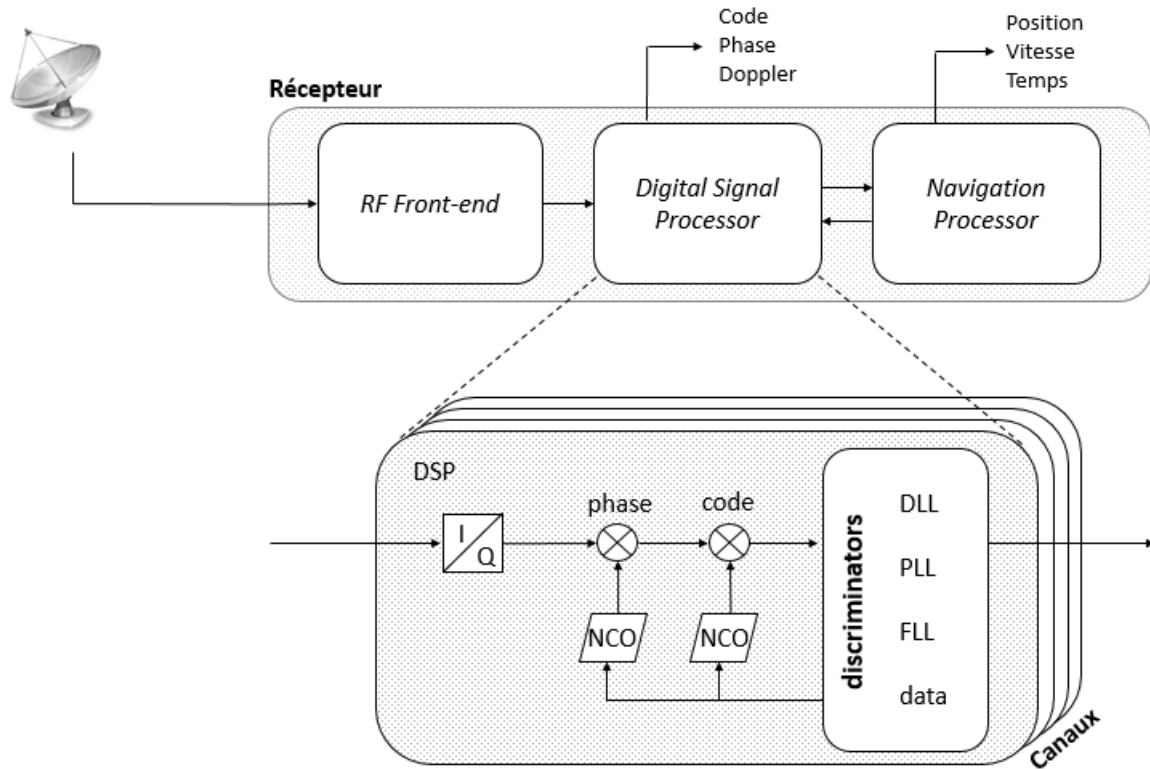


FIGURE 1.7 – Récepteur : architecture

ment du signal. Pour ce faire, le *RF Front-End* effectue les tâches suivantes :

- Pré-amplification du signal entrant et premier filtrage (passe-bande)
- Conversion en une fréquence intermédiaire (décalage du spectre)
- Second filtrage (passe-bas ou passe-bande, suivant que la fréquence intermédiaire équivaille ou non à 0 Hz)¹²
- Amplification (gain optimal)
- Conversion du signal analogique en un signal digital discret¹³

C'est au niveau du DSP que le traitement du signal sera effectué, dans le but d'obtenir les mesures de codes, phases, et éventuellement de doppler. A l'entrée du DSP, le signal, sous forme de données IQ¹⁴, est séparé en différents canaux¹⁵. Chaque canal correspond à une fréquence porteuse particulière d'un satellite particulier.

Dans un premier temps, le récepteur doit acquérir le signal. Cette étape est appelée *phase d'acquisition*. Il existe différents types de recherche de signal :

porteuses voulues (350 MHz entre les fréquences centrales GPS L1 et L2, 400 MHz entre L1 et L5, alors que seuls 24MHz sont alloués par l'*International Télécommunication Union* pour chaque signal).

12. Plus la bande passante sera large, plus l'information récupérée sur le signal sera grande, mais plus il sera sujet au bruit et aux interférences.

13. La discrétisation est temporelle (*sampling*) et en magnitude (*quantization*). Ces deux paramètres conditionneront la qualité du signal numérique. En terme d'ordre de grandeur, le *sampling rate* est de l'ordre de plusieurs centaines de mégaHertz, et la quantisation est généralement comprise entre 4 bits et 16 bits.

14. Les composantes I et Q sont en quadrature de phase.

15. Par exemple, le PolarX4 de Septentrio possède 256 canaux hardware, le PolarXS en possède 136, et le NetR9 de Trimble en possède 440.

- *Cold start* : Lorsque le récepteur est allumé pour la première fois, il n'a aucune idée de sa propre position et analyse les signaux reçus sur base des *ranging codes* qu'il connaît (selon les satellites et les signaux présents dans sa base de données, fournie par le fabricant).
- *Warm start* : La position du récepteur est connue, et il possède de précédentes données temporelles et d'almanac¹⁶.
- *Hot start* : Les mêmes informations que le *warm start* sont utilisées, en y ajoutant les éphémérides.
- *Réacquisition* : Lorsque le signal est perdu puis réacquis, le récepteur possède alors une bonne approximation de la vitesse du satellite ainsi que du temps.

L'acquisition consiste en la recherche de la corrélation maximale entre le signal réel reçu et la réplique de ce signal générée par le récepteur. Plus le récepteur possède des informations sur le signal à acquérir, plus le travail du corrélateur sera facilité, et donc plus le temps nécessaire à l'acquisition du signal (appelé *Time To First Fix*) sera réduit.

Une fois le signal acquis, le bloc entre dans une *phase de tracking*. Focalisons-nous sur la mesure de phase, sans tenir compte du code et du message de navigation. La différence entre la fréquence de la porteuse reçue et celle de la réplique est mesurée et qualifiée de phase de battement (FIGURE 1.8). Lors de la première observation, le récepteur ne peut qu'observer la mesure de phase de battement, c'est-à-dire une fraction de cycle, mais il ne peut savoir le nombre de cycles entiers de décalage entre les deux signaux. Ce nombre entier de cycles est appelé ambiguïté initiale. Au fur et à mesure de la réception du signal, le récepteur observera l'évolution de la mesure de phase, et un compteur sera incrémenté à chaque cycle entier, c'est-à-dire à chaque passage de la phase par 2π . L'ambiguïté initiale restera donc une inconnue uniquement liée à la première époque d'observation.

Le *phase lock loop* (PLL) est responsable du *tracking* de la phase. Le *Delay Lock Loop* (DLL) est lui responsable de l'ajustement continu du code et de sa mesure, et le *Frequency Lock Loop* (FLL) du doppler. Le DSP est également responsable de la démodulation du message de navigation. A la sortie du DSP, le message de navigation, ainsi que les mesures de code, phase, et doppler, sont fournies au processeur de navigation.

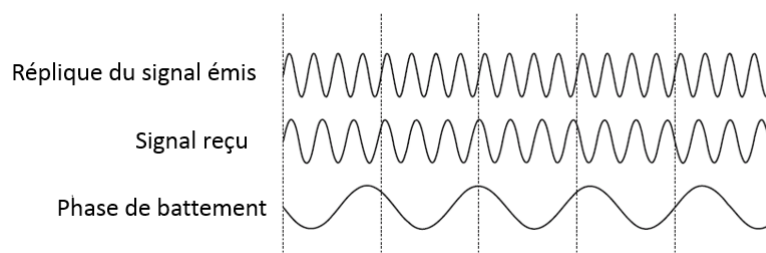


FIGURE 1.8 – Récepteur : comparaison du signal reçu et de la réplique

Le *Navigation Processor* a pour rôle de fournir les informations de position, de vitesse, et de temps. Le message de navigation lui permet de connaître la position du satellite observé ainsi que l'erreur d'horloge de ce dernier. Connaissant cela et disposant des mesures

¹⁶. Paramètres émis dans le message de navigation et actualisés toutes les semaines contenant, entre autres, des informations sur les orbites des satellites.

des trois observables, il est alors capable de déterminer les coordonnées de l'observateur, sa vitesse, et le temps, à condition d'observer un minimum de quatre satellites. Notons également que ce bloc interagit avec le DSP afin d'aider ce dernier à acquérir le signal plus rapidement (selon les informations fournies, l'on sera dans un cas de *warm start*, de *hot start*, ou de *réacquisition*) et de faciliter le *tracking* de celui-ci.

Enfin, pour des récepteurs sophistiqués, tels que ceux utilisés aux stations de référence, l'utilisateur peut choisir l'échantillonnage de ses données de sorties. A ULG0, le taux d'échantillonnage des données finales choisi est de 1 Hz.

L'architecture décrite ci-dessus peut présenter certaines variantes d'un récepteur à l'autre. En pratique, les trois blocs fonctionnels ne sont pas toujours compris physiquement dans le boîtier du récepteur. En effet, de plus en plus de GNSS *Software Defined Radio* (SDR) sont utilisés. Cela permet de limiter le matériel physique, et donc l'investissement, au *RF Front-End*. Ce dernier est relié à l'ordinateur, sur lequel les tâches du DSP et du *Navigation Processor* sont effectuées via le SDR. Un des problèmes rencontrés avec ce type de montage est le transfert des données entre RF-Front End et la machine de traitement. En effet, la quantité de données par seconde transitant entre ces deux blocs (déterminées par le taux d'échantillonnage et la quantisation du *RF Front End*) est telle qu'une saturation du câble ou de la mémoire vive de l'ordinateur est courante. Il est bien évidemment possible de réduire cette quantité de données, mais cela sera au détriment de la qualité du positionnement.

1.7.2 Les sauts de cycles

Un saut de cycle est créé par la perte momentanée du verrouillage de phase. La durée de cette perte de signal peut être variable, de quelques millisecondes à plusieurs minutes.

Durant l'interruption de la réception du signal, le compteur de cycles entiers n'est plus incrémenté. Il reste alors sur la dernière valeur pendant un certain intervalle de temps (variable selon le récepteur utilisé) avant d'être réinitialisé à 0. Deux cas de figures peuvent se présenter : le signal peut être réacquis avant ou après le *timeout*.

Dans le premier cas, le compteur aura laissé passer un nombre entier de cycles et reprendra son comptage là où il s'était arrêté lors du dernier signal reçu. Si la perte de signal est de très courte durée, le saut en résultant peut n'être que de un ou deux cycles.

Au contraire, si le *timeout* est expiré lors de la ré-acquisition, le saut résultant sera égal au nombre de cycles comptabilisés depuis la première époque d'observation, auxquels s'ajoutent le nombre de cycles non-comptabilisés pendant la perte de signal.

Le saut de cycle se manifestera par un saut d'un nombre entier dans la mesure de phase (FIGURE 1.9). Si ce saut n'est pas détecté avant le calcul de la position, celle-ci s'en retrouvera biaisée. En effet, un saut d'un seul cycle induit une erreur d'environ 20 cm sur la mesure de pseudo-distance. Même si la pseudo-distance affectée d'un saut est utilisée en combinaison avec des pseudo-distances issues d'autres satellites lors du calcul des coordonnées de l'utilisateur, son impact peut s'avérer problématique, tout particulièrement dans des applications requérant un haut degré de précision et d'exactitude. L'impact sera d'autant plus important que le nombre de cycles manquants est élevé et

que le nombre de satellites visibles est faible.

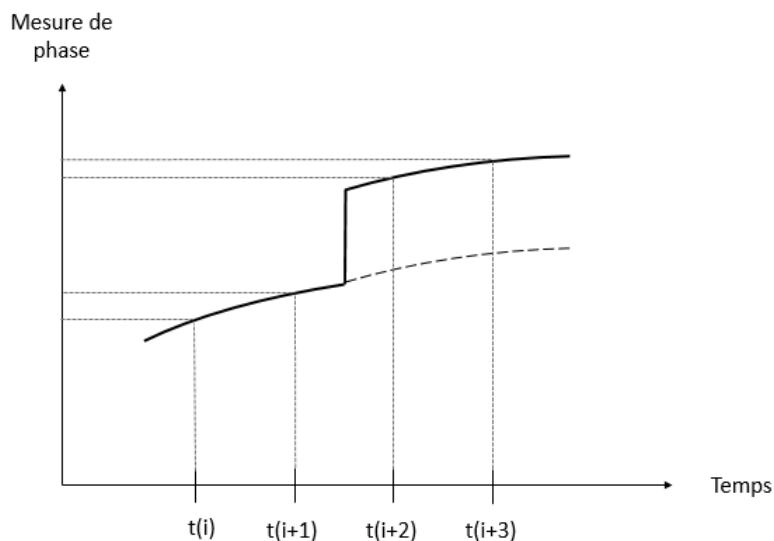


FIGURE 1.9 – Impact d'un saut de cycle sur la mesure de phase

Plusieurs configurations peuvent se présenter lors d'une perte de signal. Tout d'abord, le signal peut être temporairement perdu sur une seule fréquence ou sur plusieurs fréquences simultanément. Si des sauts simultanés sont présents, ces derniers peuvent être de même amplitude ou d'amplitude différente¹⁷. Enfin, un saut peut être isolé dans le temps, ou accompagné de sauts à des intervalles de temps proches (sauts successifs).

1.7.3 Causes des sauts de cycles

Les causes des sauts de cycles peuvent être multiples. On distinguera les causes dépendantes des observations de celles dépendantes du récepteur (Seeber,2003).

Du point de vue des observations, les sauts de cycles peuvent être causés par une obstruction du signal. Elle peut être due à la présence d'un obstacle aux alentours du récepteur. Un exemple de ce cas est donné en ANNEXE A. Il est également possible que la perte du signal soit due à un bruit trop important sur celui-ci. L'effet multi-trajet ou encore des perturbations ionosphériques (scintillations par exemple) peuvent en être la cause. Enfin, la puissance du signal provenant d'un satellite à basse élévation peut être assez faible que pour perdre le verrouillage de la phase.

Du côté récepteur, certaines interférences peuvent affecter le signal reçu en diminuant sa puissance. L'inclinaison de l'antenne par rapport à la direction du satellite observé peut également influencer la qualité du signal reçu. Enfin, il est également possible qu'un problème lors du traitement du signal engendre un saut de cycle.

¹⁷. L'amplitude d'un saut de cycle peut varier de 1 à des milliers de cycles.

Dans certains récepteurs plus sophistiqués, l'implémentation du PLL est plus évoluée : le récepteur est alors plus robuste et perd moins facilement le signal.

1.7.4 Traitement des sauts de cycles

Une première manière, simple, d'éviter les sauts de cycle est de vérifier dans les données si aucune époque d'observation ne manque, signe d'une perte momentanée de signal. Si c'est le cas, la reprise de signal peut être définie lors du traitement comme une nouvelle période d'observation, avec une nouvelle valeur d'ambiguïté initiale. Plus la fréquence d'échantillonnage des données de sortie est faible, moins ce cas sera susceptible de se présenter.

Lorsque la perte de signal est comprise entre deux époques d'observations, l'utilisateur n'a aucun moyen d'être informé de la présence d'un éventuel saut au seul regard des données brutes. Il est donc nécessaire de développer des méthodes permettant de détecter la présence de saut de cycles.

Les sauts de cycles ne sont généralement pas directement visibles dans l'observable de phase (la FIGURE 1.9 représente un très grand saut de cycle à titre d'illustration), des combinaisons de mesures seront donc utilisées afin de mettre en évidence la présence de ces sauts. Ces combinaisons seront qualifiées de quantité-test, et le saut y apparaîtra comme une discontinuité. Les quantités tests seront alors associées à des méthodes de détection, permettant de détecter ces discontinuités, pouvant correspondre à des sauts.

Différentes méthodes ont été proposées au fil du temps. Certaines d'entre elles reposent sur des observations provenant uniquement de récepteurs GNSS, d'autres combinent ces données à des informations provenant d'autres types de capteurs (INS, Pseudolites). La plupart des méthodes de détection analysent le signal satellite par satellite, de manière indépendante. Le multi-GNSS n'avait donc a priori pas de raison d'être. Pourtant, récemment, une méthode de traitement des sauts de cycles multi-GNSS (GPS et GLONASS) a été proposée [Ye et al., 2015].

Si de nombreuses méthodes existent, l'environnement peut néanmoins rendre la détection des sauts difficiles. De toutes les sources d'erreurs affectant la mesure de phase, les perturbations ionosphériques sont les seules pouvant être confondues avec les sauts de cycles. En effet, l'amplitude de ses variations peut être comparable à la longueur d'onde des porteuses GNSS. Lors d'un saut brusque dans la mesure de phase, comment peut-on alors distinguer un saut de cycle d'une perturbation ionosphérique ? C'est la question à laquelle ce travail va tenter de répondre.

Quelques méthodes de détection en ionosphère active ont d'ores et déjà vu le jour. Celles-ci sont majoritairement bi-fréquences. Puisque, à terme, tous les GNSS seront au minimum équipés d'une troisième fréquence civile, d'autres méthodes se penchent sur l'exploitation de cette troisième fréquence. Enfin, le double aspect tri-fréquence et ionosphère active a commencé à être traité en 2014 par Zhao [Zhao et al., 2014]. Ce travail se situe dans la continuité de ces études et cherche plus précisément à déterminer quel serait l'apport de l'utilisation d'une troisième fréquence dans les méthodes de détection des sauts de cycles en ionosphère active. Puisque Galileo propose des signaux civils sur

une quatrième fréquence, les bénéfices de son utilisation seront eux aussi abordés. L'aspect quadri-fréquence des méthodes de détermination des sauts de cycles n'a encore jamais été traité dans la littérature, d'où l'originalité toute particulière de ce travail.

Enfin, notons que la priorité sera pour nous à la détection de la présence d'un saut à une époque donnée, puisque c'est celle-ci qui permettra d'éviter que l'erreur se propage sur la mesure de position. C'est donc principalement la détection qui sera traitée dans le cadre de ce travail. Cependant, la correction des sauts présente également de gros avantages, en particulier en termes de continuité.

1.8 GNSS : les défis actuels

Comme tout système complexe et de large envergure, les GNSS souffrent de limitations intrinsèques : en effet, les signaux GNSS, ondes radio dont la puissance est fortement diminuée au travers de leur long parcours entre satellite et la surface terrestre, pénètrent difficilement à l'intérieur des bâtiments, dans le sous-sol ou dans des milieux sous-marins. D'autre part, ils sont sujets à différentes détériorations volontaires, comme le *spoofing*, et le *jamming* [Lisi, 2015]. Les défis actuels du GNSS sont multiples : disponibilité, précision, continuité, intégrité, et plus récemment, la résistance au *spoofing* et *jamming*, ainsi que la navigation à l'intérieur des bâtiments. Ce dernier aspect ne sera pas abordé en détail puisqu'il est assez éloigné de la problématique de base. Cette section a pour but de faire le lien entre la problématique des sauts de cycles et les défis du domaine du GNSS.

1.8.1 Disponibilité

A l'heure actuelle, un grand nombre d'applications critiques dépendent des services GNSS : le monde financier, militaire, mais aussi les infrastructures liées à l'énergie et à sa distribution. Il est crucial de fournir aux utilisateurs un service disponible et fiable, 24 heures sur 24, 7 jours sur 7.

Avec l'arrivée de nouveaux systèmes de positionnement par satellites, globaux, locaux, et d'augmentation, un nombre croissant de satellites est présent dans le ciel. La disponibilité est grandissante, et continuera à augmenter dans les prochaines années, 2020 étant la date prévue de la complétion des constellations Galileo et BeiDou. Comme mentionné précédemment, un total de quatre satellites est nécessaire afin de déterminer une position. L'utilisation d'un récepteur multi-GNSS permettra de tirer un plein avantage de cette abondance de satellites, l'ensemble des différentes constellations étant utilisé pour le positionnement. Ainsi, dans un milieu où les portions de ciel dégagé sont limitées (en canyon urbain par exemple) et où il peut être difficile d'avoir quatre satellites de la même constellation visibles simultanément, le positionnement multi-GNSS fera toute la différence.

Une illustration est celle de l'interruption du service Glonass pendant 11 heures successives, le 2 avril 2014 [Gibbons, 2014]. Peu après 1h du matin (heure de Moscou), l'ensemble des signaux GLONASS furent brusquement déclarés *unhealthy* pour cause de défaillance ou d'éphémérides incorrectes. La restauration du système fut progressive, les satellites

devant passer au-dessus d'une station terrestre russe pour être réinitialisés. Alors que les récepteurs utilisant uniquement GLONASS ne purent plus déterminer de localisation avant la restauration, les récepteurs multi-constellations ont eux pu continuer à fournir des informations de positionnement grâce à l'utilisation des autres GNSS.

Influence des sauts de cycles

Les sauts de cycles peuvent affecter cette disponibilité. En effet, si un saut est détecté à une époque donnée mais ne peut être corrigé, cette époque ne sera pas directement utilisable et marquera une nouvelle période d'observation, pour laquelle une ambiguïté initiale devra être calculée. La disponibilité du signal concerné, et donc du satellite, pour le positionnement en sera momentanément interrompue. De plus, une inconnue supplémentaire apparaîtra. On devine d'ores et déjà le lien existant entre disponibilité et continuité. Si le saut est détecté et peut être corrigé, alors aucune perte de disponibilité ne sera observée, si la perte de signal est de courte durée. Malheureusement, la correction instantanée d'un saut de cycle n'est à l'heure actuelle applicable que dans un nombre limité de cas.

1.8.2 Précision et exactitude

La notion de précision est étroitement liée à celle de la disponibilité.

Elle sera fonction de deux facteurs : la géométrie de la constellation et la précision sur les observations (EQ 1.5).

$$\sigma_{pos} = DOP * \sigma_{obs} \quad (1.5)$$

Où
 σ_{pos} correspond à la précision sur le positionnement
 σ_{obs} correspond à la précision sur les observations
 DOP est un terme dépendant de la géométrie de la constellation par rapport à l'utilisateur

En effet, d'une part, la géométrie de la constellation au-dessus de l'utilisateur jouera un rôle-clé dans la précision du positionnement qu'il retirera de ces satellites, comme nous le verrons à la section suivante.

D'autre part, lors du positionnement d'un récepteur isolé (mode *standalone*), la précision des coordonnées finales dépendra également de la précision sur la position de chacun des satellites, ainsi que de la précision sur la mesure de la pseudo-distance [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].

L'exactitude de la position peut également être mise en relation avec la présence de sauts de cycles ou d'autres biais constants non corrigés. Notons également que certaines perturbations intentionnelles peuvent induire le récepteur en erreur sur sa position (*Spoofing*). Cela sera abordé en détails dans la SECTION 1.8.5.

Influence de la précision des observations

La précision sur la position des satellites dépendra de la qualité du modèle de calcul d'orbite de la constellation. En effet, c'est ce modèle qui servira à déterminer la position de chacun des satellites, dont les paramètres sont fournis via les messages de navigation.

La précision de la mesure de pseudo-distance, quant à elle, dépendra de plusieurs facteurs : la qualité du signal émis, le bruit ajouté lors du parcours du signal (en lien avec l'élévation du satellite), la localisation du récepteur et son environnement (éventuels interférents), et enfin la qualité du récepteur et de la transmission des données en interne. Dans la discussion qui suit, seul le facteur bruit est considéré, et l'on suppose que les délais ionosphérique et neutrosphérique, le multi-trajet, les erreurs d'horloges ainsi que les délais hardware de l'émetteur et du récepteur, sont parfaitement corrigés. En pratique, une partie de ces erreurs subsistera (par exemple, des résidus ionosphériques et troposphériques).

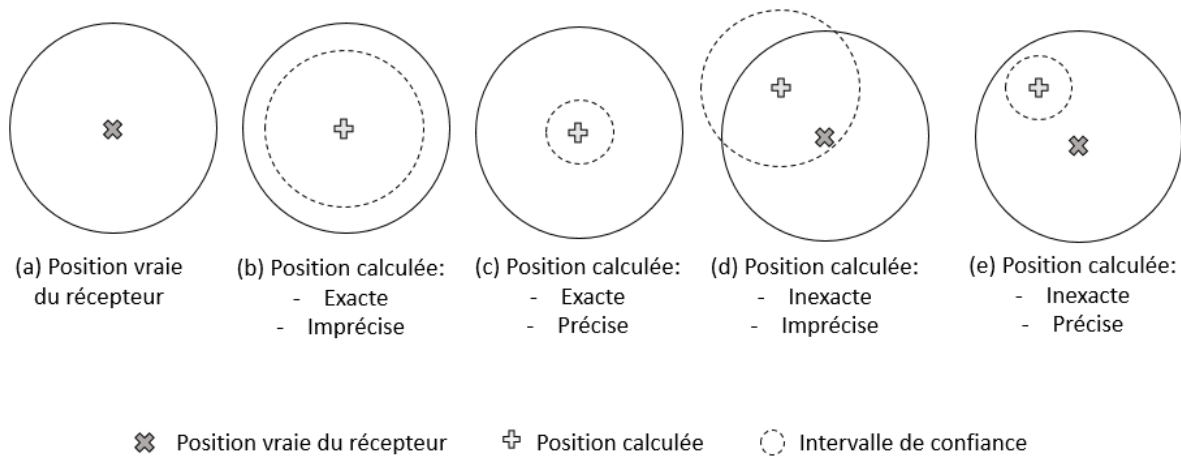


FIGURE 1.10 – Précision et exactitude

Les coordonnées du récepteur sont obtenues par l'utilisation d'ajustements par moindres carrés. L'application de propagation de variance permet de déterminer quelle est la précision de la position finale en connaissant la précision des mesures de pseudo-distances. De manière générale, plus il y aura de satellites visibles, meilleure sera la précision de la position calculée.

Cependant, une mesure de pseudo-distance de mauvaise qualité peut dégrader le positionnement, de manière telle qu'il aurait mieux valu ne pas la considérer. De tous les facteurs ajoutant du bruit aux observables, c'est le bruit dû au parcours du signal qui est le plus variable. Le bruit des observations variera donc essentiellement selon l'élévation du satellite. Deux mesures peuvent être prises pour limiter ces problèmes de qualité dus à l'élévation.

D'une part, il est possible de pondérer l'ajustement par moindres carrés en fonction de l'élévation du satellite. Ainsi, plus un satellite sera bas sur l'horizon, moins sa mesure de pseudo-distance influencera le calcul de position.

D'autre part, un masque est utilisé par la plupart des utilisateurs afin de ne pas considérer

les satellites à trop basse élévation dans le calcul de position.

Dans le passé, le choix de l'élimination d'un satellite pouvait être lourd de conséquences : en effet, le nombre de satellites dans le ciel étant limité, il était possible de n'observer que trois satellites à la place de quatre. Le récepteur n'était alors pas capable de calculer sa position, ce qu'il aurait pu faire si l'utilisation du quatrième satellite avait été permise. Il était donc préférable de calculer une position, même si celle-ci était de moins bonne qualité (FIGURE 1.10, cas (b)), que de ne pas connaître sa position du tout. Le nombre de satellites utilisables actuellement, d'autant plus si l'on considère un positionnement multi-constellations, est bien supérieur à ce qu'il était aux débuts des GNSS : la disponibilité en satellites n'est dès lors plus un facteur limitant et l'élimination de satellites à basse élévation pour augmenter la qualité du positionnement est courante (FIGURE 1.10, cas (c)). Désormais, les préoccupations quant au positionnement sont passées au niveau supérieur : la recherche d'une meilleure précision.

Grâce à ces deux solutions, la dégradation du positionnement par des mesures de mauvaise qualité peut donc être relativement contrôlée.

Exactitude et sauts de cycles

Cependant, un cas bien plus grave peut se présenter : l'utilisation d'une mesure erronée dans le positionnement. La mesure erronée, si elle n'est pas détectée, biaisera le calcul de la position, qui pourrait, non plus être simplement imprécis, mais également inexact (FIGURE 1.10, cas (d) ou (e)).

Les sauts de cycles créent un biais constant d'un nombre entier de cycles dans l'observable de phase. La mesure de pseudo-distance en résultant est alors erronée, un saut d'un cycle équivalant à environ 20 cm^{18} . La position calculée en utilisant cette mesure contenant une erreur systématique est, de ce fait, décalée de la position réelle.

Plus le saut sera grand, plus l'erreur qu'il engendra sur la position sera conséquente. Cependant, nous verrons dans le CHAPITRE 4 que les sauts de grande amplitude sont plus facilement détectables.

Plus le nombre de satellites utilisés dans le calcul de la position est élevé, moins l'effet d'une mesure biaisée par un saut influencera la position.

Influence de la géométrie

La géométrie de la constellation impacte également la précision sur les coordonnées de l'utilisateur. Les satellites étant en constant mouvement, la géométrie évolue sans cesse. Le paramètre DOP (*Dilution Of Precision*) permet de mesurer cette géométrie à un instant donné. La FIGURE 1.11 montre de manière intuitive comment la géométrie peut influencer la précision du positionnement. On comprend alors aisément que, pour un même nombre de satellites visibles, le positionnement sera de meilleure qualité si les

18. La valeur dépend de la longueur d'onde de la porteuse concernée

satellites sont répartis dans le ciel, et non rassemblés dans un même secteur (comme c'est par exemple le cas dans un canyon urbain).

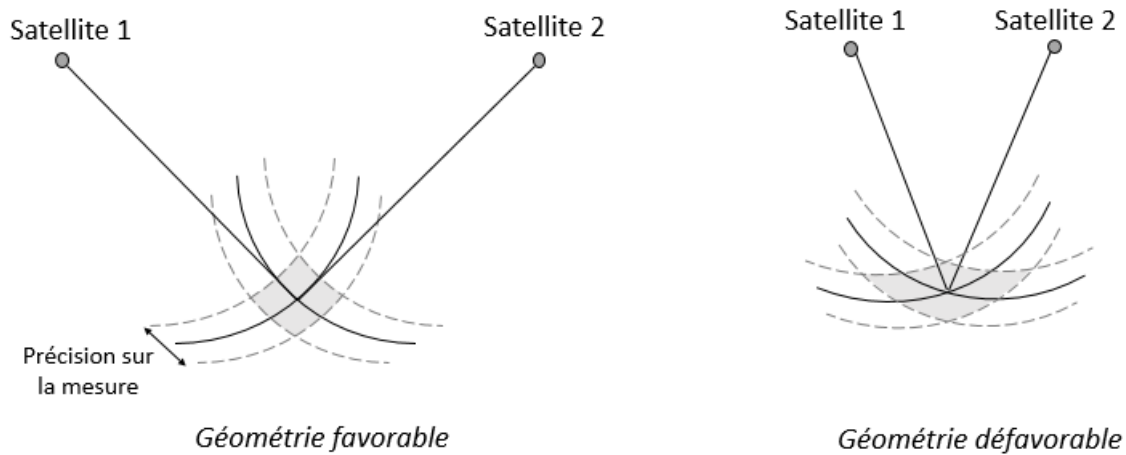


FIGURE 1.11 – Influence de la géométrie sur la qualité du positionnement

Durant son mémoire, Matthieu Lonchay a montré que la présence d'une configuration conique de la géométrie menait à des valeurs extrêmes du PDOP [Lonchay, 2009]. Cette configuration est donc particulièrement néfaste pour la précision du positionnement.

1.8.3 Continuité

Certaines méthodes de positionnement requièrent une longue période de signal ininterrompue pour mener à bien leur phase d'initialisation. Le Precise Point Positioning (PPP), par exemple, peut requérir une trentaine de minutes pour arriver à une précision centimétrique. Dès lors, le moindre saut de cycle apparaissant durant cette période d'initialisation peut en empêcher la convergence ou la fausser. La détection du saut est donc cruciale. Cependant si le saut est uniquement détecté, une nouvelle époque d'observation sera définie, et toute la procédure d'initialisation sera à recommencer. Ce n'est pas viable si les sauts de cycles sont fréquents : d'une part, la phase d'initialisation pourrait ne jamais converger, et d'autre part, si elle converge, la moindre perte de signal relancera la phase d'initialisation depuis le départ. Par contre, si les sauts peuvent être corrigés, la continuité des observations pourra être conservée.

Si la continuité est essentielle pour certaines applications en temps réel, elle l'est également en post-traitement. Prenons l'exemple de l'observation de phénomènes ionosphériques, tels que les TID's ou les scintillations [Wautelet, 2013]. Comme mentionné à la SECTION 1.7.3, l'activité ionosphérique peut être une des causes des sauts de cycles. À côté de cela, si le but est de reconstruire de l'information sur les perturbations ionosphériques (calcul du TEC), l'utilisateur peut par exemple utiliser l'évolution du délai ionosphérique. Si un saut est présent, le calcul du TEC observé en sera affecté. Il est donc nécessaire que le saut soit détecté. La correction de celui-ci permettra à l'observateur de mener à bien son analyse sans interruption.

Les sauts de cycles affectent donc la continuité des observations. La détection de ceux-ci est essentielle, mais c'est leur correction qui permettra une observation continue.

1.8.4 Intégrité

L'intégrité est la mesure de la confiance qui peut être placée en l'exactitude des informations fournies par le système de navigation. De fait, c'est également la capacité qu'a ce système de navigation à fournir des avertissements aux utilisateurs quand le système ne devrait pas être utilisé [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]. Le secteur de l'aviation est particulièrement concerné par la mesure d'intégrité.

Les systèmes Galileo et Beidou proposent tous deux une information d'intégrité via le message de navigation. GPS, quant à lui, le proposera à partir du bloc III, dont les premiers lancements sont prévus pour 2017. Pour GLONASS, la transmission de l'intégrité est fournie à partir du bloc GLONASS-K (sur la 3e fréquence, en CDMA), dont le premier satellite de test fut lancé en 2011.

L'intégrité est déterminée par les stations de références terrestres. Celles-ci renvoient un simple *flag* à l'utilisateur via le message de navigation. Si une information sur l'intégrité du système est bénéfique pour l'utilisateur, cette dernière ne comprend néanmoins pas les effets locaux, tels que le multi-trajet par exemple. C'est pourquoi il existe dans le récepteur un module de *Receiver Autonomous Integrity Monitoring* (RAIM), qui utilise la redondance des signaux de manière à mettre en évidence une éventuelle faille. Il existe quantité de types de RAIM différents, et certains d'entre eux intègrent des algorithmes de détection des sauts de cycles.

La faisabilité de cette approche a été démontrée par Kirkko-Jaakkola en 2009 [Kirkko-Jaakkola et al., 2009] par l'utilisation de différences temporelles de mesure de phases sur GPS L1, provenant de différents satellites. Sa méthode ne permet cependant pas de détecter avec certitude si la discontinuité observée est due à un *outlier* ou à un saut de cycle. De plus, si plusieurs sauts sont présents à la même époque pour différents satellites, la méthode de détection perd en efficacité.

Le principe général de la détermination de l'intégrité consiste en la comparaison de l'erreur de position (*Position Error*, PE) par rapport à plusieurs seuils : la tolérance par rapport à l'erreur attendue du système (*Protection Level*, PL), et une limite d'alarme (*Alarm Limit*, AL).

La combinaison de tests d'intégrité multiples, effectués d'une part par les stations de monitoring et d'autre part dans le RAIM, permet d'atteindre un haut niveau de confiance en matière d'intégrité les données.

1.8.5 Résistance au *jamming* et *spoofing*

Comme d'autres infrastructures critiques, le domaine du GNSS est régulièrement sujet à des attaques. Le talon d'Achille du positionnement GNSS réside dans la faible puissance du signal à la réception. Cette faiblesse des systèmes GNSS ouvre donc la porte à l'alté-

ration intentionnelle du signal par l'émission d'interférences malicieuses.

En effet, le signal GNSS est progressivement atténué durant son parcours entre le satellite et le récepteur. Il arrive typiquement à l'antenne avec une puissance de l'ordre de -130 dB. Cette valeur peut bien sûr varier en fonction de la puissance d'émission et les pertes dues au chemin du signal¹⁹.

Si l'étalement du spectre GNSS permet d'atténuer un grand nombre d'interférences, le signal reste sensible à celles de haute puissance. Dès lors, la présence de tels interférents aux abords de l'antenne peut totalement masquer le signal GNSS original.

On en distingue plusieurs types : le *jamming*, le *spoofing*, et le *meaconing*.

Le *jamming* (que l'on peut traduire comme *brouillage*) désigne l'opération consistant à "noyer" les signaux GNSS par des signaux de haute puissance sur des fréquences similaires au GNSS. Ces interférences causent alors la perte du signal et empêchent sa réacquisition.

Cette technique a par exemple été utilisée en Corée du Sud pour couper tout accès aux signaux GNSS. C'est d'ailleurs ce qui mena la Corée du Sud à se définir un système de positionnement terrestre, eLoran. Ce cas est bien sûr assez extrême, et le *jamming* à plus petite échelle est courant. Du matériel (*jammers*), de différentes performances et de prix variés, se trouve d'ailleurs sur internet. Pour quelques dizaines d'euros, il est possible de se procurer un *jammer* basique brouillant les signaux GNSS dans un rayon de 50 mètres. Ces appareils sont utilisés par des personnes ne désirant pas être localisées par GNSS, par exemple dans le cas de vol de voiture. L'utilisation de ces derniers est interdite. Le *jamming* peut en effet avoir de graves conséquences puisque le signal reçu par les autres utilisateurs peut s'en trouver pollué. Ce problème est particulièrement grave aux alentours d'aéroports ou d'autres infrastructures critiques.

Le *spoofing* est plus sophistiqué : il s'agit d'émettre des signaux factices dans le but de tromper le récepteur sur sa position. L'utilisateur pense alors se trouver à un endroit, pense se diriger vers sa destination, alors que la réalité est tout autre. C'est donc particulièrement dangereux. Une expérience sur le *spoofing* fut menée en 2013 par des étudiants de l'université du Texas : pour 80 dollars américains, en utilisant de simples produits du commerce, ils ont réussi à modifier la trajectoire d'un yacht et le mener à une mauvaise destination, tout cela sans que le capitaine ne se rende compte de rien, se fiant totalement à son système de positionnement GNSS.

Le *meaconing* est similaire au *spoofing*. La différence est qu'ici, les faux signaux générés sont en fait de vrais signaux GNSS préalablement reçus, mais qui ne sont plus d'actualité.

Certaines mesures ont pu être prises pour limiter ces possibilités de sabotage, notamment via des procédures d'authentification ou d'encryptage du signal, mais il reste malheureusement quantité de cas où l'utilisateur peut être trompé.

Comme nous l'avons vu à la SECTION 1.7.3, les interférences peuvent mener à des pertes et réacquisitions de signal successives, c'est pourquoi les problématiques des sauts

19. Notons que le signal est amplifié lors de sa réception par le *Low Noise Amplifier* (LNA) de l'antenne active (généralement de 30 à 50 dB). Si l'antenne est passive ou si l'amplification du LNA n'est pas suffisante, d'autres amplificateurs peuvent être ajoutés entre l'antenne et le récepteur.

de cycle et des interférences malicieuses sont particulièrement liées.

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, un aperçu global de la problématique des GNSS a été fourni. Tout d'abord, les divers domaines en dépendant ont été abordés et illustrés, afin de se rendre compte de la dépendance du monde moderne au GNSS, d'où l'importance de son étude.

Ensuite, le principe du positionnement par satellites ainsi que les multiples sources d'erreurs pouvant affecter le signal GNSS ont été décrites, ce qui permet d'énoncer les modèles mathématiques des deux observables de base : le code et la phase.

Le principe du positionnement étant compris, nous avons ensuite pu nous pencher sur les différentes méthodes de positionnement possibles.

Les différents systèmes globaux, régionaux, et d'augmentation ont également été caractérisés.

La problématique des sauts de cycle a ensuite été abordée, tout d'abord au niveau technique avec le fonctionnement d'un récepteur GNSS-type. Une définition des sauts de cycles ainsi que diverses causes ont par la suite été mentionnées, pour terminer par quelques informations quant aux méthodes de traitement des sauts. Les chapitres suivants entreront plus en détails dans la détection et la correction des sauts de cycles.

Enfin, après cette vue globale des GNSS à l'heure actuelle, nous nous sommes penchés sur les défis futurs du domaine, et avons pu constater que ces derniers étaient étroitement liés à la problématique des sauts de cycles.

Chapitre 2

Cadre de travail, hypothèses et méthodologie

2.1 Introduction

Au fur et à mesure de l'évolution des technologies GNSS, les préoccupations des utilisateurs ont changé. Désormais, la détermination d'une position par satellite à tout endroit de la surface terrestre n'est généralement plus un *challenge*. Le nombre de satellites croissant et l'ouverture au positionnement multi-GNSS permettent l'observation de plus de quatre satellites simultanément à tout moment et à tout endroit de la surface terrestre, sauf dans d'éventuels cas extrêmes de canyons urbains ou encore lors d'importantes perturbations atmosphériques. La priorité est maintenant à la qualité de la position, avec des exigences toujours croissantes en termes de précision.

Etant désormais sensibilisés à la problématique des sauts de cycles, nous sommes à même de comprendre l'importance cruciale de l'efficacité des méthodes de détection des sauts de cycles¹.

Au travers de ce chapitre, nous planterons tout d'abord le décor quant au type de positionnement qui nous occupera : celui d'un récepteur fixe, dont les données sont traitées en post-traitement et de manière autonome. Ensuite, un bref historique des méthodes de traitement des sauts de cycles sera dressé. La littérature dans le domaine des sauts de cycles étant relativement volumineuse, notre état de l'art se limitera aux méthodes-clés développées pour des cas d'études similaires aux nôtres. A travers la consultation de nombreux articles, nous avons pu observer deux tendances se profiler au cours des dernières années : celle du passage des méthodes bi-fréquences aux méthodes tri-fréquences et celle de la détection des sauts en ionosphère active. Nous tenterons donc, à travers ce travail, de réunir ces deux aspects, pour le cas particulier des stations de référence, dont les besoins particuliers ont jusqu'alors été peu pris en compte dans les méthodes de détection. De plus, Galileo proposant des signaux ouverts sur quatre fréquences porteuses, notre recherche portera également sur la mise en place d'une nouvelle méthode de détection des sauts, quadri-fréquence. Dans cette optique, notre méthodologie sera alors explicitée dans

1. Il en est de même pour les méthodes de correction de ces sauts, mais cela n'est pas le sujet de cette étude.

ses grandes lignes.

2.2 Méthode de positionnement concernée

Le cadre de ce travail se limitera à un récepteur fixe, dont les données sont traitées en post-traitement et de manière autonome (c'est-à-dire en utilisant les données provenant de ce récepteur uniquement).

Cette approche présente de multiples avantages.

L'utilisation d'un récepteur dont la position est fixe permet de limiter l'évolution de la distance géométrique au trajet du satellite.

L'utilisation des données en post-traitement permet d'exploiter l'ensemble des observations afin de déterminer la présence ou non d'un saut. Le fait de disposer des données après un saut potentiel permet de confirmer la présence de celui-ci et le cas échéant, de simplement considérer la discontinuité momentanée comme un *outlier*. L'affranchissement de cette contrainte de temps réel, où une décision doit être prise "immédiatement", permettra donc de développer des méthodes plus robustes.

Enfin, l'utilisation de données ne provenant que du récepteur concerné permet à l'utilisateur de travailler en autonomie, sans dépendre d'aucune infrastructure externe.

Le but de ce mémoire est donc de répondre au besoin de centres de recherche et d'observation, possédant leurs propres récepteurs et analysant des données en post-traitement. Si les méthodes de détection de sauts sont de plus en plus performantes, cette catégorie d'utilisateurs, dont les attentes sont particulières, a peu été considérée dans le développement de celles-ci. En effet, la plupart des méthodes modernes se concentrent sur des solutions temps réel, ou encore sur des récepteurs en mouvement. Il est bien évidemment important de fournir des méthodes de détection, voire de correction, des sauts de cycles dans les cas les plus courants. Cependant, dans les cas où ces contraintes ne sont pas présentes, comme celui qui nous occupe, des solutions plus efficaces pourraient être développées.

2.3 Historique du traitement des sauts de cycles

La problématique des sauts de cycles est au cœur des préoccupations depuis les débuts du GNSS.

Selon le type de positionnement, différentiel ou autonome, deux types de quantités-tests ont vu le jour : celles se basant sur des observations différenciées (simple, double, ou triple différence), et celles se basant sur les mesures brutes. Puisque le cadre de ce travail est celui d'un positionnement autonome, il ne nous sera pas possible d'utiliser de simples ou de doubles différences, et nous travaillerons donc sur des quantités-tests basées sur les mesures brutes².

2. A titre d'information, notons également que certaines méthodes de détection des sauts de cycles mettent à profit l'hybridation des données GNSS avec des capteurs inertiels (INS) [Lee et al., 2003]. A ce système GNSS/INS peut s'ajouter un réseau d'augmentation local de *Pseudolites* [Lee and Park, 2005].

Le premier algorithme de traitement des sauts de cycles sur des observations non-différenciées, appelé *Turbo Edit*, a vu le jour en 1990 [Blewitt, 1990]. Ce dernier est bi-fréquence et utilise les mesures de phase ainsi que de code P (GPS). Il n'est efficace qu'en cas de faible variation du *Total Electron Content* (TEC) de l'ionosphère. Cet algorithme a été implémenté dans différents programmes de traitement de données : *GIPSY-OASIS II* [Litchen, 1995], *PANDA* [Liu and Ge, 2003], ou encore *BERNESE* [Beutler et al., 2007]. Il est basé sur les combinaisons *Hatch-Wübenna-Melbourne* (SECTION 4.2.3) et *Geometry-Free* (SECTION 4.2.3), et est adapté à la détection en temps réel.

Cet algorithme fut amélioré à plusieurs reprises. Dans sa dernière variante en date, il permet de détecter les sauts en ionosphère active, grâce au couplage d'une détection par *Forward Backward Moving Window Averaging* (FBMWA) (SECTION 4.3.4) sur la combinaison *widelane - narrowlane*, et par différence temporelle de second ordre sur la combinaison de *Phase Ionospheric Residual* (PIR) (SECTION 4.2.3) [Cai et al., 2013]. Ces deux combinaisons permettent alors de déterminer l'amplitude et la fréquence des sauts, sous certaines conditions concernant l'activité ionosphérique. Cette version n'est pas adaptée au temps réel, due à l'utilisation de la FBMWA, et cet algorithme est toujours bi-fréquence à l'heure actuelle.

Récemment, deux aspects de la détection et de la correction des sauts sont particulièrement populaires dans la littérature : il s'agit du cas de l'efficacité en ionosphère active ainsi que celui du développement de méthodes tri-fréquences.

2.3.1 Tri-fréquence et quadri-fréquence

Avec l'apparition et la généralisation d'une troisième fréquence porteuse civile pour tous les systèmes de positionnement, que cela soit par modernisation (GPS et Glonass) ou par volonté dès le départ (BeiDou et Galileo), de nouvelles méthodes de détection ont vu le jour.

Ainsi, des quantités-tests tri-fréquences sont apparues. Une combinaison éliminant notamment les termes géométriques et effets ionosphériques de premier ordre a été développée [Simsy, 2006]. Cette dernière présente l'avantage de n'utiliser que les mesures de phases, plus précises que celles de codes. D'autres études ont également été réalisées afin de déterminer quelles seraient les combinaisons optimales de mesures de phases à utiliser en positionnement tri-fréquence [Feng, 2008]. Ces dernières ont par la suite été utilisées dans des méthodes de détection des sauts de cycles [Wu et al., 2009], voire de correction [Zhao et al., 2014]. Ces dernières utilisent, elles, un mélange de mesures de codes et de phases. D'autres méthodes tri-fréquences intègrent également les mesures de phases et de codes dans leurs quantités-tests [de Lacy et al., 2012].

Si des méthodes de détections tri-fréquences commencent à voir le jour, aucune mé-

Cela sera par exemple utile pour du positionnement à l'intérieur des bâtiments. Plusieurs application des sauts de cycles en *indoor* ont d'ailleurs été traitées [Lu et al., 2014].

thode quadri-fréquence pour les sauts de cycles n'a été développée à l'heure actuelle. Nous profiterons donc de cette opportunité pour en développer une et en montrer les avantages³.

2.3.2 Activité ionosphérique

La détection des sauts de cycles en ionosphère active est également assez récente.

Du point de vue des sauts de cycles, l'ionosphère sera considérée comme étant fortement active lorsque la variation du délai ionosphérique entre deux époques d'observations sera de l'ordre de (ou supérieure à) la longueur d'onde des signaux GNSS, c'est-à-dire aux alentours de 20 cm.

En 2011, une quantité-test *TEC rate* a été définie. Celle-ci compare une valeur de TEC extrapolée à partir des 30 observations précédentes à la valeur réelle calculée. Lorsque la réalité est trop éloignée de la valeur prédite (voir SECTION 4.3.4), un saut est déclaré [Liu, 2011].

En 2013, Cai a présenté une méthode de détection et de correction mêlant une détection FBMWA sur combinaison *widelane-narrowlane* ainsi qu'une différence temporelle de deuxième ordre de la combinaison PIR [Cai et al., 2013]. Toujours en 2013, les sauts de cycles de causes ionosphériques ont été étudiés par Banville, qui en a conclu que l'importante augmentation du bruit de mesures associée à une ionosphère agitée rendait la correction des sauts encore difficile et demandait de futures investigations [Banville and Langley, 2013]. Zhang en est arrivé à la même conclusion en tentant de réparer des sauts de cycles en cas de scintillations [Zhang et al., 2014].

Enfin, en 2014, une méthode de détection et de correction des sauts de cycles en ionosphère active, à l'aide de données tri-fréquences, a été publiée. Cette méthode est applicable en temps réel [Zhao et al., 2014]. Lors d'une analyse plus approfondie de cette dernière, nous nous sommes rendus compte que son applicabilité en ionosphère active était en réalité plus limitée que prétendue. Nous en verrons les raisons au CHAPITRE 6.

2.4 Hypothèse

Les principaux problèmes actuels des méthodes de détection des sauts de cycles étant liés à l'activité ionosphérique, et de nouveaux signaux étant disponibles, nous formulons l'hypothèse suivante : l'utilisation des troisième et quatrième fréquences va permettre d'améliorer les méthodes de détection des sauts de cycles en ionosphère active, dans le cas d'un positionnement absolu et d'un récepteur fixe, pour lequel les données seront traitées en post-traitement.

En effet, puisqu'un plus grand nombre de fréquences est disponible, le nombre grandissant

3. Notons que, par contre, une méthode de calcul des ambiguïtés en quadri-fréquence a été développée en 2007 par Ji [Ji et al., 2007].

d'informations devrait permettre, par redondance, d'augmenter l'efficacité des méthodes de détection. Cependant, si plus de fréquences porteuses sont utilisées, le nombre de sauts de cycles potentiels augmente lui aussi. Exprimée différemment, cette hypothèse est donc celle d'une meilleure valeur ajoutée de l'utilisation d'une fréquence supplémentaire par rapport aux désagréments liés à l'ajout de sauts potentiels que cette fréquence supplémentaire pourrait présenter.

Notre hypothèse sera démontrée sur la constellation Galileo, puisque cette dernière a l'avantage de proposer une quatrième fréquence en *Open Service* (contrairement aux trois autres systèmes de navigation par satellite globaux).

2.5 Méthodologie

Afin d'atteindre notre objectif de détermination de la valeur ajoutée de l'utilisation de trois (et quatre) fréquences dans les méthodes de détection de sauts de cycles en ionosphère active, nous procéderons en plusieurs étapes.

Premièrement, nous nous pencherons sur les principes globaux de la détection des sauts de cycles. Différentes quantités-tests et méthodes de détection seront abordées, et les avantages et inconvénients de chacune seront explicités. Cela fera l'objet du CHAPITRE 4. Dans ce chapitre sera également décrite une méthode de détection qualifiée d'hybride, développée dans le cadre de ce travail afin d'optimiser les performances dans le cas d'une station fixe et autonome dont les données sont traitées en post-traitement.

Une fois ces différentes possibilités s'offrant à nous connues, nous choisirons alors celles nous semblant les plus adaptées, tout en étant conditionnés par le nombre de fréquences disponibles et par la nécessité de détecter les sauts dans un maximum de cas. Le CHAPITRE 5 concernera le cas où deux fréquences sont disponibles, le CHAPITRE 6 celui où trois fréquences sont disponibles, et le CHAPITRE 7 concernera la détection lorsque des données provenant de quatre fréquences sont disponibles. Chacun de ces chapitres s'articulera de la manière suivante : après une brève introduction, le choix des quantités-tests utilisées sera explicité. Pour chacune d'entre elles, le choix de la méthode d'analyse sera alors développé et différents seuils seront définis et justifiés. Les performances théoriques globales seront ensuite calculées et fournies, performances qui seront confrontées avec des données réelles. Les différences de performances entre théorie et pratique seront discutées, et une éventuelle adaptation des seuils pourra en résulter. Enfin, quelques remarques seront formulées, par exemple du point de vue d'une éventuelle adaptation en temps réel et/ou de la comparaison avec les méthodes de détection utilisant une fréquence en moins.

Enfin, dans un troisième temps, une validation de notre méthode de détection quadri-fréquence, tout à fait inédite, sera effectuée sur un set de données équatoriales.

Notons qu'un masque d'élévation de 10° sera utilisé sur les données. Comme abordé précédemment, les applications modernes peuvent se permettre d'utiliser un masque d'élévation (généralement entre 10° et 15°) rejetant les observations provenant de satellites trop bas sur l'horizon. Le nombre de satellites n'étant plus un facteur limitant du positionnement moderne, il est préférable d'en éliminer certains, pour lesquels les observations seraient

particulièrement bruitées (plus long passage dans l'atmosphère) et sujettes au multi-trajet ou à des pertes de signal causées par obstruction, pouvant détériorer la précision globale du positionnement. Notons néanmoins que l'élimination des satellites à basse élévation influencera la géométrie de la constellation (particulièrement le DOP horizontal), et affectera donc la précision du positionnement.

2.6 Conclusion

Maintenant que le cadre et les objectifs du travail sont clairement explicités et que la méthodologie adoptée a été résumée, nous pouvons passer à des considérations plus détaillées pour chaque nombre de fréquences disponibles.

Cependant, avant de passer au cœur du travail, un chapitre sera consacré aux données utilisées lors de notre étude.

Chapitre 3

Données

3.1 Introduction

Dans tout travail scientifique appliqué, la question des données pose régulièrement problème. Les données voulues n'existent parfois pas, sont difficilement accessibles, ou encore demandent de lourdes campagnes d'échantillonnage. Dans le cadre de ce travail, nous avons pu disposer de données provenant de différentes stations, situées à différentes latitudes (moyennes, intermédiaires, et équatoriales), dans un format simple d'utilisation. Cela a donc permis d'éviter de grosses pertes de temps et de se concentrer plus en profondeur sur le sujet étudié.

