

N° d'ordre :

École Doctorale Mathématiques, Sciences de l'Information
et de l'Ingénieur

UdS – INSA – ENGEES

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Strasbourg

Discipline : Génie civil

Spécialité Topographie

par

Majd ALSHAWA

**Contribution à la cartographie mobile :
développement et caractérisation d'un système basé sur un scanner
laser terrestre**

Soutenue publiquement le 8 janvier 2010

Membres du jury

Président : M. Jihad ZALLAT, Professeur des Universités

Rapporteur externe : M. Michel KASSER, Professeur des Universités

Rapporteur externe : M. Fawzi NASHASHIBI, Ingénieur de Recherche

Directeur de thèse : M. Pierre GRUSSENMEYER, Professeur des Universités

Membre invité : Eddie SMIGIEL, Maître de Conférences

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon responsable de doctorat au sein du labo MAP-PAGE, Pierre GRUSSENMEYER, pour le temps qu'il m'a consacré et les conseils qu'il m'a prodigués. Je lui suis particulièrement reconnaissant pour son encadrement de qualité et pour sa disponibilité.

Mes remerciements sincères vont aussi à Eddie SMIGIEL pour tout le temps productif que nous avons passé ensemble, pour sa patience, son écoute, ses suggestions et son aide inestimable pendant la correction de la thèse.

Je remercie les membres du jury de m'avoir fait l'honneur de consacrer de leur temps précieux à la lecture précise du manuscrit.

J'adresse mes remerciements à Daniel LEVY, Bernard GRANDMOUGIN, Christophe CORDIER et Samuel GUILLEMIN pour le coup de main précieux qu'ils m'ont donné. Merci à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'achèvement de cette recherche. Merci pour vos notes constructives, merci pour vos critiques.

Je remercie tout particulièrement Hakim, Chokri et Fayez, mes collègues de recherche, qui ont toujours cru en ce sujet malgré les difficultés rencontrées et qui m'ont toujours soutenu à tous les niveaux.

J'adresse mes remerciements aussi à l'entreprise « Flying-Robots » et notamment aux ingénieurs Henri GEIST et Vincent RIGAU pour l'échange scientifique et technique qui a eu lieu entre nous pendant ce travail.

Je remercie les membres de jury qui me font l'honneur d'évaluer la contribution de ce travail. J'apprécie réellement leur temps consacré à la relecture précise de ce manuscrit.

Merci au gouvernement de la Syrie qui a soutenu financièrement mes études supérieures en France. J'apprécie profondément leur politique d'ouverture scientifique vers le monde entier.

Merci enfin, à ma femme, Abir pour son encouragement et son soutien. Merci de ne m'avoir jamais abandonné. Merci de ta patience sur mon rythme de vie.

**Contribution à la cartographie mobile :
développement et caractérisation d'un système basé
sur un scanner laser terrestre**

Sommaire

1.	Introduction et problématique	1
1.1	Présentation du laboratoire de recherche	1
1.2	Problématique de la thèse	1
1.1.1	Le problème général de la cartographie mobile	1
1.2.1	Système original	2
1.3	Les problèmes liés au système conçu	3
1.3.1	Le problème du scanner.....	3
1.3.2	Le problème du système de navigation par inertie	3
1.4	Enjeu des systèmes laser mobiles à moyenne précision	4
1.5	La place du sujet par rapport aux systèmes et les techniques comparables.....	4
1.5.1	Cartographie mobile où voiture autonome ?	4
1.5.2	Cartographie mobile ou SLAM ?	5
1.5.3	Cartographie mobile ou navigation pédestre ?	6
1.5.4	Temps réel ou post-traitement ?	7
1.6	Plan du mémoire	7
	Partie 1. Etat de l'art.....	9
2.	La cartographie mobile.....	11
2.1	Introduction.....	11
2.2	Exemples de systèmes de cartographie mobile.....	12
2.2.1	LaRA	12
2.2.2	STEREOPOLIS.....	12
2.2.3	Les chariots mobiles	13
2.3	Récapitulatif.....	14
2.4	Note de conclusion.....	16
3.	Le positionnement par GPS.....	19
3.1	Introduction générale du GPS.....	19
3.2	Spécifications du signal GPS	19
3.3	Principe de la mesure de la position par GPS	21
3.4	La mesure de la vitesse par GPS.....	22
3.5	Les sources d'erreur.....	22
3.5.1	Erreur des satellites.....	22
3.5.2	Erreur de propagation atmosphérique.....	23
3.5.3	Multi-trajet.....	23