3.2 Format des données

Les données utilisées ont été fournies dans le format RTP (dans sa version 4.0), actuellement en développement au sein de l'unité de géomatique¹. Le format RTP contient entre autres les mesures de codes et de phases brutes.

Dans la configuration actuelle des récepteurs à l'ULG, le Doppler² n'est pas choisi comme *output*. Il n'est pas non plus présent dans les données provenant d'autres stations. Les observables utilisées dans le cadre de ce travail sont donc uniquement les mesures de codes et de phases. Si cela peut fermer la porte à certaines solutions, cette approche nous permet de rester généralistes puisque les mesures de codes et de phases sont les plus largement utilisées.

1. Université de Liège.

2. Le Doppler est parfois considéré comme la troisième observable GNSS. Elle correspond à la variation instantanée de la phase. Autrement dit, la comparaison des mesures de phases à deux époques successives devraient correspondre au Doppler.

3.3 Répartition spatiale

Les données utilisées dans le cadre de ce travail proviennent de différentes stations à travers le monde. D'une part, des données à nos latitudes moyennes seront analysées. Celles-ci proviennent des stations ULG (Liège, Belgique), BRUX (Bruxelles, Belgique), DLF (Delft, Pays-Bas). D'autre part, des données équatoriales, caractérisées par une ionosphère plus active, seront traitées. Ces dernières sont issues de la station NKLG (Libreville, Gabon). Enfin, en zone intermédiaire, la station GMSD (Nakatane, Japon) sera utilisée. La localisation de ces dernières est reprise à la FIGURE 3.1.

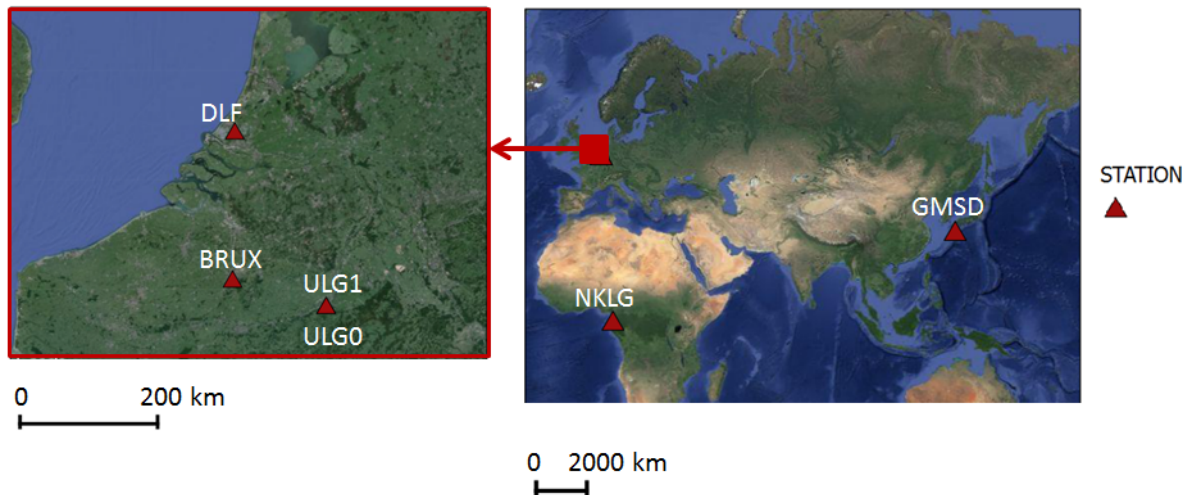


FIGURE 3.1 – Localisation des stations utilisées dans le cadre de ce travail

Les données provenant des stations ULG, BRUX, DLF, et GMSD ont été utilisées dans le cadre du développement et des tests des algorithmes de détection des sauts en bi-, tri-, et quadri-fréquence.

Les données provenant de NKLG, la station la plus équatoriale, seront quant à elles utilisées pour valider l'algorithme de traitement des données GNSS développé dans le cadre de ce travail. Il nous semblait en effet plus adapté d'effectuer cette validation dans les conditions les plus difficiles du point de vue de l'activité ionosphérique, puisque nous cherchons à y caractériser son efficacité. Ces données ayant été envisagées à un stade déjà avancé du travail, elles n'ont pas été utilisées pour optimiser nos développements bi-, tri-, et quadri-fréquences en cours d'étude, mais uniquement pour les valider. Nous verrons par ailleurs que cette validation a permis de préciser les limites de l'utilisation de notre algorithme dans un environnement très affecté par l'ionosphère, et a pu ouvrir la porte à de nouvelles améliorations de l'algorithme.

3.4 Précision des observables

Les valeurs de précision sur les observables que nous utiliserons sont celles fournies par l'ESA en 2013 lors de l'*AGU Fall Meeting* [Springer and Schönemann, 2013]. La précision (*Root Mean Square*, soit 1σ) est différenciée par type d'observable (code ou phase), par fréquence porteuse, et par constellation. Ces valeurs ont été énoncées dans la section

dédiée aux systèmes globaux (SECTION 1.6.1).

Ces résultats proviennent d'expérimentations sur les données du projet *Multi-GNSS Experiment* (MGEX) initié par l'*International GNSS Service* (IGS) [Montenbruck et al., 2014]. Le réseau utilisé consiste en plus de 60 stations multi-GNSS réparties dans le monde. Toutes ces stations proposent des données des systèmes GPS, GLONASS, et Galileo. De plus, 25 d'entre elles suivent le système BeiDou. Dans le cadre de l'étude de précision des observables menées par l'Agence Spatiale Européenne (ESA), 18 jours répartis dans les mois d'août et septembre 2013 ont été choisis et analysés. Les résultats suivants ont alors été fournis.

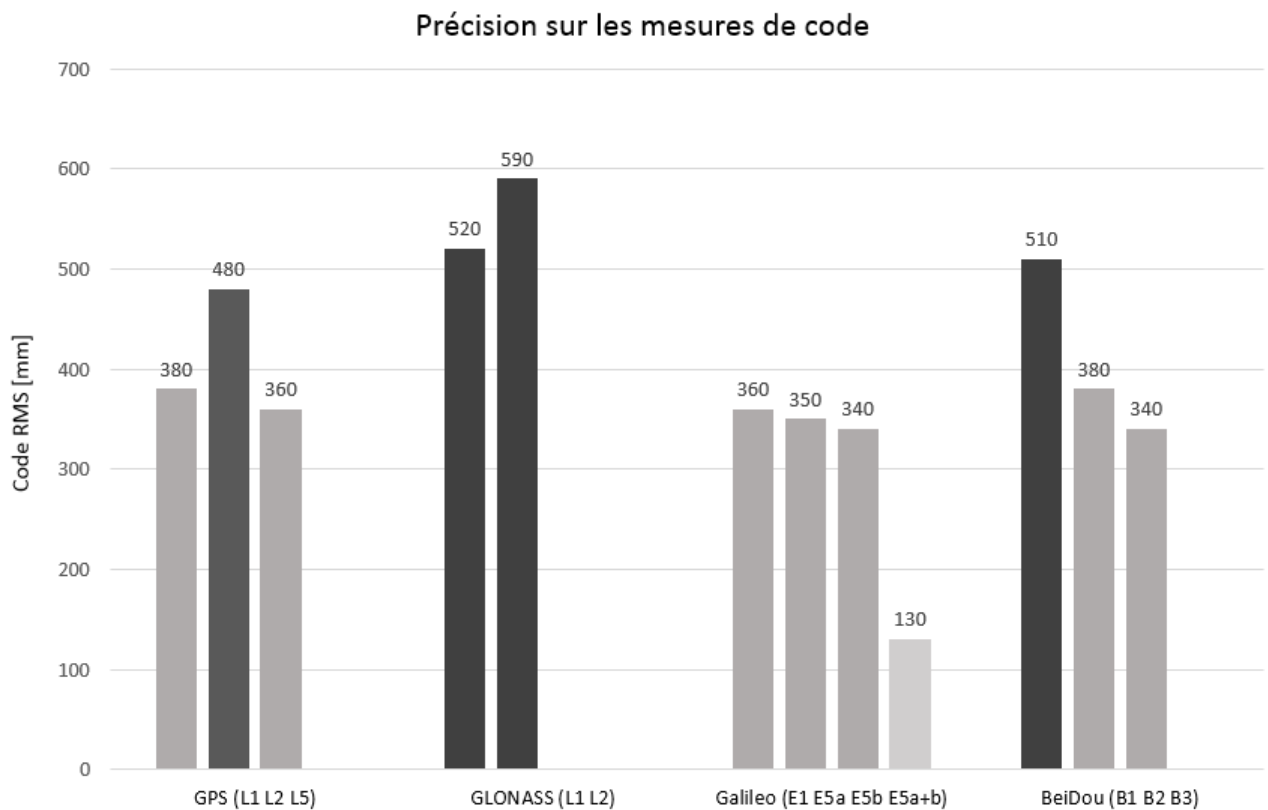


FIGURE 3.2 – Précision des mesures de code [Springer and Schönemann, 2013]

Les résultats obtenus soulèvent plusieurs réflexions. Tout d'abord, on constate que les mesures de phases sont effectivement plus précises que les mesures de codes. Ensuite, les mesures de Galileo, aussi bien les codes que les phases, sont d'un niveau de précision légèrement supérieur, comparées à celles provenant des autres constellations, voire nettement meilleures pour la fréquence E5a+b (AltBOC).

Il est évident que ces valeurs ne sont pas absolues, la précision des observations dépendant d'un grand nombre de facteurs : matériel utilisé, configuration de l'environnement de la station, élévation du satellite, traversée de l'atmosphère, qualité du signal émis. Les conclusions tirées par l'ESA sont donc globales et ne tiennent pas compte d'éventuelles variabilités locales. Des études de précision plus locales sont en cours à la station ULG³.

3. Nous renvoyons au futur mémoire de Cécile Deprez pour plus d'informations à ce sujet.

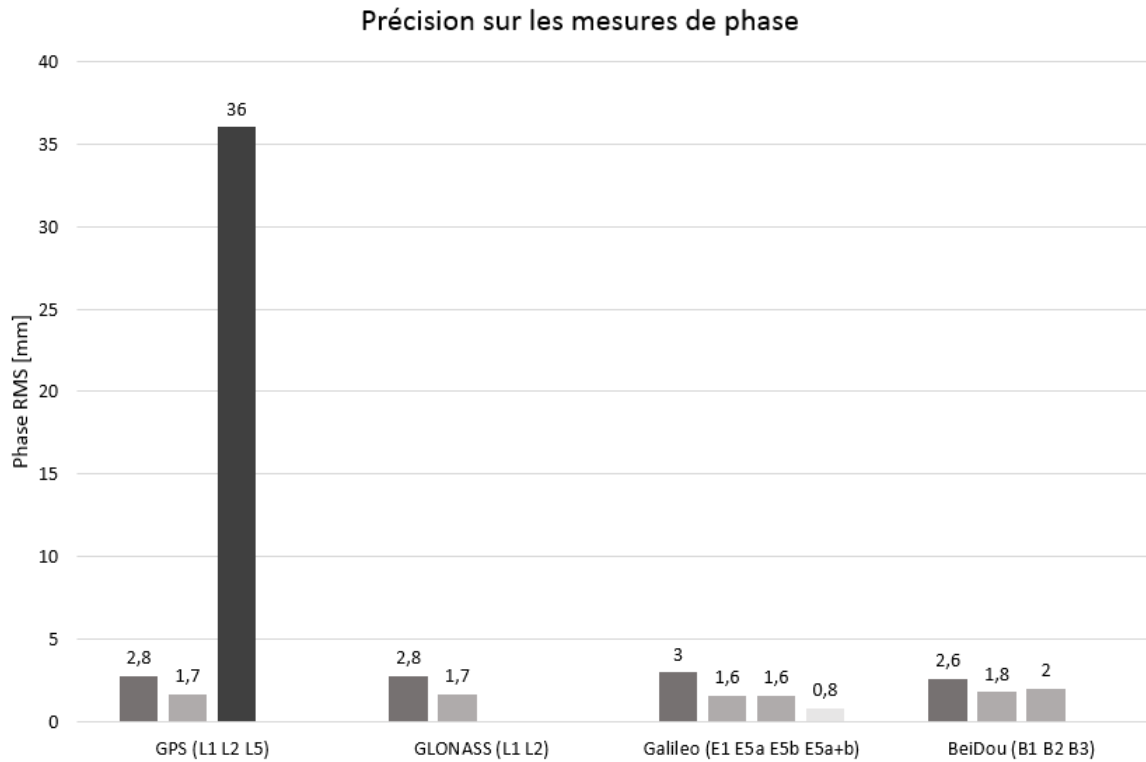


FIGURE 3.3 – Précision des mesures de phase [Springer and Schönemann, 2013]

Elles sont intéressantes en terme de comparaison, mais nous ne les utiliserons cependant pas dans les propagations de variance, de manière à rester le plus global possible dans notre étude.

3.5 Modification des données

Afin de mener au mieux notre étude, il nous a semblé essentiel de pouvoir tester nos solutions dans des configurations particulières de sauts : sauts de faible amplitude, sauts présents sur plusieurs fréquences à la fois, etc.

Dans le cadre de ce travail, la terminologie suivante est utilisée :

- Un saut est qualifié d'isolé si, pour la même époque, aucun autre saut n'est présent sur une ou plusieurs des autres fréquences analysées.
- Des sauts sont qualifiés de simultanés si, pour la même époque, plusieurs fréquences porteuses sont affectées par des sauts.
- Les sauts simultanés sont de même amplitude si leur valeur ainsi que leur signe sont similaires.
- Des sauts sont successifs s'ils apparaissent à des époques se succédant.

D'une part, il est parfois difficile de rencontrer certains cas dans les données brutes,. D'autre part, ils ne sont pas aisément identifiables lorsqu'ils sont présents. Afin de permettre une gestion la plus efficace possible dans ces conditions particulières, l'idéal serait

de tester nos algorithmes dans ces conditions lors de leur développement. Quoi de mieux pour cela que créer artificiellement ces cas sur des données brutes quelconques ?

Afin de rendre cela possible, une routine permettant d'insérer des sauts dans des données brutes a été développée. A partir d'un fichier RTP de notre choix, cette routine nous permet de choisir les satellites et les époques pour lesquelles des sauts vont être insérés, ainsi que l'amplitude de ces derniers. En sortie, la routine fournit un fichier au format RTP similaire à l'original, dont la seule différence est la présence de sauts de cycles artificiels. Grâce à cette routine, des scénarios particuliers de sauts de cycles ont pu être créés.

Cette pratique présente plusieurs avantages :

- Tout d'abord, l'utilisateur a le loisir d'insérer des sauts à l'époque lui semblant la plus propice. Ainsi, s'il remarque dans ses données la présence de forts gradients ionosphériques lors de certaines époques, il peut décider d'insérer des sauts justement à ces époques stratégiques.
- Ensuite, l'insertion manuelle des sauts permet de connaître exactement les époques d'apparition des sauts, la (ou les) fréquence(s) concernée(s), ainsi que leur amplitude. Ce contrôle total de la situation lui permettra de savoir, sans équivoque, quelle est la solution à laquelle l'algorithme devrait parvenir. Ceci est particulièrement appréciable pour les tests d'algorithmes.

Ces sauts artificiels seront particulièrement utilisés pour les tests des méthodes de détection en cours de développement et permettront d'en définir les limites.

Quant aux données brutes, elles seront, elles, utilisées pour la validation, le but de cette dernière étant de voir le comportement des algorithmes dans des situations tout à fait réelles, dont la solution réelle est inconnue.

3.5.1 Choix des jours de données de tests

Durant les tests effectués en cours de parcours, comme nous l'avons déjà mentionné, les données provenant des stations de ULG, de BRUX, de DLF, et de GMSD ont été utilisées.

Afin de déterminer les jours ainsi que les époques les plus propices à l'insertion manuelle des sauts, nous avons tout d'abord consulté le site www.gnss-ulg.be⁴. Ce dernier permet, entre autres, de consulter des informations sur le niveau d'activité ionosphérique, essentiellement à travers la présence d'irrégularités ionosphériques. Celles-ci sont comptabilisées pour toutes les heures et présentées sous forme d'histogramme, pour la station voulue. Dans un cadre de détection des sauts de cycles en ionosphère active, il nous a semblé opportun d'utiliser cet indicateur, pour un premier dégrossissement, afin de relever les jours pour lesquels les irrégularités observées étaient nombreuses et de forte amplitude, et donc pour lesquels les méthodes de détection des sauts de cycles seraient particulièrement mises à mal. C'est en effet la variabilité locale, causée par des phénomènes tels que les *Travelling Ionospheric Disturbance* (TID's), les scintillations, les éruptions solaires, ou

4. Développé par le service de Géodésie et de GNSS de l'unité de Géomatique de l'ULg.

encore les tempêtes géomagnétiques, qui conditionnera l'efficacité des méthodes de détection des sauts de cycles⁵.

Si, en réalité, plusieurs stations et plusieurs jours ont été utilisés afin de tester nos méthodes, nous ne reprendrons, dans les explications et les illustrations de ce travail, que les données du jour 134 de 2014 à GMSD. GMSD étant une station dont la latitude est entre la nôtre et l'équateur magnétique, elle sera celle globalement la plus concernée par de fortes variations ionosphériques, par rapport à l'ensemble de nos stations de tests. Le jour 134 à cette station est, parmi les jours de données dont nous disposons, un de ceux affectés par les plus fortes et plus fréquentes irrégularités (voir FIGURE 3.4). C'est en effet celui qui se révélera le plus problématique lors de nos tests, c'est pourquoi ce dernier sera utilisé pour illustrer notre propos et conditionnera nos réflexions quant à l'optimisation des méthodes de détection⁶.

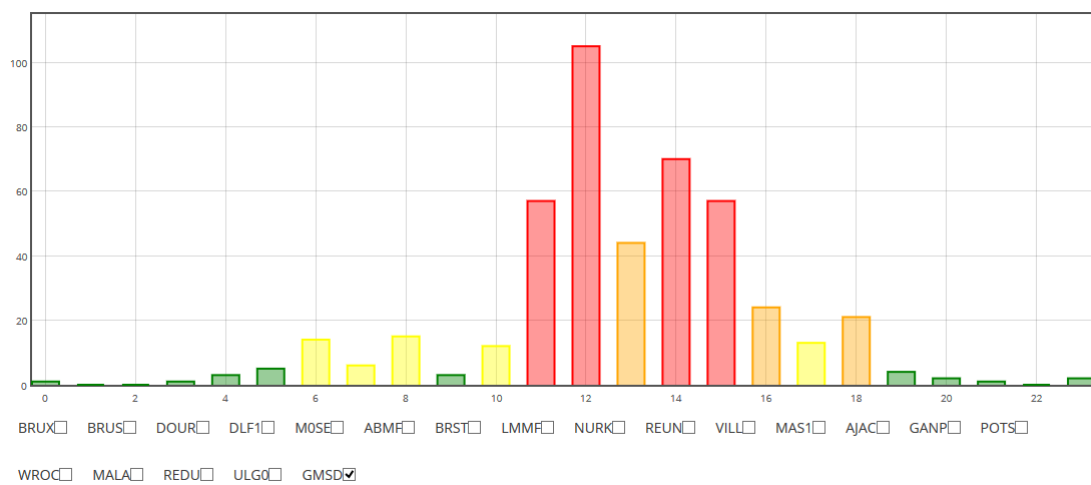


FIGURE 3.4 – Irrégularités journalières - GMSD - DOY 134/14 [www.gnss-ulg.be]

3.5.2 Choix des époques d'insertion de sauts

A l'intérieur même de cette journée d'exemple, il a ensuite fallu déterminer les époques auxquelles il serait le plus intéressant d'insérer des sauts de cycles. Pour ce faire, nous avons observé le délai ionosphérique sur base des fréquences E1-E5a. Ces deux fréquences étant spectralement les plus éloignées, les mesures sur chacune d'entre elles seront affectées des délais ionosphériques les plus différents, c'est pourquoi l'utilisation de ces dernières est la plus indiquée afin de se faire une idée de la variabilité ionosphérique locale. Le délai ionosphérique résultant entre ces deux époques a pu être approché grâce à une combinaison *Geometry-Free* différenciée au premier (ΔI) et au second ordre ($\Delta\Delta I$). Les résultats pour le jour d'illustration choisi sont repris à la FIGURE 3.5.

Comme ces figures le montrent, les délais ionosphériques sont, pour certaines époques, suffisants que pour qu'une telle variation rapide soit confondue avec un saut de cycle. C'est par exemple le cas pour l'époque 1604 du satellite 11.

5. Cela sera abordé plus en détail dans les chapitres suivants.

6. Les résultats de tests sur d'autres jours et d'autres stations sont bien sur évidemment disponibles sur demande.

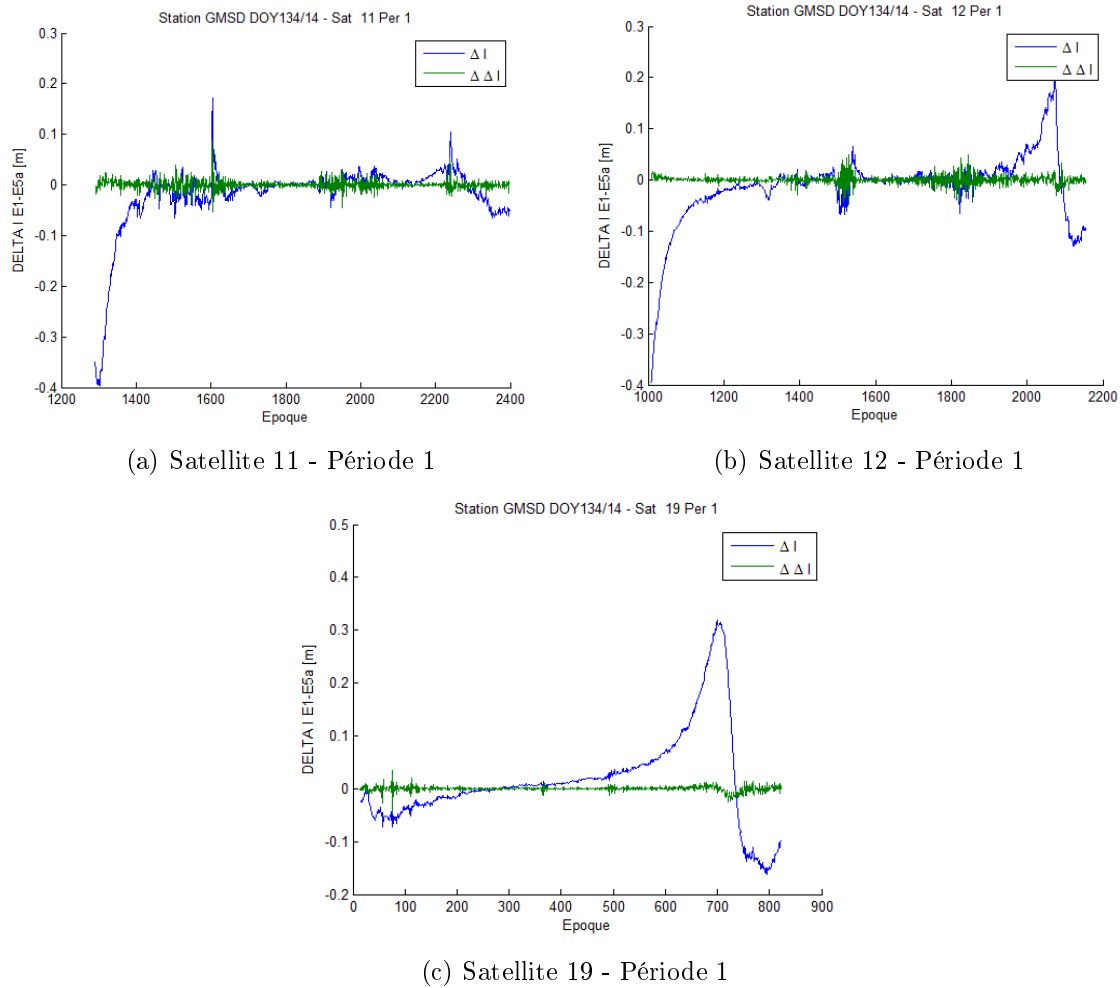


FIGURE 3.5 – Délais ionosphériques entre E1 et E5a - GMSD - DOY 134/14

Sur base de ces illustrations, les époques auxquelles nous avons décidé d'insérer des sauts de cycles sont les suivantes :

- Pour le satellite 11 - période 1, les époques 1604 et 2241 ont été choisies
- Pour le satellite 12 - période 1, les époques 1540 et 2074 ont été choisies
- Pour le satellite 19 - période 1, les époques 75 et 701 ont été choisies

3.5.3 Insertion de sauts

Dans nos méthodes de détection, les trois cas de figure seront distingués :

- Sauts isolés
- Sauts simultanés d'amplitudes différentes
- Sauts simultanés de mêmes amplitudes

En fonction de cela, différentes modifications seront effectuées à partir du fichier de base. Notons que, comme précisé à la SECTION 1.7.2, les sauts de cycles peuvent se

succéder dans le temps, à intervalle proche. Ces sauts successifs ne seront pas créés artificiellement et seront peu discutés dans le cadre de ce travail, ceux-ci étant rares en pratique.

Sauts isolés

Les premiers types de modifications sont les sauts isolés. Aux 6 époques concernées (associées bien sûr à un satellite et une passe), des sauts isolés seront insérés. Pour un même fichier, ils seront spécifiques à une fréquence et présenteront la même amplitude. Les fichiers suivants seront créés :

- 4 fichiers pour lesquels les sauts seront d'amplitude d'un seul cycle
 - 1 où ils seront sur E1
 - 1 où ils seront sur E5a
 - 1 où ils seront sur E5b
 - 1 où ils seront sur E5a+b
- 4 fichiers pour lesquels les sauts seront d'amplitude de deux cycles
 - 1 où ils seront sur E1
 - 1 où ils seront sur E5a
 - 1 où ils seront sur E5b
 - 1 où ils seront sur E5a+b
- *etc.* (jusqu'une amplitude de 5 cycles)

Sauts simultanés d'amplitudes différentes

Les deuxièmes types de modifications sont les sauts simultanés d'amplitudes différentes. Dans cette idée, le fichier contenant les sauts suivants sera créé :

Satellites	Epoques	Saut sur E1	Saut sur E5a	Saut sur E5b	Saut E5a+b
E 11	Ep 1604	6	4	8	1
	Ep 2241	-6	-4	-8	-1
E 12	Ep 1540	2	1	4	5
	Ep 2074	-2	-1	-4	-5
E 19	Ep 75	1	3	5	10
	Ep 701	-1	-3	-5	-10

TABLE 3.1 – Insertions de sauts simultanés d'amplitudes différentes pour GMSD - DOY 134/14

Sauts simultanés de mêmes amplitudes

Enfin, les troisièmes types de modifications sont les sauts simultanés de mêmes amplitudes. Dans cette idée, cinq fichiers seront créés. Le premier concernera les sauts d'amplitude d'un cycle, le deuxième les sauts d'amplitude de deux cycles, *etc.* Ceux-ci sont repris à la TABLE 3.2.

Satellites	Epoques	Saut sur E1	Saut sur E5a	Saut sur E5b	Saut E5a+b
E 11	Ep 1604	5 à 1	5 à 1	5 à 1	5 à 1
	Ep 2241	-5 à -1	-5 à -1	-5 à -1	-5 à -1
E 12	Ep 1540	5 à 1	5 à 1	5 à 1	5 à 1
	Ep 2074	-5 à -1	-5 à -1	-5 à -1	-5 à -1
E 19	Ep 75	5 à 1	5 à 1	5 à 1	5 à 1
	Ep 701	-5 à -1	-5 à -1	-5 à -1	-5 à -1

TABLE 3.2 – Insertions de sauts simultanés de même amplitude pour GMSD - DOY
134/14

3.6 Conclusion

Dans ce travail, la collection de données brutes n'a pas été laborieuse et le format dans lequel ces données ont été fournies en ont permis une exploitation de manière assez directe. A partir de ces données, un travail supplémentaire a donc pu être effectué : celui de l'ajout manuel de sauts de cycles, afin de créer des configurations particulières peu courantes et pouvant se révéler problématiques. Ces données modifiées seront utilisées dans les chapitres suivants afin de confronter les performances théoriques aux performances réelles.

Chapitre 4

Détection : les principes

4.1 Introduction

La détection des sauts de cycles consiste en l'association de quantités-tests, dans lesquelles le saut apparaîtra comme une discontinuité, et de méthodes de détection, permettant quant à elles de mettre en évidence cette discontinuité.

Comme évoqué à la SECTION 1.7.2, plusieurs cas de figure peuvent se présenter. Ce travail traitera des sauts isolés et simultanés, d'amplitudes identiques ou différentes. Les sauts successifs n'y seront par contre que peu discutés, ce cas étant peu abordé dans la littérature et étant rare en pratique¹.

4.2 Quantité-test

Afin de construire des quantités-tests mettant le saut de cycle efficacement en évidence, il s'avère tout d'abord nécessaire de comprendre la manière dont le saut se manifeste dans la mesure de phase.

L'unité de l'observable de phase peut être soit le mètre, soit le cycle (comme fourni dans le format RTP). Pour rappel, à la SECTION 1.4, la mesure de phase, exprimée en mètres, a été modélisée comme suit :

$$\begin{aligned} \Phi_p^i[m] = & D_p^i + T_p^i - I_{p,f_k}^i + M_{p,f_k,\varphi}^i + \lambda N_{p,f_k}^i + c\Delta t^i(t^e) - c\Delta t_p(t_r) + \Delta t_{p,f_k,\varphi} \\ & + \Delta t_{f_k,\varphi}^i + \varepsilon_{p,f_k,\varphi}^i \end{aligned} \quad (4.1)$$

La mesure de phase, exprimée en cycles, peut être dérivée de cette dernière et modélisée comme suit :

1. Ils sont généralement liés à des événements ionosphériques extrêmes et rares. Nous renvoyons à ce sujet au chapitre de validation.

$$\begin{aligned} \varphi_p^i [\text{cycle}] = & \frac{f_k}{c} * (D_p^i + T_p^i - I_{p,f_k}^i + M_{p,f_k,\varphi}^i + \Delta t_{p,f_k,\varphi} + \Delta t_{f_k,\varphi}^i) + N_{p,f_k}^i \\ & + f_k * (\Delta t^i(t^e) - \Delta t_p(t_r)) + \varepsilon_{p,f_k,\varphi}^i \end{aligned} \quad (4.2)$$

Comme développé à la SECTION 1.7.1, les sauts de cycles correspondent à une non-incrémentation du compteur d'ambiguïté entière. Dès lors, dans l'observable de phase exprimée en cycles, un saut correspondra à ce nombre entier de cycles perdus. Le terme \mathbf{CS}_{p,f_k}^i , correspondant au saut de cycle sur une fréquence porteuse f_k , sera ajouté à la mesure de phase en cycles, qui deviendra alors :

$$\begin{aligned} \varphi_p^i [\text{cycle}] = & \frac{f_k}{c} * (D_p^i + T_p^i - I_{p,f_k}^i + M_{p,f_k,\varphi}^i + \Delta t_{p,f_k,\varphi} + \Delta t_{f_k,\varphi}^i) + N_{p,f_k}^i + \mathbf{CS}_{p,f_k}^i \\ & + f_k * (\Delta t^i(t^e) - \Delta t_p(t_r)) + \varepsilon_{p,f_k,\varphi}^i \end{aligned} \quad (4.3)$$

Si l'observable de phase est exprimée en mètres, le saut de cycle correspondra alors à ce nombre entier multiplié par la longueur d'onde de la porteuse concernée, et cette mesure de phase exprimée en mètres deviendra alors :

$$\begin{aligned} \Phi_p^i [m] = & D_p^i + T_p^i - I_{p,f_k}^i + M_{p,f_k,\varphi}^i + \lambda N_{p,f_k}^i + \lambda \mathbf{CS}_{p,f_k}^i + c\Delta t^i(t^e) - c\Delta t_p(t_r) \\ & + \Delta t_{p,f_k,\varphi} + \Delta t_{f_k,\varphi}^i + \varepsilon_{p,f_k,\varphi}^i \end{aligned} \quad (4.4)$$

Dans la détection des sauts de cycles, en plus des mesures de phases, les mesures de codes peuvent également être utilisées. L'équation de l'observable de code est, comme nous l'avons établi à la SECTION 1.4, modélisée comme suit :

$$P_p^i [m] = D_p^i + T_p^i + I_{p,f_k}^i + M_{p,f_k,m}^i + c\Delta t^i(t^e) - c\Delta t_p(t_r) + \Delta t_{p,f_k,m} + \Delta t_{f_k,m}^i + \varepsilon_{p,f_k,m}^i \quad (4.5)$$

Dans l'observable de phase brute, le saut, en particulier lorsqu'il est de petite amplitude, n'est pas directement visible. Il est caché par les différents termes contribuant à la mesure de phase, en particulier par la distance satellite-récepteur ainsi que les erreurs d'horloge. Afin d'éliminer une partie de ces termes et de mettre en évidence les éventuels sauts, des combinaisons linéaires d'observables sont construites. Dans le cadre de la détection des sauts, ces combinaisons sont qualifiées de *quantités-tests*.

Les quantités-tests peuvent se différencier selon plusieurs aspects :

- En fonction du type d'observables utilisées : les mesures de phases peuvent être combinées avec des mesures de codes (EQ 4.5) ou de Doppler, ou elles sont utilisées seules.
- En fonction de leurs propriétés (voir SECTION 4.2.1).
- En fonction du nombre de fréquences porteuses utilisées.

Nous préférerons la dernière classification, le but du travail étant de mettre en évidence une éventuelle valeur ajoutée de l'utilisation de fréquences supplémentaires dans les méthodes de détection des sauts de cycles.

L'analyse des sauts sera effectuée indépendamment pour chaque satellite et pour chaque constellation. Cette approche est de loin la plus courante. En effet, la manière la plus efficace d'éliminer les différents termes dont la variation d'époque en époque "masque" les sauts est de combiner différentes observables ayant suivi le même trajet atmosphérique (afin d'éliminer les délais neutrosphériques, voire ionosphériques), provenant du même satellite (afin d'éliminer les biais hardware des satellites et leurs erreurs d'horloges), arrivant au même récepteur (afin d'éliminer les biais hardware des récepteurs et leurs erreurs d'horloges), et donc ayant parcouru la même distance (élimination du terme de distance géométrique satellite-récepteur).

Cette approche permet également une certaine autonomie puisque, pour corriger les données d'un satellite, seules les informations provenant de celui-ci sont nécessaires. Cela est particulièrement avantageux pour le traitement des données de constellations en phases de déploiement, dont la totalité des satellites n'est pas encore en orbite, et où il est tout à fait possible de se retrouver avec un seul satellite visible à un moment donné.

4.2.1 Différentes propriétés

Chaque combinaison d'observables possède ses propres caractéristiques. Dans le cadre de la détection des sauts de cycles en ionosphère active, les caractéristiques particulièrement décisives seront le caractère *geometry-free*, le caractère *ionosphere-free*, le bruit sur la combinaison finale, et enfin la conservation du caractère entier des ambiguïtés.

Caractère *geometry-free*

Une combinaison *geometry-free* permet d'éliminer les termes qui ne dépendent pas de la fréquence de la porteuse considérée, comme les termes de distances, les erreurs d'horloges, et l'effet neutrosphérique. L'élimination de ces termes est particulièrement importante car, d'une manière générale, leur variation entre deux époques d'observation masquera l'effet de petits sauts de cycles sur la mesure de phase de battement.

Caractère *ionosphere-free*

Une combinaison à caractère *ionosphere-free* permet d'éliminer les délais ionosphériques de premier ordre. En réalité, il existe également des effets ionosphériques d'ordres plus élevés, c'est-à-dire inversement proportionnels aux troisième, quatrième, *etc.* puissances de la fréquence porteuse. Les fréquences utilisées par les GNSS étant de l'ordre du GigaHertz, ces termes d'ordre supérieur seront considérés comme négligeables, et les délais ionosphériques seront approchés, pour rappel, de la manière suivante :

$$I \approx \frac{40.3 TEC}{f_k^2} \quad (4.6)$$

L'élimination des délais ionosphériques est une propriété particulièrement intéressante dans notre cas, puisqu'elle permet d'éviter la confusion entre un saut et une variation ionosphérique d'amplitude du même ordre de grandeur.

Bruit sur la combinaison finale

Les observables GNSS étant utilisées en combinaisons dans les méthodes de détection des sauts de cycles, il importe de déterminer la variance du résultat de ces combinaisons. Si les propriétés stochastiques des observables sont connues, la propagation de variance se calcule de la manière suivante.

Posons :

$\underline{\tilde{x}}$	est un vecteur de variables aléatoires $\underline{\tilde{x}}(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n)$
$\underline{\tilde{y}}$	est un vecteur aléatoire $\underline{\tilde{y}}(\tilde{y}_1, \dots, \tilde{y}_m)$ et est une fonction linéaire de $\underline{\tilde{x}}$ tel que $\underline{\tilde{y}} = \underline{f}(\underline{\tilde{x}})$
$\sigma_{x_i}^2$	est la variance de \tilde{x}_i
σ_{x_i, x_j}	est la covariance entre \tilde{x}_i et \tilde{x}_j
$\sigma_{y_i}^2$	est la variance de \tilde{y}_i
σ_{y_i, y_j}	est la covariance entre \tilde{y}_i et \tilde{y}_j
Σ_x	est la matrice variance-covariance du vecteur $\underline{\tilde{x}}$
Σ_y	est la matrice variance-covariance du vecteur $\underline{\tilde{y}}$
J	est le Jacobien de la fonction $\underline{f}(\underline{\tilde{x}})$

La fonction $\underline{f}(\underline{\tilde{x}})(f_1(\tilde{x}), \dots, f_m(\tilde{x}))$ est linéarisée autour d'une valeur à priori $\underline{x}^0(x_1^0, \dots, x_n^0)$ (aussi appelée valeur pivot) [Warnant, 2013], et le Jacobien correspond à la matrice des dérivées partielles de premier ordre :

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta f_1}{\delta x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta f_m}{\delta x_n} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

A partir de la matrice variance-covariance de x , l'on peut déterminer celle de y de la manière suivante :

$$\Sigma_y = J \Sigma_x J^T \quad (4.8)$$

Où

$$\Sigma_x = \begin{pmatrix} \sigma_{x_1}^2 & \dots & \sigma_{x_1, x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{x_n, x_1} & \dots & \sigma_{x_n}^2 \end{pmatrix} \quad \Sigma_y = \begin{pmatrix} \sigma_{y_1}^2 & \dots & \sigma_{y_1, y_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{y_m, y_1} & \dots & \sigma_{y_m}^2 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Les mesures de codes et de déphasages effectuées par les récepteurs GNSS utilisés dans notre étude sont considérées comme statistiquement indépendantes : les covariances de ces observations seront donc nulles.

Les précisions sur les observations de bases (codes et phases) utilisées sont celles fournies par l'Agence Spatiale Européenne [Springer and Schönemann, 2013].

Les mesures de phases étant significativement plus précises que celles de codes, le résultat des combinaisons n'utilisant que les phases seront de meilleure précision.

Pour chaque combinaison, en plus de la précision à 1σ , l'effet d'un saut d'un seul cycle sur la combinaison sera fourni. Ces deux paramètres seront alors comparés et un ratio entre ces deux valeurs sera calculé (EQ 4.10). Celui-ci permettra de mettre en évidence si, oui ou non, un saut d'un cycle induira une discontinuité détectable dans la quantité-test.

$$ratio = \frac{| \text{effet saut d'1 cycle} |}{1\sigma} \quad (4.10)$$

Si l'on suppose les erreurs aléatoires et distribuées autour de la moyenne selon une loi Normale, environ 68 % des mesures seront comprises dans l'intervalle [moyenne- σ ; moyenne+ σ]. Plus de 99 % des données seront comprises dans un intervalle de 3σ .

Autrement dit, si le ratio est supérieur à trois, on considérera le saut comme détectable. Les principes de la détection statistique seront détaillés à la SECTION 4.3.

Une combinaison sera considérée comme insensible à un saut d'un cycle, présent sur une fréquence particulière, si l'effet d'un saut sur la combinaison est inférieur à la précision de cette combinaison, c'est-à-dire si le ratio est inférieur à l'unité.

Dans cette section, seule la constellation Galileo, au centre du travail, sera considérée. La même approche pourrait cependant être réalisée pour d'autres constellations.

Conservation du caractère entier des ambiguïtés

La mesure de phase peut être exprimée en cycles ou en mètres. Dans les données RTP, elle est fournie en cycles. La conservation du caractère entier des ambiguïtés est une propriété des quantités-tests qui présente principalement une importance en terme de correction des sauts, puisqu'il sera plus facile de déterminer la valeur de ceux-ci si ils restent entiers. Dans le cadre de la détection uniquement, cette propriété, si elle est appréciable, n'est pas primordiale.

4.2.2 Mono-fréquence

Les combinaisons mono-fréquences sont peu nombreuses, le nombre d'observables disponibles sur une seule fréquence étant assez restreint. En pratique, comme les sauts de cycles ne sont pas directement visibles dans l'observable de phase, celle-ci sera combinée avec la mesure de code.

La combinaison Code-Phase

La combinaison code-phase soustrait la mesure de code à la mesure de phase, toutes deux exprimées en mètres :

$$\begin{aligned} CP_p^i[m] &= \Phi_p^i - P_p^i \\ &= -2 * I_{p,f_k}^i + M_{p,f_k,\varphi}^i - M_{p,f_k,m}^i + \lambda_{f_k} N_{p,f_k}^i + \lambda_{f_k} \mathbf{CS}_{p,f_k}^i + \varepsilon_{p,f_k,CP}^i \end{aligned} \quad (4.11)$$

Plusieurs termes sont communs aux deux mesures, cette combinaison permet donc de s'affranchir :

- de la distance satellite-récepteur (elle est donc qualifiée de *geometry-free*)
- des erreurs d'horloges du récepteur et du satellite
- du délai troposphérique

Au contraire, certains termes, spécifiques au type d'observable sont conservés :

- Les délais ionosphériques étant de signes opposés pour les mesures de code et de phase, ils s'additionnent. Ce double délai ionosphérique sera particulièrement gênant en cas de forte variabilité ionosphérique.
- Le multi-trajet ne peut non plus être éliminé, puisqu'il est spécifique à l'observable, de code ou de phase.
- Les délais hardware du satellite et du récepteur
- Le terme d'ambiguïté initiale (et l'éventuel saut de cycle)

La mesure de phase étant en mètres, le caractère entier du terme d'ambiguïté, et donc d'un éventuel saut, n'est pas respecté. L'effet d'un saut de cycle sur le résultat de la combinaison peut être calculé de la manière suivante :

$$\Delta CP_p^i [m] = \lambda_{f_k} * \mathbf{CS}_{p,f_k}^i \quad (4.12)$$

Où

λ_{f_k} est la longueur d'onde de la fréquence porteuse concernée
 \mathbf{CS}_{p,f_k}^i est l'amplitude du saut exprimée en cycles

La TABLE 4.1 reprend la précision des différentes combinaisons code-phase qu'il est possible de construire à partir des signaux Galileo ainsi que l'effet qu'un saut d'un cycle aurait sur cette combinaison.

Fréquence	$1\sigma [m]$	Effet d'un saut d'un cycle $[m]$	Ratio
<i>E1</i>	0.36	0.1903	0.5
<i>E5a</i>	0.35	0.2548	0.7
<i>E5b</i>	0.34	0.2483	0.7
<i>E5a+b</i>	0.13	0.2515	1.9

TABLE 4.1 – Précision de la combinaison Code-Phase

Cette table montre que la précision de la combinaison code-phase est insuffisante pour mettre en évidence des sauts d'un seul cycle². Il n'est cependant pas exclu qu'elle contribue à la détection ou correction de sauts de plus grandes amplitudes.

Enfin, notons que le grand avantage des combinaisons mono-fréquences est qu'elles ne sont pas affectées par les sauts simultanés, puisqu'elles ne traitent qu'une seule fréquence porteuse à la fois.

4.2.3 Bi-fréquence

Trois combinaisons bi-fréquences sont abordées : la combinaison de Hatch-Wübenna-Melbourne, la combinaison *geometry-free*, et la combinaison *ionosphere-free*. Par convention, la fréquence la plus haute sera la f_1 (et donc la plus basse, f_2).

La combinaison Hatch-Wübenna-Melbourne

La combinaison de Hatch-Wübenna-Melbourne (EQ 4.13) mélange mesures de codes et de phases. Elle se décline en plusieurs versions : *widelane - narrowlane*, *middlelane-narrowlane*, ou encore *extra-widelane-narrowlane*, selon les fréquences porteuses correspondant aux indices. Pour GPS, la combinaison est *widelane - narrowlane* entre L1 et L2, elle est *middlelane-narrowlane* entre L1 et L5, et est *extra-widelane-narrowlane* entre L2 et L5. Puisque nous utiliserons jusqu'à quatre fréquences Galileo différentes, nous préférons appeler cette combinaison par le nom de ses contributeurs.

$$HWM_p^i [cycle] = \varphi_{p,f_1}^i - \varphi_{p,f_2}^i - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{f_1}{c} P_{p,f_1}^i + \frac{f_2}{c} P_{p,f_2}^i \right) \quad (4.13)$$

Dans cette combinaison, il ne reste que les termes de délais hardware, de multi-trajet, ainsi que ceux d'ambiguïté initiale (et les éventuels sauts de cycles) :

$$\begin{aligned} HWM_p^i [cycle] = & N_{p,f_1}^i + \mathbf{CS}_{p,f_1,\varphi}^i - N_{p,f_2}^i - \mathbf{CS}_{p,f_2,\varphi}^i \\ & + \frac{f_1}{c} (M_{p,f_1,\varphi}^i + \Delta t_{p,f_1,\varphi} + \Delta t_{f_1,\varphi}^i) \\ & - \frac{f_2}{c} (M_{p,f_2,\varphi}^i + \Delta t_{p,f_2,\varphi} + \Delta t_{f_2,\varphi}^i) \\ & - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} * \frac{f_1}{c} (M_{p,f_1,m}^i + \Delta t_{p,f_1,m} + \Delta t_{f_1,m}^i) \\ & - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} * \frac{f_2}{c} (M_{p,f_2,m}^i + \Delta t_{p,f_2,m} + \Delta t_{f_2,m}^i) \\ & + \varepsilon_{p,f_1,f_2,HWM}^i \end{aligned} \quad (4.14)$$

2. Notons tout de même un ratio nettement plus élevé pour $E5a+b$.

En effet, cette combinaison est *geometry-free*. Les différentes occurrences de la distance satellite-récepteur se compensent de la manière suivante :

$$\frac{f_1}{c} * D_p^i - \frac{f_2}{c} * D_p^i - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{f_1}{c} * D_p^i + \frac{f_2}{c} * D_p^i \right) = 0 \quad (4.15)$$

Les délais troposphériques sont eux aussi les mêmes peu importe la porteuse et le type de mesure considéré. Ils s'annulent donc de la même manière que le terme géométrique.

La combinaison HWM est également *ionosphere-free*, puisque le terme ionosphérique, pour rappel uniquement considéré de premier ordre (voir EQ 1.2), s'annule lui aussi :

$$\begin{aligned} & \frac{f_1}{c} * \frac{40.3 \text{ TEC}}{f_1^2} - \frac{f_2}{c} * \frac{40.3 \text{ TEC}}{f_2^2} \\ & - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{f_1}{c} * \frac{40.3 \text{ TEC}}{f_1^2} + \frac{f_2}{c} * \frac{40.3 \text{ TEC}}{f_2^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.16)$$

Les erreurs d'horloges du satellite et du récepteur disparaissent également :

$$\begin{aligned} & f_1 * (\Delta t^i(t^e) - \Delta t_p(t_r)) - f_2 * (\Delta t^i(t^e) - \Delta t_p(t_r)) \\ & - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{f_1}{c} * c * (\Delta t^i(t^e) - \Delta t_p(t_r)) + \frac{f_2}{c} * c * (\Delta t^i(t^e) - \Delta t_p(t_r)) \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.17)$$

Puisqu'aucune des mesures de phases (en cycles) provenant des deux fréquences observées ne sont multipliées par un quelconque facteur, la combinaison finale conserve le caractère entier des ambiguïtés ainsi que des éventuels sauts. L'effet d'un saut d'un certain nombre de cycles sur la combinaison, peu importe la fréquence concernée, sera donc ce même nombre.

Si deux sauts simultanés de même amplitude (et de même signe) affectent les deux mesures de phases utilisées, ils ne pourront être mis en évidence sur cette combinaison HWM puisqu'ils s'y compensent totalement. Si deux sauts simultanés sont d'amplitudes différentes, le saut en résultant dans la combinaison sera égal à la différence entre l'amplitude de ces deux sauts.

La TABLE 4.2 reprend la précision des différentes combinaisons Hatch-Wübenna-Melbourne qu'il est possible de construire à partir des signaux Galileo, ainsi que l'effet qu'un saut d'un cycle aurait sur cette combinaison.

Ici, la précision théorique des mesures permet de mettre en évidence la présence d'un saut, même d'un cycle. Le cas de la combinaison E1-E5a est cependant légèrement en dessous de la limite admise. L'on peut remarquer que plus les fréquences porteuses seront spectralement éloignées³, plus la combinaison sera affectée par le bruit des observables de base. Cela s'explique par le facteur multiplicatif commun aux deux mesures de codes : plus les fréquences utilisées seront éloignées, plus le terme sera grand, et donc plus la mesure de code impactera le résultat de la combinaison.

3. Autrement dit, plus la différence entre les fréquences centrales des deux porteuses sera grande.

Fréquence	1σ [cycle]	Effet d'un saut d'un cycle [cycle]	Ratio
$E1 - E5a$	0.339	(-1)	2.9
$E1 - E5b$	0.310	(-1)	3.2
$E1 - E5a+b$	0.272	(-1)	3.7
$E5a - E5b$	0.027	(-1)	38
$E5a - E5a+b$	0.012	(-1)	85
$E5b - E5a+b$	0.012	(-1)	85

TABLE 4.2 – Précision de la combinaison Hatch-Wübenna-Melbourne

A nouveau, comme pour la combinaison code-phase, la mesure de code sera la principale contributrice à cette valeur de précision résultante.

La combinaison *Geometry-free*

La combinaison *geometry-free* bi-fréquence utilise uniquement les mesures de phases. Si le terme *geometry-free* est utilisé en toute généralité pour qualifier une combinaison éliminant les termes non-dépendants de la fréquence, il correspond également par extension au nom de la combinaison bi-fréquence décrite ci-dessous :

$$\begin{aligned} GF_p^i [m] &= \Phi_{p,f_1}^i - \Phi_{p,f_2}^i \\ &= \lambda_{f_1} \varphi_{p,f_1}^i - \lambda_{f_2} \varphi_{p,f_2}^i \end{aligned} \quad (4.18)$$

Après développement, celle-ci devient :

$$\begin{aligned} GF_p^i [m] &= I_{p,f_1}^i - I_{p,f_2}^i + M_{p,f_1,\varphi}^i - M_{p,f_2,\varphi}^i + \Delta t_{p,f_1,\varphi} + \Delta t_{f_1,\varphi}^i - \Delta t_{p,f_2,\varphi} - \Delta t_{f_2,\varphi}^i \\ &\quad + \lambda_{f_1} N_{p,f_1}^i - \lambda_{f_2} N_{p,f_2}^i + \lambda_{f_1} \mathbf{CS}_{p,f_1}^i - \lambda_{f_2} \mathbf{CS}_{p,f_2}^i + \varepsilon_{p,f_1,f_2,GF}^i \end{aligned} \quad (4.19)$$

En effet, la différence entre ces mesures de phases (exprimées en mètres) issues de deux porteuses différentes permet d'éliminer les termes communs suivants :

- la distance géométrique satellite-récepteur
- les délais troposphériques
- les erreurs d'horloges du satellite et du récepteur

Au contraire, les termes dépendants de la fréquence ne peuvent être éliminés. Il reste donc :

- les délais ionosphériques
- le multi-trajet
- les délais hardware du satellite et du récepteur
- les termes d'ambiguïté initiale (et les éventuels sauts de cycles)

La sensibilité de la combinaison GF à l'ionosphère, désavantageuse dans le cas de la détection des sauts de cycles, est au contraire bénéfique pour les études de *space weather*. En effet, cette combinaison est fréquemment utilisée pour le monitoring de l'ionosphère

et de ses variations.

Le résultat de la combinaison étant exprimé en mètres, le caractère entier des ambiguïtés et d'éventuels sauts n'est pas conservé. L'effet de sauts de cycles sur la combinaison peut être calculé de la manière suivante :

$$\Delta GF_p^i [m] = \lambda_{f_1} \mathbf{CS}_{p,f_1}^i - \lambda_{f_2} \mathbf{CS}_{p,f_2}^i \quad (4.20)$$

Selon la longueur d'onde de la porteuse sur laquelle le saut est situé, l'effet de ce saut sur la combinaison sera différent. Autrement dit, des sauts simultanés de mêmes amplitudes ne s'annuleront pas⁴. Néanmoins, certaines configurations de sauts simultanés, d'amplitudes différentes, seront difficilement détectables, voire indétectables. Par exemple, si l'on considère une GF E1-E5a, la combinaison d'un saut de 4 cycles sur E1 et d'un saut de 3 cycles sur E5a se manifestera dans la quantité-test par une différence de 0.0033 mètres. Or, la TABLE 4.3 renseigne que la précision de cette quantité-test, à 1σ , est de 0.0034 mètres. Ces sauts ne pourront donc pas être identifiés à l'aide de cette combinaison GF.

La TABLE 4.3 reprend la précision des différentes combinaisons *Geometry-free* qu'il est possible de construire à partir des signaux Galileo, ainsi que l'effet qu'un saut isolé d'un cycle aurait sur cette combinaison.

Fréquence	1σ [m]	Fréquence saut	Effet d'un saut d'un cycle [m]	Ratio
E1 - E5a	0.0034	E1	0.1903	56
		E5a	- 0.2548	75
E1 - E5b	0.0034	E1	0.1903	56
		E5b	- 0.2483	73
E1 - E5a+b	0.0031	E1	0.1903	61
		E5a+b	- 0.2515	81
E5a - E5b	0.0023	E5a	- 0.2548	111
		E5b	0.2483	108
E5a - E5a+b	0.0018	E5a	- 0.2548	142
		E5a+b	0.2515	140
E5b - E5a+b	0.0018	E5b	0.2483	138
		E5a+b	- 0.2515	140

TABLE 4.3 – Précision de la combinaison Geometry-free

La précision de la combinaison GF sera, pour toutes les associations de fréquences Galileo, suffisante pour permettre à un saut isolé de ressortir, peu importe son amplitude. Si les sauts sont simultanés et de mêmes amplitudes, ils seront également visibles. Cependant, ces derniers peuvent, dans certains cas particuliers, être confondus avec des sauts isolés. Par exemple, toujours sur une GF E1-E5a, des sauts simultanés de 3 cycles se manifesteront dans la combinaison par un écart de 0.1936 mètres. Or, l'effet d'un saut isolé d'un cycle sur E1 dans cette même combinaison est de 0.1903 mètres. L'écart entre

4. Pour rappel, nous considérons comme sauts de mêmes amplitudes des sauts dont les valeurs absolues ainsi que les signes sont similaires.

ces deux valeurs est inférieur à la précision de la combinaison, d'où une confusion possible entre ces deux cas. Comme mentionné précédemment, cette combinaison GF est également insensible à certaines combinaisons de sauts simultanés d'amplitudes différentes.

La combinaison *geometry-free* peut également être déclinée sous une autre variante appelée *Phase Ionospheric Residual* (PIR) (EQ 4.21). Cette dernière correspond à la combinaison précédente, divisée par la longueur d'onde de la première fréquence. Cela permet d'obtenir une combinaison exprimée en cycles. Le caractère entier de la première ambiguïté (ainsi que d'un éventuel saut de cycle y étant associé) est conservé. Ce n'est par contre pas le cas pour la seconde porteuse. Mis à part le caractère entier des ambiguïtés, les propriétés de cette combinaison sont similaires à la traditionnelle GF.

$$\begin{aligned}
PIR_p^i [cycle] &= \varphi_{p,f_1}^i - \frac{\lambda_{f_2}}{\lambda_{f_1}} \varphi_{p,f_2}^i \\
&= \frac{f_1}{c} (I_{p,f_1}^i - I_{p,f_2}^i + M_{p,f_1,\varphi}^i - M_{p,f_2,\varphi}^i + \Delta t_{p,f_1,\varphi} + \Delta t_{f_1,\varphi}^i - \Delta t_{p,f_2,\varphi} - \Delta t_{f_2,\varphi}^i) \\
&\quad + N_{p,f_1}^i - \frac{\lambda_{f_2}}{\lambda_{f_1}} N_{p,f_2}^i + \mathbf{CS}_{p,f_1}^i - \frac{\lambda_{f_2}}{\lambda_{f_1}} \mathbf{CS}_{p,f_2}^i + \varepsilon_{p,f_1,f_2,PIR}^i
\end{aligned} \tag{4.21}$$

Fréquence	1σ [cycle]	Fréquence saut	Effet d'un saut d'un cycle [cycle]	Ratio
<i>E1 - E5a</i>	0.0179	<i>E1</i>	1	56
		<i>E5a</i>	- 1.339	79
<i>E1 - E5b</i>	0.0179	<i>E1</i>	1	56
		<i>E5b</i>	- 1.305	73
<i>E1 - E5a+b</i>	0.0163	<i>E1</i>	1	61
		<i>E5a+b</i>	- 1.322	81
<i>E5a - E5b</i>	0.0091	<i>E5a</i>	- 1.026	113
		<i>E5b</i>	1	110
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0071	<i>E5a</i>	- 1.013	143
		<i>E5a+b</i>	1	141
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0072	<i>E5b</i>	1	139
		<i>E5a+b</i>	- 1.013	141

TABLE 4.4 – Précision de la combinaison *Phase Ionospheric Residual*

En termes d'effet des sauts sur la combinaison, la proportion est gardée par rapport à la combinaison GF. Cela s'explique par le fait que l'entièreté de la combinaison a été divisé par une constante (la longueur d'onde de la première porteuse, pour rappel). Le ratio entre l'influence d'un saut et la précision de la combinaison, est lui aussi similaire.

La combinaison *Ionosphere-free*

La combinaison *ionosphere-free* bi-fréquence n'utilise que les mesures de phases. De la même manière que pour *geometry-free*, le terme *ionosphere-free* est non seulement utilisé

pour décrire une combinaison qui permet l'élimination du délai ionosphérique, mais est également le nom d'une combinaison.

$$IF_p^i [m] = \frac{f_1^2 \Phi_{p,f_1}^i - f_2^2 \Phi_{p,f_2}^i}{f_1^2 - f_2^2} \quad (4.22)$$

Après développement, celle-ci devient :

$$\begin{aligned} IF_p^i [m] = & D_p^i + T_p^i + c(\Delta t^i(t^e) - \Delta t_p(t_r)) \\ & + \frac{f_1^2 (M_{p,f_1,\varphi}^i + \Delta t_{p,f_1,\varphi} + \Delta t_{f_1,\varphi}^i) - f_2^2 (M_{p,f_2,\varphi}^i + \Delta t_{p,f_2,\varphi} + \Delta t_{f_2,\varphi}^i)}{f_1^2 - f_2^2} \\ & + \frac{c f_1 (N_{p,f_1}^i + \mathbf{CS}_{p,f_1}^i) - c f_2 (N_{p,f_2}^i + \mathbf{CS}_{p,f_2}^i)}{f_1^2 - f_2^2} + \varepsilon_{p,f_1,f_2,IF}^i \end{aligned} \quad (4.23)$$

en effet, cette combinaison permet, comme son nom l'indique, d'éliminer les délais ionosphériques (EQ 4.24).

$$\left(\frac{f_1^2 * 40.3 \text{ TEC}}{f_1^2} - \frac{f_2^2 * 40.3 \text{ TEC}}{f_2^2} \right) \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} = 0 \quad (4.24)$$

Par contre, elle ne permet pas l'élimination d'autres termes.

Ainsi, les termes non-dépendants de la porteuse ont le même effet sur la combinaison finale que leur effet sur une mesure de phase brute (EQ 4.23) :

- Le terme géométrique résultant de la combinaison correspond à la distance géométrique satellite-récepteur D_p^i (EQ 4.25).

$$\frac{(f_1^2 * D_p^i - f_2^2 * D_p^i)}{f_1^2 - f_2^2} = D_p^i \quad (4.25)$$

- De la même manière, le terme troposphérique de la combinaison résultante est égal à T_p^i .
- Selon la même démarche, les erreurs d'horloges résultantes dans la combinaison finale sont de $c(\Delta t^i(t^e) - \Delta t_p(t_r))$

Les termes dépendants de la porteuse (à l'exception du délai ionosphérique, qui lui s'annule) affectent également la combinaison IF (EQ 4.23) :

- le multi-trajet
- les délais hardware du satellite et du récepteur
- les termes d'ambiguïté initiale (et les éventuels sauts de cycles)

Cette combinaison reste donc dépendante de nombreuses influences (en particulier les termes de distances et d'erreurs d'horloges) dont la variation entre deux époques de mesures sera nettement supérieure à un cycle. Seule une modélisation très précise de ces

différentes influences permettrait éventuellement d'utiliser cette combinaison dans le cadre de la détection des sauts de cycles. Un tel niveau de modélisation des différentes influences ne pourrait être atteint (sous réserve) que dans le cadre d'un positionnement par *Precise Point Positioning* dont la mise en œuvre dépasse largement le cadre de ce mémoire.

4.2.4 Tri-fréquence

Par convention, la fréquence la plus haute sera la f_1 , l'intermédiaire sera la f_2 , et la plus basse fréquence sera la f_3 .

Deux combinaisons tri-fréquences seront ici présentées : celle développée par Andrew Simsky [Simsky, 2006], et celle développée par Feng [Feng, 2008].

La combinaison de Simsky

La combinaison tri-fréquence de Simsky est uniquement composée de mesures de phases.

$$S_p^i [m] = \left(\frac{\lambda_{f_3}^2 - \lambda_{f_2}^2}{\lambda_{f_2}^2 - \lambda_{f_1}^2} \right) \Phi_{p,f_1}^i + \left(\frac{\lambda_{f_1}^2 - \lambda_{f_3}^2}{\lambda_{f_2}^2 - \lambda_{f_1}^2} \right) \Phi_{p,f_2}^i + \Phi_{p,f_3}^i \quad (4.26)$$

Pour plus de clarté, on pose généralement :

$$b_1 = \frac{\lambda_{f_3}^2 - \lambda_{f_2}^2}{\lambda_{f_2}^2 - \lambda_{f_1}^2} \quad b_2 = \frac{\lambda_{f_1}^2 - \lambda_{f_3}^2}{\lambda_{f_2}^2 - \lambda_{f_1}^2} \quad b_3 = 1$$

La valeur de ces facteurs multiplicatifs, pour les combinaisons qu'il est possible de construire à partir des signaux Galileo, sont reprises à la TABLE 4.5.

Fréquence	b_1	b_2	b_3
$E1 - E5a - E5b$	0.128	-1.128	1
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0614	-1.0614	1
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0628	-1.0628	1
$E5a - E5b - E5a+b$	1.0394	-2.0394	1

TABLE 4.5 – Coefficients des différentes combinaisons de Simsky

Après développement, cette combinaison peut se réécrire comme suit :

$$\begin{aligned} S_p^i [m] = & b_1 \lambda_{f_1} (N_{p,f_1}^i + \mathbf{CS}_{p,f_1}^i) + b_2 \lambda_{f_2} (N_{p,f_2}^i + \mathbf{CS}_{p,f_2}^i) + b_3 \lambda_{f_3} (N_{p,f_3}^i + \mathbf{CS}_{p,f_3}^i) \\ & + b_1 (M_{p,f_1,\varphi}^i + \Delta t_{p,f_1,\varphi} + \Delta t_{f_1,\varphi}^i) + b_2 (M_{p,f_2,\varphi}^i + \Delta t_{p,f_2,\varphi} + \Delta t_{f_2,\varphi}^i) \\ & + b_3 (M_{p,f_3,\varphi}^i + \Delta t_{p,f_3,\varphi} + \Delta t_{f_3,\varphi}^i) + \varepsilon_{p,f_1,f_2,f_3,S}^i \end{aligned} \quad (4.27)$$

En effet, cette combinaison permet de s'affranchir des termes communs aux différentes mesures de phases :

- distance satellite récepteur (Eq 4.28) (*geometry-free*)

- délais troposphériques
- erreurs d'horloges satellite et récepteur

$$\left(\frac{\lambda_{f_3}^2 - \lambda_{f_2}^2}{\lambda_{f_2}^2 - \lambda_{f_1}^2} \right) D_p^i + \left(\frac{\lambda_{f_1}^2 - \lambda_{f_3}^2}{\lambda_{f_2}^2 - \lambda_{f_1}^2} \right) D_p^i + D_p^i = 0 \quad (4.28)$$

Elle permet également de s'affranchir des délais ionosphériques (EQ 4.29) (*ionosphere-free*) :

$$\left(\frac{\lambda_{f_3}^2 - \lambda_{f_2}^2}{\lambda_{f_2}^2 - \lambda_{f_1}^2} \right) \frac{40.3 \text{ TEC}}{f_1^2} + \left(\frac{\lambda_{f_1}^2 - \lambda_{f_3}^2}{\lambda_{f_2}^2 - \lambda_{f_1}^2} \right) \frac{40.3 \text{ TEC}}{f_2^2} + \frac{40.3 \text{ TEC}}{f_3^2} = 0 \quad (4.29)$$

Ainsi, la combinaison finale ne dépend que des termes suivants :

- Les délais hardware du satellite et du récepteur
- Le multi-trajet
- Les termes d'ambiguïté initiale (et les éventuels sauts de cycles)

L'effet d'un saut de cycle sur la combinaison peut être calculé de la manière suivante :

$$\Delta S_p^i [m] = b_1 \lambda_{f_1} \mathbf{CS}_{p,f_1}^i + b_2 \lambda_{f_2} \mathbf{CS}_{p,f_2}^i + b_3 \lambda_{f_3} \mathbf{CS}_{p,f_3}^i \quad (4.30)$$

Le facteur multiplicatif des mesures de phases étant différent selon la fréquence, des sauts simultanés de mêmes amplitudes ne s'annuleront pas. Cependant, ils seront généralement difficiles à détecter : par exemple, sur la combinaison E1-E5a-E5b, un saut d'un cycle à la même époque sur ces trois fréquences impacte le résultat de 0.0009 m. Or, la précision de cette combinaison est de 0.0024 m. Pour que des sauts simultanés soient détectables (à 3σ) sur E1-E5a-E5b, il faudra que leurs amplitudes soient de 8 cycles au minimum.

La TABLE 4.6 reprend la précision des différentes combinaisons de Simsky qu'il est possible de construire à partir des signaux Galileo, ainsi que l'effet qu'un saut d'un cycle aurait sur cette combinaison.

Il est intéressant de remarquer la différence d'ordre de grandeur entre les effets d'un saut d'un cycle selon la fréquence concernée. Par exemple, pour une combinaison *E1-E5a-E5b*, la combinaison sera affectée de 0.0243 m si un saut d'un cycle est présent sur E1 (aucun saut sur E5a ni E5b pour cette même époque). Par contre, si le saut est sur la fréquence E5a, la combinaison sera alors affectée de 0.255 m. On observe donc presque un facteur 10 entre l'effet d'un saut d'un cycle sur E1 et l'effet d'un saut d'un cycle sur E5a. Il est donc clair que, dans cette combinaison, les sauts présents sur E1 seront plus difficilement détectables que ceux sur E5a.

Il est également intéressant de constater qu'un même effet sur la combinaison peut être induit par des scénarios différents. Par exemple, un saut isolé d'un cycle aura comme influence un décalage de 0.0243 m sur la combinaison *E1-E5a-E5a+b*. Si, à l'inverse, aucun saut n'est présent sur E1 mais qu'un saut d'un cycle est présent sur E5a et sur E5b, la

Fréquence	1σ [m]	Fréquence saut	Effet d'un saut d'un cycle [m]	Ratio
		<i>E1</i>	0.024	10
<i>E1 - E5a - E5b</i>	0.0024	<i>E5a</i>	0.255	106
		<i>E5b</i>	-0.280	117
		<i>E1</i>	0.012	6.7
<i>E1 - E5a - E5a+b</i>	0.0018	<i>E5a</i>	0.255	142
		<i>E5a+b</i>	-0.267	148
		<i>E1</i>	0.012	6.3
<i>E1 - E5b - E5a+b</i>	0.0019	<i>E5b</i>	-0.264	139
		<i>E5a+b</i>	0.252	133
		<i>E5a</i>	0.255	91
<i>E5a - E5b - E5a+b</i>	0.0028	<i>E5b</i>	0.258	92
		<i>E5a+b</i>	-0.513	183

TABLE 4.6 – Précision de la combinaison de Simsky

combinaison sera affectée de 0.0253 m. La différence entre ces deux effets, 0.001 m, est inférieure à la précision de la combinaison, 0.0024 mètres. Notons cependant que, dans le cadre de la détection des sauts de cycles, nous ne nous préoccupons pas de la (des) fréquence(s) concernée(s) par le(s) saut(s).

4.2.5 Comparaison des quantités-tests

Comme nous l'avons vu, chaque combinaison a ses avantages et ses inconvénients, et il n'existe pas de solution miracle permettant de détecter les sauts dans toutes les configurations possibles.

Dans le cadre de la détection des sauts de cycles, de manière générale et indépendamment du niveau d'activité ionosphérique, le critère minimum qu'une combinaison doit présenter est le caractère *geometry-free*, c'est-à-dire l'indépendance quant aux termes géométriques, troposphériques, et erreurs d'horloges. Cette qualité est absolument essentielle, et une combinaison ne la présentant pas ne sera pas utilisable.

- La combinaison mono-fréquence Code-Phase est *geometry-free*.
- Les combinaisons bi-fréquences Hatch-Wübbena-Melbourne et Geometry-Free sont elles aussi *geometry-free*. La combinaison Ionosphere-Free ne l'est par contre pas.
- La combinaison tri-fréquence de Simsky est *geometry-free*.

L'élimination des délais ionosphériques de premier ordre est elle aussi une qualité importante, tout particulièrement dans le cas qui nous occupe : lorsque l'activité ionosphérique est élevée.

- La combinaison bi-fréquences de Hatch-Wübbena-Melbourne, ainsi que la combinaison tri-fréquence de Simsky ne sont pas affectées de délais ionosphériques de premier ordre.

- La combinaison mono-fréquence Code-Phase est doublement affectée par des délais ionosphériques, spécifiques à la porteuse considérée.
- La combinaison bi-fréquence Geometry-Free est affectée d'un délai ionosphérique correspondant à la différence entre les délais ionosphériques présents sur les deux fréquences concernées.

Du point de vue du bruit de la combinaison et son rapport avec l'effet qu'ont les sauts sur la combinaison :

- La combinaison mono-fréquence Code-Phase est trop bruitée pour permettre la détection de petits sauts (inférieurs à 6 cycles pour E1, inférieurs à 5 cycles pour E5a et E5b, et inférieurs à 2 cycles pour E5a+b) .
- La combinaison bi-fréquence Hatch-Wübbena-Melbourne est insensible aux sauts simultanés de mêmes amplitudes.
- La combinaison bi-fréquence Geometry-free est insensible à certaines combinaisons de sauts simultanés d'amplitudes différentes.
- La combinaison tri-fréquence de Simsky est insensible aux sauts simultanés de mêmes amplitudes.

La combinaison Hatch-Wübbena-Melbourne conserve le caractère entier des ambiguïtés.

Il sera donc nécessaire d'utiliser plusieurs types de combinaisons différentes afin de permettre la détection d'un maximum de cas particuliers.

4.3 Méthode de détection

Le rôle des méthodes de détection est double. Tout d'abord, elles se doivent d'identifier les discontinuités d'une quantité-test donnée. Cela est effectué par comparaison des valeurs de ces quantités-tests à des époques successives. Une fois les discontinuités repérées, il faut ensuite déterminer si chacune de celles-ci correspond à un saut de cycle ou bien à un *outlier*⁵. Si l'association d'une méthode de détection et d'une quantité-test particulière ne met en évidence que les sauts et non pas les *outliers*, ces deux aspects sont alors traités en une seule étape.

4.3.1 Quantité-test : brute ou différenciée

Ces quantités-tests peuvent être soit le résultat brut de la combinaison, soit une différence temporelle du résultat de la combinaison⁶. La différence temporelle présente plusieurs avantages.

D'une part, elle permet d'éliminer les erreurs communes à des époques successives. Ainsi, dans les combinaisons qui ne sont pas *ionosphere-free*, une différenciation temporelle permet d'éliminer la variation "régulière" de l'ionosphère. Elle est par contre dangereuse à

5. Pour rappel, un *outlier* est une discontinuité dans la quantité-test ne correspondant pas à un saut de cycle.

6. Dans la suite du texte, nous qualifierons de "différenciée" une quantité-test ayant subi une différence temporelle d'ordre 1 à 4.

utiliser en cas de variations rapides de l'ionosphère, puisque ces variations seront amplifiées, comme le sont les sauts. Cette même remarque peut être faite concernant l'effet multi-trajet. Dans tous les cas, la différence temporelle permet de s'affranchir des erreurs de délais hardware, puisque ces erreurs, si elles sont spécifiques à la porteuse ainsi qu'au type d'observable, sont constantes tout au long de la période d'observation.

D'autre part, les différences temporelles permettent d'amplifier le saut. Dans la combinaison brute, le saut apparaît comme un biais constant (ε , de la valeur du saut) à partir de son époque d'apparition (voir TABLE 4.7). Au contraire, dans la différence du premier ordre, il apparaîtra comme un pic. Si l'on effectue la différence entre les différences de premier ordre, deux pics successifs de sens opposés caractériseront le saut. Au troisième ordre, la valeur du saut sera doublée. Elle sera triplée au quatrième ordre. Plus l'ordre de différenciation sera élevé, plus le bruit du résultat le sera lui aussi. Il conviendra donc de faire la part entre les avantages de l'utilisation d'une différence d'un ordre supérieur et ses inconvénients.

t_i	$y(t_i)$	y^1	y^2	y^3	y^4
t_1	0				
		0			
t_2	0		0		
		0		ε	
t_3	0		ε		-3ε
		ε		-2ε	
t_4	ε		$-\varepsilon$		3ε
		0		ε	
t_5	ε		0		$-\varepsilon$
		0		0	
t_6	ε		0		
		0			
t_7	ε				

TABLE 4.7 – Différences temporelles (D'après [Hofmann-Wellenhof et al., 2008])

L'utilisation de la combinaison brute présente cependant un avantage de taille : la présence d'un biais constant après apparition d'un saut, qui aidera à distinguer aisément si l'on a affaire à un saut de cycle ou un *outlier* (voir SECTION 4.3.2).

4.3.2 Détection de la discontinuité

Il existe plusieurs types d'approches pour détecter des discontinuités dans une quantité-test. Comme pour les quantités-tests, chacune présente des avantages et des inconvénients, et il n'existe pas de solution parfaite. Le choix découlera toujours d'un compromis entre différentes contraintes contradictoires.

Les méthodes classiques

La plus basique consiste à comparer les résultats de la combinaison à deux époques successives (principe de la différence temporelle) à un seuil absolu donné (voir SECTION 4.3.3). Cette approche a l'avantage de ne nécessiter que deux époques d'observation et de pouvoir être utilisée en temps réel. Elle est par contre sensible à de fortes variations en amplitude dans la quantité-test. Ainsi, si de manière générale le bruit de la combinaison est élevé, des observations seront continuellement confondues avec des sauts de cycles.

Afin d'être plus adaptée à la variabilité de la combinaison, une détection dite *statistique* peut être mise en place. Cette dernière compare la valeur courante de la combinaison aux valeurs précédentes, comprises dans une fenêtre d'analyse (voir SECTION 4.3.4). Dans cette fenêtre sont calculés des paramètres statistiques. La moyenne et l'écart-type sont les plus couramment utilisés pour le domaine de la détection des sauts. Ces paramètres permettront de définir le seuil au-delà duquel une discontinuité sera considérée comme un saut. Si cette approche, orientée sur l'analyse des données précédentes, permet de réduire le nombre de mauvaises détections dues au bruit sur les données, il reste cependant un problème : si la variabilité de la combinaison est trop importante, le seuil fixé sera supérieur à l'effet d'un saut de cycle sur la combinaison. Celui-ci ne pourra alors pas être détecté. C'est pourquoi il convient de choisir une combinaison peu bruitée et peu variable si l'on veut une détection statistique efficace. Cette méthode peut elle aussi être utilisée en temps réel, puisqu'elle se base uniquement sur les mesures précédant l'époque courante. Cependant, le désavantage de cette méthode statistique est qu'elle rend nécessaire la possession d'un nombre minimum de données (conditionné par la taille de la fenêtre), afin de pouvoir calculer des paramètres de moyennes et écarts-types représentatifs. De ce fait, il ne sera pas possible de détecter d'éventuels sauts présents à ces premières époques. Plus grave encore, la présence d'un saut lors de ces époques biaisera les statistiques dans la fenêtre.

Notons qu'un mélange entre ces deux premières méthodes peut également être utilisé : l'application d'un seuil absolu (fixe) à la comparaison entre l'époque courante et la moyenne des époques la précédant. Si l'utilisation d'une moyenne en comparaison permet de limiter l'influence d'une valeur extrême précédant la valeur courante, elle a pour désavantage, comme la méthode statistique, de nécessiter un certain nombre d'observations.

Élimination de la contrainte de temps réel

Cette étude se situant dans le cadre de post-traitement, il est possible de s'affranchir de la contrainte de temps réel. La possession de l'ensemble des données présente de nombreux avantages.

D'une part, le cas d'utilisation d'une fenêtre d'analyse n'est plus problématique au niveau d'éventuels sauts sur les premières époques. En effet, il suffit de construire l'ensemble de la combinaison et d'y faire passer une fenêtre *moving average filter* (MAF, voir SECTION 4.3.4) dans le sens inverse en plus du sens chronologique (de la première à la dernière mesure). Dès lors, les données en début de visibilité de satellite seront traitées lors du passage de la fenêtre en sens inverse, et celle en fin de visibilité par le passage de la fe-

nêtre dans le sens chronologique.

Cette approche de *forward and backward moving window averaging* (FBMWA) est utilisée par Cai dans son amélioration de l'algorithme Turbo Edit [Cai et al., 2013].

D'autre part, en généralisant cette approche, il est possible de comparer les moyennes avant et après un saut potentiel, afin de voir si un décalage de la moyenne est bel et bien observé, ou si la discontinuité détectée lors d'une étape antérieure ne correspond qu'à un outlier. Notons que seule la quantité-test brute est affectée d'un biais continu après l'apparition d'un saut de cycle.

4.3.3 Seuils

Le seuil est un des paramètres-clés de la détection des sauts de cycles, puisque c'est lui qui mènera à la décision de la présence d'un saut ou non, pour une époque donnée. Le choix du seuil optimal est délicat. S'il est trop restrictif, il y a un risque de laisser passer certains sauts (*faux négatifs*) de faible amplitude. Au contraire, s'il ne l'est pas suffisamment, certaines discontinuités ne correspondant pas à des sauts peuvent être identifiées comme telles (*faux positifs*).

En pratique, le choix du seuil dépendra de l'application. En effet, dans certains cas, l'utilisateur n'a pas besoin de connaître sa précision au centimètre près et un éventuel biais de quelques mètres ne posera pas de problème majeur. Au contraire, dans des applications critiques de haute précision, il est absolument indispensable de détecter la présence du moindre saut. Qu'il soit possible de le corriger en temps réel ou non, qu'une perte de continuité temporaire (due à la détermination d'une nouvelle époque d'observation avec sa propre ambiguïté initiale) soit acceptable ou non, il est crucial d'être tout au moins conscient de la présence d'un biais.

Deux types de seuils peuvent être définis : les seuils absolus et relatifs.

Un seuil est *absolu* lorsqu'il ne fait pas référence à la variabilité d'une combinaison. Dans les combinaisons où le caractère entier de l'ambiguïté est conservé, le seuil est généralement fixé aux alentours de l'unité. En effet, si un saut de cycle est par définition entier, le bruit ainsi que les termes non-éliminés dans la quantité-test font que le saut observé dans cette dernière ne sera pas parfaitement entier. Selon le bruit attendu de la combinaison, le seuil sera fixé entre 0.8 et 0.95, de manière à ne pas négliger de saut légèrement inférieur à l'unité. Dans les combinaisons où le caractère entier du saut n'est pas respecté, le choix du seuil est conditionné par l'effet minimal qu'aurait un saut sur la combinaison, multiplié par ce même facteur compris entre 0.8 et 0.95, selon le bruit attendu de la combinaison ainsi que le niveau de restriction voulu.

Un seuil sera au contraire *relatif* s'il s'adapte à la variabilité de la combinaison. Ce type de seuil est utilisé dans les méthodes statistiques et est généralement exprimé comme un multiple de l'écart-type (σ) par rapport à la moyenne. Statistiquement, si on prend comme hypothèse la distribution des observations (ici, la quantité-test) autour de la moyenne suivant une loi Normale,

- un intervalle de 1σ autour de cette moyenne est la plage de normalité à un niveau

- de confiance de 68 %
- un intervalle de 2σ autour de cette moyenne est la plage de normalité à un niveau de confiance de 95 %
- un intervalle de 3σ autour de cette moyenne est la plage de normalité à un niveau de confiance de 99 %

Dans le contexte de la détection des sauts de cycle, l'intervalle de 4σ est fréquemment utilisé [Blewitt, 1990].

4.3.4 Fenêtre d'analyse statistique

Les fenêtres statistiques peuvent être de deux types : *running average filter* (RAF) ou *moving average filter* (MAF) [Lonchay et al., 2011].

Une fenêtre *running AF* calcule les paramètres statistiques sur la quantité-test, à partir de la première époque d'observation, et jusqu'à l'époque courante (non-comprise). Cependant, les paramètres statistiques de la quantité-test, et plus exactement la dispersion, sont variables au cours de la période d'observation. Cela est dû à l'influence de l'élévation sur la qualité des données reçues : en début et en fin de période d'observation, le satellite est bas sur l'horizon. La variabilité des données est donc plus élevée⁷, et l'écart-type sera donc localement plus élevé. En conséquence, la fenêtre RAF est mal adaptée à une détection statistique dans le cadre de la recherche de sauts de cycles : en début de visibilité, l'intervalle de confiance, défini par un certain nombre d'écarts-types, sera élevé et correspondra à la variabilité de l'époque considérée. En milieu de période d'observation, alors que la variabilité locale sera plus faible, les paramètres statistiques seront toujours en partie influencés par la dispersion des premières observations. En fin de période d'observation, lorsque le satellite est à nouveau à basse élévation, les paramètres statistiques ne seront plus du tout représentatifs de l'époque analysée, puisqu'influencés par le long passage à haute élévation du satellite. L'intervalle de confiance sera donc trop faible et les écarts à la moyenne les plus importants seront automatiquement considérés comme des sauts de cycles, alors que les données seraient tout à fait dans la tolérance représentative de cette fin de période.

L'utilisation d'une fenêtre *moving AF* permet au contraire l'adaptation des paramètres statistiques à la variabilité de la quantité-test. Dans une MAF, seul un nombre limité d'observations précédant l'époque courante est considéré. La taille de la fenêtre de convolution est généralement fixe. Il est également possible de définir une taille différente de fenêtre selon le sens de son déplacement [Cai et al., 2013]. Ce passage d'une fenêtre mobile est comparable à un filtre et permet de "lisser" la quantité-test, et par la même occasion de réduire l'intervalle de confiance qui lui est associé [Cai et al., 2013].

$$\sigma_{MAF} = \frac{\sigma_{QT}}{\sqrt{\gamma}} \quad (4.31)$$

Où

7. Pour rappel, cela est dû à la combinaison d'un bruit plus important, d'une traversée plus longue des couches ionosphériques et troposphériques, et du multi-trajet plus probable.

σ_{MAF} est la précision sur le résultat du lissage par *MAF*
 σ_{QT} est la précision sur la quantité-test
 γ est la taille de la fenêtre de convolution

La taille de la fenêtre est également à mettre en relation avec le taux d'échantillonnage des données utilisées, puisque plus le taux d'échantillonnage sera élevé, plus, pour une même taille de fenêtre, l'intervalle de temps couvert par celle-ci sera faible.

L'influence de la taille de la fenêtre statistique n'a pas été étudiée plus en profondeur, cette considération s'éloignant de l'objectif principal du travail : l'amélioration apportée par l'usage de nouvelles fréquences dans les méthodes de traitement des sauts de cycles.

Après de multiples tests, il a donc été décidé de conserver une fenêtre de taille fixe de 20 époques pour l'ensemble du travail. Les données utilisées étant échantillonnées à 30 secondes, cela correspondra à une fenêtre de 10 minutes.

4.3.5 Méthode hybride

Une combinaison idéale pour la détection des sauts de cycles devrait principalement mettre en évidence l'ambiguïté initiale et ses variations (sauts de cycles) et ne pas subir l'influence d'autres paramètres. Un saut sera alors visible par un biais constant dans la version brute de la combinaison et d'un pic sans équivoque dans sa version différenciée.

Dans ce cas, nous procéderons en deux étapes.

La première étape consiste à détecter la discontinuité dans la quantité-test différenciée par méthode statistique. La fenêtre parcourra les données dans les deux sens (FBMAW), et deux seuillages seront appliqués : un seuil relatif et un seuil absolu.

La seconde étape consistera en la comparaison des moyennes avant et après le saut potentiel dans la quantité-test brute. Un second seuil absolu, plus restrictif, sera appliqué.

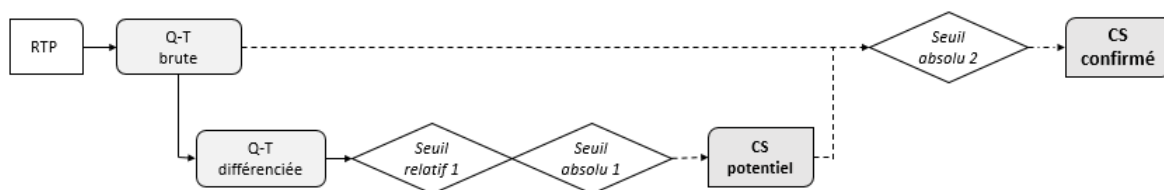


FIGURE 4.1 – Méthode de détection hybride

Cette double approche fut mise en place au fur et à mesure de nombreux tests.

Première étape : détection grossière

Quantité-test différenciée Pour une première détection des discontinuités, il est préférable de ne pas utiliser une combinaison brute. En effet, dans celle-ci, le saut se manifeste

par un décalage continu dans la moyenne. Dès lors, les paramètres statistiques de moyenne et écart-types calculés pour les époques suivant le saut ne seront pas cohérents, la fenêtre d'analyse comprenant des données situées avant le saut. Afin de détecter un éventuel nouveau saut dans les données suivant ce premier saut, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- Ne pas analyser les γ données suivant le saut. Si le saut est isolé, cela ne posera pas de problème majeur. Il convient cependant de considérer le cas où un second saut serait présent quelques époques après le premier saut. Cette seconde discontinuité ne serait alors pas détectée. De plus, lors de la reprise de l'analyse, ce second saut rendrait le calcul des paramètres statistiques incohérents, et l'on retombe alors sur le même problème.
- Adapter la taille de la fenêtre pour les γ données suivant le saut : taille d'une époque pour l'époque suivant le saut, de deux époques pour la suivante, *etc.*, jusqu'au rétablissement de la taille γ originale. Si cette approche permet de traiter les époques suivant directement le saut, elle est statistiquement discutable : en effet, plus la taille de la fenêtre est petite, plus une mesure extrême influencera les paramètres. Une variante serait d'utiliser les écarts aux moyennes avant et après saut de cycle pour le calcul de l'écart-type (qui serait donc basé sur γ observations). Cependant, le paramètre de moyenne ne pourra être que calculé à partir de l'époque du saut. En ionosphère active, où la variabilité peut être importante, l'utilisation d'une fenêtre de quelques époques à peine est difficilement justifiable.
- Utiliser une combinaison différenciée. En effet, dans ce cas, le saut apparaîtra comme un pic à l'époque concernée. Dès lors, lors du calcul des paramètres pour l'époque suivante, il suffira de ne pas considérer l'époque affectée par le saut. La moyenne et l'écart-type ne seront alors pas biaisés par celui-ci et calculés sur $\gamma - 1$ époques. Cette approche permet de détecter des sauts apparaissant à des époques proches (mais difficilement successives). Cette solution est donc celle que nous utiliserons.

Méthode d'analyse par fenêtre Pour rappel, les méthodes de détection par fenêtre présentent l'avantage de comparer l'époque courante à plusieurs époques précédentes. Cette comparaison peut être effectuée de différentes manières :

- En utilisant un *seuil absolu* comparant moyenne avant l'époque courante et la valeur observée à cette époque.
- En utilisant un *seuil relatif* comparant la valeur courante à un intervalle de confiance statistique calculé sur les données précédentes (moyenne et écart-type), ce qui permet de tenir compte de la variabilité des données.

Elles possèdent cependant le désavantage de nécessiter un certain nombre γ d'époques d'observations afin de mener à bien le calcul des paramètres caractérisant les époques précédentes.

Dans le cadre de la détection en post-traitement, il est possible de faire passer une fenêtre sur les données dans le sens chronologique et dans le sens inverse, ce qui permet le traite-

ment de l'ensemble des données. Cette nécessité d'un certain nombre d'observations n'est dès lors plus une limitation.

Double seuils Dans le cadre de ce travail, il a été choisi de soumettre deux types de seuils différents lors de cette première étape. Le premier est un seuil statistique, qui permet de détecter un pic anormal par rapport au comportement de la quantité-test aux époques voisines. Le second est un seuil absolu, conditionné par la plus petite influence d'un saut d'un cycle sur la quantité-test.

Ainsi, une discontinuité ne sera détectée que si elle satisfait à ces deux conditions. Cela suppose que, premièrement, la discontinuité se démarque clairement du reste des données (*seuil relatif*), et que deuxièmement, son amplitude soit suffisante pour être véritablement un saut de cycle (*seuil absolu*).

Il est possible que le seuil relatif soit supérieur au seuil absolu.

D'une part, cela dépend de l'effet du plus petit saut sur la combinaison par rapport à la précision de la quantité-test. Notons que le calcul de différences d'une quantité-test dégrade la précision :

$$\sigma_{QT \text{ difference}} = \sqrt{2} \sigma_{QT \text{ brute}} \quad (4.32)$$

D'autre part, il arrive qu'une forte activité ionosphérique augmente la variabilité d'une quantité-test d'une manière telle que le seuil relatif devienne supérieur au seuil absolu. Dans ce cas, la détection de saut d'un petit nombre de cycles ne pourra être garantie pour les époques concernées. Cela sera signalé à l'utilisateur via un rapport d'erreurs.

Si la discussion des seuils sera abordée dans le détail lors des sections dédiées aux méthodes bi-, tri-, et quadri-fréquences, notons que, dans le cadre de cette détection grossière, les seuils seront peu restrictifs, de manière à ne pas risquer la non-détection d'un saut. Les seuils étant bas, il ne sera pas rare de rencontrer des faux positifs à l'issue de cette première étape.

Seconde étape : confirmation de la présence d'un saut

Une fois des sauts potentiels détectés, il convient de déterminer si, oui ou non, ces discontinuités correspondent à un saut de cycle.

Quantité-test brute Pour ce faire, la quantité-test brute sera utilisée. Son décalage constant après l'apparition d'un saut de cycle permet, en comparant les moyennes avant et après l'éventuel saut, de déterminer si c'est un saut de cycle qui est effectivement présent ou non. En effet, seul un saut de cycle est capable d'influencer la combinaison de manière durable et constante. Si la discontinuité détectée est un *outlier*, la moyenne avant et après celle-ci sera similaire.

Comparaison de moyennes Le calcul des moyennes avant et après l'éventuel saut est effectué sur une fenêtre de γ époques. Autrement dit, plus la fenêtre sera grande, plus la confiance sera élevée. Notons tout de même que cette méthode comporte quelques limitations : en effet, si un autre saut est compris dans la fenêtre d'analyse, avant ou après la discontinuité en cours d'analyse, la moyenne concernée en est affectée. Afin de palier à ce problème, la moyenne pourra être calculée sur un nombre moindre d'observations si un saut potentiel est compris dans la fenêtre d'analyse. Si, statistiquement, ce n'est pas l'idéal, cela reste préférable à un biais dans une des moyennes, pouvant empêcher la détection d'un saut pourtant véritablement présent. Une pratique similaire sera utilisée en cas de saut en début ou en fin de visibilité, lorsque l'entièreté de la fenêtre ne pourra être complétée par des données.

Seuil absolu La comparaison étant effectuée entre deux moyennes et non pas entre une moyenne et une mesure, le seuil utilisé sera plus restrictif. En effet, la précision sur la différence sera calculé de la manière suivante :

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{différence entre les 2 moyennes}} &= \sqrt{2} \sigma_{MAF} \\ &= \sqrt{2} \frac{\sigma_{QT \text{ brute}}}{\sqrt{\gamma}}\end{aligned}\tag{4.33}$$

4.4 Conclusion

Ce chapitre est d'une grande importance dans le cadre de ce travail puisqu'il fournit tous les outils nécessaires à la création des algorithmes de traitements bi-, tri-, et quadri-fréquences.

Concernant la détection des sauts isolés ou des sauts simultanés d'amplitudes différentes, les combinaisons bi-fréquences de *Hatch-Wübenna-Melbourne*, et encore plus les combinaisons tri-fréquences de *Simsky* sont à la fois suffisamment performantes en termes de bruit, mais présentent également les propriétés *ionosphere-free* et *geometry-free*. De plus, ces quantités-tests sont assez stables pour permettre l'application de la méthode de détection hybride, particulièrement efficace, comme nous le verrons lors des chapitres suivants.

Concernant la détection des sauts simultanés de mêmes amplitudes, aucune quantité-test ne permet leur détection tout en étant *ionosphere-free*. Ceci sera un grand frein à ce travail, et de manière générale, à toutes les méthodes de détection des sauts, puisque les performances de détection des sauts simultanés de mêmes amplitudes dépendront de l'activité ionosphérique.

Chapitre 5

Détection bi-fréquence

5.1 Introduction

Après avoir fait le tour des quantités-tests disponibles et des différentes méthodes de détection des sauts qu'il est possible d'appliquer à celles-ci, voyons ce qu'il est concrètement possible de faire lorsque deux fréquences sont disponibles.

5.2 Choix des quantités-tests

Lorsque deux fréquences porteuses sont disponibles, il est possible de construire :

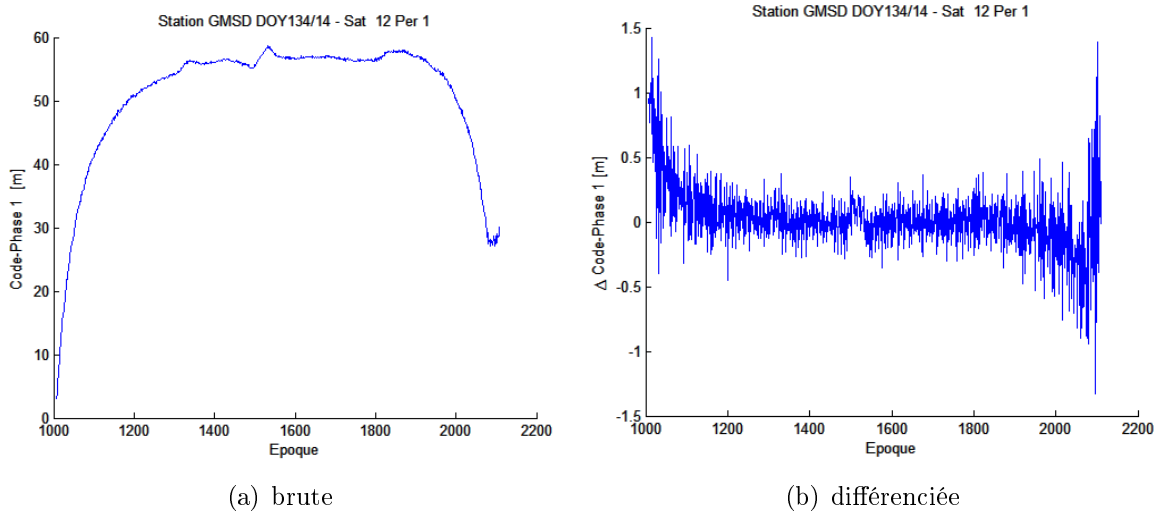
- deux combinaisons mono-fréquences
- une combinaison bi-fréquence

Si le ratio est un élément-clé, on ne peut limiter la variabilité de la quantité-test à ce dernier. En effet, certaines quantités-tests contiennent des termes résiduels variables au cours du temps.

Certains termes résiduels sont communs à toutes les combinaisons : le multi-trajet et les délais hardware. Les délais hardware sont très peu variables et peuvent être considérés comme constants au cours de la période d'observation. Au contraire, le multi-trajet est variable au cours du temps et ne peut donc pas être éliminé.

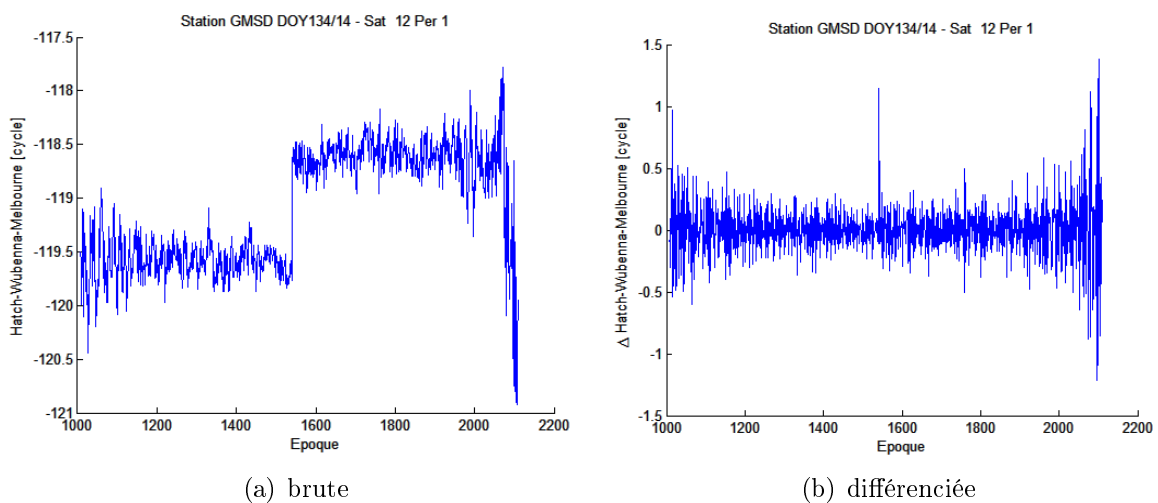
La combinaison mono-fréquence *Code-Phase* présente d'une part un très faible ratio, et d'autre par un terme de délai ionosphérique double. Le fait de ne traiter qu'une seule fréquence présente cependant un avantage pour la détection des sauts simultanés.

La FIGURE 5.1 illustre, pour le jour 134 de 2014 à la station GMSD, le résultat de la combinaison *Code-Phase* sur E1 pour le passage du satellite E12. Un saut d'un cycle a été inséré sur E1 à l'époque 1540 et un second à l'époque 2074. Dans la combinaison brute (*a*) aussi bien que dans sa version différenciée (*b*), le saut n'est pas visible. En effet, comme calculé à la TABLE 4.1 à partir des précisions ESA, l'effet d'un saut d'un cycle sur cette combinaison est inférieur à la précision (1σ) de cette dernière.

FIGURE 5.1 – Saut d’un cycle sur E1 (ép. 1540 & 2074) : *Code-Phase* E1

La combinaison bi-fréquence *Hatch-Wübenna-Melbourne* est particulièrement intéressante puisqu’elle est *ionosphere-free* et *geometry-free*. Le multi-trajet et des délais hardware sont les seuls termes résiduels qu’elle comprend. Cependant, le ratio est faible pour une des fréquences proches. Elle est insensible aux simultanés de mêmes amplitudes.

La FIGURE 5.2 illustre, pour le jour 134 de 2014 à la station GMSD, le résultat de la combinaison *Hatch-Wübenna-Melbourne* sur E1-E5a pour le passage du satellite E12. Un saut d’un cycle isolé a été inséré sur E1 à l’époque 1540 et un second à l’époque 2074, comme dans le cas précédent. Dans la combinaisons brute, le décalage dans la moyenne après l’apparition du premier saut est flagrant. Quant au second saut, sa présence est moins évidente, étant situé en fin de période d’observation, où la variabilité de la combinaison est plus élevée. Ce même constat peut être fait pour la combinaison différenciée : alors que le premier saut se distingue clairement du reste de la combinaison, le second est au contraire indissociable.

FIGURE 5.2 – Saut d’un cycle sur E1 (ép. 1540 & 2074) : *Hatch-Wübenna-Melbourne* E1-E5a

La combinaison bi-fréquence *Geometry-Free* présente un meilleur ratio mais n'élimine pas les délais ionosphériques. Le terme ionosphérique résultant sera la différence des délais entre les deux fréquences. Elle est insensible à certaines combinaisons de sauts, mais rend les sauts simultanés détectables. La FIGURE 5.3 illustre, pour le jour 134 de 2014 à la station GMSD, le résultat de la combinaison *Geometry-Free* sur E1-E5a pour le passage du satellite E12. Comme dans les deux illustrations précédentes, un saut d'un cycle isolé a été inséré sur E1 à l'époque 1540 et un second à l'époque 2074. Ici, la combinaison brute ainsi que différents ordres de différences temporelles sont repris. D'après les graphiques, c'est à partir d'une différence temporelle du deuxième ordre que les sauts de cycles pourront être mis en évidence. Cependant, comme la TABLE 4.3 l'a illustré, la différence temporelle de quatrième ordre est celle présentant le meilleur ratio.

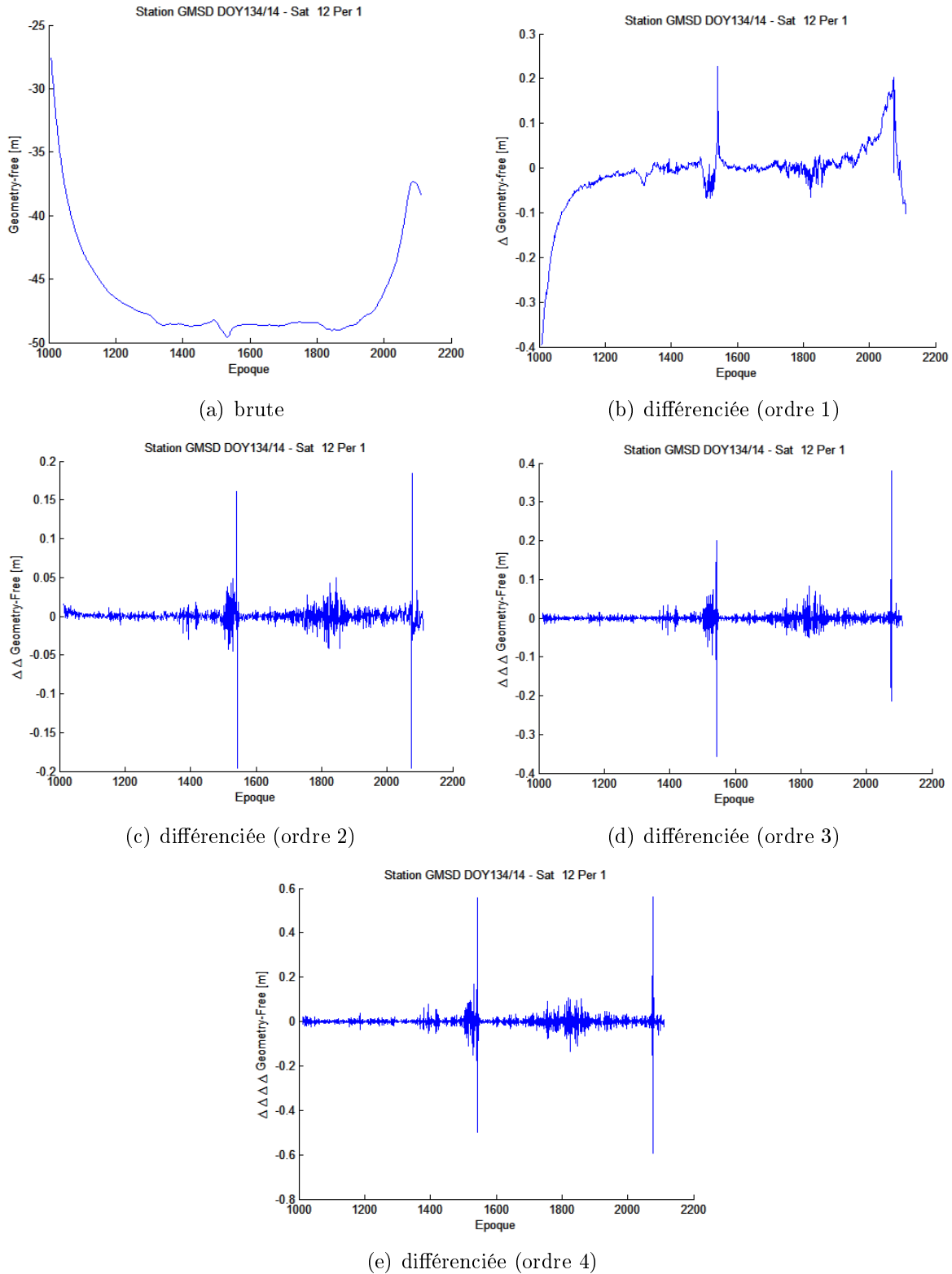


FIGURE 5.3 – Saut d'un cycle sur E1 (ép. 1540 & 2074) : *Geometry-free* E1-E5a

En conclusion, lorsque les mesures sur deux fréquences sont disponibles, la combinaison *Hatch-Wübenna-Melbourne* est la plus adaptée à la détection des sauts de cycles en ionosphère active, puisqu'elle est la seule à ne pas être affectée par d'autres termes que le multi-trajet et les délais hardware. Son utilisation nécessitera néanmoins de faire face au faible ratio des combinaisons avec E1 par un choix de seuils adaptés. Cette combinaison

permettra de détecter les sauts isolés et les sauts simultanés d'amplitudes différentes, via la méthode hybride (voir SECTION 4.3.5).

Cependant, la quantité-test *Hatch-Wübenna-Melbourne* ne peut être utilisée en autonomie : afin de détecter les sauts simultanés de même amplitude, nous y ajouterons la combinaison *Geometry-Free*. Etant affectée par les délais ionosphériques, cette combinaison ne permet pas d'utiliser la méthode hybride. Comme le montre la FIGURE 5.3, il est nécessaire d'utiliser une différence du second ordre au minimum.

La méthode de détection bi-fréquence développée dans le cadre de ce travail se déroulera en deux temps : dans un premier temps, une recherche des sauts isolés et des sauts simultanés d'amplitudes différentes sera menée à l'aide de la combinaison *Hatch-Wübenna-Melbourne* (SECTION 5.3); dans un second temps, les sauts simultanés de mêmes amplitudes seront recherchés à l'aide d'une combinaison *Geometry-Free* (SECTION 5.4), que nous choisirons différenciée au quatrième ordre.

Pour chacun des deux passages, le choix de la méthode d'analyse sera tout d'abord discuté. Ensuite, les seuils seront déterminés de manière théorique et mis en relation avec les performances, théoriques elles aussi. Suivra enfin une comparaison avec les performances dans un cas réel, exemple à l'appui.

5.3 Passage 1 : HWM : Sauts isolés et sauts simultanés d'amplitudes différentes

5.3.1 Choix de la méthode d'analyse

Puisqu'il est possible d'appliquer la méthode hybride sur cette combinaison, c'est le choix que nous ferons.

5.3.2 Choix des seuils

Dans la méthode hybride, le but de la première étape est de détecter les sauts potentiels. La priorité sera donc à l'identification de toutes les époques susceptibles d'être affectées par des sauts de cycles, quitte à en détecter certaines ne présentant pas réellement de sauts (faux positifs). Autrement dit, un faible degré de faux négatifs sera requis. Le but de la seconde étape sera au contraire de faire le tri entre les sauts réels et les faux positifs détectés à l'étape précédente. Tout en gardant un faible degré de faux négatifs, il conviendra de réduire au maximum la proportion de faux positifs.