3.5.4	Erreurs liées aux récepteurs.....	23
3.6	Les critères de précision.....	23
3.7	Les récepteurs GPS	25
3.8	Le GPS à haute sensibilité HSGPS.....	25
3.9	Utilisation d'un GPS bifréquences.....	26
3.10	Le GPS différentiel (DGPS)	27
3.10.1	Les techniques basées sur le code.....	27
3.10.2	Les techniques basées sur la phase	28
3.10.3	Le GPS en mode dynamique	29
3.11	Le RTK	30
3.12	Calcul de l'attitude par GPS	30
3.13	Le GNSS (Global Navigation Satellite System).....	31
4.	La centrale inertielle IMU et la centrale de cap et de verticale AHRS	33
4.1	Les détecteurs de vitesse angulaire	33
4.1.1	MEMS (microsystème électromécanique)	33
4.1.2	L'effet Coriolis	34
4.1.3	Les gyroscopes MEMS à effet Coriolis (gyroscopes à vibration).....	34
4.2	Les détecteurs d'accélération	35
4.2.1	Accéléromètres mécaniques	35
4.2.2	Microaccéléromètre (à semi-conducteur).....	35
4.3	Les capteurs magnétiques	36
4.3.1	Le champ magnétique terrestre.....	36
4.3.2	Détecteurs électroniques du champ terrestre (moyen)	37
4.4	La navigation inertielle/magnétique	37
4.5	La centrale inertielle	38
4.5.1	La mécanisation de l'INS	40
4.6	Système de référence d'orientation et de cap AHRS.....	42
4.7	Les erreurs de navigation inertielle/magnétique	43
4.7.1	Au niveau du capteur.....	43
4.7.1.1	Les erreurs des gyromètres \ accéléromètres	43
4.7.1.1.1	Le biais	44
4.7.1.1.2	L'erreur du facteur d'échelle.....	45
4.7.1.1.3	Le bruit	46
4.7.1.2	Les erreurs des magnétomètres	47

4.7.1.2.1	Le ferromagnétisme dur/doux	47
4.7.2	Le niveau du système	48
4.8	Le modèle d'erreurs pour la centrale inertielle	48
4.9	Le modèle d'erreurs de l'AHRs	49
5.	Le Filtre de Kalman et ses applications à la navigation	51
5.1	Les espaces état-mesures :	51
5.2	Le Filtre de Kalman	52
5.2.1	Le modèle de temps discret	52
5.2.1.1	La boucle prédiction – correction	53
5.2.1.1.1	La prédiction	54
5.2.1.1.2	La correction	54
5.2.2	Filtre de Kalman étendu	54
5.3	L'intégration des capteurs de trajectométrie	56
5.4	Intégration GPS/IMU	57
5.4.1	L'architecture de l'intégration	57
5.4.2	La mise au point du filtre	59
5.4.2.1	Intégration GPS/INS	59
5.4.2.2	Intégration de GPS/IMU/Odomètre	61
5.4.2.3	Intégration GPS/AHRs	61
6.	Le scanner laser terrestre TLS	63
6.1	Classification des systèmes de mesure terrestre par laser	63
6.1.1	Selon la dimensionnalité de la mesure	64
6.1.2	Selon le principe de la mesure de distance	64
6.1.2.1	Par mesure de temps de vol	65
6.1.2.2	Par mesure de différence de phase	65
6.1.3	Selon les dispositifs de déflexion de la lumière laser	66
6.2	La caractéristique d'un scanner Laser terrestre TLS	68
6.3	La caractéristique d'un scanner dynamique terrestre	69
6.4	Les scanners laser aéroportés ALS	71
6.5	Les erreurs du scanner laser terrestre	72
6.5.1	Les erreurs aléatoires instrumentales	72
6.5.2	Les erreurs en relation avec l'objet	73
6.5.3	Erreurs environnementales	74
6.6	La modélisation des erreurs du TLS	74