Le choix d'un seuil donné favorisera soit l'apparition de faux négatifs, soit celle de faux positifs. Son augmentation diminuera la proportion de faux positifs, mais elle augmentera celle de faux négatifs. Chaque choix du seuil dépendra donc de trois facteurs-clés :

- l'effet du plus petit saut sur la combinaison
- la précision de la combinaison

- la tolérance de l'utilisateur par rapport à la proportion de faux positifs et de faux négatifs

Si l'on peut ajuster les seuils afin de rencontrer au mieux les exigences de l'utilisateur, il ne sera pas toujours possible d'y répondre parfaitement. Ainsi, si la combinaison est fortement bruitée par rapport à l'influence d'un saut, il n'existera pas de solution miracle. Le choix d'un seuil adapté permettra bien sûr de tirer le meilleur profit de la combinaison, mais il ne sera pas possible de détecter des sauts de faibles amplitudes dans tous les cas.

Le but poursuivi dans chacune des deux étapes de la méthode hybride étant différent, il nous a semblé préférable de déterminer des seuils utilisés dans ces étapes de manière séparée également. Nous aborderons donc dans un premier temps les seuils utilisés dans la première étape, la détection grossière, puis nous passerons à ceux utilisés dans la seconde étape, celle de la confirmation de la présence des sauts.

Première étape : détection grossière

La première étape de la méthode hybride, la détection grossière, utilise la quantité-test dans sa version différenciée. Ici, il s'agit de la combinaison *Hatch-Wübenma-Melbourne*.

Comme indiqué précédemment, la *précision de la combinaison* jouera un rôle clé dans la détermination du seuil. Dans la TABLE 5.1 sont reprises les différentes combinaisons de fréquences avec pour chacune, la précision de la combinaison HWM différenciée (obtenue par propagation de variance à partir de la HWM brute), la précision sur la moyenne des 20 époques précédant l'époque courante, et enfin, la précision sur le décalage mesuré entre la valeur courante et la moyenne précédente.

Puisque la combinaison brute n'est affectée, en plus de l'ambiguïté initiale et d'éventuels sauts, que du multi-trajet et des délais hardware, sa différence temporelle sera considérée comme de moyenne nulle. En effet, sur un faible intervalle de temps, les délais hardware sont supposés non-variables et les variations temporelles du multi-trajet sont considérées comme des erreurs aléatoires. Dès lors, dans ce cas particulier qui nous occupe, la moyenne des époques précédentes sera toujours considérée comme nulle et seul un calcul d'écart-type sera effectué dans la fenêtre statistique. Ainsi, l'écart entre l'époque courante et la moyenne précédente sera affecté de la même précision que celle de la quantité-test différenciée elle-même.

Fréquences	Préc. 1σ	Préc. moy. $\gamma=20\text{ep.}$ (1σ)	Préc. Δ moy. - pic (1σ)
<i>E1 - E5a</i>	0.479	0.00	0.479
<i>E1 - E5b</i>	0.438	0.00	0.438
<i>E1 - E5a+b</i>	0.385	0.00	0.385
<i>E5a - E5b</i>	0.038	0.00	0.038
<i>E5a - E5a+b</i>	0.017	0.00	0.017
<i>E5b - E5a+b</i>	0.017	0.00	0.017

TABLE 5.1 – Combinaison Hatch-Wübenma-Melbourne différenciée [*cycle*]

Le second facteur clé, l'*influence du plus petit saut* sur la combinaison, est toujours de 1 dans les combinaisons HWM.

Dans la première étape de la méthode hybride, deux types de seuils sont définis : un seuil relatif et un seuil absolu. Le seuil relatif permet de s'assurer que l'époque retenue comme saut potentiel corresponde à une discontinuité suffisante par rapport au reste des observations (de la fenêtre). Le seuil absolu permet quant à lui de vérifier que la discontinuité détectée est d'amplitude suffisante que pour être susceptible de correspondre à un saut. Afin d'être considérée comme potentiellement affectée d'un saut, l'époque devra satisfaire à ces deux critères.

Bien sûr, l'un des deux seuils sera supérieur à l'autre et conditionnera donc l'acceptation de l'époque. Il nous semblait cependant utile de les définir tous les deux pour éviter les cas de figures suivants :

- Si seul un seuil absolu est utilisé dans un cas où la précision de la combinaison est faible, un grand nombre d'époques se trouveront au-dessus du seuil absolu, alors qu'aucun saut n'est réellement présent.
- Si seul un seuil relatif est utilisé et qu'il est faible, un grand nombre d'observations peuvent se trouver au-delà du seuil (par exemple, à 2σ , 5 % des époques seront statistiquement supérieures).

Au regard du ratio de la combinaison HWM (TABLE 4.2), l'on peut distinguer deux groupes : celui des combinaisons où la fréquence E1 est utilisée, où le ratio sera faible, et celui où la fréquence E1 ne sera pas utilisée, et où le ratio sera plus élevé¹. Ces différences de précision des combinaisons influenceront clairement l'efficacité des méthodes de détection.

Seuil relatif

La TABLE 5.2 reprend les différentes performances pour des seuils relatifs de 2, 3, et 4σ dans la détection d'un saut d'un cycle. Ces dernières seront calculées selon la méthodologie décrite en ANNEXE B.

Cela soulève plusieurs points :

- Plus le nombre de σ sera élevé, plus la probabilité de rencontrer de faux positifs sera faible. C'est le principe des intervalles de confiance statistiques.
- Plus le nombre de σ sera élevé, plus la probabilité de rencontrer des faux négatifs sera élevée.

Pour les combinaisons sans E1, le rapport entre l'effet d'un saut d'un cycle et la précision de la combinaison (ratio) sera tellement élevé que l'augmentation du seuil statistique à 4σ n'augmentera pas la proportion de faux négatifs. Cette dernière

1. Comme déjà abordé précédemment, cette différence dans les ratios est due aux différences de précisions des combinaisons, elles-mêmes dues à la proximité ou non des deux fréquences concernées dans l'espace spectral. Notons tout de même que, dans le cas d'une combinaison avec E5a+b, la précision de l'observable jouera également un rôle.

Fréquences	Seuil relatif [cy]	Faux négatifs [%]	Faux positifs [%]
Seuil de 2σ			
<i>E1 - E5a</i>	0.958	46.41	4.56
<i>E1 - E5b</i>	0.877	38.97	4.56
<i>E1 - E5a+b</i>	0.769	27.42	4.56
<i>E5a - E5b</i>	0.076	0.00	4.56
<i>E5a - E5a+b</i>	0.034	0.00	4.56
<i>E5b - E5a+b</i>	0.034	0.00	4.56
Seuil de 3σ			
<i>E1 - E5a</i>	1.438	81.86	0.26
<i>E1 - E5b</i>	1.315	76.42	0.26
<i>E1 - E5a+b</i>	1.154	65.54	0.26
<i>E5a - E5b</i>	0.115	0.00	0.26
<i>E5a - E5a+b</i>	0.051	0.00	0.26
<i>E5b - E5a+b</i>	0.051	0.00	0.26
Seuil de 4σ			
<i>E1 - E5a</i>	1.918	97.19	0.00
<i>E1 - E5b</i>	1.754	95.73	0.00
<i>E1 - E5a+b</i>	1.539	91.92	0.00
<i>E5a - E5b</i>	0.153	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.068	0.00	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.068	0.00	0.00

TABLE 5.2 – Performances HWM différenciées dans la détection d’un saut d’un cycle -
Seuil relatif

restera à 0.

Au contraire, pour les combinaisons avec E1, l’augmentation du nombre de σ sera telle que le seuil dépassera l’influence du saut de cycle (ou sera de l’ordre de celui-ci, pour 2σ). Ceux-ci n’auront dès lors que très peu de chances d’être détectés et la proportion de faux négatifs sera donc élevée.

Dans sa méthode *TurboEdit*, Blewitt préconise l’utilisation d’un seuil statistique de 4 σ autour de la moyenne, ce qui procure à sa méthode de détection un taux nul de faux positifs. Cependant, son cas d’étude présente quelques différences avec le nôtre :

- *TurboEdit* est adapté au temps réel. Nous nous situons au contraire en post-traitement, ce qui, pour rappel, permet de procéder à une étape ultérieure de vérification par comparaison de moyennes. Dans ce cas, il n’est donc pas crucial d’éviter les faux positifs, et il est acceptable d’abaisser le seuil afin de réduire le taux de faux négatifs. Les faux positifs engendrés seront éliminés lors de l’étape suivante.
- *TurboEdit* n’est pas applicable en ionosphère active. La variabilité des données sera donc moindre. Ainsi, même un seuil statistique élevé n’aura pas nécessairement une valeur supérieure à 1 cycle. Au contraire, le cadre de notre travail se situe en ionosphère active. La variabilité plus élevée aura donc comme conséquence des seuils

globalement plus élevés². Afin d'éviter d'être trop restrictifs, nous nous permettrons donc d'abaisser le seuil statistique, ce qui facilitera la détection de sauts de faible amplitude. A nouveau, les faux positifs engendrés par cette pratique seront dissociés des vrais sauts à l'étape suivante.

Dans notre cas, le seuil de 4σ pourra être appliqué aux combinaisons suivantes, puisqu'en utilisant ce dernier, la probabilité de faux négatifs et de faux positifs tend vers zéro :

- E5a - E5b
- E5a - E5a+b
- E5b - E5a+b

A l'issue de cette première étape, les sauts sur ces combinaisons seront détectés à 100 % (pas de faux négatifs), et 100 % des époques détectées correspondront à de réels sauts (pas de faux positifs). Autrement dit, pour ces combinaisons, la méthode est théoriquement efficace à 100 % et il ne serait donc pas nécessaire de procéder à l'étape de confirmation.

Le seuil de 2σ sera appliqué aux combinaisons suivantes, puisqu'il permet, par rapport aux autres seuils, de minimiser la probabilité d'avoir des faux négatifs (but de cette première étape, rappelons-le) :

- E1 - E5a
- E1 - E5b
- E1 - E5a+b

A l'issue de cette première étape, les sauts d'amplitude d'un cycle sur ces combinaisons ne seront détectés que dans une partie des cas (entre 53 à 72 %, selon les fréquences concernées). Le taux de faux positifs sera lui d'environ 5 %. Si les sauts de 1 cycle sont difficilement détectables dans ces combinaisons avec E1, il est dès lors intéressant de se poser la question suivante : à partir de quelle amplitude un saut sera-t-il détectable ?

La TABLE 5.3 reprend les performances pour des sauts de plus grandes amplitudes. Pour un seuil de 2σ , les 100 % de sauts détectés sont atteints à partir d'une amplitude de 3 cycles. A titre indicatif, pour un seuil de 4σ , les 100 % de détection seraient atteints pour une amplitude de 4 cycles.

2. Rappelons cependant que les données de précision utilisées dans notre cas sont des valeurs globales fournies par l'ESA et ne sont pas spécifiques à une activité ionosphérique spécifique. Il est évident que celles-ci sont en réalité extrêmement variables, entre autres selon cette activité.

Fréquences	Seuil relatif 2σ [cy]	Faux négatifs [%]	Faux positifs [%]
Saut de 2 cycles			
$E1 - E5a$	0.958	1.46	4.56
$E1 - E5b$	0.877	0.52	4.56
$E1 - E5a+b$	0.769	0.07	4.56
Saut de 3 cycles			
$E1 - E5a$	0.958	0.00	4.56
$E1 - E5b$	0.877	0.00	4.56
$E1 - E5a+b$	0.769	0.00	4.56

TABLE 5.3 – Performances HWM différenciées dans la détection d’un saut de plusieurs cycles - Seuil relatif

Seuil absolu

En plus du seuil relatif, un seuil absolu est défini.

Lorsqu’il est supérieur au seuil relatif, il a pour but de réduire le nombre de faux positifs, liés à un faible seuil relatif, en soumettant l’époque à un test complémentaire. En effet, parmi les 5% de faux positifs lors de l’utilisation de 2σ , la plupart n’auront pas l’amplitude nécessaire pour correspondre à un saut de cycle. Il convient cependant d’être prudent dans la détermination de ce seuil et de ne pas le choisir trop restrictif, car il pourrait alors ne pas détecter de réels sauts (faux négatifs). Si, pour les combinaisons sans E1, aucun faux positif ne sera théoriquement engendré par le seuil de 4σ , le seuil absolu peut avoir un intérêt dans les combinaisons avec E1, où environ 5% de faux positifs seront engendrés par l’utilisation d’un seuil de 2σ : en effet, la variabilité locale peut être faible et le seuil relatif bien inférieur à celui prévu sur base des précisions théoriques de l’ESA³. Dans ce cas, le seuil absolu pourrait être supérieur à la valeur instantanée du seuil relatif, et l’utilisation de ce seuil absolu permettra alors de limiter la proportion finale de faux positifs. En regard de cette considération, l’utilisation d’un seuil absolu en plus du seuil relatif est tout à fait justifiable.

Notons que si le seuil absolu est inférieur au seuil relatif, comme cela sera le cas si la variabilité de la combinaison suit les prédictions théoriques de l’ESA, il n’aura pas d’intérêt particulier.

La TABLE 5.4 reprend, par combinaison et par seuil relatif, les taux de faux négatifs et de faux positifs.

3. En réalité, la précision de la combinaison sera généralement meilleure que celle fournie par l’ESA. De plus, elle variera au cours de la période d’observation, non seulement en fonction de l’élévation mais également en fonction d’éventuels résidus ionosphériques d’ordre 2 et supérieurs (non éliminés, même dans une combinaison *ionosphere-free*) en cas de forte activité. Le *Signal sur Noise Ratio (SNR)* jouera également un rôle dans la précision de la combinaison. Notons que c’est d’ailleurs cette variabilité temporelle de la précision qui justifie particulièrement l’utilisation d’un seuil statistique adaptatif.

Fréquences	Seuil absolu [cy]	Faux négatifs [%]	Faux positifs [%]
Seuil de 0.7			
<i>E1 - E5a</i>	0.7	26.43	11.88
<i>E1 - E5b</i>	0.7	24.82	10.96
<i>E1 - E5a+b</i>	0.7	21.77	6.88
<i>E5a - E5b</i>	0.7	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.7	0.00	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.7	0.00	0.00
Seuil de 0.8			
<i>E1 - E5a</i>	0.8	33.72	9.50
<i>E1 - E5b</i>	0.8	32.28	6.88
<i>E1 - E5a+b</i>	0.8	30.15	3.76
<i>E5a - E5b</i>	0.8	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.8	0.00	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.8	0.00	0.00
Seuil de 0.85			
<i>E1 - E5a</i>	0.85	37.83	7.68
<i>E1 - E5b</i>	0.85	36.69	5.24
<i>E1 - E5a+b</i>	0.85	34.83	2.72
<i>E5a - E5b</i>	0.85	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.85	0.00	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.85	0.00	0.00
Seuil de 0.9			
<i>E1 - E5a</i>	0.9	41.68	6.02
<i>E1 - E5b</i>	0.9	40.90	4.04
<i>E1 - E5a+b</i>	0.9	39.74	1.92
<i>E5a - E5b</i>	0.9	0.44	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.9	0.00	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.9	0.00	0.00

TABLE 5.4 – Performances HWM différenciées dans la détection d'un saut d'un cycle -
Seuil absolu

Globalement, plus le seuil augmente, plus le nombre de faux négatifs sera élevé. Nous préférons donc utiliser, dans tous les cas, un seuil de 0.7 lors de cette première étape de détection grossière. D'une part, si, pour les combinaisons avec E1, les taux de faux négatifs et de faux positifs peuvent sembler élevés, n'oublions pas que ce seuil ne sera enclenché que si la variabilité est plus faible qu'attendue. Dès lors, le taux de faux négatifs et de faux positifs seront donc, eux aussi, automatiquement plus faibles. D'autre part, si, pour les combinaisons sans E1, un seuil plus élevé pourrait être utilisé tout en obtenant les mêmes performances, il reste préférable de fixer un faible seuil. En effet, dans le cas où la variabilité de la combinaison serait plus importante (par exemple en cas de forte activité ionosphérique), le risque de faux négatifs pour un même seuil serait plus élevé.

Seuil résultant

Pour un saut d'un cycle, la TABLE 5.5 reprend les seuils relatifs et absolus, ainsi que les performances associées au seuil prédominant, basées sur les précisions ESA.

Fréquences	Seuil relatif [cy]	Seuil absolu [cy]	Faux négatifs [%]	Faux positifs [%]
<i>E1 - E5a</i>	<u>0.958</u> [2σ]	0.7	46.41	4.56
<i>E1 - E5b</i>	<u>0.878</u> [2σ]	0.7	38.97	4.56
<i>E1 - E5a+b</i>	<u>0.769</u> [2σ]	0.7	27.42	4.56
<i>E5a - E5b</i>	0.153 [4σ]	<u>0.7</u>	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.068 [4σ]	<u>0.7</u>	0.00	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.068 [4σ]	<u>0.7</u>	0.00	0.00

TABLE 5.5 – Performances Hatch-Wübenna-Melbourne différenciées dans la détection d'un saut d'un cycle

Deuxième étape : confirmation de la présence d'un saut

La seconde étape de la méthode hybride, la confirmation de la présence de saut, utilise la quantité-test dans sa version brute. Il s'agit ici toujours de la combinaison Hatch-Wübenna-Melbourne.

De la même manière que pour la première étape, les seuils seront choisis en fonction des deux facteurs suivants : la précision de la combinaison, ainsi que l'effet du plus petit saut sur la combinaison.

La TABLE 5.6 reprend les différentes combinaisons de fréquences avec, pour chacune d'entre elles, la précision de la combinaison HWM brute, la précision sur la moyenne des 20 époques précédant l'époque courante, et enfin, la *précision sur la différence* calculée entre moyennes avant et après saut potentiel. C'est donc cette dernière précision qui entrera en compte dans le calcul des performances.

Fréquences	Préc. (1σ)	Préc. moy. $\gamma=20$ ep. (1σ)	Préc. Δ 2 moy. (1σ)
<i>E1 - E5a</i>	0.339	0.076	0.107
<i>E1 - E5b</i>	0.310	0.069	0.098
<i>E1 - E5a+b</i>	0.272	0.061	0.086
<i>E5a - E5b</i>	0.027	0.006	0.009
<i>E5a - E5a+b</i>	0.012	0.003	0.004
<i>E5b - E5a+b</i>	0.012	0.003	0.004

TABLE 5.6 – Combinaison Hatch-Wübenna-Melbourne brute [*cycle*]

Concernant l'*influence du plus petit saut* sur la combinaison, il s'agit ici d'un biais d'un cycle, dans tous les cas.

Ici, seul un seuil absolu sera mis en place. En effet, l'époque analysée a déjà préalablement été soumise à un seuil statistique et ressort donc du reste de la combinaison. De plus, il a également été vérifié que la discontinuité à l'époque considérée est suffisante pour pouvoir correspondre à un saut de cycle. Cette deuxième étape n'est en effet qu'une vérification de la présence ou non d'un saut réel, grâce à l'observation d'une éventuelle différence dans la moyenne avant et après le saut potentiel. Ici, le but est d'éliminer les faux positifs rescapés de la première étape. Il est cependant nécessaire, idéalement, de choisir un seuil qui ne rejettera pas non plus de réels sauts (pas de faux négatifs).

La TABLE 5.7 reprend les performances pour différents seuils absolus dans la détection de sauts d'un cycle.

Fréquences	Seuil absolu [cy]	Faux négatifs [%]	Faux positifs [%]
Seuil de 0.85			
<i>E1 - E5a</i>	0.85	8.08	0.00
<i>E1 - E5b</i>	0.85	6.30	0.00
<i>E1 - E5a+b</i>	0.85	4.09	0.00
<i>E5a - E5b</i>	0.85	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.85	0.00	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.85	0.00	0.00
Seuil de 0.8			
<i>E1 - E5a</i>	0.8	3.14	0.00
<i>E1 - E5b</i>	0.8	2.07	0.00
<i>E1 - E5a+b</i>	0.8	0.99	0.00
<i>E5a - E5b</i>	0.8	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.8	0.00	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.8	0.00	0.00
Seuil de 0.7			
<i>E1 - E5a</i>	0.7	0.26	0.00
<i>E1 - E5b</i>	0.7	0.11	0.00
<i>E1 - E5a+b</i>	0.7	0.02	0.00
<i>E5a - E5b</i>	0.7	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.7	0.00	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.7	0.00	0.00
Seuil de 0.6			
<i>E1 - E5a</i>	0.6	0.01	0.00
<i>E1 - E5b</i>	0.6	0.00	0.00
<i>E1 - E5a+b</i>	0.6	0.00	0.00
<i>E5a - E5b</i>	0.6	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.6	0.00	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.6	0.00	0.00
Seuil de 0.55			
<i>E1 - E5a</i>	0.55	0.00	0.00
<i>E1 - E5b</i>	0.55	0.00	0.00
<i>E1 - E5a+b</i>	0.55	0.00	0.00
<i>E5a - E5b</i>	0.55	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.55	0.00	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.55	0.00	0.00

TABLE 5.7 – Performances Hatch-Wübenna-Melbourne brute dans la détection d'un saut d'un cycle

Pour les combinaisons sans E1, tous les seuils proposés ci-dessus seront efficaces. A nouveau, afin d'éviter une éventuelle non-détection de sauts lors d'évènements ionosphériques extrêmes, nous préférons un seuil intermédiaire, comme par exemple celui de 0.8.

Pour les combinaisons avec E1, tous les sauts de cycles ne seront pas détectés lors de la première étape. Si l'on veut néanmoins s'assurer que tous les sauts détectés lors de la

première étape soient correctement confirmés ou rejetés lors de cette étape, il est préférable de choisir un seuil faible, de 0.55 ou 0.6. Si la précision des données est en réalité meilleure que celle attendue, une plus grande proportion de sauts sera détectée lors de la première étape, et l'on pourra également se permettre de choisir un seuil plus élevé lors de cette étape de confirmation.

5.3.3 Performances globales

Si les seuils suivants sont utilisés :

Fréquences	seuil relatif 1 [cy]	seuil absolu 1 [cy]	seuil absolu 2 [cy]
$E1 - E5a$	2σ	0.7	0.6
$E1 - E5b$	2σ	0.7	0.6
$E1 - E5a+b$	2σ	0.7	0.6
$E5a - E5b$	4σ	0.7	0.8
$E5a - E5a+b$	4σ	0.7	0.8
$E5b - E5a+b$	4σ	0.7	0.8

TABLE 5.8 – Seuils utilisés pour la détection bi-fréquence de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes

A l'issue de cette double étape de détection des sauts isolés et des sauts simultanés et d'amplitudes différentes, les performances suivantes sont attendues :

Fréquences	1 cycle		2 cycles		3 cycles	
	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]
$E1 - E5a$	46.95	0	1.46	0	0	0
$E1 - E5b$	38.97	0	0.52	0	0	0
$E1 - E5a+b$	27.42	0	0.07	0	0	0
$E5a - E5b$	0	0	0	0	0	0
$E5a - E5a+b$	0	0	0	0	0	0
$E5b - E5a+b$	0	0	0	0	0	0

TABLE 5.9 – Performances bi-fréquences pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes

Ainsi, pour les combinaisons sans E1, une performance de 100 % sera déjà atteinte pour la détection de sauts d'un seul cycle. Au contraire, pour les autres combinaisons, il faudra attendre des amplitudes de 3 cycles pour atteindre cette efficacité.

5.3.4 Confrontation avec les données réelles

Après avoir déterminé les performances théoriques de cet algorithme, confrontons le à des données "réelles", dans lesquelles des petits sauts ont été insérés manuellement (voir CHAPITRE 3).

Saut isolé d'un cycle

La TABLE 5.10 reprend les résultats de la détection de sauts isolés d'une amplitude d'un cycle à l'aide de combinaisons *Hatch-Wübenna-Melbourne*. Les données utilisées sont des données réelles, provenant de la station japonaise GMSD, le jour 134 de 2014, dans lesquelles des sauts de cycles isolés d'une amplitude d'un cycle ont été insérés⁴. Nous renvoyons au CHAPITRE 3 pour plus d'informations à ce sujet.

Fréquences	Sat E11		Sat E12		Sat E19		Autres
	Ep 1604	Ep 2241	Ep 1540	Ep 2074	Ep 75	Ep 701	
<u>E1</u> - E5a	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	7
<u>E1</u> - E5b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	7
<u>E1</u> - E5a+b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	1
<u>E5a</u> - E5b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0
<u>E5a</u> - E5a+b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0
<u>E5b</u> - E5a+b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0

TABLE 5.10 – Sauts isolés d'un cycle

Ces résultats, s'ils sont encourageants puisque tous les sauts isolés ont correctement été détectés, soulèvent néanmoins quelques remarques :

- Premièrement, l'on peut remarquer que les performances en terme de faux négatifs sont, dans ce cas d'étude particulier, meilleures que celles attendues.
- Deuxièmement, alors que l'étude théorique ne prévoit pas de faux positifs, certains sont présents dans les combinaisons avec E1.

Proportion de faux négatifs plus faible

On remarque que les performances en termes de faux négatifs sont, dans ce cas d'étude particulier, meilleures que celles attendues.

En effet, selon la TABLE 5.9, les combinaisons avec E1 présentent de fortes de chances de ne pas détecter les sauts isolés d'un cycle (entre 27 et 47 %). Ici, pourtant, tous les sauts sont détectés, y compris sur ces combinaisons. L'explication de cette augmentation des performances est la suivante : sachant que le seuil statistique (2σ , dans le cas des combinaisons avec E1) lors de la première étape était, en théorie, responsable de ce haut pourcentage de faux négatifs, de meilleures performances peuvent s'expliquer par l'abaissement de ce seuil statistique (en terme de "valeur", car celui-ci reste toujours à 2σ), causé par une moindre variabilité de la combinaison, elle-même provenant de mesures brutes de meilleure qualité. Comme nous l'avons déjà abordé précédemment, plusieurs raisons peuvent expliquer une variabilité différente des données par rapport aux valeurs fournies par l'ESA :

4. La fréquence sur laquelle a été insérée un saut est celle soulignée dans le tableau.

- qualité de l'émission
- parcours du signal (lié à l'élévation du satellite)
- localisation (en termes d'environnement autour de l'antenne de réception et de latitude/longitude)
- qualité de l'antenne et des récepteurs
- pertes de puissance hardware et transmission des données

Proportion de faux positifs plus élevée

Alors que l'étude théorique ne prévoit pas de faux positifs, certains sont présents dans les combinaisons avec E1 (faible ratio).

La combinaison de plusieurs facteurs peut expliquer ce comportement. En effet, les faux positifs doivent passer au travers de la première étape de détection, mais également de la seconde.

Concernant la première étape, le seuil statistique utilisé dans les combinaison avec E1 est de 2σ , et le seuil absolu est de 0.7 cycles. Si le seuil statistique est supérieur au seuil absolu, la proportion de faux positifs est d'environ 5 %. Si la précision des combinaisons est meilleure que celle attendue, comme nous l'avons vu à la remarque précédente, le seuil absolu prend alors le pas sur le seuil relatif lors de la première étape. Comme renseigné dans la TABLE 5.4, un seuil de 0.7 induit une proportion de faux positifs variant entre 7 et 12 %. Cependant, dans ce cas où la variabilité de la combinaison est meilleure que celle attendue, la proportion réelle de faux positifs sera alors inférieure à celle attendue et inférieure à 5 %. Néanmoins, que ce soit à cause du seuil statistique ou du seuil absolu, une certaine proportion de faux positifs, entre 0 et 5%, passent la première étape et se retrouvent alors confronté à la comparaison de moyennes.

Concernant la seconde étape, seul un seuil absolu de 0.6 est utilisé. Celui-ci ne devrait théoriquement pas laisser passer de faux positifs.

Cependant, n'oublions pas que les statistiques calculées pour cette deuxième étape considèrent une fenêtre de 20 époques d'observations de chaque côté de la moyenne. Les moyennes d'un grand nombre de mesures étant comparées, la précision calculée sur la différence était alors excellente et ne laissait pas de place au doute⁵. Dans certains cas, le nombre d'observations dans la moyenne peut être inférieur à la taille de la fenêtre d'analyse. Si ce nombre d'observations est plus faible, la précision sur la moyenne est alors détériorée. La différence des moyennes en souffrira donc également. Cette différence étant moins précise, les proportions de faux positifs et de faux négatifs sont alors modifiées : elles augmentent toutes deux. Si le faible seuil de 0.6 lors de la comparaison de moyenne n'était pas censé poser de problème quant à de quelconques faux positifs, il peut devenir problématique en cas d'une moins bonne précision.

Sur cette journée-exemple à GMSD, les faux positifs sont en effet dus à un nombre trop faible d'observations dans une, ou dans les deux, moyenne(s).

On peut distinguer plusieurs cas de figure pour lesquels le nombre d'observations dans la

5. C'est d'ailleurs à partir de cette précision que les seuils de la seconde étape furent déterminés.

moyenne sera inférieur à la taille de la fenêtre d'observation : le cas du début ou de la fin d'observation, ou celui de sauts potentiels détectés dans les observations voisines.

Afin d'illustrer notre propos, nous nous baserons sur un exemple : la FIGURE 5.4 reprend les faux positifs détectés sur la combinaison *Hatch-Wübenna-Melbourne* à l'issue de chacune des deux étapes de la méthode hybride, pour le premier passage du satellite E12 (b) et le second passage du satellite E20 (a). Le graphique supérieur reprend la combinaison HWM⁶ brute utilisée lors de la seconde étape de la méthode hybride, et le graphique inférieur reprend la différence temporelle de la combinaison HWM, utilisée lors de la première étape de la méthode hybride. Les lignes verticales rouges représentent les époques où des sauts ont été détectés à l'issue de la première étape (graphique inférieur - combinaison différenciée) et de la seconde étape (graphique supérieur - combinaison brute) de la méthode hybride.

- En début ou de fin d'observation : si la première étape permet de traiter sans problème les données en début et en fin de période, par le passage d'une fenêtre dans les deux sens, la comparaison de moyenne peut, elle, être affectée. En effet, plus l'on se rapproche d'une extrémité, plus le nombre d'observations constituant la moyenne de ce côté sera faible.

Une solution serait de considérer ces époques de début et de fin de période non-analysables. Ce n'est cependant pas conseillé, puisque, si un saut est réellement présent pour l'une de ces époques, celui ci peut affecter les futures comparaison de moyennes en biaisant l'une de ces dernières. Cette réflexion fait de nouveau appel à ce que l'utilisateur est prêt à accepter ou non.

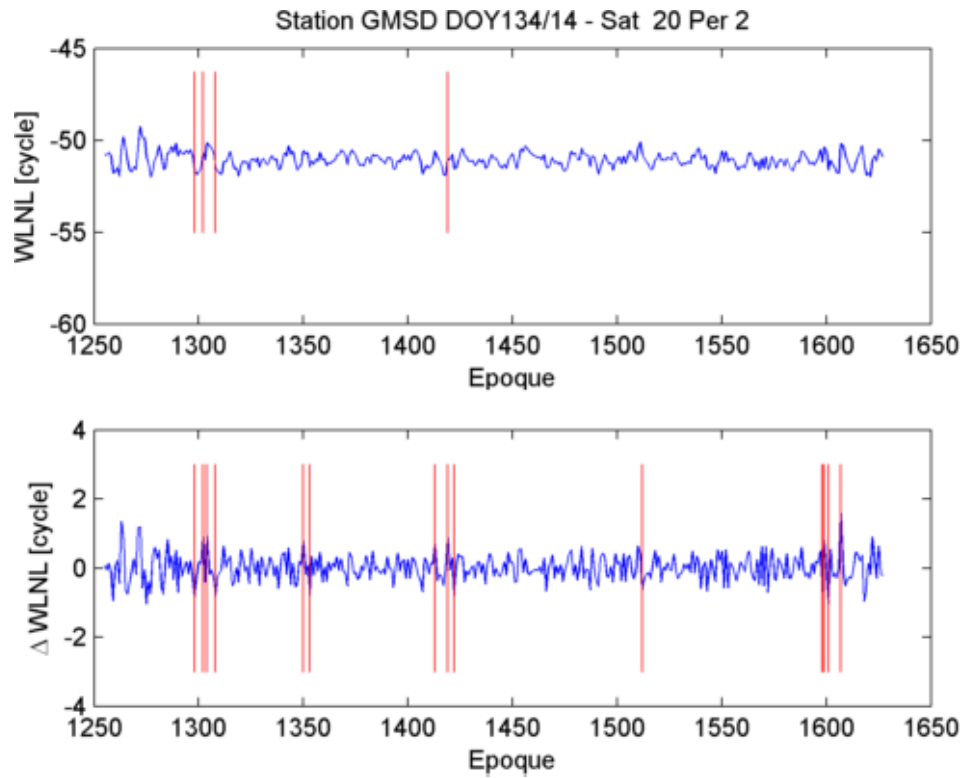
Des solutions annexes peuvent être envisagées, par exemple celle de la mise en place, lors de la première étape, d'un seuil plus restrictif pour les observations de début et de fin de période. Pour ces quelques époques (20 à chaque extrémité, dans notre cas), la proportion de faux positifs serait alors théoriquement moindre⁷. Cependant, si les seuils sont augmentés, une plus forte proportion de faux négatifs en résultera.

Ce problème de détection pour les débuts et fins de périodes est particulièrement épineux, puisque c'est justement lors du lever et du coucher du satellite, lorsqu'il est à basse élévation, que les mesures seront de moins bonne qualité : non seulement, le niveau de bruit sera plus important (faible SNR), diminuant l'efficacité des méthodes de détection, mais la présence de sauts sera, en plus de cela, plus probable, puisque le récepteur a plus de difficultés à poursuivre un satellite lorsque les observations qu'il en reçoit soit de moins bonne qualité.

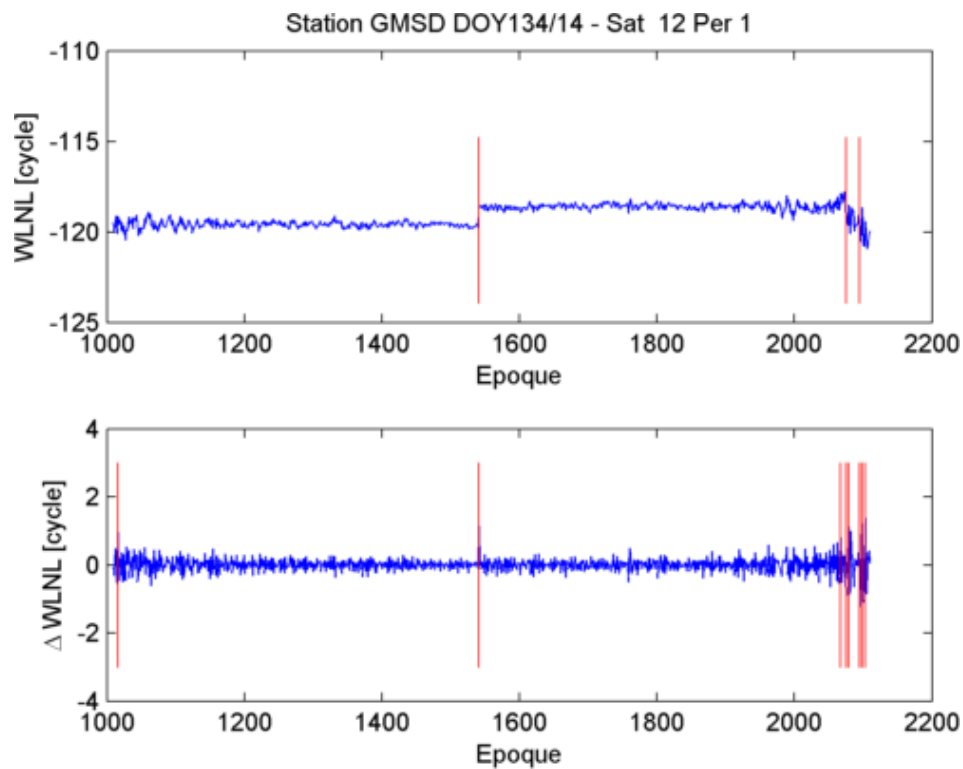
Dans l'exemple de la FIGURE 5.4 (b) - *supérieur*, le faux positif à l'époque 2094 n'est séparé "que" de 14 époques de la fin des observations pour cette période (ce qui reste raisonnable). A sa droite, ce saut est séparé de 20 observations du saut

6. Nommée WLNL pour *Wide-Lane Narrow-Lane* dans les graphiques, autre nom donné aux combinaisons de *Hatch-Wübenna-Melbourne*.

7. Théoriquement, car n'oublions pas que les mesures sont plus bruitées en début et fin de période. C'est principalement le seuil absolu qui en souffrira, puisque le seuil relatif s'adapte lui à la variabilité de la combinaison.



(a) Saut potentiel dans les observations voisines



(b) Saut dans les observations voisines et fin de période

FIGURE 5.4 – Faux positifs détectés sur la Hatch-Wübenna-Melbourne $E1-E5a$ après les deux étapes

inséré (époque 2074). Si le calcul de moyenne sur ce nombre d'observations semble

donc à priori valable, la réalité est tout autre : la FIGURE 5.4 (b) - *supérieur* ne reprend en effet que les époques détectées comme présentant des sauts à l'issue des deux étapes. A l'issue de la première étape, avant le calcul de comparaison de moyennes, un nombre élevé de sauts potentiels est en réalité détecté en particulier pour la fin de la première période de passage de ce satellite 12 (voir FIGURE 5.4 (b) - *inférieur*). Dès lors, la deuxième étape correspond, à peu de choses près, à une comparaison d'époque à époque. La précision de la différence calculée est alors très faible, c'est pourquoi de faux positifs deviennent tout à fait probables. Le problème que l'on croyait initialement dû à une fin de période d'observation est en réalité dû à la proximité d'autres sauts potentiels.

Notons tout de même que, au simple regard du résultat de la combinaison, nous nous sommes réellement demandé si le saut détecté à l'époque 2094 ne correspondait pas à un vrai saut. Visuellement, il semblerait en effet y avoir un second décalage dans la combinaison brute. Dans la combinaison *E1-E5b*, ce "saut" est également détecté. Pourrait-il alors s'agir d'un saut sur E1 ? Le saut n'est pourtant pas détecté dans la combinaison *E1-E5a+b*, et il ne l'est d'ailleurs pas non plus dans les combinaisons sans E1. De plus, il n'est pas non plus détecté dans les combinaisons tri-fréquences, plus efficaces, présentées au chapitre suivant. C'est pourquoi nous pouvons déduire qu'il correspond à un faux positif. Remarquons que, si nous avons pu arriver à cette conclusion, c'est parce que nous disposions de fréquences supplémentaires, qui nous ont alors permis d'analyser d'autres combinaisons bi- et tri-fréquences. Si nous n'avions disposé que des mesures sur E1 et E5a, il aurait été impossible de déterminer si oui ou non ce "saut" était un faux positif.

- En cas de saut potentiel dans les observations voisines : C'est le cas rencontré ci-dessus, et par exemple également celui des époques 1297, 1301, 1308, et 1418 du second passage du satellite E20. La FIGURE 5.4 (a & b) - *inférieur* témoigne du nombre de sauts détectés lors de la première étape.

Une solution pour s'affranchir de ce problème de nombreux faux positifs détectés lors de la première étape serait d'en augmenter les seuils. Avec moins de faux positifs dans le voisinage (voir plus aucun), les quelques faux positifs passant malgré tout la première étape seraient efficacement éliminés lors de la seconde étape de comparaison de moyennes. Si, pour des variabilités de données comme celles observées dans cet exemple⁸, l'augmentation des seuils est envisageable sans dégrader les performances en terme de faux négatifs, il convient néanmoins d'être conscients de l'augmentation potentielle de la proportion de faux négatifs dans un contexte plus général : en effet, théoriquement, cette proportion est déjà élevée pour les faibles seuils utilisés.

Notons que les faux positifs détectés seront différents selon la combinaison (avec E1) considérée. Cela peut s'expliquer de manière assez simple par les différentes précisions des

8. Pour rappel, ce jour 134/14 à GMSD fait partie des jours les plus agités pour cette station, proche de l'équateur magnétique, pour l'année 2014.

combinaisons. Nous y reviendrons plus en détail dans de prochains exemples.

Enfin, soulignons que les combinaisons sans E1, de par leur ratio élevé, ne sont pas, du moins dans cet exemple, concernées par la présence de faux positifs.

En conclusion, on peut donc dire que plusieurs différences sont constatées entre les performances théoriques attendues et les performances réelles. Ces différences sont principalement dues à la variabilité de la combinaison, différente de celle déterminée théoriquement, ainsi qu'à la détection de nombreux sauts lors de la première étape, rendant les performances de la seconde étape plus faibles que celles attendues.

Sauts simultanés d'amplitudes différentes

La TABLE 5.11 reprend les résultats de la détection de sauts simultanés d'amplitudes différentes à l'aide de la combinaison *Hatch-Wübenna-Melbourne*. A nouveau, les données utilisées sont des données réelles, provenant de la station GMSD, le jour 134 de 2014, dans lesquelles, cette fois, des sauts simultanés d'amplitudes différentes ont été manuellement insérés. Les époques et satellites concernés sont les mêmes qu'avant, mais c'est ici sur toutes les fréquences que des sauts d'amplitudes différentes ont été créés. Nous renvoyons au CHAPITRE 3 pour de plus amples informations à ce sujet.

Fréquences	Sat E11		Sat E12		Sat E19		Autres
	Ep 1604	Ep 2241	Ep 1540	Ep 2074	Ep 75	Ep 701	
<u>E1</u> - E5a	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	7
<u>E1</u> - E5b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	7
<u>E1</u> - E5a+b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	1
<u>E5a</u> - E5b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0
<u>E5a</u> - E5a+b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0
<u>E5b</u> - E5a+b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0

TABLE 5.11 – Sauts simultanés d'amplitudes différentes

Ici également, toutes les époques présentant des sauts ont été détectées. Quant aux faux positifs présents pour les combinaisons avec E1, ils sont les mêmes que ceux rencontrés lors de la détection des sauts isolés, traitée ci-dessus. Cela est tout à fait normal puisqu'ils s'agit des mêmes données brutes, seules changent l'amplitude et les fréquences des sauts artificiels.

5.3.5 Discussion

A l'heure actuelle, même lors du post-traitement, il n'est pas possible de garantir la détection de petits sauts isolés ou simultanés mais d'amplitudes différentes en ionosphère active grâce à une détection bi-fréquence (si une des fréquences est E1).

Si cette méthode devait être adaptée au temps réel, la seconde étape, de vérification, ne serait pas réalisable. Il faudrait alors envisager une augmentation des seuils lors de la

première étape afin de limiter les faux positifs. Si l'une ou l'autre fausse détection n'est pas dommageable, il n'est pas non plus acceptable de déclarer une époque comme porteuse de sauts toutes les 20 observations (comme le seuil de 2σ et ses 5% de faux positifs induiront).

Comme déjà abordé précédemment, les seuils choisis dans ce travail sont à titre indicatif et varient selon les exigences de l'utilisateur ainsi que selon l'application. Si la non détection d'un saut n'est pas considérée comme acceptable, mieux vaut alors baisser les seuils, quitte à favoriser les faux positifs.

5.4 Passage 2 : GF : Sauts simultanés de mêmes amplitudes

La combinaison *Geometry-free* a pour avantage de ne pas être affectée de la même manière par un saut selon la fréquence sur laquelle il apparaît. Elle permet dès lors de mettre en évidence des sauts simultanés de mêmes amplitudes. De plus, grâce à son utilisation de mesures de phases uniquement, elle est nettement moins bruitée que la combinaison *Hatch-Wübenna-Melbourne*.

Cependant, cette combinaison n'élimine pas les délais ionosphériques, c'est pourquoi il sera nécessaire d'utiliser des différences d'ordres élevés afin de mettre en évidence d'éventuels sauts. Cela sera concrètement possible à partir du second ordre, comme l'illustre la FIGURE 5.3. La quantité-test utilisée ici sera donc toujours différenciée.

Cette combinaison sera principalement utilisée pour sa capacité à mettre en évidence des sauts simultanés de mêmes amplitudes. Il n'est cependant pas exclu de l'utiliser afin de détecter d'autres sauts qui n'auraient pu être détectés lors des premiers traitements par la combinaison HWM.

La TABLE 5.12 reprend les précisions des différences temporelles pour les ordres de 2 à 4, l'effet de sauts simultanés d'un cycle, ainsi que le ratio entre ces deux quantités.

Notons que, comme démontré à la FIGURE 4.7,

- l'amplitude du saut sera conservée dans la différence de 2e ordre
- l'amplitude du saut sera doublée dans la différence de 3e ordre
- l'amplitude du saut sera triplée dans la différence de 4e ordre

Notons également que, plus une différence d'ordre élevé sera utilisée, plus de données il sera nécessaire de posséder pour la construire. Ainsi,

- une différence du 1e ordre nécessite 2 époques d'observations
- une différence du 2e ordre nécessite 3 époques d'observations
- une différence du 3e ordre nécessite 4 époques d'observations
- une différence du 4e ordre nécessite 5 époques d'observations

Le ratio étant plus élevé pour la différence de 4e ordre, nous utiliserons cette dernière. Cependant, cette pratique demande de faire plusieurs hypothèses et concessions :

Fréquences	Précision 1σ [m]	Effet de sauts simultanés d'un cycle [m]	Ratio
Différence du 2e ordre			
<i>E1 - E5a</i>	0.0068	0.0645	9.48
<i>E1 - E5b</i>	0.0068	0.0580	8.53
<i>E1 - E5a+b</i>	0.0062	0.0612	9.87
<i>E5a - E5b</i>	0.0045	0.0065	1.44
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0036	0.0033	0.92
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0036	0.0032	0.89
Différence du 3e ordre			
<i>E1 - E5a</i>	0.0096	0.1290	13.44
<i>E1 - E5b</i>	0.0096	0.1160	12.08
<i>E1 - E5a+b</i>	0.0088	0.1224	13.91
<i>E5a - E5b</i>	0.0064	0.0130	2.03
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0051	0.0066	1.29
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0051	0.0064	1.25
Différence du 4e ordre			
<i>E1 - E5a</i>	0.0136	0.1935	14.23
<i>E1 - E5b</i>	0.0136	0.174	12.79
<i>E1 - E5a+b</i>	0.0124	0.1836	14.81
<i>E5a - E5b</i>	0.0091	0.0195	2.14
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0072	0.0099	1.37
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0072	0.0096	1.33

TABLE 5.12 – Combinaison Geometry-free différenciée dans la détection de sauts simultanés de mêmes amplitudes

- Il n'y a pas de saut lors des 3 premières époques d'observations.
- On ne détectera pas les sauts sur les trois premières époques⁹.
- On suppose que, dans les trois époques suivant le saut, aucun autre saut ne sera présent (pas de sauts successifs)¹⁰.

Cela est le prix à payer si l'on veut une méthode de meilleure efficacité (car meilleur ratio), qui s'appliquera à l'ensemble de la période d'observation.

Il est également intéressant de remarquer que, dans le cas de la combinaison *Geometry-free*, ce sont les combinaisons n'utilisant pas E1 qui seront problématiques, contrairement à la combinaisons HWM. En effet, si leurs précisions sont pourtant meilleures, comparées à celles avec E1, l'influence de sauts simultanés est elle aussi très faible. Cela aura pour conséquence de conférer un mauvais ratio à ces combinaisons.

9. Il est possible de décider d'éliminer les trois premières époques de la période d'observation. C'est l'option généralement choisie en pratique.

10. Il est également possible de décider d'éliminer les trois premières époques après détection d'un saut. A nouveau, c'est l'option généralement choisie en pratique.

5.4.1 Choix de la méthode d'analyse

Il n'est pas possible d'appliquer la méthode hybride à la combinaison *Geometry-free*. En effet, cette dernière est influencée par les délais ionosphériques et ne sera donc pas stable au cours du temps dans sa version brute (comme le montre la FIGURE 5.3). Il conviendra d'effectuer des différences d'ordres élevés afin d'éliminer au maximum la tendance ionosphérique. Dans ces différences d'ordres élevés, les sauts de cycles se manifesteront comme des pics. Plus spécifiquement, dans différence de 4e ordre, que nous utiliserons, l'amplitude du pic sera 3 fois supérieure à l'amplitude du saut (voir FIGURE 4.7).

Nous utiliserons une détection par fenêtre statistique, et pourrons soumettre l'époque analysée à deux types de seuils : un seuil relatif et un seuil absolu.

5.4.2 Choix des seuils

Puisqu'aucune étape supplémentaire ne pourra être utilisée, il s'agira ici de trouver un compromis entre faux négatifs et faux positifs. En effet, pour une même précision, favoriser l'un défavorisera automatiquement l'autre. Les exigences de l'utilisateur seront donc déterminantes dans la définition de ces seuils.

A nouveau, le choix du seuil sera également conditionné par l'influence du plus petit saut simultané ainsi que par le bruit de la combinaison.

L'influence du plus petit saut simultané dépendra ici de la combinaison et donc des deux fréquences concernées (contrairement à la combinaison HWM). Quant à la précision de la différence entre l'époque courante et la moyenne la précédant, elle sera la même que la précision de la combinaison différenciée puisque la "moyenne" précédente sera considérée comme nulle (même principe que lors de la première étape de la HMW). La TABLE 5.13 reprend ces valeurs.

Fréquences	Préc. 1σ	Préc. moy. $\gamma=20\text{ep.}$ (1σ)	Préc. Δ moy. - pic (1σ)
$E1 - E5a$	0.0136	0.00	0.0136
$E1 - E5b$	0.0136	0.00	0.0136
$E1 - E5a+b$	0.0124	0.00	0.0124
$E5a - E5b$	0.0091	0.00	0.0091
$E5a - E5a+b$	0.0072	0.00	0.0072
$E5b - E5a+b$	0.0072	0.00	0.0072

TABLE 5.13 – Combinaison *Geometry-free* différenciée au 4e ordre [m]

Seuil relatif

Si, dans la méthode hybride, on pouvait se permettre de fixer le seuil relatif assez bas, c'est ici plus délicat. En effet, dans le cas nous occupant, les faux positifs restants ne pourront être éliminés lors d'une étape postérieure. Dès lors, détecter erronément une époque sur 20 comme étant porteuse de saut est difficilement justifiable (même si cela

dépend bien sûr de l'application et de l'exigence de l'utilisateur).

Les différents seuils statistiques auront les performances suivantes :

Fréquences	Seuil relatif [m]	Faux négatifs [%]	Faux positifs [%]
Seuil de 2σ			
<i>E1 - E5a</i>	0.0272	0.00	4.56
<i>E1 - E5b</i>	0.0272	0.00	4.56
<i>E1 - E5a+b</i>	0.0248	0.00	4.56
<i>E5a - E5b</i>	0.0182	44.43	4.56
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0144	73.24	4.56
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0144	74.54	4.56
Seuil de 3σ			
<i>E1 - E5a</i>	0.0408	0.00	0.26
<i>E1 - E5b</i>	0.0408	0.00	0.26
<i>E1 - E5a+b</i>	0.0372	0.00	0.26
<i>E5a - E5b</i>	0.0273	80.51	0.26
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0216	94.74	0.26
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0216	95.25	0.26
Seuil de 4σ			
<i>E1 - E5a</i>	0.0544	0.00	0.00
<i>E1 - E5b</i>	0.0544	0.00	0.00
<i>E1 - E5a+b</i>	0.0496	0.00	0.00
<i>E5a - E5b</i>	0.0364	96.86	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0288	99.56	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0288	99.62	0.00

TABLE 5.14 – Performances Geometry-free dans la détection de sauts simultanés d'un cycle - seuil relatif

Si un seuil statistique de 4σ est choisi, il n'y aura théoriquement pas de faux positifs détectés. Il est alors inutile de procéder à une seconde étape de test par rapport à un seuil absolu. Au vu de la TABLE 5.14, ce peut être le cas pour les combinaisons sans E1.

Pour les autres combinaisons, par contre, une proportion croissante de sauts sera non-détectée en augmentant le seuil. Dans les combinaisons *E5a-E5a+b* et *E5b-E5a+b*, le seuil statistique à 2σ est supérieur à l'effet de sauts simultanés d'un cycle, c'est pourquoi ces derniers n'ont que 25 % de chances d'être détectés (environ). Pour ces combinaisons sans E1, plusieurs cas sont alors possibles :

- Si, malgré tout, l'utilisateur souhaite détecter des sauts de petite amplitude, son seuil statistique devra alors être faible. De faux positifs seront alors automatiquement détectés, et il sera conseillé d'utiliser un seuil absolu par la suite afin d'éliminer un maximum de ces faux positifs.
- Si l'utilisateur préfère ne pas détecter des faux positifs, il peut choisir d'utiliser un seuil statistique de 4σ , tout en sachant alors que les sauts simultanés de faibles am-

plitudes ne seront pas détectables.

La TABLE 5.15 reprend les performances pour des sauts simultanés d'amplitudes supérieures à 1. Avec un seuil de 2σ , 100 % des sauts simultanés seront détectés à partir d'une amplitude de 3 cycles ($E5a-E5b$) ou de 5 cycles ($E5a-E5a+b$ et $E5b-E5a+b$). Quoiqu'il en soit, les 5% de faux positifs seront toujours d'application. Avec un seuil de 4σ , si aucun faux positif ne sera détecté, il faudra par contre attendre des sauts simultanés d'une amplitude de 4 cycles ($E5a-E5b$) ou 6 cycles ($E5a-E5a+b$ et $E5b-E5a+b$) pour parvenir à une totale efficacité.

Fréquences	Seuil relatif [m]	Faux négatifs [%]	Faux positifs [%]
Sauts simultanés de 2 cycles			
<i>E5a - E5b</i>	0.0182 [2σ]	1.10	4.56
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0144 [2σ]	22.66	4.56
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0144 [2σ]	25.14	4.56
<i>E5a - E5b</i>	0.0364 [4σ]	38.59	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0288 [4σ]	89.44	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0288 [4σ]	90.82	0.00
Sauts simultanés de 3 cycles			
<i>E5a - E5b</i>	0.0182 [2σ]	0.00	4.56
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0144 [2σ]	1.70	4.56
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0144 [2σ]	2.28	4.56
<i>E5a - E5b</i>	0.0364 [4σ]	0.75	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0288 [4σ]	45.22	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0288 [4σ]	50.00	0.00
Sauts simultanés de 4 cycles			
<i>E5a - E5b</i>	0.0182 [2σ]	0.00	4.56
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0144 [2σ]	0.02	4.56
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0144 [2σ]	0.04	4.56
<i>E5a - E5b</i>	0.0364 [4σ]	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0288 [4σ]	6.68	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0288 [4σ]	9.18	0.00
Sauts simultanés de 5 cycles			
<i>E5a - E5b</i>	0.0182 [2σ]	0.00	4.56
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0144 [2σ]	0.00	4.56
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0144 [2σ]	0.00	4.56
<i>E5a - E5b</i>	0.0364 [4σ]	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0288 [4σ]	0.19	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0288 [4σ]	0.38	0.00
Sauts simultanés de 6 cycles			
<i>E5a - E5b</i>	0.0182 [2σ]	0.00	4.56
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0144 [2σ]	0.00	4.56
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0144 [2σ]	0.00	4.56
<i>E5a - E5b</i>	0.0364 [4σ]	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0288 [4σ]	0.00	0.00
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0288 [4σ]	0.00	0.00

TABLE 5.15 – Performances de la Geometry-free dans la détection de sauts simultanés d'amplitudes supérieures à 1 cycle

Enfin, rappelons encore une fois que tous ces calculs, ces limites et ces performances, sont déterminées par rapport à des mesures fixes de précision sur les observables. La précision est en réalité variable et peut être bien plus faible ou plus forte selon, entre autres, des paramètres tels que l'activité ionosphérique.

Seuil absolu

Le seuil absolu sera donc éventuellement appliqué pour les combinaisons E5a-E5b, E5a-E5a+b, et E5b-E5a+b où le seuil relatif est de 2σ ¹¹.

Dans le cas d'une quantité-test où les sauts ont un impact différent selon la fréquence concernée, la base utilisée sera l'effet du plus petit saut. Dans notre cas particulier, il s'agira plus exactement de la plus petite influence de sauts simultanés (un saut de 1 cycle sur chacune des fréquences). Cette valeur sera différente pour chaque combinaison. Le seuil choisi (0.7, 0.8, etc.) sera multiplié par cette valeur.

Ici, à nouveau, plusieurs philosophies peuvent être adoptées :

- L'utilisateur accepte le fait que des sauts simultanés d'un cycle ne soient pas détectables. Le seuil relatif de 2σ est adopté de manière à permettre une détection plus efficace des sauts d'amplitude de 2,3,4, *etc.* cycles, et le seuil absolu est là pour limiter la détection de faux positifs. La TABLE 5.16 reprend les différentes performances selon le seuil (1, 1.5, ou 2 fois l'influence du plus petit saut) ainsi que l'amplitude des sauts simultanés à détecter. Ainsi, pour limiter les faux positifs, il sera préférable d'utiliser un seuil de 2 (fois l'influence du plus petit saut). Pour ce seuil, des performances proches de 100% seront acquises pour la détection des sauts d'amplitude de 4 cycles. Au total, il n'y aura donc que peu de faux positifs détectés, mais les sauts simultanés d'un cycle (voire deux, selon le seuil choisi) seront indétectables.

11. Ces cas de combinaisons seront rares, puisque E1 est une fréquence à priori reçue et traitée par tous les utilisateurs Galileo.

Fréquences	Seuil absolu [m]	Faux négatifs [%]	Faux positifs [%]
<i>Sauts simultanés de 2 cycles : seuil = 1 X effet plus petit saut</i>			
<i>E5a - E5b</i>	0.0195	1.62	3.24
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0099	8.38	16.76
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0096	9.18	18.36
<i>Sauts simultanés de 2 cycles : seuil = 1.5 X effet plus petit saut</i>			
<i>E5a - E5b</i>	0.0292	14.23	0.14
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0148	24.51	3.94
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0144	25.14	4.56
<i>Sauts simultanés de 3 cycles : seuil = 1 X effet plus petit saut</i>			
<i>E5a - E5b</i>	0.0195	0.00	3.24
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0099	0.30	16.76
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0096	0.38	18.36
<i>Sauts simultanés de 3 cycles : seuil = 1.5 X effet plus petit saut</i>			
<i>E5a - E5b</i>	0.0292	0.07	0.14
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0148	1.97	3.94
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0144	2.28	4.56
<i>Sauts simultanés de 3 cycles : seuil = 2 X effet plus petit saut</i>			
<i>E5a - E5b</i>	0.0390	1.62	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0198	8.38	0.60
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0192	9.18	0.76
<i>Sauts simultanés de 4 cycles : seuil = 2 X effet plus petit saut</i>			
<i>E5a - E5b</i>	0.0390	0.00	0.00
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0198	0.30	0.60
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0192	0.38	0.76

TABLE 5.16 – Performances de la Geometry-free dans la détection de sauts simultanés d'un ou plusieurs cycles - seuil absolu

- L'utilisateur veut malgré tout détecter un maximum de sauts simultanés d'un cycle. Dans ce cas, l'intervention d'un seuil absolu se justifie si le bruit réel est inférieur à celui que nous utilisons pour nos propagations de variances. En effet, si ce bruit est en réalité plus bas, le seuil fourni par l'intervalle de confiance est lui aussi moindre. Il peut alors devenir inférieur à l'effet du plus petit saut sur la combinaison, ce qui réduit alors la proportion de faux négatifs lors de la détection par ce seuil statistique. Il est dès lors possible d'utiliser un seuil absolu situé entre le seuil statistique et l'effet du plus petit saut simultané, afin de réduire la proportion de faux positifs à moins de 5 %. Il est délicat de fournir des valeurs pour ce seuil absolu ainsi que des performances, puisque ces paramètres dépendront de la variabilité de la combinaison, qui elle-même dépendra de l'activité ionosphérique.

5.4.3 Performances globales

Si les seuils suivants sont utilisés :

Fréquences	seuil relatif [m]	seuil absolu [m]
$E1 - E5a$	4σ	<i>aucun</i>
$E1 - E5b$	4σ	<i>aucun</i>
$E1 - E5a+b$	4σ	<i>aucun</i>
$E5a - E5b$ - cas 1	4σ	<i>aucun</i>
$E5a - E5a+b$ - cas 1	4σ	<i>aucun</i>
$E5b - E5a+b$ - cas 1	4σ	<i>aucun</i>
$E5a - E5b$ - cas 2	2σ	2X
$E5a - E5a+b$ - cas 2	2σ	2X
$E5b - E5a+b$ - cas 2	2σ	2X

TABLE 5.17 – Seuils pour la détection bi-fréquences de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes

A l'issue de cette étape de détection des sauts simultanés de mêmes amplitudes, les performances suivantes sont attendues :

Fréquences	1 cycle		2 cycles		3 cycles	
	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]
$E1 - E5a$	0	0	0	0	0	0
$E1 - E5b$	0	0	0	0	0	0
$E1 - E5a+b$	0	0	0	0	0	0
$E5a - E5b$ - cas 1	96.86	0	38.59	0	0.75	0
$E5a - E5a+b$ - cas 1	99.56	0	89.44	0	45.22	0
$E5b - E5a+b$ - cas 1	99.62	0	90.82	0	50.00	0
$E5a - E5b$ - cas 2	98.38	0	50.00	0	1.62	0
$E5a - E5a+b$ - cas 2	91.47	0.60	50.00	0.60	8.38	0.60
$E5b - E5a+b$ - cas 2	90.82	0.76	50.00	0.76	9.18	0.76

Fréquences	4 cycle		5 cycles		6 cycles	
	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]
$E1 - E5a$	0	0	0	0	0	0
$E1 - E5b$	0	0	0	0	0	0
$E1 - E5a+b$	0	0	0	0	0	0
$E5a - E5b$ - cas 1	0	0	0	0	0	0
$E5a - E5a+b$ - cas 1	6.68	0	0.19	0	0	0
$E5b - E5a+b$ - cas 1	9.18	0	0.38	0	0	0
$E5a - E5b$ - cas 2	0	0	0	0	0	0
$E5a - E5a+b$ - cas 2	0.30	0.60	0	0.60	0	0.60
$E5b - E5a+b$ - cas 2	0.38	0.76	0	0.76	0	0.76

TABLE 5.18 – Performances bi-fréquences pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes

Ainsi, pour les combinaisons comprenant E1, une performance de 100 % sera déjà atteinte pour la détection de sauts simultanés d'un seul cycle. Au contraire, pour les autres combinaisons, il faudra attendre des amplitudes de plusieurs cycles pour atteindre cette efficacité. Selon le scénario choisi (nous en avons ici repris deux, mais de multiples variantes peuvent exister), la proportion de faux positifs diffère. Si cette faible proportion est acceptable (cas 2), la proportion de faux négatifs sera alors nulle pour des sauts à partir de 4 ou 5 cycles. Dans le cas contraire, si seul un seuil de 4σ est utilisé, il faudra alors attendre 4 ou 6 cycles pour obtenir une proportion nulle de faux négatifs. De manière globale, le cas 1 aura donc de meilleures performances que le cas 2 pour des sauts simultanés d'une amplitude égale ou supérieure à 6 cycles.

Il convient également de soulever un point important : cette quantité-test, même différenciée au second ordre, reste marquée par l'activité ionosphérique, et plus particulièrement par les variations brutales du délai ionosphérique. Tous ces précédents calculs théoriques ne tiennent pas compte de l'influence de la variabilité ionosphérique sur la quantité-test. Or, le cas qui nous occupe est justement la détection en ionosphère active. L'ionosphère affectera donc la variabilité de la combinaison que l'on utilise¹².

Prenons l'exemple de l'*Halloween Storm* de 2003, durant laquelle des variations verticales du TEC de l'ordre de 10 TECU/min¹³ ont été observés à Bruxelles (région de latitude moyenne)¹⁴. Puisque nous travaillons avec des données 30 secondes, cela correspondrait donc à une variation de 5 TECU entre deux époques d'observations. La TABLE 5.19 reprend l'effet de cette variation sur la différence temporelle GF de premier ordre ainsi que sur la différence temporelle qui nous occupe, celle du 4e ordre. Est également rappelé l'effet d'un saut d'un cycle simultané sur la combinaison. En effet, si des différenciations d'ordres élevés permettent de mettre en évidence les sauts de cycles par amplification, les variations rapides et discontinues du TEC sont elles aussi amplifiées. Les résultats montrent à quel point l'ionosphère peut influencer cette détection par combinaison *Geometry-free* : l'amplitude de la variation ionosphérique, dans le cas de l'*Halloween Storm*, est plus de dix fois supérieure à l'effet de sauts simultanés d'un cycle ! Autrement dit, il ne faut pas, dans ce genre de cas, espérer détecter des sauts simultanés de faibles amplitudes. Bien sûr, il s'agit là d'un cas extrême pour les latitudes moyennes.

Fréquences	GF différenciée O1 [m]	GF différenciée O4 [m]	effet saut simult. d'1 cy[m]
<i>E1 - E5a</i>	0.6440	1.9320	0.1935
<i>E1 - E5b</i>	0.5709	1.7127	0.1740
<i>E1 - E5a+b</i>	0.6067	1.8201	0.1836
<i>E5a - E5b</i>	0.0731	0.2193	0.0195
<i>E5a - E5a+b</i>	0.0373	0.1119	0.0099
<i>E5b - E5a+b</i>	0.0358	0.1074	0.0096

TABLE 5.19 – Effet des variations ionosphériques - Halloween Storm (5 TECU / 30sec)

Cette potentielle variabilité de la combinaison est également à prendre en compte dans le choix du type de seuils ainsi que de leurs valeurs. Ainsi, si la variabilité est forte, les

12. Au contraire, la combinaison HWM utilisée précédemment en est nettement moins affectée, puisqu'elle élimine les délais ionosphériques de premier ordre.

13. Le TECU est l'unité de mesure du TEC : 1TECU=10¹⁶ électrons par mètre carré.

14. Des valeurs supérieures à 10 TECU/min pourraient être observées dans les régions équatoriales.

seuils statistiques, qu'ils soient à 2 ou 4 σ , seront eux-aussi plus élevés. La proportion de faux négatifs pour les sauts de petites amplitudes augmentera, et une efficacité de 100 % ne sera acquise que pour des sauts d'un plus grand nombre de cycles. Lors de phénomènes ionosphériques extrêmes, les seuils absolus, si il y en a, seront dépassés par les seuils relatifs.

5.4.4 Confrontation avec les données réelles

Après avoir observé les performances théoriques pour la détection des sauts simultanés d'amplitude différente, confrontons ces dernières avec un cas réel. Pour ce faire, nous utiliserons les fichiers de données pour le jour 134 de 2014 à la station GMSD, dans lequel ont été insérés des sauts simultanés de mêmes amplitudes aux époques de tests "habituelles" (discutées au CHAPITRE 3). Cinq fichiers différents seront utilisés pour illustrer notre propos. Ceux-ci sont affectés par des sauts simultanés de mêmes amplitudes allant de 1 à 5 cycles d'amplitudes.

A nouveau, nous ferons la distinction entre le cas des combinaisons avec E1 et le cas de celles sans E1. Contrairement à la détection de sauts à l'aide de la combinaison *Hatch-Wübenna-Melbourne*, c'est pour la *Geometry-Free* les combinaisons avec E1 qui seront théoriquement les plus performantes. Voyons donc ce qu'il en est dans notre exemple.

La TABLE 5.20 reprend les résultats de la détection de sauts simultanés de mêmes amplitudes sur les données-tests.

Fréquences	Sat E11		Sat E12		Sat E19		Autres
	Ep 1604	Ep 2241	Ep 1540	Ep 2074	Ep 75	Ep 701	
<i>E1 - E5a</i>	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	1
<i>E1 - E5b</i>	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	1
<i>E1 - E5a+b</i>	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	1
<i>E5a - E5b</i> (1)	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 4-5 Non : 1-3	Oui : / Non : 1-5	Oui : 3-5 Non : 1-2	6
<i>E5a - E5a+b</i> (1)	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 3-5 Non : 1-2	Oui : 4-5 Non : 1-3	Oui : / Non : 1-5	Oui : / Non : 1-5	Oui : 5 Non : 1-4	3
<i>E5b - E5a+b</i> (1)	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 3-5 Non : 1-2	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 4-5 Non : 1-3	Oui : / Non : 1-5	Oui : 4-5 Non : 1-3	3
<i>E5a - E5b</i> (2)	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 3-5 Non : 1-2	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 3-5 Non : 1-2	Oui : 3-5 Non : 1-2	Oui : 2-5 Non : 1	7
<i>E5a - E5a+b</i> (2)	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 3-5 Non : 1-2	Oui : 3-5 Non : 1-2	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 2-5 Non : 1	18
<i>E5b - E5a+b</i> (2)	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 2-5 Non : 1	16

TABLE 5.20 – Performances réelles pour la détection de sauts simultanés de mêmes amplitudes (de 1 à 5 cycles)

Combinaisons avec E1

Dans ce cas d'étude pratique, les combinaisons avec E1 présentent de moins bonnes performances que celles attendues. Notre attention s'est plus précisément portée sur les deux observations suivantes :

- Les sauts simultanés de toutes amplitudes sont détectés, à l'exception d'un. Selon les performances théoriques, la proportion de faux négatifs est pourtant nulle (pour toutes les combinaisons avec E1).
- Un faux positif est détecté. Selon les performances théoriques, le proportion de faux positifs est pourtant également nulle (pour toutes les combinaisons avec E1).

Détection de tous les sauts simultanés, même de faible amplitude, à l'exception d'un

L'époque concernée (l'époque 75) est affectée de sauts simultanés d'un cycle d'amplitude sur le satellite E19. Si, dans les combinaisons $E1-E5a$ et $E1-E5a+b$, ce petit saut simultané est détecté, il ne l'est pas dans la combinaison $E1-E5b$. Cela s'explique par les différences entre les caractéristiques intrinsèques de ces combinaisons : la précision et l'effet de sauts simultanés d'un cycle sur cette dernière, paramètres pouvant être regroupés dans le ratio.

En consultant la TABLE 5.12, l'on observe que le ratio de la combinaison $E1-E5b$ est plus faible que celui des deux autres combinaisons (12.79 contre 14.23 et 14.81). Dès lors, les sauts simultanés sur cette seconde combinaison ressortiront légèrement moins que leurs équivalents sur les combinaisons voisines. Néanmoins, dans notre exemple, où le seuil statistique est de 4σ , ces sauts devraient être très aisément détectés. Cela était sans compter les effets ionosphériques sur la combinaison, rendant cette dernière plus variable qu'attendue. Dès lors, les ratios chutent et la légère différence entre la combinaison $E1-E5b$ et les combinaisons $E1-E5a$ et $E1-E5a+b$ a pour conséquence d'empêcher la détection des plus petits sauts simultanés sur $E1-E5b$.

Un faux positif est détecté

Si la présence d'un seul faux positif est dans l'absolu acceptable (sauf application particulière), elle ne devrait néanmoins pas avoir lieu, au regard des statistiques. Pour rappel, un seuil de 4σ ne devrait pas induire de faux positifs. Il n'est cependant jamais possible d'atteindre une probabilité absolue nulle, et il reste donc toujours une infime possibilité de détecter des faux positifs en dehors de l'intervalle statistique de 4σ .

La raison de ce faux positif, illustré à la FIGURE 5.5, vient donc probablement d'ailleurs. Comme nous l'avons vu, l'étude statistique des performances ne tient pas compte de l'ionosphère. Or, la combinaison *Geometry-Free* est clairement influencée par ce type de délai. Dès lors, des perturbations rapides de l'ionosphère peuvent ressortir dans la combinaison différenciée au quatrième ordre, de la même manière qu'un saut de cycle. C'est le cas ici. Si l'amplitude de cette perturbation ionosphérique est légèrement inférieure à celle de petits sauts de cycles simultanés, elle n'aurait néanmoins pas pu être écartée par l'ajout d'un seuil absolu (étant trop proche de la valeur d'un saut d'un cycle).

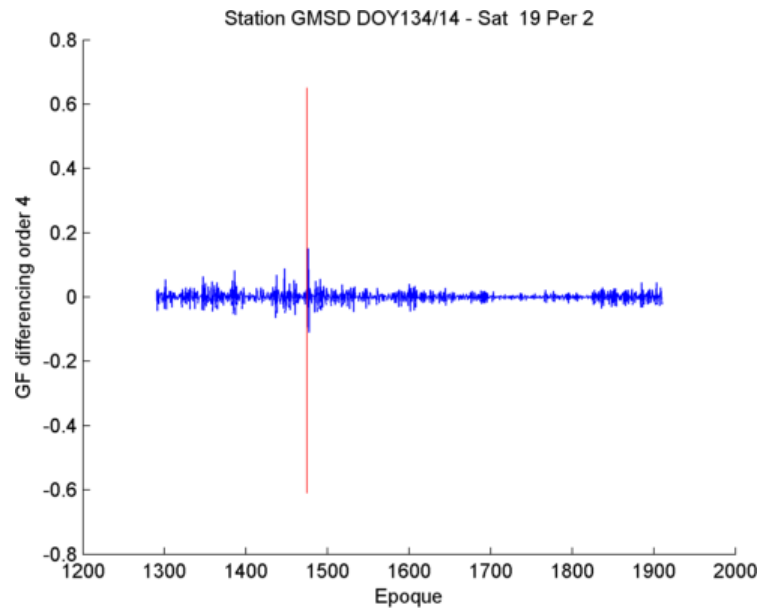


FIGURE 5.5 – Faux positif détecté sur la Geometry-Free E1-E5a

En conclusion, aussi bien pour les faux positifs que pour les faux négatifs, les différences de performances observées dans la détection bi-fréquence des sauts de cycles simultanés et de mêmes amplitudes, à l'aide d'une combinaison *Geometry-Free* dont une des fréquences est E1, sont dues à une variabilité réelle plus importante que celle théoriquement attendue sur base des précisions ESA. Cette variabilité de la combinaison est directement en relation avec les délais ionosphériques résiduels, la combinaison GF n'étant pas *ionosphere-free*. Ces derniers n'ayant pas été pris en compte dans le calcul des performances théorique, on comprend alors aisément la dégradation des performances observées en ionosphère active.

Le même constat peut-il être établi dans les combinaisons sans E1 ? Nous différencierons la discussion des résultats pour chacune des deux configurations de seuils testées : pour le premier cas, l'application d'un seuil relatif de 4σ seul, et pour le second cas, l'utilisation d'un seuil statistique de 2σ couplé à un seuil absolu correspondant au double de l'influence de sauts simultanés d'un cycle sur la combinaison. Dans ces deux cas de configurations de seuils, les mêmes remarques seront faites :

- Proportion de faux positifs plus élevée dans l'exemple que dans les prédictions théoriques.
- Variation de l'amplitude des sauts simultanés à partir de laquelle ces sauts seront détectés, selon les satellites, les époques, et les combinaisons (fait appel à la proportion de faux négatifs).

Combinaisons sans E1 - cas 1

On observe en pratique la même tendance que celle déterminée de manière théorique : les combinaisons sans E1 sont moins performantes que celles avec E1. Au regard des résultats sur données réelles, en utilisant la première configuration de seuils, les deux constats cités précédemment peuvent être établis.

Proportion de faux positifs plus élevée

La proportion de faux positifs est ici plus élevée que celle attendue, et en particulier pour la combinaison E5a-E5b. Il est donc nécessaire de se pencher sur deux aspects : la présence générale d'un plus grand nombre de faux positifs par rapport aux attentes théoriques, et la présence de différences selon les combinaisons.

Tout d'abord, souvenons-nous que le seuil de 4σ n'est pas censé laisser passer des faux positifs, mais que, comme l'illustre la FIGURE 5.5 discutée au point précédent, une ionosphère active peut néanmoins favoriser leur présence. Ceci explique donc la présence générale d'un plus grand nombre de faux positifs par rapport aux attentes théoriques.

Il nous reste ensuite à déterminer la raison de différences selon les combinaisons. Deux raisons à cela nous ont semblé envisageables : les différences de ratio entre les combinaisons, et l'impact différent de l'activité ionosphérique selon les combinaisons.

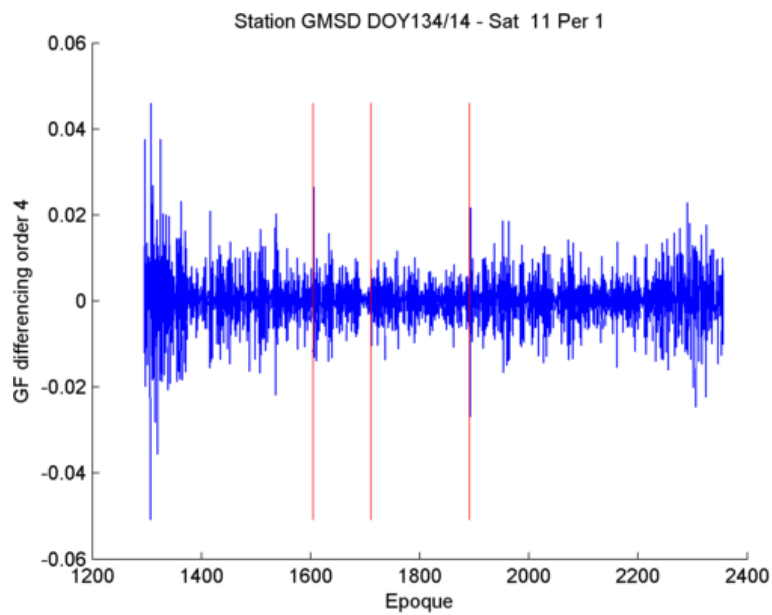
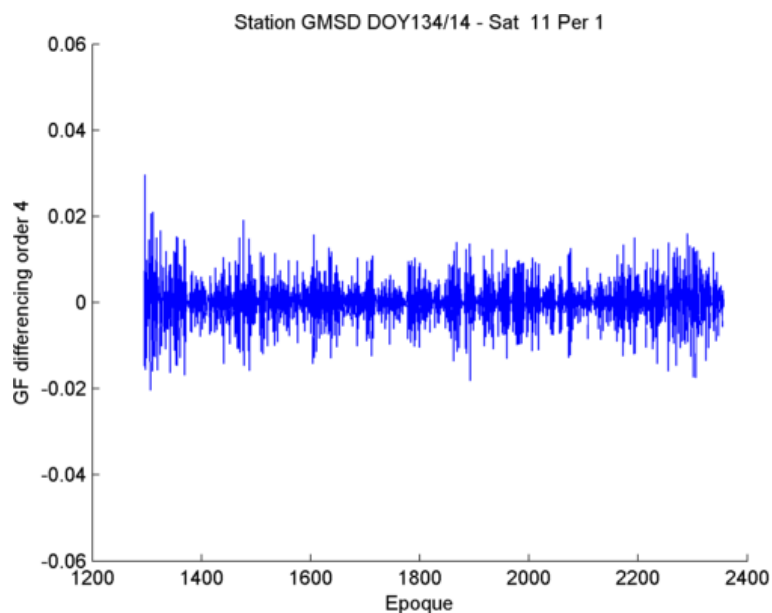
- Les différences de ratio

Il existe en effet une différence entre la combinaison E5a-E5b et les combinaisons E5a-E5a+b et E5b-E5a+b : le ratio de la première est supérieur à celui des deux autres (2.14 contre 1.37 et 1.33). Un ratio plus élevé devrait, d'une part, favoriser la détection des sauts et, d'autre part, limiter la proportion de faux positifs. Pourtant, à l'inverse, le nombre de faux positifs est plus élevé dans la combinaison au fort ratio. Le ratio n'en est donc certainement pas la raison.

- L'impact différent de l'activité ionosphérique selon les combinaisons

Si l'activité ionosphérique peut justifier l'apparition de faux positifs (premier aspect de la question), peut-elle expliquer que l'on rencontre un nombre différent de faux positifs selon la combinaison utilisée (second aspect de la question) ?

La réponse est oui : en effet, selon la combinaison utilisée, les fréquences concernées seront différentes et plus ou moins proches dans l'espace spectral. Plus ces dernières sont proches, plus les délais engendrés par le passage de leurs signaux dans l'ionosphère seront semblables. Ainsi, le délai ionosphérique d'une combinaison dont les fréquences seront proches sera moindre que pour une combinaison où les fréquences sont éloignées. On comprend alors aisément pourquoi la combinaison *E5a-E5b*, plus affectée par l'ionosphère, est plus variable et donc plus sujette aux faux positifs. Cette différence de variabilité est clairement observable à l'oeil nu sur la FIGURE 5.6, reprenant d'une part le résultat de la combinaison *Geometry-Free E5a-E5b* différenciée au quatrième ordre (avec faux positifs détectés), et d'autre part celui de la combinaison *Geometry-Free E5a-E5a+b*, également différenciée au quatrième ordre (aucun faux positif n'est détecté).

(a) $E5a-E5b$ (b) $E5a-E5a+b$ FIGURE 5.6 – Faux positifs détectés sur les Geometry-Free $E5a-E5b$ et $E5a-Ea+b$

Suivant ce raisonnement, on peut alors conclure la chose suivante : dans une combinaison Geometry-Free où les fréquences sont plus proches (ici, $E5a-E5a+b$ et $E5b-E5a+b$), le ratio est plus faible, mais les délais ionosphériques résultants sont également plus faibles. Au contraire, dans une combinaison où les fréquences sont plus éloignées (ici, $E5a-E5b$), le ratio est plus élevé, mais les délais ionosphériques résultants sont eux aussi plus élevés. Dès lors, si l'activité ionosphérique est importante, l'avantage du ratio élevé d'une combinaison à fréquences éloignées sera annihilée par le désavantage d'un important délai ionosphérique. De la même manière, pour une combinaison dont les fréquences sont proches et si l'activité ionosphérique est importante, le désavantage d'un plus faible ratio sera relativisé par l'avantage d'un faible délai ionosphérique résiduel.

Entre ces deux "types" de combinaisons (fréquences proches ou éloignées), il existe une limite d'activité ionosphérique au delà de laquelle la combinaison à fréquences proches devient plus efficace que celle dont les fréquences sont éloignées.

Notons que nous nous situons dans le cas particulier des combinaisons sans E1 auxquelles on applique un seuil de détection de 4σ . Dans ce cas, une activité ionosphérique telle que celle à observée à GMSD le jour 134/14 peut expliquer une différence d'efficacité entre les différentes combinaisons. Dans le prochain cas analysé, celui de ces mêmes combinaisons sans E1, auxquelles un seuil relatif plus faible (2σ) et un seuil absolu sont appliqués, d'autres facteurs seront prépondérants dans l'explication des différences d'efficacité.

Variation de l'amplitude des sauts simultanés à partir de laquelle ces sauts seront détectés

L'amplitude des sauts simultanés à partir de laquelle ces sauts seront détectés varie selon les satellites, les époques, et les combinaisons.

Quelques tendances globales ressortent :

- Le saut sur le satellite E19, à l'époque 75, n'est détecté dans aucune des combinaisons (sans E1), même lorsque leur amplitude est de 5 cycles.
- Les sauts sur les satellites E12 (époque 2074) et E19 (époque 701) ne sont détectables qu'à partir de 3,4, ou 5 cycles.
- Les sauts sur le satellite E11 et le saut sur le satellite E12 (époque 1540) sont détectés à partir d'une amplitude variant de 1 à 4 cycles (un seul cas pour 4 cycles).
- Les sauts simultanés d'un cycle ne sont détectés que pour le satellite E11 à l'époque 1604. Cela s'explique par le fait que le seuil de 4σ , pour les combinaisons sans E1, est généralement supérieur à l'effet de sauts simultanés d'un cycle sur la combinaison. Dans le cas où il est détecté, le saut avait été inséré à une époque où un "pic" de délai ionosphérique était déjà présent. Allant dans le même sens que ce dernier, les sauts simultanés ressortiront d'autant plus dans la combinaison GF différentiée. Le succès de sa détection est donc en partie "accidentel".

On peut cependant se demander pourquoi, dans une combinaison, un saut de plus petite amplitude sera détecté plus facilement que dans une autre combinaison, alors que, pour ces mêmes combinaisons, on observera la tendance inverse à une autre époque. Cela est dû au fait que, comme nous l'avons abordé précédemment pour le cas des faux positifs, l'efficacité de la détection sera fonction :

- du ratio de la combinaison (précision et influence du plus petit saut)
- de l'influence de l'activité ionosphérique sur la combinaison, par rapport à ce ratio

Ainsi, dans le cas du satellite E11 et des deux sauts qui y sont insérés aux époques 1604 et 2241, la combinaison $E5a-E5b$ permettra de détecter les sauts d'amplitudes plus faibles que les combinaisons $E5a-E5a+b$ et $E5b-E5a+b$ (sauts de 1 et 2 cycles aux époques 1604 et 2241 pour la combinaison $E5a-E5b$, contre sauts de 2 et 3 cycles à ces mêmes époques pour les combinaisons $E5a-E5a+b$ et $E5b-E5a+b$). L'activité ionosphérique étant relativement faible pour ce satellite, il s'agit probablement de l'**influence du ratio** : étant plus élevé pour la combinaison $E5a-E5b$ que pour les deux autres, des sauts de plus faibles amplitudes y seront détectables.

Cette relation est moins claire pour les autres satellites et sauts, probablement car l'**activité ionosphérique** y est plus importante. En effet, pour les sauts sur les satellites E12 et E19, la combinaison $E5a-Eb$ présente toujours les meilleures performances, mais parfois conjointement avec la combinaison $E5b-E5a+b$. Quant à la combinaison $E5a-E5a+b$, elle présente les plus mauvaises performances. Pourquoi une telle différence de performances entre les combinaisons $E5a-E5a+b$ et $E5b-E5a+b$, alors que celles-ci présentent pourtant un ratio très proche (pour rappel, 1.37 contre 1.34) et que les fréquences des porteuses sont écartées d'un même nombre de mégahertz dans l'espace spectral ?

La réponse se trouve probablement dans les valeurs des deux fréquences. En effet, le délai ionosphérique résiduel de la combinaison GF, si il dépend de la proximité des fréquences dans l'espace spectral, dépend également, pour un même écart, des valeurs de ces fréquences : plus les fréquences seront élevées, moins le facteur ionosphérique résultant sera élevé. Au contraire, plus les fréquences seront basses, plus le facteur ionosphérique résultant sera élevé. $E5a$ et $E5b$ étant localisées de part et d'autre de $E5a+b$ dans l'espace spectral ($E5a$ étant inférieure et $E5b$ supérieure), l'on comprend alors pourquoi le délai ionosphérique est plus important sur la combinaison $E5a-E5a+b$, et donc pourquoi cette dernière présente une efficacité légèrement inférieure à $E5b-E5a+b$.

Cette seconde variation¹⁵ n'est bien sûr pas du même ordre de grandeur que la première¹⁶ mais peut néanmoins jouer un rôle, comme dans le cas qui nous occupe¹⁷.

Combinaisons sans E1 - cas 2

On observe en pratique la même tendance que celle déterminée de manière théorique et que celles observées sur notre exemple en utilisant la première configuration de seuils : les combinaisons sans E1 sont moins performantes que celles avec E1. Au regard des résultats sur données réelles, en utilisant la seconde configuration de seuils, les deux constats cités précédemment peuvent être établis.

15. Pour un même écart spectral, la variation due aux valeurs des fréquences.

16. Due à différents écarts spectraux.

17. Afin d'avoir une idée de la différence de grandeur entre ces deux facteurs, nous renvoyons à la TABLE 5.19. En plus de la légère différence entre les délais sur $E5a-E5a+b$ et $E5b-E5a+b$, remarquons que le délai ionosphérique sur $E5a-E5b$ correspond bien à la somme de ceux-ci.

Proportion de faux positifs plus élevée

La proportion de faux positifs est ici plus élevée, d'une part, par rapport aux combinaisons avec E1 (comme c'était déjà le cas pour la première configuration de seuils), et d'autre part par rapport au cas 1. Si, comme dans le cas précédent, les mauvaises performances des combinaisons sans E1 étaient, déjà de manière théorique, prévisibles, penchons-nous plutôt sur les différences entre les cas 1 et 2, et entre les combinaisons de ce second cas.

Dans le cas précédent, où le seuil était uniquement statistique et de 4σ , le nombre de faux positifs était supérieur pour la combinaison $E5a-E5b$. Dans le cas qui nous occupe, où un seuil relatif de 2σ ainsi qu'un seuil absolu de $2X$ (l'effet du plus petit saut simultané) sont appliqués, c'est la tendance inverse que l'on observe : les combinaisons $E5a-E5a+b$ et $E5b-E5a+b$ sont les plus touchées par les faux positifs.

Cette tendance globale concorde avec les prédictions théoriques, reprises à la TABLE 5.16, prévoyant des faux positifs pour les combinaisons $E5a-Ea+b$ et $E5b-E5a+b$. Si l'on comptabilise l'ensemble des époques sur les quatre satellites Galileo pour cette journée et que nous les comparons avec le nombre de faux positifs effectivement détectés, nous arrivons à des proportions de 0.4 % et 0.35 % respectivement. C'est donc inférieur aux prédictions théoriques, de respectivement 0.6 % et 0.76 %. La théorie prévoit en effet plus de faux positifs sur la combinaison $E5b-E5a+b$ que sur la $E5a-E5a+b$. C'est pourtant le contraire qui est observé. Dès lors, si la théorie peut expliquer, de manière globale, une tendance générale à plus grand nombre de sauts sur ces combinaisons, elle ne permet pas d'expliquer la présence de faux positifs sur $E5a-E5b$ et le nombre plus important de faux positifs sur $E5a-E5a+b$ que sur $E5b-E5a+b$.

La présence de faux positifs en pratique sur $E5a-E5b$ peut être expliquée de la même manière que pour le premier cas : l'ionosphère plus active. Quant à la présence d'un plus grand nombre de faux positifs sur $E5a-E5a+b$ que sur $E5b-E5a+b$, elle peut en pratique être expliquée par un délai ionosphérique résultant légèrement plus important sur la combinaison $E5a-E5a+b$ ¹⁸.

Variation de l'amplitude des sauts simultanés à partir de laquelle ces sauts seront détectés

Comme pour le premier cas de configuration des seuils, l'amplitude des sauts simultanés à partir de laquelle ces sauts seront détectés varie selon les satellites, les époques, et les combinaisons. On remarque cependant de meilleures performances globales que dans le premier cas, à une exception près : le satellite E11, pour la combinaison $E5a-E5b$ (pour les deux sauts). Dans la comparaison entre les deux configurations de seuils, plusieurs faits peuvent être soulignés concernant l'amplitude des sauts détectés :

- Dans cette seconde configuration, tous les sauts de 3 à 5 cycles sont détectés. Au contraire, dans le premier cas, certains sauts simultanés, même de 5 cycles ne sont

18. Pour rappel, cette variation est due à la valeur des fréquences utilisées, pour un même écart spectral entre celles-ci : les fréquences étant plus basses, le délai ionosphérique résiduel sera plus élevé.

pas détectés. Si, dans le premier cas, une faible proportion de faux négatifs était présente pour des amplitudes de 5 cycles pour les combinaisons $E5a-E5a+b$ et $E5b-E5a+b$, ce qui pourrait justifier la non-détection d'un des sauts simultanés de 5 cycles, elle ne l'était pourtant pas pour $E5a-E5b$, alors qu'un des sauts simultanés de 5 cycles n'est pas non plus présent sur cette dernière. Les performances sont donc inférieures à celles attendues. Au contraire, dans le second cas, les sauts de trois cycles sont détectés alors que les statistiques théoriques renseignent jusqu'à 50 % de faux négatifs pour ceux-ci. Dans ce cas, les performances sont donc meilleures qu'attendues. Cela va même loin : la combinaison $Eb-E5a+b$, qui était théoriquement, parmi les trois, celle susceptible de présenter le plus de faux négatifs, est dans ce cas pratique la seule détectant tous les sauts d'amplitude de deux cycles.

- Dans le même ordre d'idées, soulignons que certains sauts simultanés de 1 cycle sont détectés. Ces mêmes sauts, dans le cas précédent, n'étaient pas toujours détectés, même pour une amplitude de 5 cycles.

La comparaison de ces deux configurations illustre bien l'éternel dilemme de la détection bi-fréquence : si l'on est prêt à accepter un nombre plus important de faux positifs, les performances en terme de détection des vrais sauts seront meilleures, et des sauts de plus petites amplitudes pourront alors être plus aisément détectés.

5.4.5 Discussion

A l'heure actuelle, il n'est pas possible de garantir la détection de petits sauts simultanés de même amplitude lorsque deux fréquences sont disponibles. Si, en ionosphère calme, les performances de détection à l'aide des combinaisons sans E1 sont de 100 %, même pour les plus petit sauts, ces dernières sont fortement dégradées par une forte activité ionosphérique. Quant aux performances des combinaisons avec E1, elles sont dès le départ plus mauvaises, et seront également dégradées par une forte activité ionosphérique.

Si cette détection devait être adaptée en temps réel, cela ne poserait pas de problème majeur : à la place de parcourir les données dans les deux sens, la fenêtre statistique ne passerait que dans le sens chronologique. Le principal désavantage occasionné serait la non-analyse des premières époques d'observations, qui pourrait purement et simplement être éliminées afin d'éviter d'introduire des erreurs dans les traitements ultérieurs.

Enfin, notons que l'utilisation de cette quantité-test *Geometry-free* permettrait éventuellement de détecter certains sauts isolés ou simultanés mais d'amplitudes différentes qui n'auraient pas été détectés lors de l'étape précédente dans la combinaison *Hatch-Wübenna-Melbourne*. Les combinaisons avec E1 étaient, lors du premier passage, problématiques pour les sauts de petite amplitude (ou pour des sauts simultanés dont la différence d'amplitude était faible). Elles sont ici au contraire les plus performantes. De plus, l'influence d'un saut isolé sur la combinaison GF est bien plus importante que celle de sauts simultanés de mêmes amplitudes. Dès lors, sauf cas d'ionosphère extrêmement active, la combinaison GF devrait pouvoir mettre en évidence d'éventuels sauts non détectés lors de la première passe. N'oublions cependant pas la présence de quelques exceptions, cette

combinaison étant insensible à certaines configurations de sauts simultanés de mêmes amplitudes.

5.5 Conclusion

Tout d'abord, les différentes combinaisons susceptibles d'être utilisées dans une détection de sauts de cycles bi-fréquence ont été brièvement rappelées et illustrées. La combinaison semblant convenir le mieux, la *Hatch-Wübenna-Melbourne* a tout d'abord été choisie. Cette dernière ne permettant pas de détecter les sauts simultanés de même amplitude, nous avons alors porté notre choix sur une seconde combinaison, la *Geometry-Free*.

Dans un premier temps, après le choix de ces quantités-tests, une étude théorique a été effectuée.

Pour chacune des quantités-tests, une méthode d'analyse a été choisie. De par sa stabilité dans le temps, la combinaison *Hatch-Wübenna-Melbourne* a la possibilité d'être utilisée à travers notre méthode de détection hybride. Ce n'est pas le cas de la combinaison *Geometry-Free*, qui doit, elle, être différenciée au deuxième degré au minimum, pour élimination d'une partie des effets ionosphériques, afin d'être utilisée dans des méthodes de détection des sauts de cycles. Nous la choisirons différenciée au quatrième ordre afin d'obtenir un ratio optimal et y appliquerons une détection par fenêtre statistique, dans les deux sens, soit l'équivalent conceptuel de la première étape de la détection hybride.

Ensuite, chacun des seuils de ces méthodes ont été discutés, en tenant compte des caractéristiques intrinsèques aux combinaisons respectives, et des recommandations ont été formulées. Celles-ci ne sont fournies qu'à titre indicatif et peuvent bien sûr être adaptées en fonction des priorités de l'utilisateur et de l'application concernée.

A partir des résultats théoriques, les performances globales pour chaque combinaison ont pu être énoncées.

Dans un second temps, une étude pratique a été menée sur des données réelles dans lesquelles des sauts avaient préalablement été insérés artificiellement. Cela a permis de tester la validité des méthodes et des seuils pour une journée précise, sous ionosphère active et comparer les performances réelles aux performances théoriques attendues. Plusieurs constats en sont ressortis :

- L'éloignement dans l'espace spectral de E1 par rapport aux autres fréquences Galileo engendre de fortes différences de performances entre les combinaisons comprenant celles-ci et celles ne la comprenant pas. Pour chaque quantité-test, deux groupes de combinaisons sont donc formés sur cette base.
- ★ Pour la détection des sauts isolés et des sauts simultanés d'amplitudes différentes, utilisant la quantité-test HWM, les combinaisons sans E1 seront les plus efficaces.
- * Selon le groupe, différents seuils seront utilisés, afin de tirer parti au maximum des différentes capacités de ceux-ci. Des seuils plus faibles seront appliqués aux combinaisons avec E1.

- * En termes de performances, l'étude théorique et les tests s'accordent pour les combinaisons sans E1 : ces dernières permettront de détecter les sauts d'un cycle jusqu'à la plus petite amplitude, celle d'un cycle, sans faux positifs ni faux négatifs. Ces performances sont donc excellentes.
- * Toujours en termes de performances, l'étude théorique et les tests ne sont pas totalement en accord pour les combinaisons sans E1.
 - o En termes de faux négatifs, les tests ont montré de meilleurs résultats que ceux attendus. Cela s'explique par une variabilité des données plus faible que celle attendue en théorie¹⁹
 - o En termes de faux positifs, les tests ont montrés de moins bons résultats qu'attendu. En effet, lors de la modélisation théorique, nous n'avions pas pris en compte l'influence des faux positifs résultant de la première étape dans la comparaison de moyenne (seconde étape). Ce problème n'a pas été rencontré dans le cas des combinaisons avec E1 puisque le seuil statistique y est plus élevé.
- * Pour la détection des sauts simultanés de mêmes amplitudes, utilisant la quantité-test GF, les combinaisons avec E1 seront au contraire les plus efficaces.
- * Selon le groupe, différents seuils seront utilisés, afin de tirer parti au maximum des différentes capacités de ceux-ci. Deux cas seront distingués pour les combinaisons sans E1 : pour l'un, les seuils seront élevés et similaires à ceux utilisés dans les combinaisons avec E1 ; pour l'autre, des seuils plus faibles seront appliqués.
- * En terme de performances, les tests ont montré que les combinaisons avec E1 ne tenaient pas leurs promesses : un saut est non-détecté et un faux positif apparaît. Cela est dû à l'augmentation de la variabilité de la quantité-test suite à l'importante activité ionosphérique, chose dont il était difficile de tenir compte dans le calcul des performances théoriques. Ces combinaisons restent malgré tout assez efficaces, comparées à celles sans E1.
- * Toujours en terme de performances, les tests ont également montré une baisse d'efficacité pour les combinaisons sans E1. Celles-ci sont également dues à l'activité ionosphérique.
 - o Dans le premier cas, celui où seul un seuil statistique de 4σ est appliqué, la proportion de faux positifs est plus élevée que celle attendue. Concernant l'amplitude à partir de laquelle les sauts sont détectés, pour une même combinaison, elle est en pratique un peu variable (entre 1 cycle et plus de 5 cycles).
 - o Dans le second cas, celui où un seuil statistique de 2σ et un seuil absolu de $2X$ sont appliqués, la proportion de faux positifs est plus faible que celle attendue. Ceux-ci restent malgré tout bien plus nombreux que pour le cas 1. Quant à l'amplitude à partir de laquelle les sauts sont détectés, elle est de

19. En théorie = selon les valeurs de base de l'ESA.

manière générale plus faible que pour le premier cas (entre 1 et 3 cycles).

- Une ionosphère active dégradera les performances, particulièrement celles de la quantité-test GF. Dans celle-ci, les effets ionosphériques peuvent inverser les tendances prévues par les études théoriques, et aller jusqu'à rendre impossible la détection de sauts simultanés de moins de 10 cycles dans les cas extrêmes.

Finalement, une courte discussion aborde les modifications que nécessiteraient une éventuelle adaptation en temps réel et les dégradations de performances que celle-ci pourrait occasionner.

A travers les comparaisons entre théorie et exemple pratique, ce chapitre a permis de mettre en évidence les principaux problèmes rencontrés à l'heure actuelle dans les méthodes de détection des sauts de cycles, majoritairement bi-fréquences et peu adaptées à l'ionosphère active. Les deux prochains chapitres seront consacrés aux détections tri- et quadri-fréquences, et les éventuelles améliorations fournies par l'utilisation d'un nombre plus élevé de fréquences seront expliquées et illustrées.

Chapitre 6

Détection tri-fréquence

6.1 Introduction

Après avoir analysé les performances de l'algorithme bi-fréquence, limitées sous certains aspects, nous discutons de l'apport d'une troisième fréquence pour la détection des sauts de cycles.

6.2 Choix des quantités-tests

Lorsque trois fréquences porteuses sont disponibles, il est possible de construire :

- trois combinaisons mono-fréquences
- trois combinaisons bi-fréquences
- une combinaison tri-fréquence

En plus des quantités-tests bi-fréquences présentées lors du chapitre précédent, disposer d'une troisième fréquence permet d'utiliser des combinaisons tri-fréquences.

La combinaison tri-fréquence de *Simsky* présente globalement les mêmes avantages que la bi-fréquence *Hatch-Wübenna-Melbourne*. Elle est *ionosphere-free* et *geometry-free* ; le multi-trajet et les délais hardware sont les seuls termes résiduels qu'elle comprend. Elle est par contre exprimée en mètres et ne conserve donc pas l'entièreté des ambiguïtés et des sauts. La fréquence de la porteuse ayant subi un saut déterminera donc l'influence sur la combinaison. Si ses ratios sont élevés, en comparaison avec la *Hatch-Wübenna-Melbourne*, elle présente néanmoins le même problème en cas de sauts simultanés de mêmes amplitudes sur les trois fréquences : ceux-ci s'annulent dans la combinaison, rendant toute détection de ceux-ci impossible sans l'aide d'une combinaison d'un différent type.

La FIGURE 6.1 illustre, pour le jour 134 de 2014 à la station GMSD, le résultat de la combinaison de *Simsky* sur E1 pour le passage du satellite E12. Un saut d'un cycle a été inséré sur E1 à l'époque 1540 et un second à l'époque 2074. Dans la combinaison brute (*a*) aussi bien que dans sa version différenciée (*b*), le saut est visible. En effet, les

ratios des combinaisons de Simsky sont globalement plus élevés que ceux des combinaisons *Hatch-Wübenna-Melbourne*.

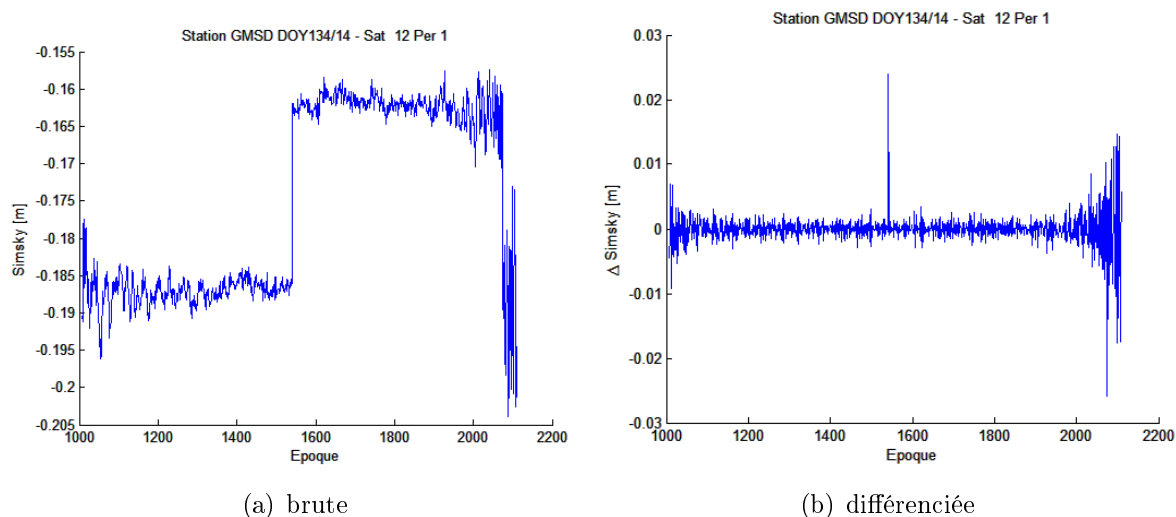


FIGURE 6.1 – Saut d’un cycle sur E1 (ép. 1540 & 2074) : *Simsky* E1-E5a-E5b

Nous choisirons donc d’utiliser une combinaison tri-fréquence de *Simsky* pour la détection des sauts isolés et des sauts simultanés d’amplitudes différentes. Concernant les sauts simultanés de mêmes amplitudes, nous continuerons à utiliser les combinaisons *Geometry-Free* bi-fréquences.

6.3 Passage 1 : Simsky : Sauts isolés et sauts simultanés d’amplitudes différentes

6.3.1 Choix de la méthode d’analyse

Puisqu’il est possible d’appliquer la méthode hybride sur cette combinaison, c’est le choix que nous ferons.

6.3.2 Choix des seuils

Pour rappel, la méthode hybride est constituée de deux phases. La première vise à détecter les sauts potentiels, dont la présence sera confirmée lors de la seconde étape par une comparaison de moyennes. Lors de la première étape, la priorité sera donc donnée à une faible proportion de faux négatifs, et les seuils devront donc être assez bas. Nous prenons le risque de détecter des faux positifs pour éviter la non détection de réels sauts (faux négatifs). Les éventuels faux positifs détectés lors de cette étape seront éliminés lors de la comparaison de moyennes (deuxième étape).

A nouveau, chaque choix de seuil dépendra des trois facteurs clés :

- l’effet du plus petit saut sur la combinaison
- la précision de la combinaison
- la tolérance de l’utilisateur par rapport à la proportion de faux positifs et de faux négatifs

Première étape : détection grossière

La première étape de la méthode hybride, la détection grossière, utilise la quantité-test dans sa version différenciée. Ici, il s’agit de la combinaison de Simsky.

La TABLE 6.1 reprend la *précision de la combinaison* de Simsky différenciée. Comme pour la combinaison HWM, la moyenne des époques précédentes sera considérée comme nulle, et l’écart entre l’époque courante et la moyenne précédente sera affectée de la même précision que la combinaison en elle-même.

Fréquences	Préc. (1σ)	Préc. moy. $\gamma=20\text{ep.}$ (1σ)	Préc. Δ moy. - pic (1σ)
$E1 - E5a - E5b$	0.0035	0.00	0.0035
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0026	0.00	0.0026
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0027	0.00	0.0027
$E5a - E5b - E5a+b$	0.0040	0.00	0.0040

TABLE 6.1 – Combinaison Simsky différenciée [m]

Quant à l’*influence du plus petit saut* sur la combinaison, il sera variable selon la fréquence affectée par le saut. La TABLE 6.2 reprend, pour chaque combinaison tri-fréquence qu’il est possible de construire à partir des signaux Galileo, la fréquence dont les sauts auront la plus faible influence sur la combinaison ainsi que cette influence pour un saut d’un cycle.

Combinaison	Fréquence	Effet sur la combinaison
$E1 - E5a - E5b$	E1	0.024
$E1 - E5a - E5a+b$	E1	0.012
$E1 - E5b - E5a+b$	E1	0.012
$E5a - E5b - E5a+b$	E5a	0.255

TABLE 6.2 – Influence du plus petit saut sur la combinaison de Simsky [m]

Les grandes différences entre l’influence d’un saut selon la fréquence concernée mènent à d’importantes différences de ratios (voir TABLE 4.6). Cela sera particulièrement le cas pour les combinaisons $E1-E5a-E5b$, $E1-E5a-E5a+b$ et $E1-E5b-E5a+b$, où l’influence d’un saut sur E1 sera plus de 10 fois plus faible que l’influence d’un saut présent sur une des autres fréquences. C’est donc ici l’influence de la fréquence pour laquelle un saut d’un cycle provoquera la plus petite variation dans la combinaison qui sera prise en compte dans la définition des seuils. Il convient néanmoins de garder à l’esprit que les performances seront en réalité nettement meilleures pour les autres fréquences. Cependant, en cas de sauts simultanés uniquement sur ces deux autres fréquences (celles influençant de

manière plus importante la combinaison), l'influence sur la combinaison sera égale à celle d'un saut sur la troisième fréquence.

Lors de cette première étape, deux types de seuils seront à nouveau définis : un seuil relatif et un seuil absolu. Le premier cherche à mettre en évidence une éventuelle discontinuité alors que le second vérifie que l'amplitude de cette discontinuité est susceptible de correspondre à un saut de cycle ou est au contraire trop petite.

Seuil relatif

La TABLE 6.3 reprend les différentes performances pour des seuils relatifs de 2, 3, et 4 σ dans la détection de saut d'un cycle.

Fréquences	Seuil relatif [m]	Faux négatifs [%]	Faux positifs [%]
Seuil de 4 σ			
$E1 - E5a - E5b$	0.0138	0.16	0.00
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0103	25.46	0.00
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0107	31.21	0.00
$E5a - E5b - E5a+b$	0.0160	0.00	0.00
Seuil de 3 σ			
$E1 - E5a - E5b$	0.0104	0.00	0.26
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0077	3.14	0.26
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0080	3.59	0.26
$E5a - E5b - E5a+b$	0.0120	0.00	0.26
Seuil de 2 σ			
$E1 - E5a - E5b$	0.0069	0.00	4.56
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0051	0.39	4.56
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0053	0.64	4.56
$E5a - E5b - E5a+b$	0.0080	0.00	4.56

TABLE 6.3 – Performances de la QT Simsky différenciée dans la détection d'un saut d'un cycle

Comme pour tout seuil statistique, le nombre de σ déterminera le nombre de faux positifs.