Partie 2. La conception du système	77
7. Opérations préalables aux missions mobiles.....	79
7.1 Composants du système	79
7.2 Mise en route du système.....	80
7.3 La liaison entre les capteurs	81
7.4 Étalonnage du système.....	83
7.4.1 Validation des résultats.....	88
7.5 La synchronisation entre les composants du système.....	90
7.5.1 Introduction	90
7.5.2 Tests et observations.....	91
7.5.3 Décodage des fichiers binaires	93
7.5.3.1 Lecture en mode texte	93
7.5.3.2 Lecture en mode binaire.....	93
7.5.4 Validation de la méthode	94
7.6 Le géoréférencement direct.....	95
7.7 Analyse préalable des erreurs	97
7.7.1 Cas de la calibration	97
7.7.2 Cas de la synchronisation	98
8. Le traitement de trajectométrie et la production du nuage de points	101
8.1 Traitement de trajectométrie	101
8.1.1 Intégration GPS /AHRS.....	102
8.1.1.1 Reconstitution de la position.....	103
8.1.1.2 La méthode d'ajustage des polynômes	103
8.1.1.3 La modélisation par plusieurs polynômes.....	105
8.1.1.3.1 Découpage du trajet.....	105
8.1.1.3.2 Ajustage contraint des polynômes.....	106
8.1.1.3.3 La modélisation par position-vitesse.....	107
8.1.2 Intégration GPS RTK/HSGPS.....	108
8.1.3 La corrélation position/attitude.....	111
8.2 Le nuage de points	114
8.2.1 La résolution	115
8.2.2 L'angle d'incidence	116
8.2.3 Les points « zéro ».....	117
8.2.4 La séparation en profils	117

8.2.5	Note de conclusion	118
Partie 3.	L'évaluation des résultats	119
9.	Les erreurs du système	121
9.1	Introduction.....	121
9.2	L'exactitude	121
9.2.1	Comparaison du nuage mobile avec un plan cadastrale	121
9.2.2	Comparaison du nuage mobile avec un nuage fixe	122
9.2.3	Comparaison du nuage mobile avec un nuage LiDAR aéroporté	124
9.3	La précision.....	124
9.4	Le modèle des erreurs de l'AHRS	125
9.4.1	Simulation du filtre embarqué sur l'AHRS	125
9.4.1.1	Le filtre GPS/IMU	126
9.4.1.2	Le filtre Mag/IMU	127
9.4.2	Le modèle d'erreur du nuage de points	129
9.4.2.1	Effet des erreurs de position	129
9.4.2.2	Effet des erreurs de l'attitude.....	129
9.4.2.3	Effet des erreurs du scanner.....	130
9.4.3	La matrice de covariance.....	131
9.5	Discussion.....	132
10.	Expérimentation.....	139
10.1	Cas d'étude n° 1	141
10.1.1	Calcul du nuage	141
10.1.2	Le modèle d'erreurs.....	144
10.1.3	L'exactitude.....	148
10.2	Cas d'étude n°2.....	149
10.2.1	Le modèle d'erreurs.....	150
10.2.2	L'exactitude.....	150
10.3	Cas d'étude n°3.....	152
10.4	Note de conclusion.....	156
Partie 4.	Les solutions futures	157
11.	L'apport de la photogrammétrie à la navigation	159
11.1	L'appareil photo utilisé.....	159
11.2	La synchronisation	159
11.3	La calibration	160

11.4	Le géoréférencement direct.....	163
11.5	Calcul des coordonnées approchées.....	164
11.6	L'ajustement de bande simultané.....	166
11.7	L'intégration GPS/AHRS/photo	169
11.8	Expérimentation.....	170
11.8.1	Traitement du trajet	171
11.8.2	Premier calcul du nuage de points.....	172
11.8.3	Le calcul photogrammétrique.....	172
11.8.4	Intégration INS/photo	174
11.8.5	Intégration INS/photo + GPS/AHRS.....	175
11.8.6	Le calcul du nuage par géoréférencement direct.....	176
11.8.7	Validation des résultats.....	178
11.9	Note de conclusion.....	179
12.	Ouverture vers la modélisation.....	181
12.1	La modélisation des données mobiles.....	181
12.1.1	Introduction	181
12.1.2	Traitement des données	181
12.1.2.1	La segmentation	181
12.1.2.2	Extraction des contours.....	183
12.2	Note de conclusion.....	184
13.	Perspectives et conclusion	185
13.1	Perspectives et travaux futurs	185
13.2	Contributions de la thèse à la recherche scientifique.....	186
13.3	Conclusion	187
Annexes	189