Pour un seuil de 4 σ , la combinaison $E5a-E5b-E5a+b$ est déjà efficace à 100 %. La combinaison $E1-E5a-E5b$ présente également de très bonnes performances, puisque seuls 0.16 % des sauts d'un cycle, sur la fréquence qui influence le moins la combinaison, sont susceptibles de ne pas être détectés. Les deux autres combinaisons, par contre, nécessiteront clairement un seuil plus faible, puisque c'est entre 25 et 35 % des sauts sur $E1$ qui pourraient ne pas être détectés.

Pour un seuil de 2 σ , si les faux positifs s'élèvent à presque 5 %, les taux de faux négatifs sont au contraire proches, voire égaux, à zéro. Nous choisirons ce seuil pour les raisons suivantes :

- Pour les combinaisons $E1-E5a-E5a+b$ et $E1-E5b-E5a+b$, c'est le seuil présentant le taux le plus faible de faux négatifs. L'objectif de cette étape étant principalement de les limiter, ce seuil constitue donc la meilleure solution.
- Pour les combinaisons $E1-E5a-E5b$ et $E5a-E5b-E5a+b$, de très bonnes performances en termes de faux négatifs sont déjà obtenues pour des seuils statistiques plus élevés, seuils proposant d'ailleurs un taux moindre de faux positifs. Cependant, afin d'être efficace lors d'évènements ionosphériques, provoquant une hausse dans la variabilité de la combinaison¹, nous préférons utiliser un seuil de 2σ . Ainsi, en cas d'augmentation de la variabilité, des sauts d'un cycle seront plus facilement détectables.
- Les faux positifs que l'utilisation de 2σ impose ne sont à priori pas un problème, puisqu'ils seront soit supprimés lors de l'application du premier seuil absolu, soit supprimés lors de la seconde étape, celle de la confirmation ou l'infirmité des sauts potentiels par comparaison de moyennes. Cependant, nous avons vu dans l'application de la méthode hybride à la combinaison *Hatch-Wübenna-Melbourne* qu'un nombre trop élevé de faux positifs lors de la première étape pouvait nuire à l'efficacité de la seconde. Nous verrons donc si ce problème est, oui ou non, toujours d'actualité avec une combinaison tri-fréquence, moins bruitée.

Seuil absolu

La TABLE 6.4 reprend les performances pour différents seuils absolus. Comme tout seuil, pour une précision donnée, l'abaissement du seuil diminuera la proportion de faux négatifs mais augmentera celle des faux positifs.

1. En effet, même si cette dernière est *ionosphere-free*, le *Signal to Noise Ratio* sera influencé par l'activité ionosphérique, les données reçues par le récepteur seront alors de moins bonne qualité, d'où une plus grande variabilité des données en sortie. Si, dans un premier temps, nous avons aussi pensé que les délais ionosphériques d'ordres supérieurs, non-correctés même dans les combinaisons dites *ionosphere-free*, pouvaient également influencer la variabilité de la combinaison, nous prouverons par la suite que ce n'est pas le cas.

Fréquences	Seuil absolu [m]	Faux négatifs [%]	Faux positifs [%]
Seuil de 0.7 X effet plus petit saut			
$E1 - E5a - E5b$	0.0168	1.88	0.00
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0084	8.08	0.12
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0084	8.85	0.16
$E5a - E5b - E5a+b$	0.1785	0.00	0.00
Seuil de 0.6 X effet plus petit saut			
$E1 - E5a - E5b$	0.0144	0.27	0.00
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0072	3.14	0.52
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0072	3.59	0.70
$E5a - E5b - E5a+b$	0.1530	0.00	0.00
Seuil de 0.5 X effet plus petit saut			
$E1 - E5a - E5b$	0.0120	0.03	0.06
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0060	0.99	1.98
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0060	1.22	2.44
$E5a - E5b - E5a+b$	0.1275	0.00	0.00
Seuil de 0.4 X effet plus petit saut			
$E1 - E5a - E5b$	0.0096	0.00	0.54
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0048	0.26	6.28
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0048	0.35	7.18
$E5a - E5b - E5a+b$	0.1020	0.00	0.00

TABLE 6.4 – Performances de la QT Simsky différenciée dans la détection d'un saut d'un cycle

Le seuil de 0.4X présentant une très faible proportion de faux négatifs tout en limitant la proportion des faux positifs, c'est celui-ci que nous choisirons.

Pour les combinaisons de Simsky, si l'on se base sur les précisions théoriques des observables fournies par l'ESA, l'utilisation d'un seuil absolu en plus du seuil relatif lors de la première étape ne serait pas utile pour les combinaisons $E1-E5a-E5a+b$ et $E1-E5b-E5a+b$. En effet, dans ce cas, suivant ces mêmes valeurs, si un seuil absolu de 0.4 est utilisé en plus des 2σ , c'est le seuil statistique qui prédominera (voir TABLES 6.3 et 6.4). Dès lors, ce seuil absolu n'aura d'influence que si la variabilité est plus faible que celle attendue. Si la variabilité est plus faible, les performances du seuil absolu seront meilleures qu'annoncées, et la surimposition du seuil absolu au seuil statistique permettra alors de limiter les faux positifs.

Au contraire, toujours sur base des précisions théoriques de l'ESA, pour les combinaisons $E1-E5a-E5b$ et $E5a-E5b-E5a+b$, l'utilisation d'un seuil absolu de 0.4 s'avère utile pour l'élimination d'une partie des faux positifs. Cela sera bien sûr d'autant plus utile que la précision de la combinaison est faible.

A l'issue de cette première étape, les performances seront donc les suivantes :

Fréquences	seuil relatif [m]	seuil absolu [m]	Faux négatifs [m]	Faux positifs [m]
$E1 - E5a - E5b$	0.0069 [2σ]	0.0096 [$0.4X$]	0.00	0.54
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0051 [2σ]	0.0048 [$0.4X$]	0.39	4.56
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0053 [2σ]	0.0048 [$0.4X$]	0.64	4.56
$E5a - E5b - E5a+b$	0.0080 [2σ]	0.1020 [$0.4X$]	0.00	0.00

TABLE 6.5 – Performances tri-fréquences pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes : Etape 1

Deuxième étape : confirmation de la présence d'un saut

La seconde étape de la détection hybride a pour but de confirmer ou d'infirmer la présence réelle d'un saut ou non parmi les sauts potentiels détectés lors de la première étape. C'est ici la combinaison brute de Simsky qui sera utilisée.

La TABLE 6.6 reprend la précision de cette combinaison brute, la précision sur la moyenne des 20 époques précédant l'époque courante, et la *précision sur la différence* calculée entre moyennes avant et après le saut potentiel. C'est cette dernière qui entrera en compte dans le calcul des performances.

Fréquences	Préc. (1σ)	Préc. moy. $\gamma=20$ ep. (1σ)	Préc. Δ 2 moy. (1σ)
$E1 - E5a - E5b$	0.0024	0.00055	0.00077
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0018	0.00041	0.00058
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0019	0.00042	0.00060
$E5a - E5b - E5a+b$	0.0028	0.00063	0.00089

TABLE 6.6 – Combinaison Simsky brute [m]

Concernant l'*influence du plus petit saut* sur la combinaison, elle est de même valeur que pour la combinaison différenciée (voir TABLE 6.2). Elle se présente cependant comme un biais dans la combinaison brute, alors qu'elle correspondait à un pic dans la combinaison différenciée.

La TABLE 6.7 reprend les performances de plusieurs seuils absolus sur les différentes combinaisons tri-fréquences qu'il est possible de construire. Ces performances sont toujours exprimées par rapport à la détection d'un saut d'un cycle sur la fréquence étant la moins représentée dans la combinaison.

Fréquences	Seuil absolu [m]	Faux négatifs [%]	Faux positifs [%]
Seuil de 0.8 X effet plus petit saut			
$E1 - E5a - E5b$	0.0192	0.00	0.00
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0096	0.00	0.00
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0096	0.00	0.00
$E5a - E5b - E5a+b$	0.2040	0.00	0.00
Seuil de 0.85 X effet plus petit saut			
$E1 - E5a - E5b$	0.0204	0.00	0.00
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0102	0.09	0.00
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0102	0.13	0.00
$E5a - E5b - E5a+b$	0.2167	0.00	0.00
Seuil de 0.9 X effet plus petit saut			
$E1 - E5a - E5b$	0.0216	0.09	0.00
$E1 - E5a - E5a+b$	0.0108	1.88	0.00
$E1 - E5b - E5a+b$	0.0108	2.22	0.00
$E5a - E5b - E5a+b$	0.2295	0.00	0.00

TABLE 6.7 – Performances de la QT Simsky brute dans la détection d'un saut d'un cycle

Pour toutes les combinaisons, un seuil de 0.8X (l'effet du plus petit saut) permettra de détecter, parmi les sauts potentiels identifiés lors de l'étape précédente, ceux correspondant réellement à des sauts de cycles. Cette étape est efficace à 100 %, c'est à dire que non seulement, tous les faux positifs provenant de l'étape précédente seront éliminés, mais en plus, qu'aucun rejet d'un saut réel ne sera effectué.

6.3.3 Performances globales

Si les seuils suivants sont utilisés :

Fréquences	seuil relatif 1 [m]	seuil absolu 1 [m]	seuil absolu 2 [m]
$E1 - E5a - E5b$	2σ	0.4X	0.8X
$E1 - E5a - E5a+b$	2σ	0.4X	0.8X
$E1 - E5b - E5a+b$	2σ	0.4X	0.8X
$E5a - E5b - E5a+b$	2σ	0.4X	0.8X

TABLE 6.8 – Seuils utilisés pour la détection tri-fréquence de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes

A l'issue de cette étape de détection tri-fréquence des sauts isolés et des sauts simultanés de mêmes amplitudes, les performances suivantes sont attendues :

Fréquences	1 cycle		2 cycles	
	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]
$E1 - E5a - E5b$	0.00	0.00	0.00	0.00
$E1 - E5a - E5a+b$	0.39	0.00	0.00	0.00
$E1 - E5b - E5a+b$	0.64	0.00	0.00	0.00
$E5a - E5b - E5a+b$	0.00	0.00	0.00	0.00

TABLE 6.9 – Performances tri-fréquence pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d’amplitudes différentes

Les performances théoriques sont donc excellentes, puisque qu’elles sont efficaces à 100% (pas de faux négatifs ni de faux positifs), à l’exception de la détection de sauts d’un cycle sur les combinaisons $E1-E5a-E5a+b$ et $E1-E5b-E5a+b$, qui présente une très faible proportion de faux négatifs.

6.3.4 Confrontation avec les données réelles

Après avoir déterminé les performances théoriques de cet algorithme tri-fréquence, confrontons-le à des données "réelles" dans lesquelles des sauts de faibles amplitudes ont été insérés manuellement (voir CHAPITRE 3).

Saut isolé d’un cycle

La TABLE 6.10 reprend les résultats de la détection de sauts isolés d’une amplitude d’un cycle à l’aide de la combinaison de Simsky, à laquelle a été appliquée une détection hybride utilisant les seuils préconisés ci-dessus. Nous utiliserons les mêmes fichiers de données réelles (GMSD, DOY 134/14) que ceux utilisés pour illustrer l’équivalent bi-fréquence et renvoyant au CHAPITRE 3 pour de plus amples informations. Rappelons que, dans le cas de la tri-fréquence *Simsky*, un saut d’un cycle n’aura pas la même influence sur la combinaison selon la fréquence sur laquelle il se trouve. Nous avons donc veillé, pour cette analyse de sauts isolés, à utiliser les fichiers pour lesquels les sauts isolés d’un cycle concernent la fréquence influençant le moins la combinaison concernée. Cette fréquence est soulignée ci-dessous.

Fréquences	Sat E11		Sat E12		Sat E19		Autres
	Ep 1604	Ep 2241	Ep 1540	Ep 2074	Ep 75	Ep 701	
<u>$E1 - E5a - E5b$</u>	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0
<u>$E1 - E5a - E5a+b$</u>	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	1
<u>$E1 - E5b - E5a+b$</u>	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0
<u>$E5a - E5b - E5a+b$</u>	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0

TABLE 6.10 – Sauts isolés d’un cycle

Ces résultats sont très encourageants, puisque toutes les époques affectées de sauts sont détectées avec succès. En plus de cela, seul un faux positif est détecté (combinaison $E1-E5a-E5a+b$).

En comparaison avec les attentes théoriques, plusieurs points méritent d'être mis en évidence :

- En termes de faux négatifs, si les performances théoriques prévoient tout de même (moins d'1%) pour les combinaisons $E1-E5a-E5a+b$ et $E1-E5b-E5a+b$, tous les sauts manuellement insérés sont détectés. Cela est donc un avantage conséquent non-négligeable. Cet avantage est dû à une plus faible variabilité locale de la combinaison, par rapport à celle attendue.
- En ce qui concerne les faux positifs, aucun n'était théoriquement censé apparaître. En pratique, un faux positif est pourtant détecté sur la combinaison $E1-E5a-E5a+b$. Quelle est donc la raison de celui-ci, et pourquoi n'est-il présent que sur une des combinaisons ?

* *Présence d'un faux positif sur la combinaison $E1-E5a-E5a+b$*

La FIGURE 6.2 illustre, d'une part, les sauts potentiels détectés à l'issue de la première étape (graphique inférieur, correspondant à la quantité-test différenciée utilisée lors de la première étape de la méthode hybride), et d'autre part les sauts identifiés comme réels au terme du processus de détection (graphique supérieur, correspondant à la quantité-test brute utilisée lors de la seconde étape de la méthode hybride). Le problème présent ici a déjà été rencontré lors de la détection bi-fréquence *Hatch-Wübenma-Melbourne* : il s'agit d'une mauvaise efficacité de la seconde étape, la comparaison de moyennes, due à la présence de sauts potentiels voisins lors de la première étape.

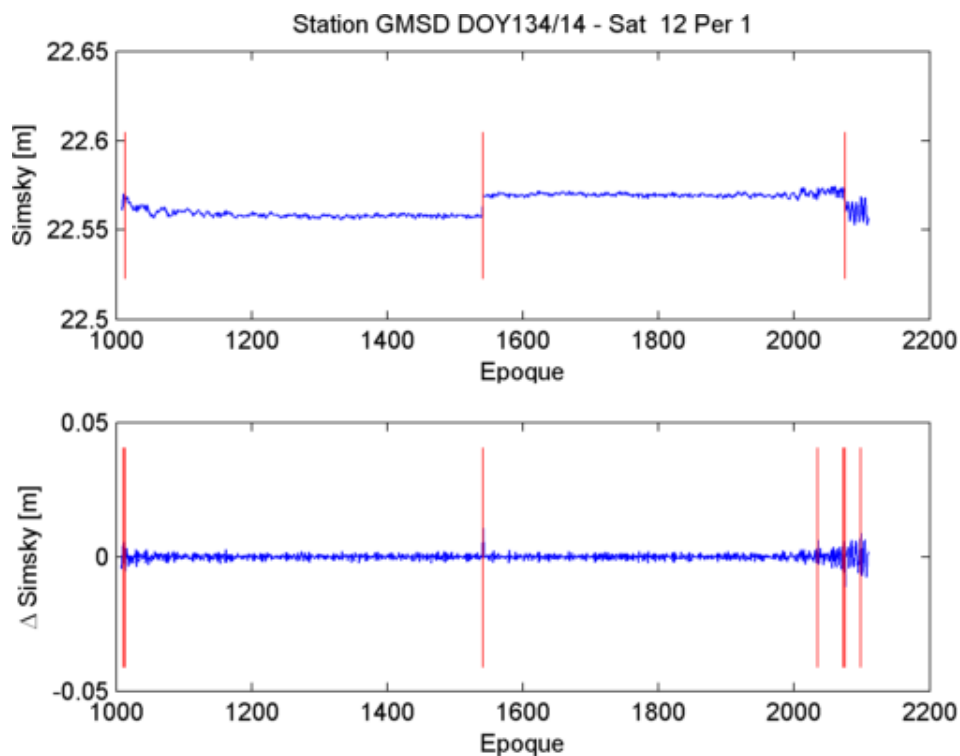


FIGURE 6.2 – Faux positif sur la combinaison de Simsky $E1-E5a-E5a+b$

La même solution que dans le précédent cas pourrait être proposée : l'augmentation des seuils lors de la première étape afin d'éviter la détection d'un trop grand nombre de sauts potentiels non réels. Dans le cas de la combinaison de Simsky, les combinaisons les moins performantes sont, théoriquement, les $E1-E5a-E5a+b$ et $E1-E5b-E5a+b$. Lors de leur première étape, c'est le seuil relatif qui sera prédominant (toujours sur base des précisions théoriques de l'ESA) et c'est donc lui qui est responsable du nombre élevé de faux positifs. Si ce seuil relatif passe de 2σ à 3σ , la proportion de faux positifs passera alors de 4.56 à 0.26 %, ce qui représente une nette amélioration. N'oublions cependant pas que cette pratique augmente la proportion de faux négatifs, qui passerait alors de moins de 1 à plus de 3 %. Enfin, notons que, si la précision est meilleure que celle attendue, la proportion de faux négatifs sera alors moindre et augmenter le seuil relatif ne sera que bénéfique. A nouveau, cette éventuelle augmentation du seuil relatif par rapport à celui recommandé se doit d'être mise en relation avec les exigences de l'utilisateur, en fonction du risque qu'il est prêt à prendre quant à une éventuelle non-détection d'un saut de faible amplitude pour diminuer le taux de fausses détections.

* *Absence de ce faux positif sur la combinaison $E1-E5b-E5a+b$*

Si l'on comprend maintenant la raison de la présence de ce saut, nous ne savons toujours pas pourquoi ce dernier n'est présent sur aucune autre des combinaisons. Pour les combinaisons $E1-E5a-Eb$ et $E5a-E5b-E5a+b$, cela s'explique par la faible proportion de faux positifs lors de la première étape. En effet, c'est, pour ces deux quantités-tests, le seuil absolu qui domine sur le seuil relatif, ce dernier étant faible (en comparaison avec l'effet du plus petit saut) pour cause de faible ratio. Par contre, la combinaison $E1-E5b-E5a+b$ semble présenter des performances semblables pour les deux étapes. Voyons donc tout d'abord quels sont les sauts potentiels détectés dans cette combinaison lors de la première étape. La comparaison entre la FIGURE 6.3 (a) et son équivalent pour la combinaison $E1-E5a-E5a+b$ permet de se rendre compte à quel point, pour des combinaisons présentant théoriquement les mêmes performances, les faux positifs détectés lors de la première étape sont différents. En effet, dans cette seconde combinaison, aucun saut n'est détecté lors de la première étape pour le début de période du satellite 12. D'où vient donc cette différence ?

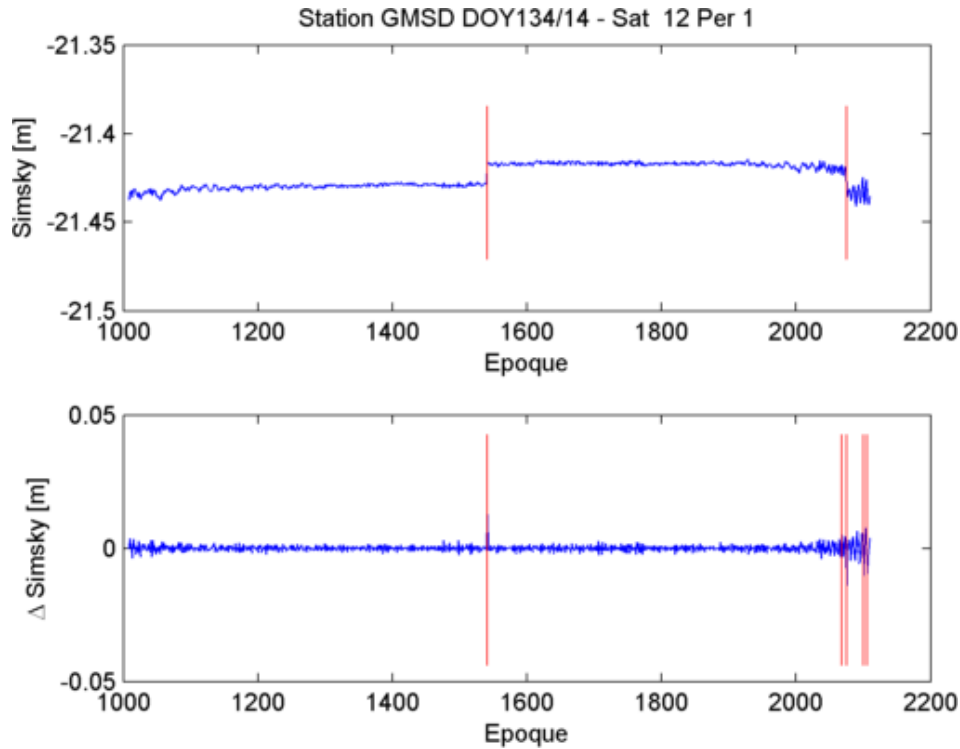


FIGURE 6.3 – Faux positif sur la combinaison de Simsky $E1-E5b-E5a+b$

Une explication liée au choix des seuils peut d’ores et déjà être écartée. En effet, les statistiques lors de la première étape, aussi bien celles du seuil relatif que du seuil absolu, renseignent des performances légèrement meilleures pour la combinaison $E1-E5a-E5a+b$. Les ratios y sont en effet plus élevés. C’est pourtant bien sur cette dernière que se situe le problème.

N’oublions cependant pas que tout notre raisonnement est basé sur un point-clé : la détermination de tous ces seuils et performances sur les valeurs de précision fournies par l’ESA. Si la présence d’un saut peut être expliquée par une augmentation globale de la variabilité de la combinaison de Simsky, par exemple due à des données de moins bonne qualité à la réception, nous avons toujours considéré que l’ordre des précisions des mesures fournies par l’ESA entre les différentes fréquences était respecté dans la réalité : ainsi, peu importe le niveau de précision global, les mesures de phases sur $E5a+b$ seront toujours meilleures que celles sur $E5a$ et $E5b$ (similaires), elles-mêmes meilleures que les mesures de phases sur $E1$. Dans le cas qui nous occupe, une meilleure précision sur les mesures de phases sur $E5b$ que celles sur $E5a$ pour le début de la période d’observation du satellite E12, le jour concerné, pourrait expliquer de manière simple la présence d’un faux positif sur la combinaison $E1-E5a-E5a+b$ et non pas sur $E1-E5b-E5a+b$ ².

Si cette piste correspond très probablement à la réalité, nous avons tout de même décidé de vérifier un autre paramètre : l’éventuelle influence du délai ionosphérique de deuxième ordre (terme d’ordre f^{-3}) dans le calcul de l’effet ionosphérique résultant. Celui-ci, s’il n’était pas négligeable, pourrait peut-être apporter une ex-

2. Notons d’ailleurs que dans les valeurs fournies par l’ESA, une infime différence de précision entre les mesures de phases sur $E5a$ et sur $E5b$ corrobore cette piste.

plication au problème qui nous occupe.

En effet, si la combinaison de Simsky est dite *ionosphere-free*, elle ne corrige néanmoins que des délais ionosphériques de premier ordre (en f^{-2}). Mais qu'en est-il de l'influence ionosphérique résiduelle ? Pour la déterminer, retournons d'un point de vue plus théorique sur la combinaison de Simsky. Celle-ci utilise des mesures de phases sur trois fréquences porteuses. Ces dernières sont multipliées par des facteurs b_1 , b_2 , et b_3 , permettant d'obtenir une combinaison qui soit à la fois *geometry-free* et à la fois *ionosphere-free*³. Cependant, l'appellation *ionosphere-free* ne consiste qu'en l'élimination des délais ionosphériques dits de premier ordre (c'est à dire les termes en f^{-2}). Essayons alors de déterminer si l'agitation ionosphérique peut être telle que les délais d'ordres supérieurs atteignent un ordre de grandeur susceptible d'affecter significativement les mesures, et donc la combinaison⁴.

Les termes ionosphériques de deuxième ordre sont, non seulement fonction du TEC (comme les délais de premier ordre), mais également fonction de facteurs liés au champ magnétique⁵ [Warnant, 1996], et ils sont inversement proportionnels à la fréquence porteuse au cube. Par ailleurs, les termes en f^{-4} sont négligeables par rapport aux termes en f^{-3} .

Toutes considérations liées au champ magnétique⁶ restant égales, quelle serait alors l'influence des délais ionosphériques sur les deux combinaisons qui nous occupent, $E1-E5a-E5a+b$ et $E1-E5b-E5a+b$ si l'on considère les délais de second ordre, en plus de ceux de premier ordre ?

$$I_p^i[m] = b_1 \left(\frac{C_e}{f_1^2} + \frac{C_e C_{mc}}{f_1^3} \right) + b_2 \left(\frac{C_e}{f_2^2} + \frac{C_e C_{mc}}{f_2^3} \right) + b_3 \left(\frac{C_e}{f_3^2} + \frac{C_e C_{mc}}{f_3^3} \right) \quad (6.1)$$

Où

C_e est le terme correspondant à l'influence du *Total Electron Content*
 C_{cm} est le terme correspondant à l'influence du champ magnétique terrestre

Sachant que les termes ionosphériques de premier ordre s'annulent, les termes restants sont ceux du second ordre :

3. La TABLE 4.5 reprenait la valeur de ces facteurs pour les différentes combinaisons de Simsky qu'il est possible de construire à partir des signaux Galileo.

4. Pour rappel, dans sa thèse, le Professeur Warnant a déterminé que les délais ionosphériques de second ordre, en f^{-3} , diffèrent de ceux de premier ordre d'un facteur 100, très approximativement, pour les fréquences L1 et L2 du système GPS [Warnant, 1996].

5. A savoir, la gyrofréquence des électrons dans le champ magnétique ainsi que de l'angle que forme le champ magnétique avec la direction de propagation de l'onde.

6. Notons que ces considérations concernant les facteurs de champ magnétique ne sont valables que si l'on se situe sur une fréquence porteuse supérieure à 100 MHz, ce qui est bien le cas des fréquences GNSS que nous utilisons [Warnant, 1996], et que si la fréquence gyroscopique des électrons est inférieure à 1.7 MHz, ce que nous devons considérer comme vrai dans notre cas.

$$\begin{aligned}
I_p^i[m] &= b_1 \frac{C_e C_{mc}}{f_1^3} + b_2 \frac{C_e C_{mc}}{f_2^3} + b_3 \frac{C_e C_{mc}}{f_3^3} \\
&= C_e C_{mc} \left(\frac{b_1}{f_1^3} + \frac{b_2}{f_2^3} + \frac{b_3}{f_3^3} \right)
\end{aligned} \tag{6.2}$$

Si l'on imagine deux époques de mesures séparées de 30 secondes (échantillonnage de nos données), pour une variation extrême de 10TECU/min (soit 5 TECU/30 secondes, valeur du gradient vertical rencontré lors de l'*Halloween Storm* à Bruxelles en 2003), déterminons quel serait l'effet engendré sur les combinaisons $E1-E5a-E5a+b$ et $E1-E5b-E5a+b$.

A partir des valeurs fournies dans la thèse du Professeur Warnant, il est possible de déterminer la valeur du terme $C_e C_{mc}$ à nos deux époques⁷.

- * Entre le temps t_1 et le temps t_2 , le délai engendré par les délais ionosphériques de second ordre seront de $1.00 * 10^{-5}$ sur la combinaison de Simsky $E1-E5a-E5a+b$.
- * Pour la combinaison $E1-E5a-E5a+b$, ce délai sera de $9.18 * 10^{-6}$.

La différence des termes ionosphériques de second ordre, même dans le cas extrême de l'*Halloween Storm*⁸, ne permettrait pas d'expliquer une telle différence de détection entre les combinaisons.

Dans le cas particulier qui nous occupe, les délais ionosphériques de second ordre ne peuvent donc être une explication plausible à la détection d'un faux positif sur la combinaison $E1-E5a-E5a+b$ et pas sur $E1-E5b-E5a+b$. La première piste abordée, celle de différences de qualité entre les mesures sur E5a et sur E5b, est probablement l'explication de la présence de ce faux positif.

Néanmoins, une autre piste pourrait également être explorée : celle du multi-trajet. En effet, ce dernier diffère pour chacune des fréquences (ainsi que pour chaque observable), et est difficilement éliminé dans les combinaisons d'observables. La combinaison tri-fréquence de Simsky, utilisée ici, a d'ailleurs été développée dans le but de détecter le multi-trajet caractérisant une station fixe [Simsky, 2006].

Il est possible d'appliquer un seuil de 3σ à la place de celui de 2σ (pour les combinaisons $E1-E5a-E5a+b$ et $E1-E5b-E5a+b$), afin de limiter ce genre de problème de faux positifs. Cela augmente cependant légèrement le taux de faux négatifs. En pratique, si la variabilité est plus faible qu'attendu, cela ne posera pas de problème majeur. Cette

7. Les valeurs fournies maximisent l'effet du champ magnétique.

8. Même si ce cas reste à relativiser puisque nous avons considéré le gradient vertical, qui reste le plus faible. Pour un satellite qui n'est pas au zénith, il conviendrait d'appliquer un facteur d'obliquité. Plus le satellite sera bas, plus il traversera une large épaisseur d'ionosphère, et donc plus il en sera affecté. En plus d'être associée à une mesure verticale, cette variation a été observée en Belgique, donc dans une zone de latitude moyenne. A plus basses latitudes, les gradients observés furent sans doute bien pires. Cependant, cet effet, même multiplié par un facteur d'obliquité (dont la valeur maximale est de quelques unités) n'aurait toujours que très peu d'effet sur la combinaison.

pratique présente cependant théoriquement un risque de non détection sur les deux combinaisons concernées pour les sauts d'un cycle.

Sauts simultanés d'amplitudes différentes

La TABLE 6.11 reprend les résultats de la détection de sauts simultanés d'amplitudes différentes à l'aide de la combinaison de Simsky, à laquelle a été appliquée une détection hybride utilisant les seuils préconisés ci-dessus. Nous utiliserons les mêmes fichiers de données réelles (GMSD, DOY 134/14) que ceux utilisés pour illustrer l'équivalent bi-fréquence et renvoyant au CHAPITRE 3 pour de plus amples informations. Rappelons que, dans le cas de la tri-fréquence *Simsky*, un saut d'un cycle n'aura pas la même influence sur la combinaison selon la fréquence sur laquelle il se trouve.

Fréquences	Sat E11		Sat E12		Sat E19		Autres
	Ep 1604	Ep 2241	Ep 1540	Ep 2074	Ep 75	Ep 701	
<u>E1</u> - E5a - E5b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0
<u>E1</u> - E5a - E5a+b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	1
<u>E1</u> - E5b - E5a+b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0
<u>E5a</u> - E5b - E5a+b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0

TABLE 6.11 – Sauts simultanés d'amplitudes différentes

Ici aussi, toutes les époques présentant des sauts ont été détectées. Le même faux positif que lors de l'analyse des sauts isolés est présent sur la combinaison $E1-E5a-E5a+b$. Cela est tout à fait normal puisque les mêmes données brutes sont utilisées. Si nous avons pu déterminer que celui-ci était bien un faux positif et non un réel saut, c'est par la comparaison de résultats de différentes combinaisons de *Simsky* et par vérification visuelle sur les représentations graphiques de ces combinaisons.

6.3.5 Discussion

A l'heure actuelle, en post-traitement, il est donc possible de garantir la détection de petits sauts en ionosphère active grâce à une détection tri-fréquence, si l'on est prêt à émettre quelques réserves :

- Une très faible proportion de sauts d'un seul cycle sur E1 pourrait ne pas être détectée dans les combinaisons suivantes : $E1-E5a-E5a+b$ et $E1-E5b-E5a+b$.
- En cas de très forte variation ionosphérique, la variabilité de la combinaison pourrait augmenter à un point tel que certains sauts de faibles amplitudes pourraient être indétectables. Ce cas n'a cependant pas été rencontré, ni dans notre analyse de différents jours à GMSD, ni même dans l'échantillon de 50 jours d'observations à la station équatoriale NKLK utilisé pour la validation.

En comparaison avec la détection bi-fréquence, les résultats sont ici meilleurs sous deux aspects. Premièrement, et c'est là le plus important, les performances pour la détection

de sauts de faibles amplitudes est ici de presque 100 % (voir totale, dans certains cas). Cela est loin d'être le cas en bi-fréquence. Deuxièmement, il n'est ici pas nécessaire de faire intervenir l'utilisateur dans le choix des seuils, selon ses priorités puisque tous les cas de sauts isolés ou d'amplitudes différentes seront détectés.

Si cette méthode hybride, dans son application à la combinaison tri-fréquence de Simsky, devait être adaptée en temps réel, les différences (théoriques) seraient les suivantes :

- La seconde étape, la confirmation par comparaison de moyennes, ne pourrait être mise en place.
 - Pour la combinaison E1-E5a-E5b, l'utilisation d'un unique seuil, relatif, de 3σ , permettrait de n'avoir que 0.26 % de faux positifs (et aucun faux négatif).
 - Pour la combinaison E5a-E5b-E5a+b, le seuil absolu de $0.4X$ permet, dès la première étape, de n'avoir ni faux positifs ni faux négatifs.
 - Enfin, pour les combinaisons E1-E5a-E5a+b et E1-E5b-E5a+b, si l'on veut limiter la proportion de faux négatifs, le seuil de 2σ doit être conservé et 5 % des époques seront alors répertoriées comme sujettes à un saut de cycle. Un seuil absolu peut néanmoins être conservé afin de limiter les faux positifs dans le cas où la variabilité de la combinaison serait inférieure à la variabilité théorique.
- Les premières époques (20 premières dans le cadre de ce travail, puisque la taille de la fenêtre est de 20) ne pourront être analysées (ou seront purement et simplement éliminées). On devra également supposer que ces dernières ne sont pas affectées de sauts de cycles. Puisque seule la différence temporelle sera dans ce cas utilisée, l'influence d'un saut dans les premières époques impactera uniquement le calcul de l'écart-type (la moyenne étant considérée comme nulle). N'étant pas détecté, si le saut est d'amplitude importante, il pourrait causer une augmentation notable du seuil statistique et causer la non détection de petits sauts pour les époques pour lesquelles il fait partie de la fenêtre d'analyse.

Afin d'améliorer les performances de cette détection tri-fréquence des sauts isolés ou simultanés d'amplitudes différentes, il serait également possible d'utiliser des combinaisons bi-fréquences. L'amélioration qui devrait être mise en place concerne la détection des sauts sur E1 dans les combinaisons $E1-E5a-E5a+b$ et $E1-E5b-E5a+b$, qui n'est pas à 100% efficace pour des sauts d'un cycle.

La combinaison bi-fréquence la plus adaptée pour la détection de sauts isolés en ionosphère active, comme abordé dans le chapitre précédent, est la combinaison *Hatch-Wübenna-Melbourne*. Cependant, dans cette dernière, les combinaisons avec E1 sont très peu efficaces pour des sauts d'un cycle. Elle ne pourra donc pas nous être utile ici.

Une autre solution serait d'utiliser la combinaison *Geometry-Free* afin de détecter les petits sauts isolés sur E1. Si cela peut fonctionner en ionosphère calme, ce ne sera pas le cas en ionosphère active puisque la combinaison *Geometry-Free*, même différenciée au 4e ordre, est sensible aux variations rapides de l'ionosphère.

6.4 Passage 2 : GF : Sauts simultanés de mêmes amplitudes

6.4.1 Choix de la méthode d'analyse et des seuils

En ce qui concerne la détection des sauts simultanés lorsque trois fréquences sont disponibles, la combinaison bi-fréquence *Geometry-Free* continuera à être utilisée. En effet, que ce soit en bi-, en tri-, ou en quadri-fréquence, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de méthode permettant de détecter les sauts simultanés qui ne soit affectée par l'ionosphère.

La combinaison *Geometry-Free* étant bi-fréquence, il est possible d'en construire trois exemplaires lors d'une détection tri-fréquence (voir TABLE 6.12). Notons que, puisqu'ici le but est de détecter les sauts simultanés, une seule combinaison parmi les trois suffirait pour mettre ces sauts en évidence.

Fréquences	GF 1	GF	GF 3
$E1 - E5a - E5b$	E1 - E5a	E1 - E5b	E5a - E5b
$E1 - E5a - E5a+b$	E1 - E5a	E1 - E5a+b	E5a - E5a+b
$E1 - E5b - E5a+b$	E1 - E5b	E1 - E5a+b	E5b - E5a+b
$E5a - E5b - E5a+b$	E5a - E5b	E5a - E5a+b	E5b - E5a+b

TABLE 6.12 – Combinaisons GF possibles en détection tri-fréquence

Sur les quatre combinaisons tri-fréquences qu'il est possible de construire à partir des signaux Galileo, seule une d'entre elle n'utilise pas les signaux E1. Comme nous l'avons vu lors de la détection bi-fréquence, les combinaisons avec E1 seront les plus efficaces, même si, en cas d'ionosphère active, elles seront incapables de détecter des sauts simultanés de faibles amplitudes. Dès lors, mis à part pour la combinaison $E5a-E5b-E5a+b$, les sauts de cycles simultanés pourront être détectés en l'absence de cas extrêmes.

Combinaisons tri-fréquences avec E1

D'un point de vue pratique, nous utiliserons donc, pour les combinaisons tri-fréquences contenant E1, uniquement les deux combinaisons bi-fréquences *Geometry-Free* avec E1 afin de déterminer une éventuelle présence de sauts de cycles simultanés. Le recoupement entre ces deux combinaisons permettra, dans la plupart des cas, d'obtenir de meilleures performances. Deux approches peuvent être mises en œuvre :

- Un saut est considéré comme vrai s'il est détecté par les deux combinaisons (opération "*ET*" - *intersection*).

Ce cas permettra de limiter le nombre de faux positifs, puisque ceux-ci ne sont pas toujours présents dans les deux combinaisons mais bien spécifiques à l'une d'entre elles. Par contre, les moins bonnes performances l'emporteront concernant l'ampli-

tude à partir de laquelle les sauts simultanés pourront être détectés.

- Un saut est détecté comme vrai à partir du moment où il est présent sur une combinaison (opération "*OU*" - *union*).

Ce cas permet de tirer parti des meilleures performances concernant l'amplitude à partir de laquelle les sauts simultanés seront détectés. Par contre, elle est beaucoup moins performante du point de vue des faux négatifs, puisque toutes les époques concernées par ces derniers (dans les deux combinaisons), seront détectées comme présentant des sauts.

Notons que, comme les statistiques et les tests sur données réelles modifiées l'ont montré, les combinaisons avec E1 détectent, presque à chaque fois, les sauts simultanés d'amplitude d'un cycle. De plus, leur proportion de faux négatifs est très faible.

Cependant, si l'utilisateur le désire, il peut ne tenir compte que d'une seule des deux combinaisons GF avec E1. Cela pourrait être avantageux si la combinaison E1-E5b est une de ces possibilités, puisque, des trois combinaisons avec E1, c'est cette dernière qui est la moins performante (comme illustré au CHAPITRE 5, lors de l'analyse des performances sur données réelles).

Combinaison tri-fréquence sans E1

Pour la combinaison tri-fréquence où E1 n'est pas présente, nous serons contraints d'utiliser une (ou plusieurs) combinaison(s) GF bi-fréquence(s) à l'efficacité plus limitée. A nouveau, selon les besoins de l'utilisateur, il conviendra de s'orienter plutôt sur les seuils du cas 1 (un seul seuil, statistique, de 4σ), s'il est peu tolérant par rapport aux faux positifs et que détecter les plus petits sauts possibles n'est pas la priorité, ou sur ceux du cas 2 (un seuil statistique de 2σ utilisé avec un seuil absolu de $2X$ l'influence du plus petit saut simultané), si la détection de petits sauts est prioritaire. En plus du choix du cas de configuration des sauts, il convient également de décider quelles seront les combinaisons bi-fréquences GF utilisées (une, deux, ou trois, parmi les trois disponibles), ainsi que la relation entre ces combinaisons ("*ET*" ou "*OU*").

Dans le cadre de ce travail, nous développerons les résultats pour les deux cas de configurations des seuils, lorsque les trois combinaisons seront utilisées. Pour chacun des cas, les deux relations, "*ET*" et "*OU*", seront discutées.

- Si l'on voulait privilégier un nombre de faux positifs peu élevé, nous choisirions d'utiliser le premier cas de configuration des sauts. Celui-ci, associé à une relation de type "*ET*", serait extrêmement restrictif, puisque les sauts devraient être détectés sur les trois combinaisons pour être considérés comme vrais. Ajoutant à cela le seuil de 4σ , on comprend aisément que les sauts de petites amplitudes ne pourront être détectés. Par contre, les performances seraient excellentes en termes de faux positifs.
- Dans le cas opposé, si l'on voulait éviter à tout prix la non détection de petits sauts,

il serait alors plus intéressant de se pencher sur la seconde configuration de sauts, associée à une relation de type "OU". Le nombre de faux positifs serait par contre dans ce cas assez important.

- Un cas intermédiaire serait d'utiliser la première configuration associée à un "OU", ce qui permettrait de détecter des sauts de faibles amplitudes, puisqu'à partir du moment où il sera détecté sur une des combinaisons, il sera considéré comme vrai. Cela présente certes le désavantage d'additionner les différentes époques de faux positifs, mais ces dernières sont à la base peu nombreuses.
- Enfin, un second cas intermédiaire pourrait être construit : celui de la deuxième configuration de sauts, associée à une relation "ET".

D'autres cas auraient également pu être envisagés, en ne choisissant d'utiliser qu'une ou deux des trois combinaisons GF disponibles, ou encore en mélangeant les deux types de relations au sein d'une même analyse : utiliser un "ET" (resp. "OU") entre deux combinaisons et utiliser un "OU" (resp. "ET") entre ce résultat et la troisième combinaison. Ces autres pistes pourraient être exploitées dans le cadre d'une future étude.

Méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail

La TABLE 6.13 résume les différentes combinaisons qui seront utilisées ainsi que les seuils qui y seront associés⁹.

Fréquences	Combinaison(s) GF utilisée(s)	Seuil relatif	Seuil absolu
$E1 - E5a - E5b$	$E1-E5a$	4σ	<i>aucun</i>
$E1 - E5a - E5a+b$	$E1-E5a$ $E1-E5a+b$	4σ 4σ	<i>aucun</i> <i>aucun</i>
$E1 - E5b - E5a+b$	$E1-E5a+b$ $E1-E5a+b$	4σ 4σ	<i>aucun</i> <i>aucun</i>
$E5a - E5b - E5a+b$ (cas 1)	$E5a-E5a+b$ $E5b-E5a+b$	4σ 4σ	<i>aucun</i> <i>aucun</i>
$E5a - E5b - E5a+b$ (cas 2)	$E5a-E5b$ $E5a-E5a+b$ $E5b-E5a+b$	2σ 2σ 2σ	2x 2x 2x

TABLE 6.13 – Choix des combinaisons GF utilisées en détection tri-fréquence

6.4.2 Performances globales

La TABLE 6.14 reprend les performances théoriques, en fonction de l'utilisation des combinaisons et des seuils définis ci-dessus.

9. Les seuils seront ceux utilisés dans le cas bi-fréquence.

Fréquences	1 cycle		2 cycles		3 cycles	
	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]
$E1 - E5a - E5b$	0	0	0	0	0	0
$E1 - E5a - E5a+b$ - "ET"	0	0	0	0	0	0
$E1 - E5a - E5a+b$ - "OU"	0	0	0	0	0	0
$E1 - E5b - E5a+b$	0	0	0	0	0	0
$E5a - E5b - E5a+b$ - cas 1 "ET"	99.62	0	90.82	0	50.00	0
$E5a - E5b - E5a+b$ - cas 1 "OU"	96.86	0	38.59	0	0.75	0
$E5a - E5b - E5a+b$ - cas 2 "ET"	98.38	0	50.00	0	9.18	0
$E5a - E5b - E5a+b$ - cas 2 "OU"	90.82	0.76	50.00	0.76	1.62	0.76

	4 cycles		5 cycles		6 cycles	
	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]
$E1 - E5a - E5b$	0	0	0	0	0	0
$E1 - E5a - E5a+b$ - "ET"	0	0	0	0	0	0
$E1 - E5a - E5a+b$ - "OU"	0	0	0	0	0	0
$E1 - E5b - E5a+b$	0	0	0	0	0	0
$E5a - E5b - E5a+b$ - cas 1 "ET"	9.18	0	0.38	0	0	0
$E5a - E5b - E5a+b$ - cas 1 "OU"	0	0	0	0	0	0
$E5a - E5b - E5a+b$ - cas 2 "ET"	0.38	0	0	0	0	0
$E5a - E5b - E5a+b$ - cas 2 "OU"	0	0.76	0	0.76	0	0.76

TABLE 6.14 – Performances tri-fréquences pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes

Notons que, lorsque plusieurs combinaisons GF sont utilisées, nous avons considéré les choses de la manière suivante :

- Lorsque la relation "OU"-*Union* est utilisée, la proportion de faux négatifs sera considérée comme celle de la combinaison en présentant la plus faible. Cependant, dans la pratique, les combinaisons n'identifieront pas nécessairement toujours les mêmes sauts, et cette proportion pourrait alors être plus faible, ce qui est avantageux. Concernant la proportion de faux positifs, elle sera considérée comme celle de la combinaison en présentant la plus forte. Hélas, dans la pratique, les combinaisons n'identifieront pas nécessairement toujours les mêmes époques comme faux positifs, augmentant alors la proportion réelle de faux positifs.
- Lorsque la relation "ET"-*Intersection* est utilisée, la proportion de faux négatifs sera considérée comme celle de la combinaison en présentant la plus forte. La remarque formulée pour le cas d'union est également valable ici : en réalité, les combinaisons n'identifieront pas nécessairement toujours les mêmes sauts. Dans ce cas, la proportion de faux négatifs sera plus élevée que celle attendue. Ce qui était un avantage dans la relation "OU" devient dans la relation "ET" un inconvénient. Concernant la proportion de faux positifs, elle sera considérée comme celle de la combinaison en présentant la plus faible. Cependant, ici aussi, la remarque formulée pour l'union est d'application : les combinaisons n'identifiant pas nécessairement les mêmes faux positifs, la proportion finale en sera diminuée, dans le cas d'une relation d'intersec-

tion.

Les résultats des tests en données réelles, fournis à la section suivante, permettront de se faire une meilleure idée de ce qu'il en est en réalité.

Tout en gardant en tête les réserves émises quant aux différences entre les proportions réelles et théoriques, les points suivants méritent tout de même d'être soulevés, dans le cadre d'une analyse purement théorique :

- Pour trois des combinaisons sur quatre (celles avec E1), aucun faux positif ni négatif n'est, théoriquement, censé entacher les performances. En pratique, nous avons vu précédemment que l'activité ionosphérique était tout de même en mesure de dégrader celles-ci.
- Pour la combinaison $E5a-E5b-E5a+b$, les meilleures performances seront obtenues, dans le cas 1, avec l'utilisation de la relation d'union. Concernant le second cas de cette combinaison, la relation d'intersection sera la meilleure en termes de faux positifs et celle d'union sera la plus performante du point de vue des faux négatifs.

6.4.3 Confrontation avec les données réelles

Lorsque l'on confronte ces méthodes de détections avec des données réelles, les performances suivantes sont atteintes :

Fréquences	Sat E11		Sat E12		Sat E19		Autres
	Ep 1604	Ep 2241	Ep 1540	Ep 2074	Ep 75	Ep 701	
$E1 - E5a - E5b$	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	1
$E1 - E5a - E5a+b$ (<i>ET</i>)	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	1
$E1 - E5a - E5a+b$ (<i>OU</i>)	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	1
$E1 - E5b - E5a+b$	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	Oui : 1-5	1
$E5a - E5b - E5a+b$ (<i>cas 1 - ET</i>)	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 3-5 Non : 1-2	Oui : 4-5 Non : 1-3	Oui : / Non : 1-5	Oui : / Non : 1-5	Oui : 5 Non : 1-4	0
$E5a - E5b - E5a+b$ (<i>cas 1 - OU</i>)	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 4-5 Non : 1-3	Oui : / Non : 1-5	Oui : 3-5 Non : 1-2	11
$E5a - E5b - E5a+b$ (<i>cas 2 - ET</i>)	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 3-5 Non : 1-2	Oui : 3-5 Non : 1-2	Oui : / Non : 1-5	Oui : / Non : 1-5	Oui : 2-5 Non : 1	1
$E5a - E5b - E5a+b$ (<i>cas 2 - OU</i>)	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 2-5 Non : 1	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 2-5 Non : 1	28

TABLE 6.15 – Sauts simultanés de mêmes amplitudes (de 1 à 5 cycles)

Combinaisons avec E1

Pour les combinaisons $E1 - E5a - E5b$ et $E1 - E5b - E5a+b$, seule une des trois combinaisons est utilisée, puisqu'il était préférable d'éviter, d'une part la combinaison GF sans E1, présentant de mauvaises performances, et d'autre part la combinaison GF $E1 - E5b$, également moins performante que les combinaisons $E1-E5a$ et $E1-E5a+b$. Pour ces deux combinaisons tri-fréquences, les performances seront alors celles caractérisant la seule combinaison GF qu'elles utilisent (voir CHAPITRE 5). Dans les deux cas, tous les sauts sont détectés à partir d'une amplitude simultanée d'un cycle, ce qui est remarquable. De plus, un seul faux négatif sera détecté. Les raisons de ce dernier ont été discutées lors du chapitre précédent, nous ne reviendrons donc pas sur la question ici.

Pour la combinaison $E1 - E5a - E5a+b$, qui pour rappel utilise les combinaisons GF $E1-E5a$ et $E1-E5a+b$, les performances sont dans ce cas particulier les mêmes, peu importe la relation utilisée. Tous les sauts sont détectés à partir d'une amplitude simultanée d'un cycle, ce qui est remarquable. Le même faux négatif sera détecté sur les deux combinaisons (d'où la non différence de performances entre elles).

Combinaison sans E1

Pour la combinaison sans E1, par contre, des différences peuvent être observées, selon la relation choisie entre les différentes combinaisons, ainsi que selon la configuration de seuil utilisée.

Tout d'abord, cet exemple illustre parfaitement le point mis en évidence précédemment : les faux positifs détectés ne sont pas les mêmes selon la combinaison GF concernée (sauf quelques rares cas communs). Sont en cause les variabilités différentes des combinaisons dans le temps¹⁰. Cela accentue donc les prédictions en termes de faux positifs :

- Lors de l'utilisation de la relation d'intersection, peu de faux positifs seront donc présents, puisque ceux-ci doivent être communs aux trois combinaisons GF. Pour le cas 1, aucun faux positif ne résulte de l'intersection des trois combinaisons. Pour le cas 2, nous en dénombrons un. Cette limitation des fausses détections justifie tout à fait l'utilisation des trois combinaisons.
- Lors de l'utilisation de la relation d'union, le nombre de faux positifs croît donc, par contre, bien plus que prévu. Ici, nous avons détecté 11 faux positifs en utilisant le premier cas de configuration de sauts, et 28 faux positifs en utilisant le second. Si l'utilisateur souhaite particulièrement éviter ces derniers, il est vivement conseillé d'éviter la relation d'union.

Concernant les faux négatifs, et donc par extension les amplitudes à partir desquelles les sauts sont détectés, l'effet prédit est lui aussi d'actualité, si l'on compare les résultats obtenus ici à ceux du chapitre précédent.

- Lors de l'utilisation de la relation d'union, les performances des trois combinaisons sont rassemblées et permettent d'optimiser la détection des sauts simultanés de mêmes amplitudes. Si l'on prend l'exemple du second cas, la combinaison E5a-E5a+b permet de détecter les sauts simultanés d'un cycle sur le satellite E12, époque 2074, alors que les combinaisons E5a-E5b ou E5b-E5a+b permettent de détecter les sauts simultanés d'amplitude de deux cycles sur le satellite E12, époque 1540.
- Lors de l'utilisation de la relation d'intersection, par contre, la différence dans l'amplitude des sauts détectés entre les différentes combinaisons et selon les cas est désavantageuse. En effet, il est alors nécessaire que l'époque contenant les sauts simultanés soit détectée dans les trois combinaisons pour être déterminée comme réellement porteuse de sauts. Cela a pour conséquence une proportion bien plus élevée de faux négatifs pour de faibles amplitudes.

6.4.4 Discussion

A l'heure actuelle, il n'est pas toujours possible de garantir la détection de petits sauts simultanés de mêmes amplitudes lorsque trois fréquences sont disponibles. Si, en

¹⁰. Une partie de la variabilité est due aux effets ionosphériques. Le multi-trajet peut aussi en être une cause.

ionosphère calme, les performances de détection à l'aide des combinaisons avec E1, qui constituent tout de même les trois-quarts des possibilités de combinaisons, sont de 100 %, même pour les plus petits sauts, ces dernières peuvent être fortement dégradées par une forte activité ionosphérique (comme lors de l'*Halloween Storm* ou à l'équateur, mais cela reste des cas assez extrêmes). Quant à la combinaison sans E1, elle est dès le départ moins performante, et sera également dégradée par une forte activité ionosphérique.

Si cette détection devait être adaptée en temps réel, cela ne poserait pas de problème majeur : à la place de parcourir les données dans les deux sens, la fenêtre statistique ne passerait que dans le sens traditionnel. Le principal désavantage occasionné serait la non-analyse des premières époques d'observations.

En tri-fréquence, les combinaisons de *Simksy* sont suffisamment performantes pour détecter les sauts de faibles amplitudes, qu'ils soient isolés ou simultanés d'amplitudes différentes. Les combinaisons *Geometry-Free* ne serviront donc qu'à mettre en évidence les sauts simultanés de mêmes amplitudes, indétectables sur les combinaisons de *Simsky*.

6.5 Conclusion

Lorsque trois fréquences sont disponibles, il a été possible de remplacer la combinaison *Hatch-Wübenna-Melbourne* rencontrée précédemment par la combinaison de *Simsky*. Cette dernière présente globalement de meilleures performances, aussi bien théoriques que pratiques :

- Concernant les faux négatifs : La combinaison de *Simsky* permet de détecter les sauts, même d'un cycle, sur toutes les combinaisons. Néanmoins, il reste théoriquement un faible risque de non-détection des sauts d'un cycle sur E1 dans les combinaisons E1-E5a-E5a+b et E1-E5b-E5a+b (respectivement 0.39 et 0.64 %). A partir d'une amplitude de deux cycles, toutes les combinaisons peuvent garantir à 100 % la détection de sauts.

Au contraire, les combinaisons de *Hatch-Wübenna-Melbourne*, si elles permettent dans l'exemple pratique de détecter des sauts sans problèmes, elles ne le permettent pas théoriquement pour les combinaisons avec E1. Il convient donc de rester méfiants puisqu'il faut théoriquement atteindre une amplitude de trois cycles pour détecter 100 % des sauts dans ces dernières.

Même si, en pratique, les ratios peuvent varier entre théorie et pratique, ce qui explique que certaines performances soient meilleures qu'attendues aussi bien en bi-qu'en tri-fréquence, il n'en reste pas moins que, pour de mêmes données, les performances de la détection tri-fréquence sur la combinaison *Simksy* seront supérieures à la détection bi-fréquence sur les combinaisons *Hatch-Wübenna-Melbourne*.

- Concernant les faux positifs : On remarque également une amélioration par l'utilisation des combinaisons de *Simsky*, aussi bien théoriquement qu'en pratique. A nouveau, les meilleures ratios de la combinaisons de *Simsky* par rapport à ceux des

combinaisons HWM avec E1 permettent de l'expliquer.

En ce qui concerne la comparaison des performances réelles des combinaisons de Simsky avec leurs performances théoriques, la même remarque que celle formulée pour l'équivalent bi-fréquence est d'actualité : on observe une dégradation de l'efficacité de la seconde étape de la détection hybride, lorsque trop de sauts potentiels sont détectés lors de la première étape. A nouveau, une augmentation de seuil pourrait remédier en grande partie à ce problème.

Lorsque trois fréquences sont disponibles, les combinaisons *Geometry-Free* bi-fréquences différenciées au quatrième ordre seront à nouveau utilisées afin de déterminer la présence de sauts simultanés. L'avantage, par rapport à l'équivalent bi-fréquence, est que l'on possède trois de ces combinaisons à la place d'une. Dès lors, il est possible de, soit les combiner entre elles (deux ou trois, par des relations "*ET*" ou "*OU*"), soit de ne sélectionner que la plus performante des trois. Trois des quatre combinaisons de Simsky comprenant la fréquence E1 (les combinaisons GF les plus performantes sont, pour rappel, celles utilisant la fréquence E1), il sera possible d'obtenir d'excellentes performances théoriques et pratiques pour trois des combinaisons sur quatre. Cependant, la combinaison *Geometry-Free* étant sensible à l'ionosphère, ses performances en sont rapidement dégradées.

Chapitre 7

Détection quadri-fréquence

7.1 Introduction

Après avoir observé les performances de l'algorithme tri-fréquence, qui, si elles sont nettement meilleures que les bi-fréquences, restent tout de même limitées sous certains aspects, voyons alors ce qu'une quatrième fréquence disponible pourrait apporter comme améliorations.

7.2 Choix des quantités-tests

Lorsque quatre fréquences porteuses sont disponibles, il est possible de construire :

- quatre combinaisons mono-fréquences
- six combinaisons bi-fréquences
- quatre combinaisons tri-fréquences

Il n'existe pas encore, à l'heure actuelle, de combinaison quadri-fréquence possédant les qualités nécessaires pour répondre aux exigences des méthodes de détection des sauts de cycles.

Nous utiliserons donc les combinaisons préalablement utilisées lors des détections bi- et tri-fréquences.

A nouveau, nous distinguerons deux cas : celui de la détection des sauts isolés ou des sauts simultanés d'amplitudes différentes, et celui de la détection de sauts simultanés de mêmes amplitudes. Dans le premier cas, les combinaisons tri-fréquences de *Simsky* seront utilisées, ces dernières ayant montré leur efficacité supérieure à celles de *Hatch-Wübenna-Mebourne* dans le chapitre précédent. Dans le cas concernant les sauts simultanés de mêmes amplitudes, une détection à l'aide de plusieurs combinaisons bi-fréquences *Geometry-Free* est effectuée, comme ce fut déjà le cas pour la détection tri-fréquence.

7.3 Passage 1 : Simsky : Sauts isolés et sauts simultanés d'amplitudes différentes

7.3.1 Choix de la méthode et des seuils

La même méthode d'analyse ainsi que les mêmes seuils que pour la détection tri-fréquence seront utilisés ici. Pour rappel, en voici les caractéristiques-clés :

- Méthode hybride en deux étapes : détection grossière et confirmation du saut
- Lors de la détection grossière, deux seuils sont définis
 - Seuil relatif (ou statistique) de 2σ
 - Seuil absolu de 0.4 fois l'influence du plus petit saut (fréquence la moins représentée) sur la combinaison
- Lors de la confirmation du saut, la comparaison des moyennes avant et après le saut potentiel, un seul seuil est défini : un seuil absolu de 0.8X

Pour rappel, en utilisant la méthodologie et les seuils rappelés ci-dessus, les performances théoriques de la combinaison de Simsky pour les différentes combinaisons tri-fréquences qu'il est possible de construire à partir des signaux Galileo sont les suivantes :

Fréquences	1 cycle		2 cycles	
	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]
$E1 - E5a - E5b$	0.00	0.00	0.00	0.00
$E1 - E5a - E5a+b$	0.39	0.00	0.00	0.00
$E1 - E5b - E5a+b$	0.64	0.00	0.00	0.00
$E5a - E5b - E5a+b$	0.00	0.00	0.00	0.00

TABLE 7.1 – Performances tri-fréquences pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes

Les combinaisons $E1-E5a-E5a+b$ et $E1-E5b-E5a+b$ présentent des performances théoriques légèrement inférieures aux deux autres. Si les tests sur données réelles effectués au CHAPITRE 6 ne permettent pas de mettre en évidence la non-détection de sauts d'un cycle¹, la détection d'un faux positif sur une de celles-ci témoigne tout de même d'un plus faible ratio. Selon les statistiques, les combinaisons $E1-E5a-E5a+b$ et $E1-Eb-E5a+b$ sont celles présentant les plus faibles ratios, pour un saut sur la fréquence de plus petite influence sur la combinaison (respectivement 6.7 et 6.3). Elle sont suivies par la combinaison $E1-E5a-E5b$ (ratio de 10) puis par la $E5a-E5b-E5a+b$ (ratio de 91).

N'oublions cependant pas que ces ratios ne sont fournis qu'à titre indicatif et dépendent de la validité des précisions utilisées pour les calculer. A travers les tests effectués dans les chapitres précédents et de nombreux tests non répertoriés dans ce manuscrit, nous avons effectivement pu observer des différences : les précisions des combinaisons (provenant directement de celles des observables) étaient ainsi meilleures que les valeurs globales

1. Notons que les proportions de faux négatifs étant extrêmement faibles, ils n'est pas étonnant qu'elles ne soient pas mises en évidence sur un faible échantillon de tests.

fournies par l'ESA en ionosphère calme et/ou à haute élévation, mais moins bonnes en début ou fin de période, lorsque le satellite est à basse élévation, et cela d'autant plus si l'ionosphère est active. Si, globalement, les rapports entre les précisions de ces combinaisons semblaient respectés, un des exemples de l'utilisation de la combinaison de Simsky a néanmoins émis la possibilité que cela ne soit pas toujours le cas².

Afin d'optimiser notre détection des sauts isolés ou simultanés d'amplitudes différentes, nous utiliserons donc uniquement les $E1-E5a-E5b$ et $E5a-E5b-E5a+b$, puisque celles-ci sont les plus performantes, aussi bien en théorie qu'en pratique.

Les seuils de cette détection quadri-fréquence seront les mêmes que ceux utilisés pour ces combinaisons de Simsky lors des chapitres précédents. La TABLE 7.2 reprend les combinaisons utilisées et les seuils qui y sont associées.

Fréquences	seuil relatif 1 [m]	seuil absolu 1 [m]	seuil absolu 2 [m]
$E1 - E5a - E5b$	2σ	0.4x	0.8x
$E5a - E5b - E5a+b$	2σ	0.4x	0.8x

TABLE 7.2 – Combinaisons et seuils utilisés dans la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes dans la méthode de détection quadri-fréquence

Les résultats de ces deux combinaisons sont nécessairement liés par une relation "OU", puisque les sauts sur $E5b$ et sur $E5a+b$ ne sont chacun compris que dans une seule combinaison.

7.3.2 Performances globales

Les performances théoriques auxquelles on peut s'attendre en utilisant les deux combinaisons et les seuils qui y sont associés (repris ci-dessus) sont les suivantes :

Fréquences	1 cycle	
	FN [%]	FP [%]
$E1 - E5a - E5b - E5a+b$	0.00	0.00

TABLE 7.3 – Performances quadri-fréquences théoriques pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes

Pour la première fois, les performances théoriques sont totalement de 100 % : si l'on dispose de quatre fréquences, un saut sur n'importe laquelle de ces fréquences, à l'exception de sauts simultanés de mêmes amplitudes sur ces quatre fréquences, sera efficacement détecté. Si ces performances théoriques semblent idéales, voyons ce qu'il en est d'un point de vue plus pratique.

². Dans cet exemple particulier, les mesures sur $E5b$ semblaient légèrement de meilleure qualité. Nous renvoyons à la SECTION 6.3.4 pour plus d'informations à ce sujet.

7.3.3 Confrontation avec les données réelles

Nous utiliserons les mêmes données réelles, modifiées manuellement, que dans les deux chapitres précédents.

Saut isolé d'un cycle

La TABLE 7.4 reprend les résultats de la détection de sauts isolés d'une amplitude d'un cycle à l'aide des deux combinaisons de Simsky, auxquelles sont appliquées une détection hybride utilisant les seuils préconisés ci-dessus.

Pour tester cette méthode de détection quadri-fréquence, nous avons à nouveau utilisé des fichiers de données réelles (GMSD, DOY 134/14) modifiés aux même époques que pour tous les exemples précédents. Ici, nous testerons la détection d'un saut d'un cycle sur différentes fréquences, et non plus uniquement sur la fréquence ayant le moins d'impact sur la combinaison³. Ainsi, quatre fichiers différents seront utilisés. Pour le premier, les sauts seront présents sur la fréquence E1 ; pour le second, ils le seront sur la fréquence E5a, *etc.* Dans la TABLE 7.4, une ligne sera consacrée à chacun de ces tests, la fréquence soulignée correspondant à celle affectée de sauts.

Fréquences	Sat E11		Sat E12		Sat E19		Autres
	Ep 1604	Ep 2241	Ep 1540	Ep 2074	Ep 75	Ep 701	
<u>E1</u> - E5a - E5b - E5a+b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0
E1 - <u>E5a</u> - E5b - E5a+b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0
E1 - E5a - <u>E5b</u> - E5a+b	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0
E1 - E5a - E5b - <u>E5a+b</u>	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0

TABLE 7.4 – Sauts isolés d'un cycle

Pour la première fois depuis le début de ce travail, nous rencontrons une performance de 100 % pour tous les cas réels traités. D'une part, tous les sauts de cycles insérés, peu importe la fréquence, le satellite et son élévation, l'activité ionosphérique, *etc.* l'ensemble des sauts sera efficacement détecté. D'autre part, aucun faux positif ne sera détecté à l'issue des deux étapes de la méthode hybride.

Sauts simultanés d'amplitudes différentes

La TABLE 7.5 reprend les résultats de la détection de sauts simultanés d'amplitudes différentes à l'aide de notre méthode quadri-fréquences, c'est-à-dire l'utilisation de deux combinaisons de Simsky auxquelles a été appliquée une détection hybride utilisant les seuils préconisés précédemment. Nous utiliserons les mêmes fichiers de données réelles modifiés que pour les équivalents bi- et tri-fréquences.

3. Nous savons cependant, d'après les précédentes études, que les sauts sur E1 et sur E5a seront les plus difficilement détectables, respectivement dans les combinaisons E1-E5a-E5b et E5a-E5b-E5a+b utilisées ici.

Fréquences	Sat E11		Sat E12		Sat E19		Autres
	Ep 1604	Ep 2241	Ep 1540	Ep 2074	Ep 75	Ep 701	
$E1 - E5a - E5b - E5a+b$	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	0

TABLE 7.5 – Sauts simultanés d’amplitudes différentes

Les résultats sur ces exemples, sauts isolés et sauts simultanés d’amplitudes différentes, confirment les performances déterminées théoriquement : peu importe la fréquence sur laquelle les sauts sont insérés, peu importe la valeur de ceux-ci (à l’exception de sauts simultanés et de mêmes amplitudes sur les quatre fréquences), peu importe l’activité ionosphérique, ils sont à 100 % détectés et aucun faux positif n’apparaît.

Notons que, si cela est vrai pour les quelques tests que nous avons effectués, il est néanmoins nécessaire de valider cela de manière plus globale sur un grand set de données équatoriales. Cela fera l’objet du CHAPITRE 8.

7.3.4 Discussion

A l’heure actuelle, en post-traitement, il est donc possible de garantir la détection de petits sauts en ionosphère active grâce à une détection quadri-fréquence, si l’on est prêt à émettre une réserve quant à une éventuelle dégradation de performances dans certains cas particuliers, comme un évènement ionosphérique extrême, lorsque la qualité des observations est fortement dégradée par rapport aux valeurs habituelles (se manifestant, par exemple, par une forte augmentation du SNR). Notons que ce cas n’a pas été observé, ni dans nos tests à GMSD, ni dans la validation sur les données équatoriales de NKLG, malgré la présence d’évènements extrêmes.

En comparaison avec la détection tri-fréquence, les résultats sont ici meilleurs, puisque l’efficacité en sortie de la procédure de détection des sauts isolés (et des sauts simultanés d’amplitudes différentes) est de 100 %. En effet, en tri-fréquence, certaines combinaisons ($E1-E5a-E5a+b$ et $E1-E5b-Ea+b$) présentaient, en théorie ou en pratique, quelques limites, soit en termes de détection des sauts, soit en termes de faux positifs.

Concernant une adaptation en temps réel de cette technique quadri-fréquence, des remarques semblables au chapitre précédent s’appliquent. Nous renvoyons donc à la SECTION 6.3.5 pour plus d’informations.

7.4 Passage 2 : GF : Sauts simultanés de mêmes amplitudes

7.4.1 Choix de la méthode et des seuils

En ce qui concerne la détection des sauts simultanés lorsque quatre fréquences sont disponibles, la combinaison bi-fréquence *Geometry-Free* continuera à être utilisée. Comme nous l'avons déjà souligné, que ce soit en bi-, en tri-, ou en quadri-fréquences, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de méthode permettant de détecter les sauts simultanés qui ne soit pas affectée par l'ionosphère.

La combinaison *Geometry-Free* étant bi-fréquence, il est possible d'en construire six versions lors d'une détection quadri-fréquence $E1 - E5a - E5b - E5a+b$:

- $E1 - E5a$
- $E1 - E5b$
- $E1 - E5a+b$
- $E5a - E5b$
- $E5a - E5a+b$
- $E5b - E5a+b$

Notons que, puisqu'ici le but est de détecter les sauts simultanés, une seule combinaison parmi les six devrait suffire pour mettre ces sauts en évidence.

L'avantage de posséder toutes les fréquences est que l'on peut se permettre de n'utiliser que les combinaisons GF comprenant E1. Comme nous l'avons vu lors du CHAPITRE 5, ces dernières sont les plus efficaces, même si, en cas d'ionosphère active, elle seront incapables de détecter des sauts simultanés de faibles amplitudes. Dès lors, les sauts de cycles simultanés de mêmes amplitudes, même lorsque celles-ci sont faibles, pourront être détectés en l'absence d'évènements ionosphériques extrêmes.

En se basant sur l'approche développée lors du chapitre précédent pour la détection tri-fréquence, nous utiliserons uniquement les combinaisons *Geometry-Free* les plus efficaces, c'est à dire les $E1-E5a$ et $E1-E5a+b$. Ces justifications ayant déjà été abordées dans le chapitre précédent, nous ne reviendrons ici pas dessus. Les cas des relations "*ET*"-*intersection* et "*OU*"-*union* entre ces fréquences seront ici tous deux testés.

La TABLE 7.6 reprend les combinaisons utilisées ainsi que les seuils qui y sont associés⁴.

Fréquences	Combinaison(s) GF utilisée(s)	Seuil relatif	Seuil absolu
$E1 - E5a - E5b - E5a+b$	$E1-E5a$	4σ	<i>aucun</i>
	$E1-E5a+b$	4σ	<i>aucun</i>

TABLE 7.6 – Choix des combinaisons et des seuils GF utilisés pour la détection quadri-fréquence

4. Les seuils seront ceux utilisés dans le cas bi-fréquence.

7.4.2 Performances globales

La TABLE 7.7 reprend les performances théoriques, en fonction de l'utilisation des combinaisons et des seuils définis ci-dessus.

Fréquences	1 cycle		2 cycles		3 cycles	
	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]	FN [%]	FP [%]
$E1 - E5a - E5b - E5a+b$ - "ET"	0	0	0	0	0	0
$E1 - E5a - E5b - E5a+b$ - "OU"	0	0	0	0	0	0

TABLE 7.7 – Performances quadri-fréquences pour la détection de sauts isolés ou de sauts simultanés d'amplitudes différentes

N'oublions pas que la détermination théorique de ces performances ne tient pas compte des aspects suivants :

- Dans la relation "OU", la proportion de faux négatifs pourra être généralement plus faible qu'attendue et celle de faux positifs plus élevée.
- Dans la relation "ET", c'est l'inverse, la proportion de faux négatifs est généralement plus élevée qu'attendue et celle de faux positifs plus faible.

Nous renvoyons à la SECTION 6.4.2 pour plus d'informations à ce sujet. Notons qu'au vu des performances théoriques, ces considérations ne devraient pas s'appliquer puisque toutes les proportions sont nulles.

7.4.3 Confrontation avec les données réelles

Lorsque l'on confronte ces méthodes de détection avec des données réelles, les performances atteintes sont les suivantes :

Fréquences	Sat E11		Sat E12		Sat E19		Autres
	Ep 1604	Ep 2241	Ep 1540	Ep 2074	Ep 75	Ep 701	
$E1 - E5a - E5b$ - $E5a+b$ (ET)	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	1
$E1 - E5a - E5b$ - $E5a+b$ (OU)	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	Oui : 1-5 Non : /	1

TABLE 7.8 – Sauts simultanés de mêmes amplitudes (de 1 à 5 cycles)

Pour la combinaison $E1 - E5a - E5b - E5a+b$, les performances sont, dans ce cas particulier, les mêmes peu importe la relation utilisée. Tous les sauts sont détectés à partir d'une amplitude simultanée d'un cycle, ce qui est exceptionnel. Le même faux positif sera détecté sur les deux combinaisons utilisées, ce qui explique les mêmes performances indépendamment de la relation choisie.

7.4.4 Discussion

A l'heure actuelle, il est donc possible de garantir la détection de petits sauts simultanés de mêmes amplitudes lorsque quatre fréquences sont disponibles si l'on émet des réserves quant à un cas d'ionosphère extrêmement agitée. Si, en ionosphère calme, les performances de détection pour cette unique combinaison, sont de 100 %, même pour les plus petits sauts, ces dernières peuvent bien sûr être fortement dégradées par une forte activité ionosphérique (comme lors de l'Halloween Storm, mais cela reste un cas assez extrême). L'ajout de la quatrième fréquence présente un avantage dans le sens où une combinaison avec E1 (dans notre méthode, elles sont au nombre de deux) sera toujours disponible, permettant en théorie une détection des sauts à 100 % et aucun faux négatif. Dans les données réelles provenant de GMSD, où l'ionosphère est active, tous les sauts ont bel et bien été détectés mais il subsiste par contre toujours le même faux positif. Il conviendra néanmoins de valider les performances de cette méthode de détection quadri-fréquence des sauts simultanés de mêmes amplitudes pour des données équatoriales.

7.5 Conclusion

Dans le cadre de ce travail, une méthode de détection des sauts de cycles quadri-fréquences a ici été mise en place. C'est une première dans le domaine de la détection des sauts de cycles. Si les méthodes tri-fréquences permettaient déjà d'améliorer la détection par rapport aux méthodes bi-fréquences, l'utilisation de la quatrième fréquence permet encore de meilleures performances.

Lorsque quatre fréquences sont disponibles, les performances en termes de détection des sauts isolés et des sauts simultanés et d'amplitudes différentes sont idéales : par l'utilisation de deux combinaisons de Simsky, les plus performantes, nous arrivons théoriquement à 100 % d'efficacité, aussi bien en termes de faux positifs qu'en termes de faux négatifs. L'exemple de GMSD illustré ci-dessus est en accord avec ces performances.

Lorsque quatre fréquences sont disponibles, les combinaisons *Geometry-Free* bi-fréquences sous forme de différences du quatrième ordre seront à nouveau utilisées afin de déterminer la présence de sauts simultanés. L'avantage, par rapport à l'équivalent tri-fréquence, est que l'on possède les six combinaisons à la place de trois d'entre elles. Dès lors, il est possible de, soit les combiner entre elles (en utiliser entre 2 et 6, par des relations "*ET*" ou "*OU*"), soit de ne sélectionner que la plus performante des six. Nous utiliserons ici les deux combinaisons GF les plus performantes, les *E1-E5a* et *E1-E5a+b*. Les performances théoriques y correspondant seront de 100 %, mais en pratique, un faux positif sera tout de même détecté. Cependant, il reste utile de rappeler le nœud du problème : la combinaison *Geometry-Free* étant sensible à l'ionosphère, ses performances en sont rapidement dégradées.

Chapitre 8

Validation

8.1 Introduction

Après avoir observé les différentes améliorations apportées par un nombre croissant de fréquences disponibles et développé une toute première méthode inédite de détection quadri-fréquence des sauts de cycles, il convient de valider nos résultats sur des données équatoriales.

Lors des trois chapitres précédents, la théorie ainsi que des exemples ont permis de mettre en évidence une nette amélioration lors de l'ajout d'une troisième fréquence, puis d'une quatrième. Cependant, il serait intéressant de voir si les performances de cette nouvelle méthode de détection quadri-fréquence sont aussi bonnes pour une station équatoriale qu'elle le sont pour le reste des stations sur lesquelles les tests ont été effectués, situées dans des zones de latitude plus éloignées de l'équateur magnétique. Notons cependant que la station GMSD, utilisée dans nos exemples lors des chapitres précédents, est déjà située dans une zone ionosphérique que l'on peut qualifier d'"active"¹.

8.2 Interface graphique conviviale

Afin de faciliter les tests en cours de travail ainsi que la validation, une interface graphique a été développée sous *MatLab*. Cette dernière est assez intuitive et pourra donc être mise à profit par d'éventuels utilisateurs désireux de détecter les époques susceptibles de contenir des sauts de cycles, à partir de leurs fichiers bruts RTP, sans avoir à recoder l'ensemble de la méthode.

Dans un premier temps, l'utilisateur est invité à rechercher le fichier à analyser dans son arborescence.

Ensuite, deux choix s'offrent à lui.

- Il peut décider de simplement analyser visuellement les délais ionosphériques propres à ses données, à travers une représentation graphique de la combinaison *Geometry-*

1. Nous n'y avons cependant pas observé des phénomènes d'une ampleur comparable à ceux de NKLK.

Free E1-E5a, différenciée au premier et au second ordre.

- L'autre possibilité est de mener une campagne de détection des sauts de cycles sur ses données. C'est cette dernière qui constituera le cœur du travail.

Si la seconde possibilité est choisie, l'utilisateur doit alors saisir différents paramètres :

- nombre de fréquences disponibles
- combinaisons à construire²
- types de sauts à détecter : isolés / simultanés d'amplitudes différentes ; simultanés de mêmes amplitudes ; les deux.
- valeur des seuils des différentes étapes

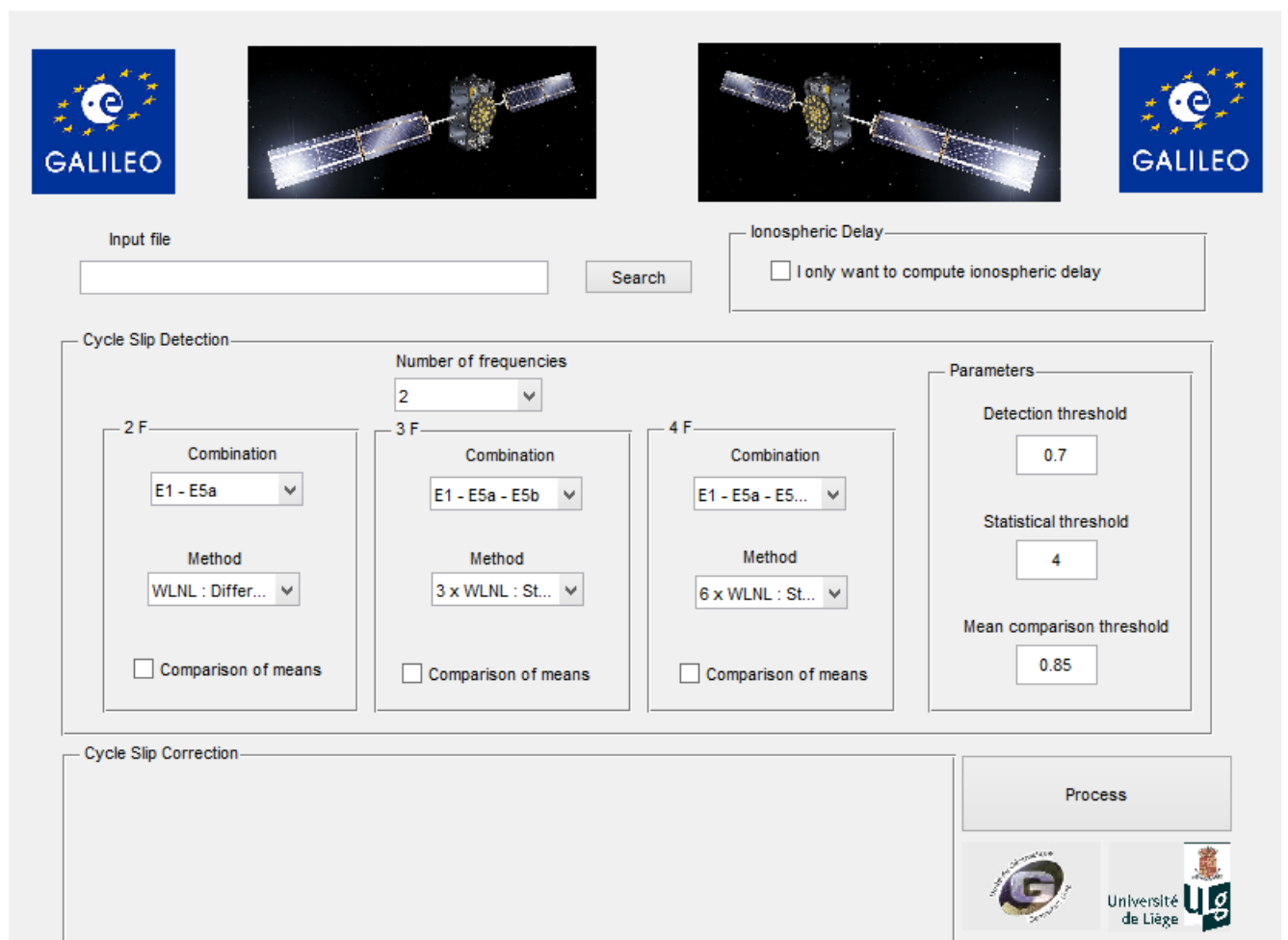


FIGURE 8.1 – Interface sous MatLab

Les résultats, c'est à dire les graphiques des combinaisons ainsi que le relevé des époques déterminées comme comportant des sauts, sont automatiquement stockés dans un sous-dossier créé dans le dossier d'origine du fichier à analyser. Le nom de ce sous-dossier comprendra :

2. 6 possibilités pour 2 fréquences ; 4 possibilités pour 3 fréquences, 1 possibilité pour 4 fréquences

- le nom du fichier analysé
- les paramètres de détection choisis
- la date et l'heure du lancement de l'analyse³

8.3 Données de validation

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'activité ionosphérique est variable dans l'espace et dans le temps. Dans le cadre de la validation, il est donc intéressant de tester notre méthode de détection quadri-fréquence dans différents cas de figure, et particulièrement les plus délicats à traiter.

Tout d'abord, notre travail se situant dans le cadre d'une ionosphère active, il nous a semblé plus judicieux d'effectuer la validation sur des données équatoriales, puisque l'activité ionosphérique y est plus marquée qu'à nos latitudes. Nous avons donc utilisé des données provenant de la station NKLK située au Gabon. Cette dernière se situe bien aux alentours de l'équateur magnétique et fait partie de la région dite "équatoriale".

Ensuite, se pose alors la question du cycle solaire. Cela tombe bien, le dernier maximum solaire date de 2014⁴. De plus, en 2014, étaient déjà présents dans le ciel quatre satellites Galileo (IOV) : E11, E12, E19, E20.

Enfin, disposant d'un set de 200 jours d'observations à la station NKLK pour 2014, la question de l'utilisation de celles-ci s'est posée. Parmi ces 200 jours de données, nous avons choisi les 25 premiers et les 25 derniers : du 6 janvier (DOY06) au 1^{ier} février (DOY32)) et du 24 juin (DOY175) au 19 juillet (DOY200)⁵. En termes de nombre, deux sets de 25 jours à des périodes différentes de l'année (non-consécutives) nous ont semblé suffisants pour caractériser les performances de l'algorithme quadri-fréquence à l'équateur. En effet, comme nous le verrons dans les exemples ci-dessous, ce sont en réalité les mêmes problèmes qui reviennent régulièrement. De plus, comme les résultats des traitements l'illustreront, les données analysées contiennent un échantillonnage de jours calmes, de jours un peu agité, ainsi que quelques cas où l'activité ionosphérique est extrême.

Le temps de traitement supplémentaire qui serait occasionné par le traitement de l'ensemble des 200 jours ne nous a pas semblé rentable par rapport à l'information supplémentaire que l'analyse de ceux-ci pourrait nous apporter.

Ayant à notre disposition des données Galileo équatoriales, pour une période de maximum solaire et en nombre suffisant, toutes les conditions sont alors réunies pour effectuer une validation de qualité de la méthode de détection des sauts quadri-fréquence.

3. Cela permet d'éviter tout effacement accidentel de résultats préexistants.

4. Celui du cycle solaire 24, chacun des cycles durant environ 11 ans.

5. Notons qu'à partir du 27 mai 2014, le satellite E20 a été déclaré non-disponible suite à une diminution soudaine des signaux transmis. Il fut réactivé en août pour la fréquence E1. Celui-ci ne sera donc pas utilisé pour le second set de données.

8.4 Résultats obtenus

Dans cette validation sur les données équatoriales, l'objectif poursuivi était double.

D'une part, il s'agissait de *tester l'algorithme* de détection sur des données encore plus variables qu'à GMSD, et d'en analyser les résultats visuellement :

- A quelles époques les sauts ont-ils été détectés ?
- Ces époques semblent-elles correspondre réellement à des sauts de cycles ou sont elles des *outliers* (faux positifs) ?
- Toujours d'après les graphiques, y a-t-il des cas ressemblant à des sauts mais n'étant pas détectés comme tels (possibles faux négatifs) ?

D'autre part, l'idée était également de déterminer quelle était la *proportion d'époques* pour lesquelles la variabilité des combinaisons utilisées était trop importante pour permettre la détection de petits sauts de cycles (les seuils relatifs étant alors trop élevés), pour des stations équatoriales.

Cette proportion sera calculée de la manière suivante : si, à un moment où à un autre lors de la détection, le seuil statistique dépasse l'effet engendré par un saut d'un certain nombre de cycles ⁶, un *flag* sera appliqué à l'époque en question.

Nous distinguerons quatre cas, pour lesquels une proportion individuelle d'absence de détection sera calculée : les deux combinaisons de *Simsky*, associées à la détection des sauts isolés et des sauts simultanés d'amplitudes différentes, et les deux combinaisons *Geometry-Free*, associées à la détection des sauts simultanés de mêmes amplitudes.

- Dans la méthode de détection appliquée aux combinaisons de *Simsky* (méthode hybride), le seuil relatif intervient lors de la première étape, la détection grossière. Pour rappel, il est de 2σ . Dans le cas des combinaisons de *Simsky*, la proportion d'époques calculée sera celle pour laquelle il ne sera pas possible de détecter des sauts isolés (ou simultanés d'amplitudes différentes).
- Dans la méthode de détection appliquée aux combinaisons *Geometry-Free*, le seuil relatif est le seul seuil utilisé. Pour rappel, il est de 4σ . Dans le cas des combinaisons *Geometry-Free*, la proportion d'époques calculée sera celle pour laquelle il ne sera pas possible de détecter des sauts simultanés de mêmes amplitudes.

A la fin du traitement, le nombre de *flags* sera comptabilisé, par combinaison (il y en aura donc quatre), et il sera comparé au nombre total d'époques traitées. Cela permettra d'obtenir un pourcentage pour chacune des combinaisons.

6. Nous avons choisi de le calculer pour des sauts d'un cycle, de deux cycles, et de cinq cycles

Pour chacun des 50 jours d'observations, les résultats présents en ANNEXE C seront composés des informations suivantes :

- Nombre de sauts détectés à l'aide des combinaisons de *Simsky*⁷
- Nombre de sauts détectés à l'aide des combinaisons *Geometry-Free*⁸
- Le pourcentage d'époques pour lesquelles on ne pourra détecter des sauts isolés d'une amplitude d'un cycle à l'aide des combinaisons de *Simsky*⁹. Si les pourcentages sont similaires pour les deux combinaisons de *Simsky*, la case ne sera remplie que par une seule valeur, qui s'appliquera aux deux combinaisons. Si les pourcentages sont significativement différents, ils seront alors séparés d'un *slash*.
- Le pourcentage d'époques pour lesquelles on ne pourra détecter des sauts simultanés d'une amplitude d'un cycle à l'aide des combinaisons *Geometry-Free*¹⁰. De la même manière que pour les combinaisons de *Simsky*, si les pourcentages sont similaires pour les deux combinaisons *Geometry-Free*, la case ne sera remplie que par une seule valeur, qui s'appliquera aux deux combinaisons. Si les pourcentages sont significativement différents, ils seront alors séparés d'un *slash*.
- Idem pour les sauts de 2 cycles et de 5 cycles.

Notons tout de même que, comme déjà mentionné, le fait d'avoir, par exemple, 25 % des époques concernées pour la GF1 et 25 % des époques concernées pour la GF2, ne veut pas dire que de manière générale, pour 25% des époques, un saut d'une telle amplitude ne sera pas détectable. En effet, il est fréquent que les époques de non détection soient en partie différentes selon la combinaison.

8.5 Analyse des résultats

Les résultats de la validation sont repris en ANNEXE C. Les TABLES C.1 et C.2 reprennent les différents résultats cités ci-dessus.

Les résultats obtenus sur les données équatoriales ne sont pas aussi probants que ceux observés à GMSD. En effet, après analyse visuelle, nous avons clairement pu identifier certains problèmes, parfois récurrents, de détection de sauts de cycles en ionosphère équatoriale. Ils sont les suivants :

- sauts simultanés sur toutes les fréquences et pour tous les satellites
- faux positifs et faux négatifs sur la combinaison GF

7. Relation "*ET*" choisies entre les résultats des deux combinaisons.

8. Relation "*ET*" choisies entre les résultats des deux combinaisons.

9. Le champ correspondant sera nommé "*TF*" pour *Tri-Fréquence*. La combinaison TF1 correspond à la E1-E5a-E5b et la combinaison TF2 correspond à la E5a-E5b-E5a+b.

10. La combinaison GF1 correspond à la E1-E5a et la combinaison GF2 correspond à la E1-E5a+b.

- faux positifs sur la combinaison de *Simsky*

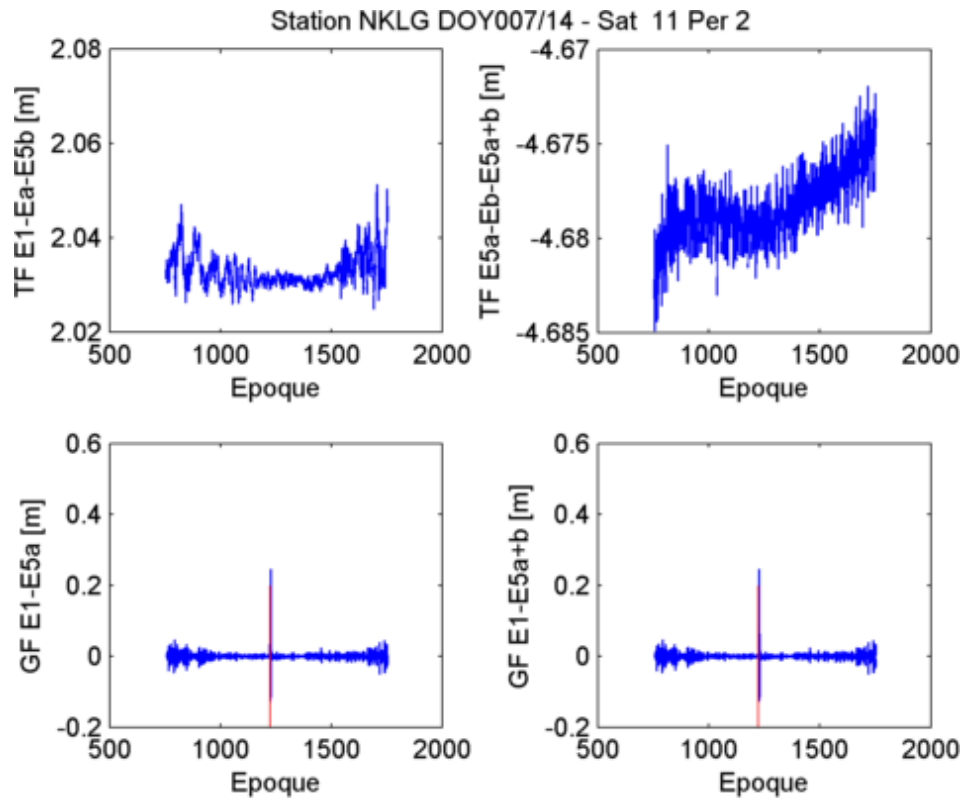
Chacun de ces cas particuliers seront illustrés et discutés dans les sections suivantes. Nous terminerons ensuite par un exemple-type d'activité ionosphérique extrême : le jour 22 / 2014.

8.5.1 Sauts simultanés sur toutes les fréquences et pour tous les satellites

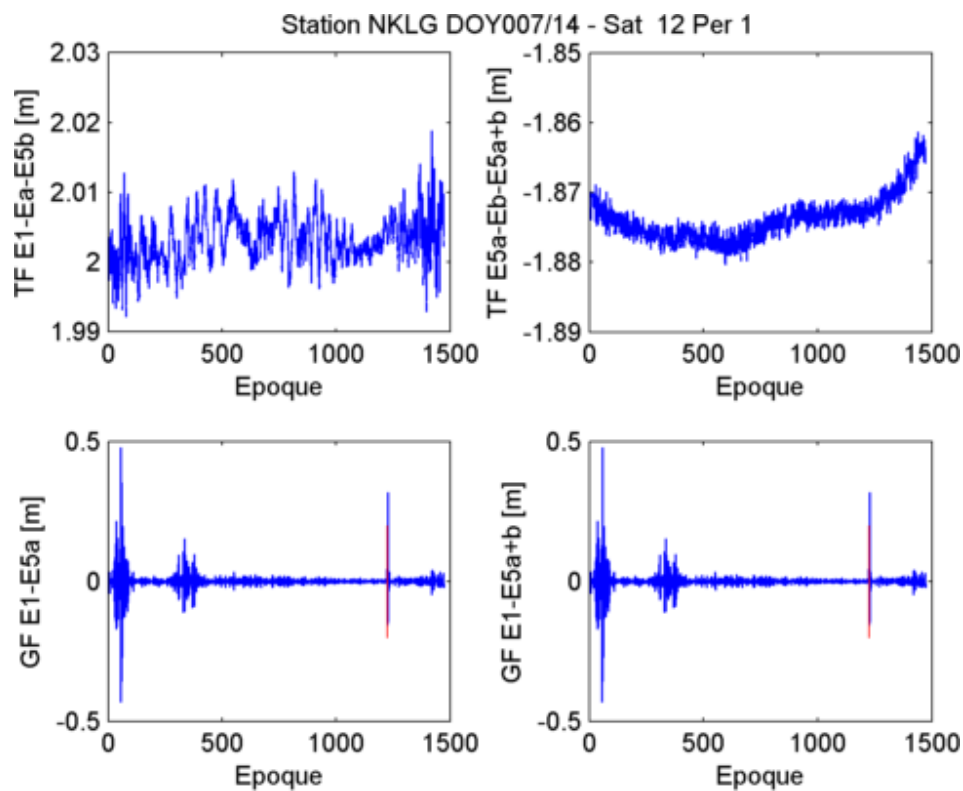
A plusieurs reprises, nous avons constaté que des sauts simultanés de mêmes amplitudes étaient présents pour la même époque sur les signaux provenant de différents satellites et sur toutes les fréquences. Le problème semble généralisé, puisque tous les signaux reçus à l'époque concernée sont affectés d'un saut de même amplitude, simultanément.

Cela est probablement le signe d'une défaillance au niveau du récepteur, dont tous les compteurs "ratent" un certain nombre de cycles à une époque donnée, pour une cause inconnue.

C'est le cas dans l'exemple repris à la FIGURE 8.2. Cette dernière représente les deux combinaisons GF ainsi que les deux combinaisons de *Simsky* le jour 7 de 2014, pour le passage des satellites E11 et E12. Pour ces deux passages de satellites, aucun saut n'est détecté sur la combinaison de *Simsky*. Par contre, deux sauts sont détectés sur la combinaison *Geometry-Free* : le premier concerne l'époque 1224 du satellite E11 et le deuxième concerne cette même époque 1224 du satellite E12. A cette époque, ces deux satellites sont les seuls Galileo présents dans le ciel. L'amplitude du saut observée sur le graphique et le fait que seules les combinaisons *Geometry-Free* soient concernées laissent à penser qu'un saut simultané de 1 cycle s'est opéré pour tous les satellites observés à l'époque 1224 en ce jour 7/2014.



(a) E11 - per 2



(b) E12 - per 1

FIGURE 8.2 – Problème du récepteur à l'époque 1224 (NKLG - DOY 7/14)

Notons que les résultats graphiques des combinaisons GF sur le *satellite E12 - per1* permettent en plus de se rendre compte d'un second problème : la combinaison GF devient

parfois soudainement irrégulière, sans doute signe du passage d'un phénomène ionosphérique local (scintillation, TID's,...), et ne permet alors pas de détecter des sauts simultanés de faibles amplitudes. Ce problème fait l'objet de la section suivante.

8.5.2 Faux négatifs et faux positifs sur la combinaison Geometry-Free

Un même exemple (FIGURE 8.3) permet de montrer à la fois la présence de faux positifs et celle de faux négatifs sur la combinaison Geometry-Free. La cause du problème : sa sensibilité à l'ionosphère.

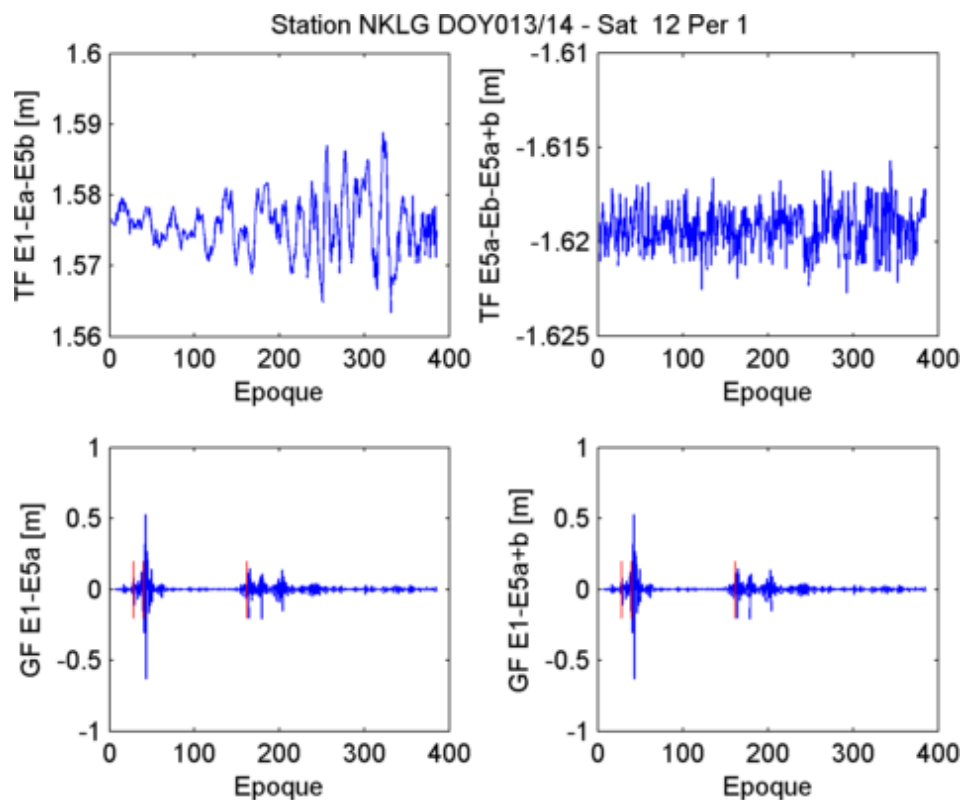


FIGURE 8.3 – Faux et vrais positifs dans la GF : DOY 13/14 - E12 - per 1

- D'une part, lors de périodes où l'activité ionosphérique est élevée, les gradients ionosphériques deviennent très rapidement très variables. Dès lors, malgré les seuils statistiques de 4σ , il est fréquent que lors des premières époques de ces événements, l'écart-type de la fenêtre ne soit que peu influencé par cette soudaine variabilité. De faux positifs peuvent alors être détectés. Nous ne disposons malheureusement d'aucun moyen pour déterminer si, oui ou non, la discontinuité détectée correspond à un faux positif ou est un réel saut de cycle.
- D'autre part, au contraire, une fois l'écart-type de la fenêtre adapté à l'évènement, le seuil statistique devient supérieur à l'effet de sauts simultanés de faibles amplitudes. Ainsi, pour le jour 13/14, il sera impossible de détecter des sauts simultanés d'amplitude d'un cycle pour plus d'un quart du nombre total d'époques. Nous ne

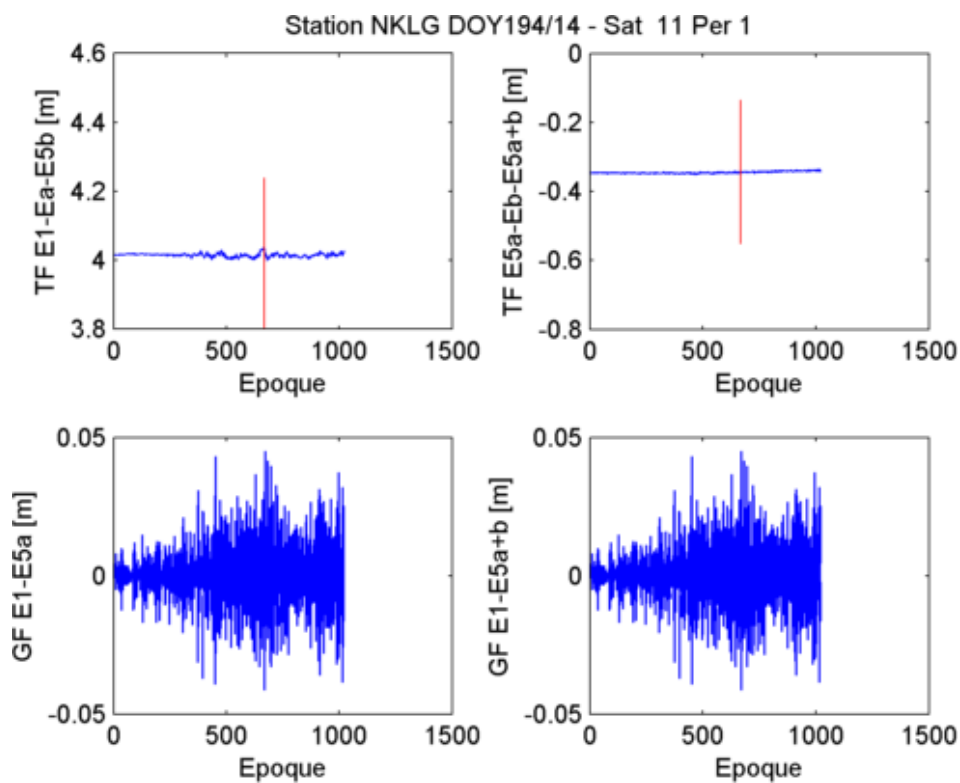
disposons malheureusement d'aucun moyen pour déterminer si, oui ou non, un faux négatif est effectivement présent dans une combinaison *Geometry-Free*.

8.5.3 Faux positifs sur la combinaison de Simsky

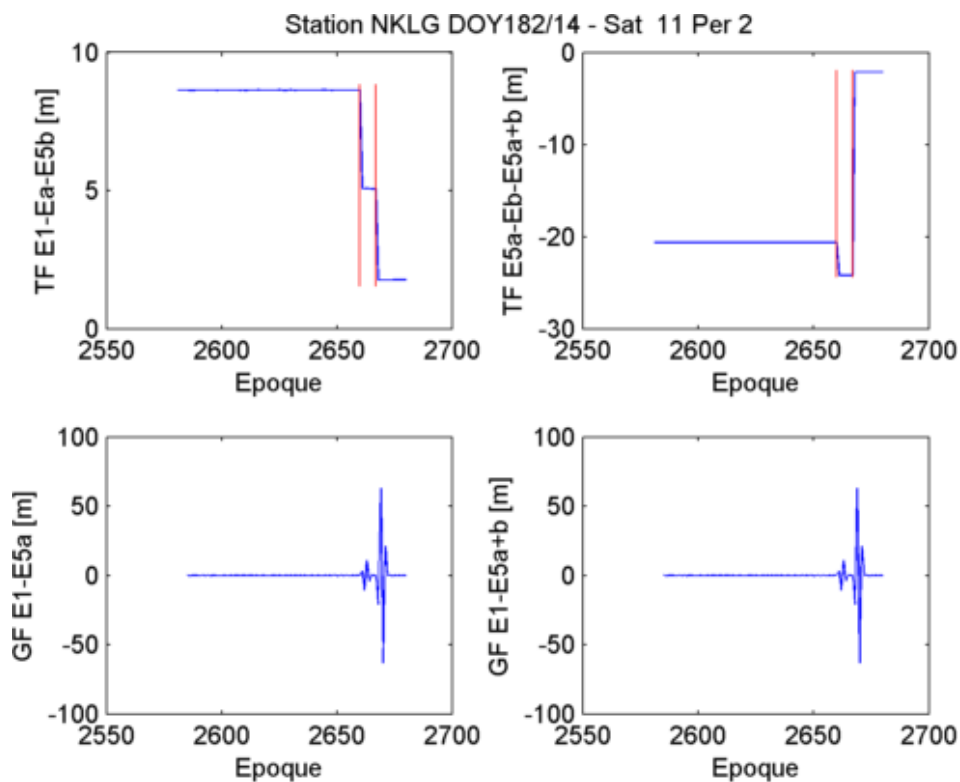
Lors des tests préliminaires, nous avons remarqué qu'un trop grand nombre de faux positifs pouvaient dégrader les performances. Nous avons donc décidé d'augmenter le seuil statistique de 2 à 3 σ . Malgré cela, le problème persiste : sur l'ensemble des données que nous avons analysées, c'est presque la moitié des sauts de cycles détectés sur les combinaisons de *Simsky* qui semblent en réalité correspondre à des faux positifs. Ce constat a été établi par l'observation individuelle des combinaisons de Simsky pour chacun des sauts détectés par la méthode. Si aucun biais n'est en réalité visible dans les représentations graphiques, c'est qu'il s'agit probablement d'un *outlier*.

La FIGURE 8.4 reprend un exemple de détection de faux positif ainsi qu'un exemple de détection de deux sauts séparés d'une dizaine d'époques.

- Le saut détecté sur le passage du satellite E11 le jour 194 de 2014 est un des nombreux exemples de faux positifs. Même si la FIGURE 8.4 (a) ne l'illustre pas clairement, comprenant l'ensemble du passage du satellite, il n'y a bien aucun biais dans la moyenne de la combinaison de *Simsky* avant et après le saut détecté. Celui-ci est un *faux positif*, dont la détection est probablement due à un trop grand nombre de sauts détectés lors de la première étape de la détection hybride (pour rappel, caractérisée par un faible seuil statistique de 2 σ).
- La détection des sauts successifs sur le passage du satellite E11 le jour 182 de 2014 démontre quant à elle l'efficacité de la méthode quadri-fréquence, même en cas de sauts "rapprochés".



(a) Faux positif : DOY 194/14 - E11 - per 1



(b) Vrais positifs : DOY 182/14 - E11 - per 2

FIGURE 8.4 – Faux et vrais positifs détectés dans les combinaisons de Simsky

Afin de limiter les faux positifs sans toutefois dégrader les performances de détection des sauts de faibles amplitudes, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- La première consiste en l’augmentation du seuil statistique de 3 à 4 σ (dans la combinaison de *Simsky*, celle qui nous occupe dans cette section).
Si, théoriquement, nous craignons de rendre la détection de petits sauts de cycles impossible en augmentant les seuils, le passage de 2 à 3 σ n’a pas posé problème, puisque même pour des données équatoriales en maximum solaire, dans aucun de nos 50 jours de validation nous n’avons observé une seule époque pour laquelle le seuil statistique aurait été en mesure de cacher ne serait-ce qu’un seul saut d’un cycle. Le même travail de validation serait à effectuer pour un seuil de 4 σ afin de déterminer si, oui ou non, celui-ci peut être applicable sans problème. Si cela est effectivement possible, il ne devrait statistiquement plus avoir aucun faux positif passant de la première étape à la seconde. Cela réglerait donc le problème.
- La seconde solution consisterait en un deuxième (voire plus) passage de la seconde étape de la méthode hybride, la comparaison de moyennes. En effet, entre le nombre de faux positifs détectés par la première étape et ceux restant à l’issue de la seconde étape, on observe tout de même une nette diminution¹¹. Si cette deuxième étape, la comparaison de moyennes, est effectuée une seconde fois, en considérant les sauts détectés à l’issue de son premier passage comme les sauts potentiels issus de l’étape précédant la comparaison (détection grossière), il y a fort à penser qu’une partie d’entre eux pourraient être éliminés. Cela permettrait alors, après plusieurs itération du processus si nécessaire, de ne plus détecter comme saut que les discontinuités y correspondant réellement.

Notons cependant que, même si quelques faux positifs sont détectés sur les combinaisons tri-fréquences, ils ne sont assurément pas en nombre suffisant pour poser de réels problèmes (à l’exception d’évènements ionosphériques extrêmes). En effet, si l’un ou l’autre faux positif apparaît au cours d’une journée, le seul désagrément créé sera une perte de continuité dans les données, puisqu’une nouvelle période, associée à une nouvelle ambiguïté initiale à calculer, sera réinitialisée.