Liste des figures

Figure 1.1 Course entre deux voitures autonomes lors du challenge urbain DARPA 2007.....	5
Figure 2.1 Véhicule LaRA aménagé pour des relevés mobiles et télémètre laser couplé avec un capteur œil-de-poisson.....	12
Figure 2.2 a : Vue générale du système Stéréopolis avec les capteurs imageurs. b : centrale inertielle et unités pilotage-stockage. c : odomètre installé sur la roue arrière gauche.	13
Figure 2.3 Chariot Swiss trolley et GRP System FX	14
Figure 2.4 Exemples de systèmes commerciaux (LAND Mark™ et LYNX™).....	16
Figure 3.1 Modulation de phase du signal GPS	20
Figure 3.2 Géométrie non favorable et favorable des satellites	23
Figure 3.3 Interférométrie singulière par GPS vers un seul satellite et double interférométrie vers deux satellites	28
Figure 3.4 Configuration de quatre antennes GPS pour déterminer l'attitude	31
Figure 3.5 Carte du ciel de Strasbourg pour une durée de deux heures (GPS+ GLONASS et GPS seulement).....	32
Figure 4.1 Concept de l'accélération de Coriolis	34
Figure 4.2 Schéma de conception d'accéléromètre mécanique et d'accéléromètre à effet Hall	35
Figure 4.3 Éléments du champ magnétique	36
Figure 4.4 Schéma de principe d'un capteur hybride combinant un gyroscope et un accéléromètre sur la même puce	38
Figure 4.5 Centrale inertielle montée sur cardan	39
Figure 4.6 Configuration d'une centrale inertielle à composants liés : schéma simplifié et montage commercial	40
Figure 4.7 Schéma de la mécanisation de la centrale inertielle dans le repère de navigation	41
Figure 4.8 Schéma fonctionnel des erreurs du gyroscope	44
Figure 4.9 Schéma fonctionnel des erreurs de l'accéléromètre	44
Figure 4.10 Schéma montrant les erreurs de biais, de facteur d'échelle et de résolution d'un gyromètre à fibres optiques.	46
Figure 4.11 Bilan d'erreurs subis par un capteur MEMS (gyromètre, accéléromètre)	47
Figure 5.1 Trois modes du couplage GPS/INS	58
Figure 5.2 Feedback de la solution de Kalman à la mécanisation de l'INS	60
Figure 5.3 Principe d'un odomètre optique à disque d'alternance opaque-transparente	61
Figure 6.1 Scanners non-topographiques.	63
Figure 6.2 Scanners 1D, 2D et 3D de gauche à droite	64
Figure 6.3 Principe de mesure de distance par mesure de temps de vol	65
Figure 6.4 Modulation des signaux laser	66
Figure 6.5 Principe de scanner à deux miroirs oscillants	67
Figure 6.6 Scanner SICK-LMS 200 : le principe du miroir tournant à 2D et la migration en 3D.....	67
Figure 6.7 Principe du scanner à miroir polygonal	68
Figure 6.8 Processus d'acquisition de surface par un scanner	68
Figure 6.9 Cordonnées sphériques du TLS	69
Figure 6.10 Scanner HDL-64E S2 installé sur un système de cartographie mobile.....	69
Figure 6.11 Configuration de l'angle mort du scanner vers le haut choisi par Roadscanner	70
Figure 6.12 Scanners SICK LD-LRS à usage industriel.....	70
Figure 6.13 Principe de la synchronisation active.....	71
Figure 6.14 Scanner LMS-Q560, à retour d'onde complet, embarqué sur le véhicule Fallbeispiel MLS am Auto.	72
Figure 6.15 Effet du bruit et du sautellement au niveau du discriminateur de temps	73
Figure 6.16 Emprise du rayon laser sur deux surfaces écartées qui engendre de multi-retours du signal.....	74
Figure 7.1 Prototype de plateforme mobile.....	80

Figure 7.2 Cadrage de la fenêtre à balayer et deux concordances possibles entre la direction du déplacement et la rotation horizontale.	81
Figure 7.3 Schéma de connexion avec un seul récepteur GPS.....	82
Figure 7.4 Interface de Pointscape™ avec le calcul du stationnement	84
Figure 7.5 Sens de mesure des angles	86
Figure 7.6 Roulis mesuré au 4 ^{ème} test.....	87
Figure 7.7 Nuage de points acquis en mode statique du scanner et calculé à l'aide de GPS/INS.....	90
Figure 7.8 Interface de Wireshark® ; (T_i, T_{i+1}) l'instant de transfert des couples de colonnes $i, i+1$	92
Figure 7.9 Montage de la station inertielle.....	94
Figure 7.10 Accélération mesurées selon l'axe Yb avec une représentation des instants PSH déduits de fichiers du programme « espion ».	95
Figure 7.11 Plateforme mobile et les dénominations essentielles concernant le géoréférencement direct laser.	96
Figure 8.1 Distribution des profils lors de la numérisation à partir d'un trajet non « droit »	101
Figure 8.2 Interpolation nécessaire pour accorder les mesures GPS/AHRS +TLS.....	102
Figure 8.3 Distinction entre la phase mobile et la phase statique de la mission dépendant de la vitesse angulaire ...	103
Figure 8.4 Découpage d'un trajet en trois sous-trajets selon un seuil ds donné	106
Figure 8.5 Schéma de la liaison GPS/AHRS utilisée sur le système	108
Figure 8.6 Trajectographie 2D mesurée par deux récepteurs GPS.....	109
Figure 8.7 Plan 2D des points appariés entre les trajets GPS.....	109
Figure 8.8 Trajet mesuré à haute sensibilité recalé vers les points RTK.....	110
Figure 8.9 Trajet reconstitué par ajustement des courbes à partir des données précédentes	110
Figure 8.10 Principe de navigation à l'estime (corrélation des coordonnées planaires-cap).....	111
Figure 8.11 Bruit du cap calculé par la navigation à l'estimé et filtrage par un filtre passe bas	112
Figure 8.12 Comparaison entre le cap calculé par navigation à l'estime et le cap sortant de l'AHRS440	113
Figure 8.13 Forme finale du lacet qui garantit au mieux la corrélation entre la position et l'attitude.....	114
Figure 8.14 Nuage de point comme numérisé dans PointScape® et corrigé spatialement	115
Figure 8.15 Nuage mobile acquis avec une vitesse de marche ~3km/h	116
Figure 8.16 Deux façades balayées grâce à l'orientation du scanner	116
Figure 8.17 Points zéro et leurs voisins.....	117
Figure 8.18 Nuage de points séparé automatiquement en ensemble de profils.....	118
Figure 9.1 Coupe horizontale dans une superposition CAO- nuage de points.....	122
Figure 9.2 Superposition mobile – fixe et constat de différence de propriétés géométrique entre les nuages.	123
Figure 9.3 Superposition des deux nuages mobile terrestre et LiDAR	124
Figure 9.4 Deux étapes de filtre cascadié suggéré pour simuler le filtre embarqué sur la centrale AHRS-440 de Crossbow®	126
Figure 9.5 Variation de la composante $\delta rpgroulisx$ sur le point étudié.....	133
Figure 9.6 Variation de la composante $\delta rpgroulisy$ sur le point étudié	134
Figure 9.7 Variation de la composante $\delta rpgroulisz$ sur le point étudié.....	134
Figure 9.8 Effet des erreurs de l'attitude sur le semis des points acquis selon les paramètres et les mesures des tableaux 9.3 et 9.4	137
Figure 10.1 Image aérienne du boulevard de la victoire à Strasbourg	139
Figure 10.2 Nuage de points superposé au plan CAO du boulevard de la victoire	140
Figure 10.3 Disponibilité des satellites et GDOP sur une période de 3h	140
Figure 10.4 Points du trajet mesurés par le GPS.....	141
Figure 10.5 Vitesses NDE calculées par la centrale AHRS 440	142
Figure 10.6 Trajet calculé et filtré ramenés au point de départ	143
Figure 10.7 Filtrage du lacet selon le principe de la navigation à l'estime	143