8.5.4 Évènement ionosphérique extrême

Lors de l’analyse des 200 jours de données à NKLG, quelques jours ont attiré notre attention pour leur activité ionosphérique extrême. Nous prendrons ici l’exemple du jour 22/2014.

Lors de cette journée, de nombreuses pertes de signal sont observées. Ces dernières sont soit comprises entre deux époques d’observations (à un taux d’échantillonnage de 30 secondes), elles sont alors à l’origine d’un saut de cycle, soit concernent une des époques qui aurait dû être observée, provoquant l’apparition d’un trou dans les données (époque manquante). Nous avons décidé que, lorsque qu’une des époques est manquante, une nouvelle période était initialisé.

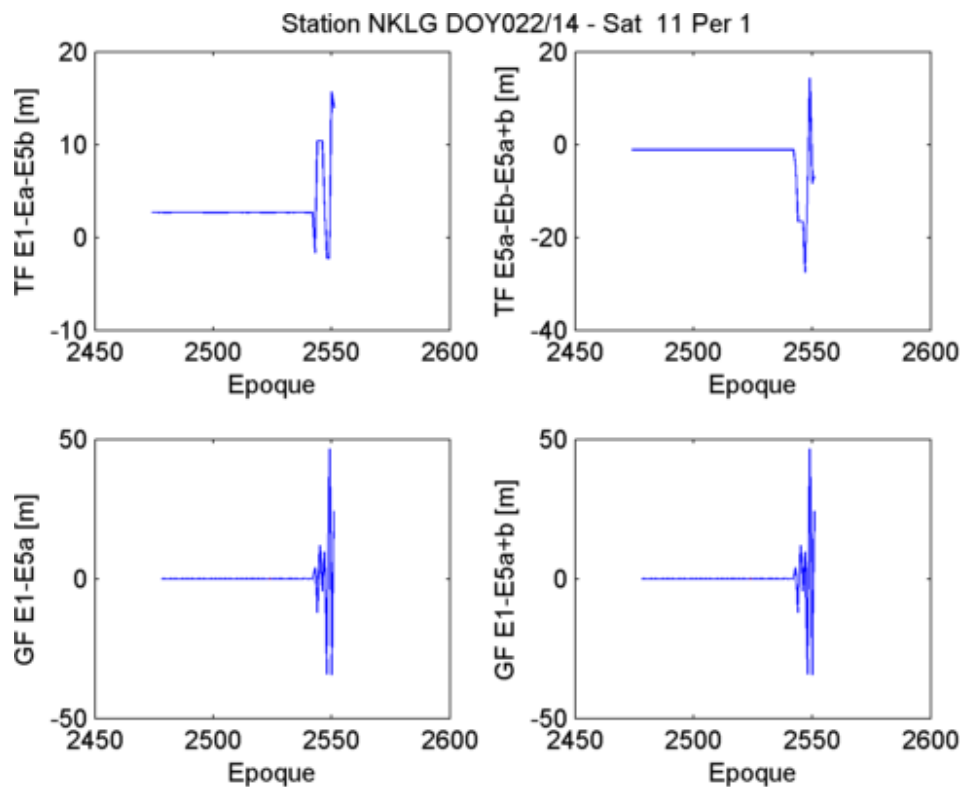
Lors de l’évènement ionosphérique extrême ayant touché la journée 22, nous observerons

11. Cela avait d’ailleurs déjà été illustré dans le CHAPITRE 5.

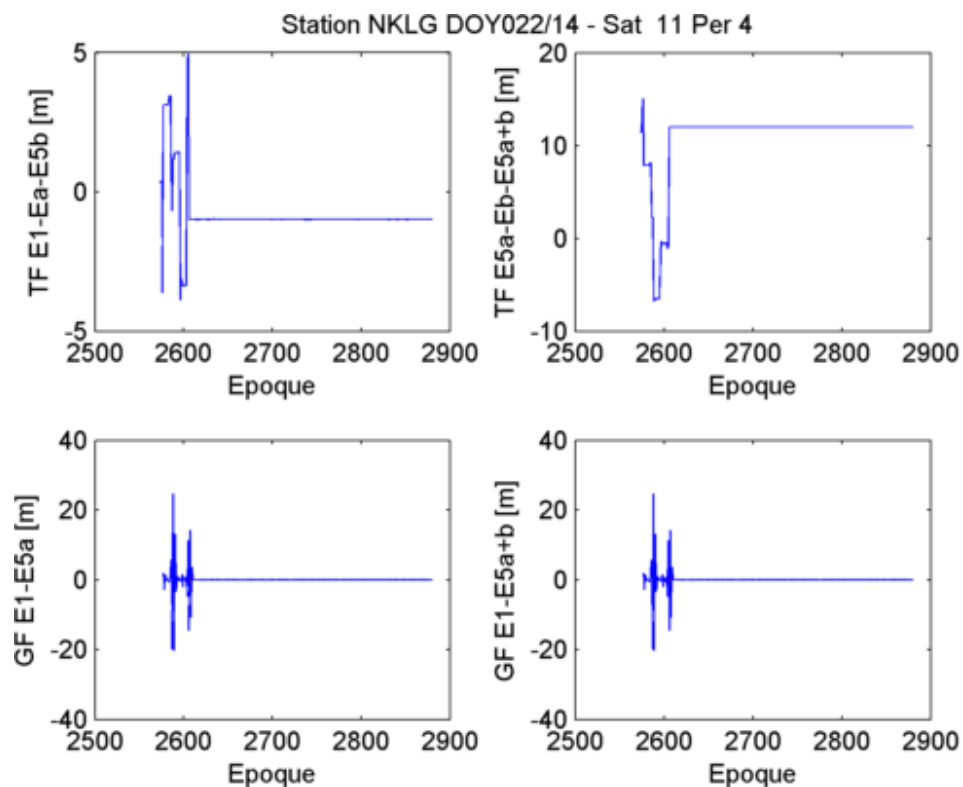
un mélange de nombreux sauts de cycles ainsi que de nombreuses périodes ne contenant que très peu d'observations. Il est évident que, dans ce genre de cas, il est inutile d'essayer d'utiliser les données, à l'exception éventuelle d'une application de monitoring de ce genre de phénomènes ionosphériques.

La FIGURE 8.5¹² illustre le passage du satellite E11, affecté par l'évènement extrême. Remarquons d'une part que des sauts successifs sont présents à la fin de la première période ainsi qu'au début de la quatrième période. Notons également que la fin de la première période correspond au début de la quatrième à quelques époques près. Cela illustre donc notre précédent propos concernant la présence de périodes intermédiaires de très courtes durées.

12. Par souci de clarté nous n'avons pas activé l'affichage des époques détectées comme porteuses de sauts. Nous pouvons ainsi visualiser les différents sauts successifs aisément sur les combinaisons.



(a) Sat 11 - Per 1



(b) Sat 11 - Per 4

FIGURE 8.5 – Cas extrêmes : sauts sur les combinaisons de Simsky

8.5.5 Pourcentage d'époques pour lesquelles les sauts de faibles amplitudes ne sont pas détectables

Quelques remarques peuvent également être formulées quant à l'application de notre méthode de détection sur des données provenant de la station équatoriale NKLK, en re-

lation avec le pourcentage d'époques pour lesquelles des sauts de faibles amplitudes ne seraient pas détectables :

- Sur 12 jours parmi les 50 jours analysés (soit environ 25 % des cas), il n'y aura ni sauts isolés détectés, ni sauts simultanés (qu'ils soient de mêmes amplitudes ou non), et pour lesquels la variabilité des combinaisons est assez faible pour garantir la détection d'un quelconque saut, si il y en avait.
- Sur les 50 jours analysés (soit 100 % des cas), la détection des sauts isolés ou simultanés d'amplitudes différentes, quelle que soit leur amplitude, est garantie (puisque le pourcentage d'absence de détection est nul pour les combinaisons de *Simsky*).
- A quelques exceptions près, la proportion d'époques pour lesquelles des sauts simultanés d'amplitudes de 5 cycles ne seraient pas détectables est comprise entre 0 et 2.5 %.

8.6 Conclusion

En conclusion, l'on peut donc dire que si les performances sont moins bonnes en ionosphère active à l'équateur, elles restent néanmoins acceptables.

Les principaux problèmes rencontrés sont les suivants :

- sauts simultanés et sur différents satellites
- faux positifs et faux négatifs sur les combinaisons GF
- faux positifs sur les combinaisons de *Simsky* (pour environ la moitié des sauts détectés)

Il est également intéressant de rappeler que, pour l'ensemble du set de validation, à aucune époque le seuil statistique des combinaisons de *Simsky* ne dépasse l'effet que le plus petit saut d'un cycle aurait sur la combinaison, ce qui est remarquable. Quant au seuil statistique de la combinaison *Geometry-Free*, il peut ou non, selon les jours, rendre la détection des sauts simultanés de mêmes amplitudes indétectables. Pour les sauts simultanés d'un cycle, le maximum que nous ayons observé est de 50 % d'époques non couvertes sur les deux combinaisons GF. Pour les sauts simultanés de deux cycles, cette proportion descend à maximum 40%. Enfin, pour les sauts simultanés de 5 cycles, elle n'est au maximum que de 22%. Notons tout de même, que, mis à part quelques cas extrêmes (par exemple celui de 22%), la proportion d'époques non couvertes par la détection GF est généralement faible et tourne autour de 0 à 2.5 %.

D'un point de vue plus pratique, notons que, sachant que l'époque est (potentiellement) problématique, l'utilisateur pourra donc décider de ne pas la considérer dans son positionnement, et initier une nouvelle période d'observation, pour laquelle une nouvelle ambiguïté initiale sera déterminée. Le désavantage de cette approche est la perte de continuité dans les observations. En effet, certaines applications nécessitent un minimum de plusieurs minutes d'observations continues (période d'initialisation). Cela sera d'autant plus

problématique si plusieurs sauts se succèdent à des époques rapprochées.

Chapitre 9

Conclusion

Les conclusions de ce travail sont prometteuses : d'une part, il a été prouvé que l'utilisation d'un plus grand nombre de fréquences permettait d'améliorer les méthodes de détection de sauts de cycles et ainsi rendre ces dernières plus efficaces. D'autre part, une méthode de détection quadri-fréquence a été développée. Il s'agit de la première de ce genre et elle ouvre donc la porte à une détection optimale des sauts de cycles sur les signaux quadri-fréquences de Galileo.

9.1 Apport des méthodes de détection tri- et quadri-fréquences

L'apport des méthodes de détection tri- et quadri-fréquences par rapport aux méthodes bi-fréquences fut développé au travers des CHAPITRES 5, 6, et 7.

Notons que, pour l'ensemble de la discussion qui va suivre, nous considérerons les performances correspondant aux seuils appliqués au cours de ce travail.

9.1.1 Sauts isolés et simultanés d'amplitudes différentes

En théorie

Afin de déterminer les performances théoriques des différentes méthodes de détections des sauts de cycles, nous nous sommes basés sur une étude statistique, utilisant et la précision sur la combinaison concernée (préalablement calculée par propagation de variances), et l'effet du plus petit saut sur cette combinaison.

En détection bi-fréquence, les combinaisons avec E1 (*Hatch-Wübenma-Melbourne*), soit la moitié des combinaisons qu'il est possible de construire à partir des signaux Galileo, présentent une proportion élevée de faux négatifs, particulièrement pour la détection des sauts d'un cycle d'amplitude (entre 25 et 50%). Les combinaisons sans E1 présentent, elles, des performances théoriques de 100%, puisqu'aucun faux négatif ni positif ne devrait apparaître.

Le passage à la détection tri-fréquence permet de réduire fortement la proportion de faux négatifs : en effet, pour deux des quatre combinaisons qu'il est possible de construire, la proportion de ceux-ci dans la détection de sauts d'un cycle sera inférieure à 1%. Pour l'autre moitié des combinaisons tri-fréquences, les performances théoriques seront de 100%.

Quant à la méthode de détection quadri-fréquence, elle présentera une performance théorique de 100%, et cela peu importe la fréquence affectée par le saut.

De manière théorique, la proportion de faux positifs sera, pour les sauts isolés et simultanés d'amplitudes différentes et cela peu importe le nombre de fréquences disponibles, nulle.

En pratique

Afin de déterminer les performances réelles des différentes méthodes de détection des sauts, nous nous sommes référés au même exemple tout au long du travail : celui du jour 134 de 2014 à la station Japonaise GMSD, pour lequel différents sauts de cycles ont été insérés manuellement à des époques particulières.

Aussi bien en bi-, en tri-, qu'en quadri-fréquences, tous les sauts insérés ont été détectés. L'apport des méthodes utilisant un plus grand nombre de fréquence se situera au niveau des faux positifs. En effet, alors que ceux-ci ne sont, dans aucun des cas, censés être présents, la détection à l'aide de combinaison bi-fréquence envoie comme résultat des faux positifs dans la moitié des combinaisons qu'il est possible de construire (celles utilisant la fréquence E1). Par contre, seule une des quatre méthodes de détection tri-fréquence détecte un faux positif. Lors de l'utilisation de la méthode de détection quadri-fréquence, aucun faux positif ne sera détecté.

9.1.2 Sauts simultanés de mêmes amplitudes

Dans le cas des sauts simultanés de même amplitudes, peu importe le nombre de fréquences disponibles, c'est la combinaison bi-fréquence *Geometry-Free* qui sera utilisée. Pour les combinaisons sans E1, deux cas de configuration des seuils ont été présentés. Le premier n'utilise qu'un seuil relatif élevé, alors que le second utilise un seuil relatif plus faible couplé à un seuil absolu.

En théorie

Afin de déterminer les performances théoriques des différentes méthodes de détections des sauts de cycles, nous nous sommes à nouveau basés sur une étude statistique.

Pour les combinaisons utilisant la fréquence E1, les performances théoriques sont de 100 %.

Pour les combinaisons sans E1, par contre, les performances ne sont pas idéales :

- En utilisant la première configuration de seuils, aucun faux positif ne devrait apparaître. En utilisant la seconde, par contre, une faible proportion (moins d'1%) des sauts détectés pourrait être des faux positifs¹
- Au contraire, la proportion de faux négatifs sera plus faible dans le second cas de seuils que dans le premier. Ainsi, des sauts simultanés de plus petites amplitudes seront détectables en utilisant la seconde configuration de seuil.

Lorsque trois fréquences sont disponibles, le recoupement (de type "ET" ou "OU") entre les combinaisons bi-fréquences qu'il est possible de construire permettra d'augmenter les performances de la détection des sauts simultanés de mêmes amplitudes. Les performances théoriques seront maximales dans le cas d'une détection quadri-fréquence, puisque les 100% d'efficacité seront atteints.

En pratique

La tendance à une augmentation des performances avec l'augmentation du nombre de fréquences disponibles se confirmera lors des tests sur données réelles, même si la différence entre performances pratiques et théoriques sera variable selon les cas.

9.1.3 Remarques générales

Les différences observées entre les performances pratiques et théoriques sont principalement dues à deux éléments :

- *L'utilisation de précisions globales* (fournies par l'ESA) dans le calcul des performances théoriques (ainsi que celui des seuils) ne permet de pas prendre en compte les variabilités locales de précision des mesures. Celles-ci sont donc en réalité tantôt surévaluées, tantôt sous-évaluées.
- *L'activité ionosphérique* a les influences suivantes :
 - Dégradation de la qualité des données et difficultés du *tracking* au niveau du récepteur, rendant les mesures en sortie plus bruitées (augmentation du SNR)
 - Délai ionosphérique sur les combinaisons *Geometry-Free* augmentant drastiquement la variabilité de ces dernières. Cela empêche dans certains cas de détecter des sauts simultanés de faibles amplitudes.

9.1.4 Validation

La validation a montré une dégradation des performances de la méthode de détection quadri-fréquence lorsque cette dernière est soumise à une forte activité ionosphérique.

1. A l'exception de la combinaison *E5a-E5b*.

Les principaux problèmes rencontrés sont les suivants :

- sauts simultanés et sur différents satellites
- faux positifs et faux négatifs sur la combinaison *Geometry-Free*
- faux positifs sur la combinaison de *Simsky*

Il est également intéressant de rappeler que, pour l'ensemble du set de validation, à aucune époque le seuil statistique des combinaisons de *Simsky* ne dépasse l'effet que le plus petit saut d'un cycle aurait sur la combinaison. Cela signifie que tous les sauts isolés ou simultanés de mêmes amplitudes y seront détectés, y compris lors d'évènements ionosphériques extrêmes. Quant au seuil statistique de la combinaison *Geometry-Free*, il peut ou non, selon l'activité ionosphérique, rendre la détection des sauts simultanés de mêmes amplitudes indétectables. De manière globale, les sauts simultanés de 5 cycles sont, à quelques exceptions près, détectables même en zone équatoriale.

9.2 Limitations et améliorations

A l'heure actuelle, toutes les méthodes de détection des sauts de cycle se heurtent à des problèmes d'efficacité lors de forte activité ionosphérique. Notre méthode de détection quadri-fréquence, comme l'ont montré les exemples au cours du travail ainsi que la validation, est plus résistante à l'ionosphère que ses équivalents bi- et tri-fréquences. Néanmoins, elle présente elle aussi des limites lorsqu'elle est confrontée à l'ionosphère équatoriale. Si ce travail a contribué à repousser les limites de la détection des sauts de cycles en ionosphère active, notamment par la définition d'une méthode de détection quadri-fréquence, de nombreuses investigations doivent encore être menées à ce sujet et devraient être une future piste de recherche à privilégier.

Dans le cas précis de notre méthode de détection quadri-fréquence, une amélioration pourrait être envisagée afin d'éviter de fausses détections de sauts de cycles sur les combinaisons de *Simsky*. Pour cela, plusieurs pistes sont proposées : le seuil statistique pourrait être augmenté à 4σ , ou des passages répétés dans la boucle de la seconde étape de la méthode de détection hybride, la comparaison de moyenne, pourraient être effectués.

Concernant la détection des sauts simultanés de mêmes amplitudes, il est également clair qu'une meilleure résistance en ionosphère active serait souhaitable. Il faudrait pour cela une combinaison présentant d'une part les qualités nécessaires pour être utilisée dans les méthodes de détections de sauts (*geometry-free*, entre autres), et qui serait d'autre part *ionosphere-free*, tout en étant sensible aux sauts simultanés de mêmes amplitudes.

Dans un tout autre ordre d'idées, cette méthode quadri-fréquence pourrait également être adaptée pour le temps réel, ainsi que, pourquoi pas, à des récepteurs en mouvement.

Un autre grand projet serait finalement d'ajouter à cette méthode de détection une méthode de correction efficace, elle-aussi, en ionosphère active.

Chapitre 10

Applications et perspectives

Ce travail, en plus de démontrer l'avantage croissant de l'utilisation d'un plus grand nombre de fréquences pour la détection des sauts de cycle, propose une méthode de détection quadri-fréquence, ce qui n'a jamais été abordé dans la littérature jusqu'à présent. Cette méthode peut être efficacement utilisée en ionosphère active, même si certains problèmes subsistent lors de périodes où l'activité ionosphérique est extrême.

En plus d'être directement exploitable dans les domaines industriels et de la recherche, ce travail ouvre, dans son ensemble, la voie à de nouvelles perspectives de recherches.

10.1 Applications

Les applications de ce travail et de l'algorithme qui y est développé sont multiples. Parmi celles-ci, les applications industrielles et les applications dans la recherche peuvent être distinguées.

10.1.1 Industrie

Tout constructeur de récepteurs cherche à produire des données de la meilleure qualité possible pour son utilisateur. Les sauts de cycles, affectant les données, sont un frein à cette qualité.

Si, d'une part, il est possible de limiter les pertes de signal par l'utilisation de meilleures techniques de corrélation lors du *tracking* du satellite, il n'empêche que certaines discontinuités ne pourront être évitées. Dès lors, il est crucial de disposer d'une méthode de détection efficace des sauts résiduels.

Les améliorations que nous proposons peuvent se situer à plusieurs niveaux : à l'intérieur même d'un récepteur "classique" (en amont de la génération des RINEX¹, dans des

1. le RINEX (*Receiver INdependent EXchange Format*) est un format d'échange de données GNSS brutes indépendant du récepteur. Ce standard est largement utilisé pour les données à la sortie du *Navigation Processor* du récepteur.

récepteurs *software*, ou encore dans des programmes de pré-traitement de données brutes.

Tout d'abord, il est théoriquement possible d'intégrer des algorithmes de détection des sauts de cycles dans les *Receiver Autonomous Integrity Monitoring* (RAIM). Des études approfondies doivent encore être menées, même si la faisabilité d'une telle pratique a été démontrée [Kirkko-Jaakkola et al., 2009]. L'utilisation de notre méthode de détection quadri-fréquence des sauts en amont de la génération des RINEX permettrait par exemple d'insérer des *flags* aux époques détectées comme potentiellement porteuses de sauts de cycles², ce qui permettrait à l'utilisateur de s'adapter. Si une méthode de correction des sauts peut être associée à notre détection, il serait alors même envisageable de corriger directement ces sauts et de fournir à l'utilisateur des fichiers RINEX exempts de sauts de cycle. Ceci reste bien sûr une vision à très long terme, et de nombreuses avancées technologiques nous séparent pour l'instant de ce cas idéal.

Si les récepteurs *software* existent depuis le début des GNSS, on a récemment pu observer une utilisation croissante de ces derniers. Couplés à un simple "récepteur" hardware, ne contenant que la partie *RF-Front End*, ils permettent de réduire les coûts de manière drastique, d'où leur popularité. Toute la partie d'acquisition du signal et du *tracking* s'effectue alors numériquement. Il serait alors possible, à nouveau, en amont de la génération des RINEX, d'intégrer des algorithmes de détection des sauts de cycles, l'équivalent *software* de ce que nous proposons dans le paragraphe précédent.

En plus de récepteurs *software*, il existe également des programmes proposant un pré-traitement des données issues d'un récepteur classique, fournies par exemple en format RINEX³. Le programme MatLab développé dans le cadre de ce mémoire s'inscrit dans cette philosophie de post-traitement de données brutes issues du récepteur. Si notre solution est adaptée à un format un peu particulier, le RTP⁴, il est tout à fait envisageable de l'adapter pour des RINEX. Notre algorithme pourrait alors être présenté comme une nouvelle fonctionnalité dans les programmes de pré-traitement de données Galileo (ne disposant pas de méthode de détection des sauts), ou permettrait une amélioration des méthodes préexistantes.

10.1.2 Recherche

Dans le domaine de la recherche, cet algorithme peut être inséré dans les routines de pré-traitement des données des chercheurs, de manière plus individuelle. Les principes de l'algorithme et ses performances étant discutés ici, il pourra être aisément re-codé, ou bien sûr utilisé tel quel (dans le cas où l'utilisateur utilise également le format RTP). Selon ses priorités, il aura également le loisir de modifier les seuils à sa guise afin d'obtenir une méthode correspondant au maximum à ses attentes.

2. Cela nécessiterait cependant l'insertion d'un champ supplémentaire dans les normes, par exemple RINEX, et nous pouvons imaginer que les difficultés engendrées et le temps nécessaire pour obtenir une modification de manière globale des normes mondiales serait un énorme frein à une telle méthode.

3. gLab, développé par l'ESA, en est un exemple. Notons qu'il inclut la possibilité de traitement de données en plus de leur pré-traitement.

4. Développé à l'université de Liège, afin de faciliter le traitement et l'analyse des données.

10.2 Perspectives

La recherche effectuée dans le cadre de ce mémoire ouvre également la voie à de nouvelles pistes à investiguer.

10.2.1 Fréquence d'échantillonnage

Dans le cadre de ce mémoire, seules des données échantillonnées à 30 secondes ont été utilisées. Il serait extrêmement intéressant de voir quelle serait l'influence de l'utilisation de données 1 seconde sur ces méthodes de détection de sauts de cycles tri- et quadri-fréquence, particulièrement du point de vue ionosphérique.

Point de vue ionosphérique

Si le taux d'échantillonnage est plus élevé, la variation des différentes quantités-tests utilisées due à l'ionosphère sera plus petite, alors que la variation liée à un saut de cycle restera la même. Il en va de même pour le multi-trajet. Une plus faible variation ionosphérique entre époques d'analyse permettra donc d'avoir une combinaison *Geometry-Free* moins variable, et donc une détection des sauts de cycles beaucoup plus efficace.

Cependant, les variations du TEC ne sont pas pour autant linéaires (par exemple dans un intervalle de 30 secondes), et cela particulièrement en cas de phénomènes ionosphériques tels que les scintillations ionosphériques, puisque ces dernières font varier les signaux électromagnétiques en amplitude et en phase [Warnant, 2014]. Si ces variations sont rapides et de grande amplitude⁵, le gradient du TEC à une échelle temporelle plus fine (telle que 1 seconde) pourrait être trop élevé pour apporter une amélioration décisive des méthodes de détections.

Point de vue traitement pratique

Réduire l'échantillonnage pourrait créer des problèmes du point de vue de la rapidité et de l'efficacité générale du programme.

En effet, le passage de 30 à 1 seconde augmenterait de 30 fois le nombre de données à traiter pour une même journée. Dans la version actuelle du programme MatLab, l'ensemble de données est extrait et stocké temporairement durant toute la durée de l'analyse, cela évite de "scanner" le fichier à plusieurs reprises pour les différentes passes. Une telle pratique fut possible, d'une part parce que l'échantillonnage est peu élevé, et d'autre part parce que le nombre de satellites Galileo, dans les données analysées (2014), s'élèvent à quatre au maximum. Le nombre de données était donc relativement faible, en comparaison avec des données 1 seconde ou avec le futur nombre d'observations lorsque la constellation Galileo sera plus développée.

Il serait donc bon, comme amélioration future, de procéder de manière différente afin

5. Pour des considérations de ce type, nous renvoyons au mémoire de Romain Neuville.

d'éviter de saturer la mémoire. Pour rappel, dans la méthode hybride :

- Le premier passage consiste à détecter les sauts potentiels par rapport aux données présentes dans une fenêtre de 20 époques, avant et après l'époque considérée. Cette dernière pourrait donc être effectuée en un seul passage durant lequel 40 données seraient analysées à la fois, le passage à l'époque d'analyse suivante consistant à éliminer la mesure la plus lointaine et à en extraire une nouvelle.
- Le second passage nécessite de posséder tous les résultats de la première étape, puisque le nombre de données dans la fenêtre d'analyse sera adaptée à une éventuelle présence de sauts potentiels voisins.

Si on procède par fenêtre de 40 époques, il sera donc nécessaire d'extraire les données à deux reprises, puisque deux passages au minimum sont nécessaires.

Une autre solution, plus facile à mettre en place, pourrait être envisageable : celle de stocker en une fois les données provenant d'un passage d'un satellite et d'y effectuer successivement les deux passages hybrides, avant de traiter le satellite suivant. Les données ne seraient alors extraites qu'à une seule reprise, ce qui diminuerait le temps de traitement.

Lien entre résolution temporelle, perte du signal, et sauts de cycles

L'utilisation d'une fréquence d'échantillonnage plus élevée pourrait également avoir un impact quant au nombre de sauts de cycles détectés.

En effet, si on revient sur l'extraction primaire des données, on avait décidé de déterminer une nouvelle période d'observation, avec sa propre ambiguïté, à partir du moment où une époque était manquante. Des sauts de cycles étaient par contre à détecter si la perte de signal est comprise entre deux époques d'observations. Plus la fréquence d'échantillonnage est élevée, plus l'intervalle entre deux époques d'observation est faible. Dès lors, la probabilité d'avoir une perte de signal entre deux époques d'observation devrait être plus faible, et la tendance devrait plutôt être à la détermination de nouvelles époques d'observations, limitant ainsi la proportion de sauts de cycles tels que nous les avons considérés dans ce travail.

Notons tout de même que, en cas d'ionosphère active, comme nous l'avons vu, il arrive que le récepteur perde et ré-acquière le signal à de nombreuses reprises en très peu de temps. De ce point de vue, une résolution temporelle plus fine pourrait accroître le nombre de pertes de signal considérées, et donc de sauts. En effet, en utilisant un échantillonnage de 30 secondes, comme nous l'avons fait, peu importe le nombre de pertes de signal et de ré-acquisitions opérées durant cet intervalle de 30 secondes, un seul saut de cycle était identifié de notre point de vue. Au contraire, avec une fréquence d'échantillonnage plus élevée, les différents sauts intermédiaires auraient été identifiés.

De manière générale, l'utilisation d'une fréquence d'échantillonnage plus faible pourrait permettre de caractériser la longueur des différentes pertes de signal. En effet, avec la résolution temporelle de 30 secondes que nous utilisons, les pertes de signal sont rarement assez longues pour induire la détermination d'une nouvelle période d'observation⁶. Par

6. Sauf cas extrême, comme le DOY 22/2014 à NKLK.

contre, avec l'aide de données 1 seconde, il serait peut-être possible de caractériser la durée des pertes du signal au sein du passage d'un même satellite, et, pourquoi pas, tenter de formuler une relation plus claire entre la valeur du saut et la durée de la perte de signal, par des analyses à différentes échelles temporelles⁷.

10.2.2 Exploitation de nouvelles quantités-tests

D'autres quantités-tests, développées assez récemment, vaudraient sans doute la peine d'être investiguées dans le cadre de la détection des sauts de cycles.

Combinaison quadri-fréquence

A l'heure actuelle, il n'existe pas dans la littérature de combinaison quadri-fréquence qui présenterait les caractéristiques permettant une utilisation dans une méthode de détection des sauts de cycles⁸.

L'idéal pour la détection des sauts de cycles serait d'avoir une combinaison qui serait à la fois *ionosphere-free* et *geometry-free*, et à la fois capable de mettre en évidence tous types de sauts de cycles (isolé ou simultanés, d'amplitudes similaires ou différentes), le tout en étant peu bruitée. Une telle combinaison n'existe pas à l'heure actuelle car il est extrêmement difficile de regrouper toutes ces caractéristiques au sein d'une même combinaison.

Si un souhait pourrait être formulé quant à la future recherche de combinaisons quadri-fréquence, il serait celui-là : permettre de détecter les sauts simultanés étant de mêmes amplitudes sur toutes les fréquences, tout en n'étant pas affecté par les variations ionosphériques. C'est en effet cet aspect qui pose, à l'heure actuelle, un des plus gros problèmes dans le domaine de la détection des sauts de cycles.

Utilisation du Doppler

Dans les données dont nous disposons⁹, le Doppler n'était pas présent par défaut. Afin de rester le plus général possible, nous avons préféré continuer à travailler en n'utilisant que des mesures de phases (et éventuellement, de code). Cela donne à notre méthode l'avantage de ne nécessiter, pour la détection des époques problématiques, que des observables dans lesquelles ces problèmes pourraient potentiellement survenir, c'est à dire les mesures de phases¹⁰.

L'utilisation de la mesure Doppler pourrait tout de même se révéler extrêmement utile dans le cadre de la détection des sauts de cycles. En effet, ce dernier ne correspondant

7. Il nous semble cependant que cela nécessiterait un échantillonnage à une plus fine échelle temporelle que celle d'une seconde.

8. Pour des exemples de combinaisons quadri-fréquences qu'il est possible de construire avec Galileo, nous renvoyons à [Li and Shen, 2008].

9. A l'origine, des fichiers de données RINEX.

10. Notons que dans le cas de notre détection bi-fréquence, il sera nécessaire d'utiliser les mesures de codes en plus des mesures de phases.

qu'à une mesure de vitesse instantanée, elle ne nécessite pas de compteur de cycles et ne peut donc pas, par définition, être affectée de sauts. Cette mesure est, comme toute observable, affectée d'erreurs ionosphériques, troposphériques, de multi-trajet, de délais hardware et d'erreurs d'horloges.

En comparant le Doppler et les mesures de phases, il serait possible de mettre en évidence les sauts de cycles, et, peut-être, s'il est possible de n'utiliser qu'une seule fréquence à la fois, de déterminer directement la valeur du saut.

Pour plus d'informations concernant la détection des sauts à l'aide des mesures Doppler, nous renvoyons à [Ren et al., 2012] .

10.2.3 Correction

Une fois les sauts détectés à une époque donnée, il peut être intéressant de les corriger, afin d'éviter une discontinuité dans les observations. L'importance d'une telle étape a été discutée dans l'introduction.

Plusieurs solutions sont proposées dans la littérature, selon le nombre de fréquences disponibles.

Lorsque la correction est *bi-fréquence*, Cai propose d'utiliser les valeurs des sauts mesurés dans les combinaisons Hatch-Wübbena-Meblourne et Geometry-Free (dans sa version PIR différenciée au deuxième ordre) afin de déterminer l'amplitude des sauts sur chaque fréquence [Cai et al., 2013]. Le système suivant est donc construit :

$$\begin{cases} a = \Delta N_{f_1} - \Delta N_{f_2} \\ b = \Delta N_{f_1} - \frac{\lambda_{f_2}}{\lambda_{f_1}} \Delta N_{f_2} \end{cases} \quad (10.1)$$

Les principaux problèmes rencontrés dans cette approche sont, à nouveau, liés à l'ionosphère :

- La détection des sauts simultanés de petites amplitudes dépendra de la combinaison PIR, sensible à l'ionosphère¹¹.
- Plus l'ionosphère sera active, plus la combinaison PIR sera bruitée, et donc plus la valeur du saut pourra s'éloigner de la valeur réelle et ainsi mener à une mauvaise détermination de l'amplitude.

Lorsque *trois fréquences* sont disponibles, Zhao propose une méthode qui utilise le recoupement de trois combinaisons de "signaux virtuels"¹² ([Feng, 2008]) ainsi qu'une Geometry-Free afin de mettre en évidence la présence des sauts et d'avoir la possibilité de corriger ceux-ci [Zhao et al., 2014]. Cette méthode de correction tri-fréquence a été brièvement abordée dans le cadre de ce mémoire et améliorée pour une détection en post-traitement¹³. Cependant, ces travaux ne sont pas discutés dans notre manuscrit.

11. Même principe que la *Geometry-Free*.

12. Les "signaux virtuels" décrits dans [Feng, 2008] correspondent à des combinaisons bi- et tri-fréquences de phases.

13. Elle était à la base en temps réel.

Si elle permet globalement de détecter les sauts et de les corriger, elle reste néanmoins sensible à l'ionosphère. En effet, comme dans notre méthode de détection quadri-fréquence, la méthode développée par Zhao utilise une combinaison *Geometry-Free* (avec le même seuil statistique de 4σ). Cette dernière sert d'une part à détecter les sauts simultanés de même amplitude, et d'autre part à corriger les effets ionosphériques sur une des combinaisons de "signaux virtuels". Le succès de la détermination de la (des) fréquences concernées ainsi que la valeur des sauts dépend donc dans tous les cas de cette combinaison *Geometry-Free*.

D'autres méthodes de correction des sauts tri-fréquences ont également été développées, mais toutes doivent à un moment où à un autre faire appel à une combinaison affectée par les délais ionosphériques de premier ordre.

C'est pourquoi, à l'heure actuelle, il reste impossible de corriger avec certitude les sauts en ionosphère active. Dans le cadre de futurs travaux, il nous semble que c'est sur ce problème qu'il conviendrait de se pencher.

10.2.4 Validation tri-fréquence pour d'autres constellations

Si, dans le cadre de ce travail, une étude théorique a été brièvement réalisée pour les autres systèmes de positionnement globaux, il serait intéressant d'étudier d'éventuels ajustements de seuils, adaptés selon les particularités fréquentielles (fréquences centrales et qualité des mesures) des constellations. Si des méthodes de détection tout aussi efficaces que pour Galileo peuvent être effectivement développées pour d'autres constellations et validées sur des données réelles, cela ouvre alors la porte à des comparaisons de présence de sauts de cycles entre systèmes : un des systèmes de positionnement est-il plus souvent sujet aux sauts de cycles qu'un autre ? Parmi chaque système, une fréquence est-elle plus souvent touchée par des pertes de signal qu'une autre¹⁴ ? Cela pourrait-il être dû à un type de modulation en particulier, dont le *tracking* (*DSP*) est plus aisé, ce qui limiterait alors l'apparition de pertes de signal ?

14. Si la méthode est améliorée afin de détecter la ou les fréquences concernées par le saut.

Annexe A

Mauvaise configuration de la zone d'acquisition de données

Lors des tests effectués afin d'évaluer la validité de nos différentes méthodes bi-, tri-, et quadri-fréquences, nous nous sommes notamment penchés sur les données de la station japonaise GMSD.

Lors de l'analyse de ces données, nous avons constaté quelque chose d'anecdotique : tous les dix jours, aux environs de la même époque, pour le même satellite, un saut de cycle est systématiquement détecté (voir FIGURE A.2).

Nous avons donc tenté de comprendre l'origine de ce problème. Il est dû à la configuration des lieux autour de l'antenne de réception. En effet, de nombreux obstacles sont présents et proches de l'antenne, comme l'illustre la FIGURE A.1. La constellation de Galileo se répétant à l'identique tous les dix jours, les signaux provenant d'un même satellite sont, à chaque fois, obstrués par l'un des obstacles.



FIGURE A.1 – Alentours de l'antenne à la station GMSD (Japon) [Source : IGS]

Notons que, pour voir ce saut, aucun masque d'élévation n'a été utilisé : il est en effet situé sous nos 10° traditionnels.

L'exemple ici n'est pas le seul et d'autres cas similaires ont été détectés à GMSD.

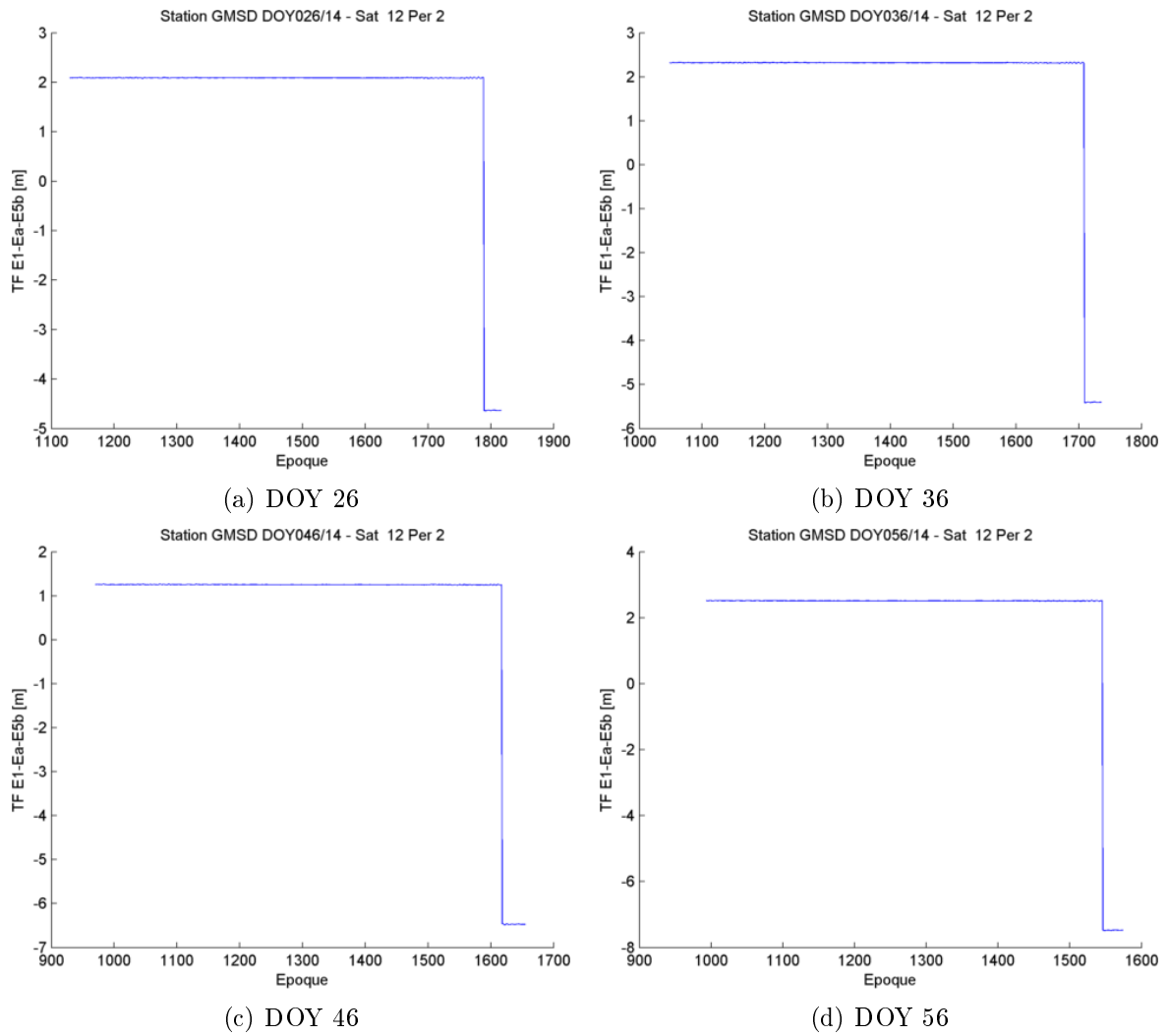


FIGURE A.2 – Station GMSD (Japon) : combinaisons E1-E5a-E5b - satellite 12 - période 2

Annexe B

Loi Normale

Afin de déterminer la probabilité qu'une discontinuité d'une certaine valeur dans une quantité-test soit due à un saut, nous utiliserons la loi Normale et ses propriétés.

Afin d'utiliser cette dernière, il est nécessaire de faire l'hypothèse que nos données, dans la fenêtre d'analyse, suivent une distribution de type Normale. Mathématiquement, nous pourrions considérer que ce soit le cas grâce au théorème central limite, qui énonce que, pour une suite de variables aléatoires indépendantes, alors la variable aléatoire suit une loi Normale(0,1) si le nombre d'échantillon est grand [Springer Texts in Statistics, 2006].

Prenons l'exemple de la combinaison *Hatch-Wübenna-Melbourne* sur E1-E5a. Dans cette quantité-test différenciée, la précision à 1σ est de 0.479 cycles (TABLE 5.1). On considère que dans cette différence temporelle, la moyenne sera nulle. Un saut d'un cycle s'y manifestera sous la forme d'un pic de valeur d'un cycle.

La question est alors de savoir quelle est la probabilité qu'un pic d'une valeur d'un cycle dans cette quantité-test ne soit pas dû au hasard (variabilité de la quantité-test) mais bien à un phénomène externe (saut de cycle) ?

Tout d'abord, il convient de se ramener à une loi Normale standardisée (de moyenne 0 et d'écart-type 1), par l'utilisation de la transformation centrée réduite suivante :

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \tag{B.1}$$

La probabilité qu'une valeur supérieure à 1 cycle soit rencontrée de manière naturelle dans cette quantité-test HWM différenciée E1-E5a est calculée de la manière suivante :

$$\begin{aligned} P(X > 1) &= P\left(\frac{X - \mu}{\sigma} > \frac{1 - 0}{0.479}\right) \\ &= P(Z > 2.09) \\ &= 0.0183 \end{aligned} \tag{B.2}$$

La probabilité qu'une valeur supérieure à 1 cycle soit rencontrée de manière naturelle dans

la combinaison est donc de 1.83 % (consultation de table dans [Lipschutz, 1973]). Si l'on ajoute à cela la probabilité de rencontrer une valeur inférieure à -1 cycle, la probabilité est alors de 3.67 %.

Autrement dit, une valeur supérieure à 1 cycle dans la combinaison HWM différenciée E1-E5a a une probabilité de 96.33 % d'être due à un élément externe. Dans le cas de la combinaison HWM différenciée, un saut de cycle est le seul élément externe qui pourra être considéré.

Annexe C

Validation et performances

DOY	Sauts		Indétection 1 cycle		Indétection 2 cycles		Indétection 5 cycles	
	TF	GF	TF 1/2 [%]	GF 1/2 [%]	TF 1/2 [%]	GF 1/2 [%]	TF 1/2 [%]	GF 1/2 [%]
6	/	1	0	8	0	7	0	0
7	/	2	0	8	0	2	0	0
8	/	2	0	2	0	1	0	0
9	2	/	0	0	0	0	0	0
10	/	/	0	0	0	0	0	0
11	/	/	0	0	0	0	0	0
12	/	/	0	0	0	0	0	0
13	/	3	0	25	0	5	0	0/0.5
14	/	/	0	1	0	0	0	0
15	/	/	0	0	0	0	0	0
16	/	4	0	10	0	5	0	0/0.2
17	/	/	0	0	0	0	0	0
18	/	4	0	5	0	2	0	0
19	1	1	0	1.5	0	0	0	0
20	/	/	0	7.5	0	0	0	0
21	<i>no data</i>		<i>no data</i>		<i>no data</i>		<i>no data</i>	
22	>20	>10	0	7	0	5.5	0	4
23	>20	>10	0	28	0	17	0	6
24	1	/	0	2	0	0	0	0
25	/	2	0	3	0	1.5	0	0.5
26	1	3	0	13.5	0	10	0	7
27	/	1	0	1.5	0	0.5	0	0
28	1	6	0	7.5	0	5	0	0/0.2
29	/	/	0	3	0	1	0	0
30	1	/	0	10	0	5	0	0.2
31	2	/	0	0	0	0	0	0
32	2	/	0	0	0	0	0	0

TABLE C.1 – Validation : DOY 6 à DOY 32

DOY	Sauts TF	Sauts GF	Indétection 1 cycle		Indétection 2 cycles		Indétection 5 cycles	
			TF 1/2 [%]	GF 1/2 [%]	TF 1/2 [%]	GF 1/2 [%]	TF 1/2 [%]	GF 1/2 [%]
175	/	/	0	0	0	0	0	0
176	/	/	0	0	0	0	0	0
177	/	/	0	0	0	0	0	0
178	/	/	0	0	0	0	0	0
179	/	1	0	13.5	0	12	0	1.5/2.5
180	/	/	0	0	0	0	0	0
181	/	/	0	0	0	0	0	0
182	12	5	0	13.5	0	13	0	8.5
183	2	5	0	14	0	8	0	3
184	1	2	0	16	0	14	0	10
185	/	/	0	5	0	0	0	0
186	/	5	0	18	0	14.5	0	0/0.5
187	>20	>10	0	42	0	30	0	18
188	3	3	0	8	0	4.5	0	0.2/0.6
189	7	6	0	14.5	0	11.5	0	10
190	/	8	0	44	0	35	0	20.5/22
191	/	1	0	9.5	0	7	0	2.5
192	3	5	0	3	0	3	0	2
193	/	3	0	1.7	0	1.6	0	0
194	/	3	0	5	0	2.5	0	0
195	3	1	0	10	0	4	0	1
196	1	2	0	7.5	0	5	0	1.5
197	4	3	0	20	0	5	0	0
198	4	1	0	1	0	0	0	0
199	1	2	0	4.5	0	3.5	0	2.5
200	/	5	0	50	0	40	0	6

TABLE C.2 – Validation : DOY 175 à DOY 200

Bibliographie

- [Banville and Langley, 2013] Banville, S. and Langley, R. (2013). Mitigating the impact of ionospheric cycle slips in gnss observations. *Journal of Geodesy*, 87 :179–193.
- [Beutler et al., 2007] Beutler, G., Bock, H., Dach, R., Fridez, P., Gäde, A., Hugentobler, U., Jäggi, A., Meindl, M., Mervart, L., Prange, L., Schaer, S., Springer, T., Urschl, C., and Walser, P. (2007). *Bernese GPS Software Version 5.0*. Astronomical Institute, University of Bern.
- [Blewitt, 1990] Blewitt, G. (1990). An automated editing algorithm for gps data. *Geophysical Research Letter*, 17(3) :199–202.
- [Caelen, 2014] Caelen, F. (2014). Contrôle de la qualité des nouveaux codes gps et galileo. Master’s thesis, Université de Liège.
- [Cai et al., 2013] Cai, C., Liu, Z., Xia, P., and Dai, W. (2013). Cycle slip detection and repair for undifferenced gps observations under high ionospheric activity. *GPS Solutions*, 17(2) :247–260.
- [China Satellite Navigation Office, 2015] China Satellite Navigation Office (2015). Update of beidou navigation satellite system. In *Munich Satellite Navigation Summit 2015*, Munich, Germany.
- [de Lacy et al., 2012] de Lacy, M., Reguzzoni, M., and Sanso, F. (2012). Real-time cycle slip detection in triple-frequency gnss. *GPS Solutions*, 16(3) :353–362.
- [European Global Navigation Satellite Systems Agency, 2015] European Global Navigation Satellite Systems Agency, G. (2015). Gnss market report, issue 4.
- [Feng, 2008] Feng, Y. (2008). Gnss three carrier ambiguity resolution using ionosphere-reduced virtual signals. *Journal of Geodesy*, 82(12) :847–862.
- [Gibbons, 2014] Gibbons, G. (2014). Glonass suffers temporary systemwide outage : Multi-gnss receiver overcomes problem. *Inside GNSS*.
- [GPS World Staff, 2013] GPS World Staff (2013). The halloween storms : When solar events spooked the skies. *GPS World*.
- [Hofmann-Wellenhof et al., 2008] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Wasle, E. (2008). *Global Navigation Satellite Systems : GPS, GLONASS, Galileo & more*. Springer-Wien New York.
- [International Committee on GNSS, 2015] International Committee on GNSS (2015). Principles of compatibility and interoperability and their further definition.
- [Ji et al., 2007] Ji, S., Chen, W., Zhao, C., Ding, X., and Chen, Y. (2007). Single epoch ambiguity resolution for galileo with the car and lambda methods. *GPS Solutions*.

- [Kirkko-Jaakkola et al., 2009] Kirkko-Jaakkola, M., Traugott, J., Odijk, Collin, J., Sachs, G., and Holzapfel, F. (2009). A raim approach to gnss outlier and cycle slip detection using l1 carrier phase time-differences. In *IEEE Workshop on Signal Processing Systems*, pages 273–278.
- [Lee et al., 2003] Lee, H.-K., Jinling, W., and Rizos, C. (2003). Effective cycle slip detection and identification for high precision gps/ins integrated systems. *Journal of Navigation*, 56(3) :475–486.
- [Lee and Park, 2005] Lee, H.-K. and Park, W.-Y. (2005). High accuracy of gps/pseudolite/ins integration : Carrier phase measurement processing issues. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 9(3) :261–270.
- [Li and Shen, 2008] Li, B. and Shen, Y. (2008). *VI Hotine-Marussi Symposium on Theoretical and Computational Geodesy*, chapter Optimal Combination of Galileo Inter-Frequencies. Springer Berlin Heidelberg.
- [Lipschutz, 1973] Lipschutz, S. (1973). *Probabilités : Cours et problèmes*. McGRAW-HILL.
- [Lisi, 2015] Lisi, M. (2015). The world-wide, integrated pnt infrastructure : a look into the future of positioning, navigation, and timing.
- [Litchen, 1995] Litchen, S. (1995). Gipsy-oasis ii : a high precision gps data processing system and general orbit analysis tool. In *Technology 2006, NASA Technology Transfert Conference*, Chicago, Illinois.
- [Liu and Ge, 2003] Liu, J.-n. and Ge, M.-r. (2003). Panda software and its preliminary result of positioning and orbit determination. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 8(2B) :603–609.
- [Liu, 2011] Liu, Z. (2011). A new automated cycle slip detection and repair method for a single dual-frequency gps receiver. *Journal of Geodesy*, 85(3) :171–183.
- [Lonchay, 2009] Lonchay, M. (2009). Précision du positionnement par satellites : influence de la constellation. Master’s thesis, Université de Liège.
- [Lonchay et al., 2011] Lonchay, M., Bidaine, B., and Warnant, R. (2011). An efficient dual and triple frequency preprocessing method for galileo and gps signals. In *Proceedings of the 3rd international colloquium-scientific and fundamentals aspects of the GALILEO programme*, Copenhagen, Denmark.
- [Lu et al., 2014] Lu, Y., Vervisch-Picois, A., and Samama, N. (2014). Cycle slips detection and repair for high accuracy gnss-based indoor positioning. In *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*.
- [Montenbruck et al., 2014] Montenbruck, O., Steigenberger, P., Khachikyan, R., Weber, G., Langley, R., Mervart, L., and Hugentobler, U. (2014). Igs-mgex : Preparing the ground for multi-constellation gnss science. *Inside GNSS*, 9(1) :42–49.
- [Ren et al., 2012] Ren, Zhofeng and Li, L., Zhong, J., and Zhao, M. (2012). Instantaneous cycle-slip detection and repair of gps data based on doppler measurement. *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2(2) :96–101.
- [Sampson, 2015] Sampson, M. (2015). A leap into the unknown? *GPS World*, 26(3) :12.
- [Simsy, 2006] Simsky, A. (2006). Three’s the charm - triple frequency combinations in the future gnss. *Inside GNSS*, 5 :38–41.
- [Springer and Schönemann, 2013] Springer, T. and Schönemann, E. (2013). Gnss analysis in multi-gnss and multi-signal environment. In *American Geophysical Union Meeting*.

- [Springer Texts in Statistics, 2006] Springer Texts in Statistics, editor (2006). *Measure Theory and Probability Theory*, chapter Central Limit Theorems, pages 343–382. Springer New York.
- [Warnant, 1996] Warnant, R. (1996). *Etude du comportement du Contenu Electronique Total et de ses irrégularités dans une région de latitude moyenne. Application aux calculs de positions relatives par le GPS*. PhD thesis, Université Catholique de Louvain.
- [Warnant, 2013] Warnant, R. (2013). Théorie des erreurs. Cours dispensé à l'Université de Liège.
- [Warnant, 2014] Warnant, R. (2014). Gns : théorie et applications. Cours dispensé à l'Université de Liège.
- [Wautelet, 2013] Wautelet, G. (2013). *Characterization of ionospheric irregularities and their influence on high-accuracy positioning with GPS over mid-latitudes*. PhD thesis, Université de Liège.
- [Wu et al., 2009] Wu, Y., Jin, S., Wang, Z., and Liu, J. (2009). Cycle slip detection using multi-frequency gps carrier phase observations : a simulation study. *Advances in Space Research*, 46(2) :144–149.
- [Ye et al., 2015] Ye, S ans Liu, Y., Song, W., Lou, Y., Yi, W., Zhang, R., Jiang, P., and Xiang, Y. (2015). A cycle slip fixing method with gps + glonass observations in real-time kinematic ppp. *GPS Solutions*.
- [Zhang et al., 2014] Zhang, X., Guo, F., and ZHou, P. (2014). Improved precise point positioning in the presence of ionospheric scintillation. *GPS Solutions*.
- [Zhao et al., 2014] Zhao, Q., Sun, B., Dai, Z., Hu, Z., Shi, C., and Liu, J. (2014). Real-time detection and repair of cycle slips in triple-frequency gns measurements. *GPS Solutions*.