Figure 10.8 Nuage de points résultant.....	144
Figure 10.9 Attitude comme sortie du filtre embarqué sur l’AHRS – attitude simulée par notre filtre GPS/INS.....	144
Figure 10.10 Cap magnétique compensé mesuré par l’AHRS et filtré	145
Figure 10.11 Différence entre l’attitude calculée par le filtre de Kalman embarqué sur le processeur interne de l’AHRS et notre calcul	146
Figure 10.12 Covariances du roulis et du tangage selon notre simulation du filtre embarqué.....	147
Figure 10.13 Covariance du lacet.....	147
Figure 10.14 Cartographie de l’écart-type calculé pour le nuage étudié.....	148
Figure 10.15 Vue latérale de la superposition des nuages LiDAR aéroporté et laser terrestre	149
Figure 10.16 Nuage de point cartographié selon la précision estimée	150
Figure 10.17 Nuage fixe considéré comme référence	151
Figure 10.18 Ecart entre le nuage mobile et le maillage construit à partir du nuage fixe servant de référence	151
Figure 10.19 Test du système mobile apres montage sur une remorque attelée à un vehicule.	152
Figure 10.20 Distinction entre les parties linéaires et les virages à l’aide de la courbe du lacet.....	153
Figure 10.21 Mesures GPS RTK pour l’échantillon étudié. Les points verts présentent le début et la fin du virage et les points rouges présente la jonction entre deux courbes.	153
Figure 10.22 Nuage de points acquis à une vitesse moyenne de 12 km/h.....	154
Figure 10.23 Superposition entre le nuage LiDAR et le nuage mobile terrestre.....	155
Figure 10.24 Exemple des lignes droites à comparer.....	155
Figure 11.1 Comparaison entre le temps réel de prise de vue lu directement sur la photo et le temps d’enregistrement récupéré de Windows®	160
Figure 11.2 Calibration à partir d’un nuage de points dense et d’une photo	161
Figure 11.3 Relation entre les repères de l’appareil photo et de l’AHRS	162
Figure 11.4 Diagramme illustrant les opérations nécessaires pour réaliser la calibration de l’appareil photo dans le système mobile.	163
Figure 11.5 Calcul des coordonnées approchées pour un point mesuré sur la photo	166
Figure 11.6 Reconstitution panoramique à partir des photos acquises en mode mobile	171
Figure 11.7 Coordonnées du trajet total parcouru	171
Figure 11.8 Trajet déduit par un ajustement d’une courbe de neuvième degré.....	172
Figure 11.9 Nuage de points correspondant à l’étendue des photos étudiées	172
Figure 11.10 Comparaison entre le lacet mesuré par l’AHRS et déduit par le calcul de bande.....	174
Figure 11.11 Lacet corrigé par le filtre de Kalman étendu.....	174
Figure 11.12 Forme finale de la courbe du lacet après avoir appliqué le filtre décentralisé de Kalman.	175
Figure 11.13 Variation de l’erreur moyenne quadratique du lacet avec le temps	176
Figure 11.14 Nuage de points obtenu après correction des éléments du trajet par la méthode photogrammétrique..	177
Figure 11.15 Déformation locale corrigée par l’apport de la photogrammétrie	177
Figure 11.16 Logiciel CloudCompare avec la fenêtre de l’histogramme des différences.....	178
Figure 11.17 Histogramme des écarts entre le nuage laser mobile et le nuage issu des traitements photogrammétriques.....	179
Figure 12.1 Exemple d’un nuage segmenté en sous-groupes coplanaires à l’aide de la méthode de RANSAC adaptive.	182
Figure 12.2 Scène segmentée en sous-groupes coplanaires à l’aide de la méthode de RANSAC adaptive.....	182
Figure 12.3 Triangulation de Delaunay 2D et détection des points des contours	183

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Exemples de systèmes de cartographie mobile existants	16
Tableau 5.1 Techniques susceptibles à s'intégrer la navigation inertielle pour des applications extérieurs	56
Tableau 7.1 Calcul d'une attitude moyenne de l'INS en statique	87
Tableau 7.2 Comparaison entre les coordonnées de référence et celles calculées après l'étalonnage.	88
Tableau 7.3 Ecart entre un nuage de points acquis et calculé en mode statique du scanner et par l'intégration de GPS/INS	89
Tableau 9.1 Valeurs correspondantes à la numérisation mobile du point étudié	133
Tableau 9.2 Paramètres de la calibration du système pour le prochain l'exemple	135
Tableau 9.3 Jeu des mesures (attitude – coordonnées polaires du scanner) représentant un échantillon pour l'étude de propagation des erreurs	135
Tableau 9.4 Valeurs calculées des erreurs triaxiales du semis des points	136
Tableau 10.1 Ecart types du calcul d'ajustement du plan moyen	148
Tableau 10.2 Ecart (distance et angle) entre les plans «LiDAR » et «terrestre »	149
Tableau 10.3 Ecart algébriques linéaires et angulaires entre les lignes des arrête extraites du nuage Lidar et laser terrestre mobile.....	156
Tableau 11.1 Ecart des éléments d'orientation externe (AHRS-photo).....	173
Tableau 11.2 Erreur quadratique moyenne de l'estimation des éléments d'orientation externe par la technique d'ajustement de bande	173

Glossaire

AHRS:	Attitude and Heading Reference Systems
ALS:	Aerial Laser Scanning.
DGPS:	Differential Global Positioning System
DMI:	Distance Measurement Instrument
EKF:	Extended Kalman Filter
END:	East-North-Down
ENU:	East-North-Up
FOG:	Fiber Optic Gyroscope
GDOP:	Global Dilution Of Precision
GLONASS:	GLOBAL'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS:	Global Navigation Satellite Systems
GPS:	Global Positioning System
HSGPS:	High Sensitivity Global Positioning System
IMU:	Inertial Measurement Unit.
INS:	Inertial Navigation System
LIDAR:	LIght Detection And Ranging
MAG:	MAGnetometer
MEMS:	Micro-Electro-Mechanical System
NED:	North-East-Down
RANSAC:	RANdom SAmples Consensus
RFID:	Radio Frequency Identification
RLG:	Ring Laser Gyroscope
RTK:	Real Time Kinematic
SLAM:	Simultaneous Localization And Mapping
SIFT:	Local Scale-Invariant Features
TLS:	Terrestrial Laser Scanner
TOW:	Time Of Week
UWB:	Ultra Wide Band
ZUPT:	Zero Velocity Update

1. Introduction et problématique

1.1 Présentation du laboratoire de recherche

Le travail effectué dans cette thèse s'est déroulé au sein du laboratoire MAP-PAGE (Modélisation de l'Architecture et du Paysage- Photogrammétrie Architecturale et GEomatique) de l'INSA (Institut National des Sciences Appliquées) de Strasbourg. Comme son nom l'indique, le laboratoire a pour objectif général la modélisation tridimensionnelle des objets topographiques et architecturaux par photogrammétrie. Depuis 2004, Le LiDAR aéroporté fait partie des axes de recherche du laboratoire. Depuis la fin 2005, le laboratoire possède un scanner laser terrestre (TLS) qui a introduit une dimension nouvelle à la recherche. On peut constater que le laboratoire MAP-PAGE se spécialise désormais dans la lasergrammétrie à côté de la photogrammétrie, sa discipline historique.

Faisant partie de la spécialité topographie à l'INSA de Strasbourg, MAP-PAGE accumule des connaissances profondes en géodésie spatiale par GPS, et des notions sur la navigation inertielle. Ces conditions ont donné naissance à la présente thèse qui aurait pu s'intituler « Modélisations tridimensionnelles par levé topométrique mobile »

1.2 Problématique de la thèse

1.2.1 *Le problème général de la cartographie mobile*

De nos jours, plusieurs technologies et applications se basent sur les données tridimensionnelles géoréférencées. La naissance d'applications comme le SIG 3D, la réalité virtuelle, la réalité augmentée, la conservation du patrimoine culturel et même les jeux vidéo engendrent une demande croissante de données tridimensionnelles. L'approche traditionnelle du relevé de données spatiales repose souvent sur des mesures statiques discrètes pour déterminer la position des détails d'intérêt. On peut constater que la mesure tachéométrique, le balayage laser fixe, ou la photogrammétrie approchée sont loin de fournir des données 3D au niveau de canyons urbain (une ville complète par exemple). D'autre part, la photogrammétrie et le LiDAR aéroportés ne produisent pas des données 3D suffisamment riches en détails pour alimenter les applications déjà mentionnées. Le relevé aéroporté est susceptible de produire des données 2.5D plutôt que 3D complètes. La modélisation des données acquises à partir des techniques aéroportées en zone urbaine se fait en premier lieu pour les toitures et les emprises au sol des bâtiments. Les façades sont un produit secondaire avec un niveau de détail très simple (déduit souvent par projection orthogonale des toitures sur le sol). C'est ainsi que les techniques aéroportées sont insuffisantes, seules, pour produire des modèles 3D urbains.

La solution, récemment apparue, pour acquérir des données 3D en quantité est le relevé depuis des plateformes mobiles. Dans l'approche cinématique inhérente à la cartographie mobile terrestre, des capteurs d'imagerie enregistrent les éléments « visibles » le long d'une voie à partir d'un véhicule mobile, dont la position est fournie par des capteurs de navigation. La numérisation des façades et des routes se fait aussi vite que le déplacement du véhicule. Idéalement, les enregistrements sont utilisés pour former un modèle tridimensionnel continu de la voirie et des façades environnantes pour des applications diverses.

La cartographie mobile est une problématique à deux volets. Le premier est la navigation qui implique la connaissance de la position et de l'orientation de la plateforme mobile à chaque instant du trajet parcouru. La partie navigation de n'importe quel système mobile impacte principalement la précision du produit final du système. Elle consomme, d'ailleurs, la majorité du budget consacré pour l'ensemble du système. Le deuxième volet est l'intégration entre les capteurs imageurs et les capteurs de navigation. Ce problème est connu sous le nom de géoréférencement direct qui implique pour sa part la résolution de sous-problèmes comme la synchronisation et la calibration.

La cartographie mobile est donc, techniquement, l'intégration de deux axes : la navigation et le géoréférencement direct. Pour cela, on se concentre souvent sur tous les sujets qui sont en relation avec la science de navigation et la technique de géoréférencement direct. Une brève introduction du système aidera à situer cette thèse parmi les autres disciplines de recherche.

1.2.2 Système original

L'idée de base de cette thèse est de concevoir un système de cartographie mobile à faible coût avec des applications limitées aux petits et moyens projets. Les composants coûteux d'un tel système existent déjà au sein de plusieurs cabinets de géomètres. Ces composants ne sont pas uniquement limités à la cartographie mobile mais sont utilisables également pour d'autres applications. Ainsi, l'utilisation de la plupart des composants à bord du système ne correspond pas à leur vocation première. Le système doit être totalement géré par une seule personne (topographe en l'occurrence) sans faire appel systématiquement aux spécialistes en génie électronique. Monter et démonter le système doit être suffisamment simple pour ne pas mobiliser les composants exclusivement dans le contexte mobile. Il faut que le système dispose d'un mode d'emploi simple et accessible à une grande variété d'utilisateurs.

Le système dans ses premières versions représente une configuration minimale de tout système de cartographie mobile. Les composants de départ du système évoquent, en partie, la vraie problématique de cette recherche. De façon plus pratique, la présente thèse essaie de répondre à la question du design du système mobile avec deux soucis supplémentaires : l'utilisation d'un scanner laser inadapté, initialement en mode cinématique et la faible précision du cœur de la partie de navigation du système (la centrale à inertie).

Dans la dernière version du système, un appareil photo numérique professionnel rejoint le système comme aide à la navigation pour résoudre le problème de précision évoqué ci-dessus. Bien que ce soit possible, on n'attend pas toutefois dans cette thèse, que le système crée les produits classiques de la reconstitution photogrammétrique (vision stéréo, orthophoto) mais un nuage de points spatialement correct.

1.3 Les problèmes liés au système conçu

1.3.1 Le problème du scanner

Le capteur imageur initial du système est un scanner laser terrestre. Par conséquent, on peut le désigner par « système laser mobile terrestre ». Le scanner est conçu pour être installé sur un trépied fixe afin de capter une image spatiale du milieu environnant ou autrement dit un nuage de points 3D. Le balayage tridimensionnel consiste en des rotations horizontales et verticales du scanner qui aboutissent à balayer un hémisphère autour du point de positionnement du scanner. Dans le cas mobile, on attend généralement que le scanner fasse un profil en 2D et que le déplacement donne la troisième dimension en plaçant les profils successifs à leur position correcte. La rotation horizontale du scanner représente donc un effet indésirable à contourner lors de la mission mobile. D'autres soucis apparaissent également quand on exerce des accélérations sur le scanner qui se transforment en forces pouvant contrer les mouvements du scanner (notamment la rotation horizontale).

Les tâches principales du scanner utilisé dans le contexte de sa vocation, c'est-à-dire en mode statique, ne sont pas en relation avec le temps. Il est ainsi totalement logique de ne trouver aucune signature de temps parmi les données obtenues par le scanner. L'horodatage constitue donc un des axes principaux de ce travail.

Bien que les problèmes mentionnés semblent être propres au scanner utilisé à bord du système, on les présente dans le contexte générique d'intégration d'un capteur imageur quelconque sur une plateforme mobile. Ce problème devient de plus en plus important à cause de la confidentialité industrielle. La plupart des fabricants n'exposent guère le code de pilotage de leurs instruments. Ce travail se concentre donc sur le problème de manque de trousse de développement logiciel (SDK) pour le scanner et la résolution des problèmes techniques qui en résultent.

1.3.2 Le problème du système de navigation par inertie

Les géomètres sont habitués à utiliser des instruments de mesures d'angles (tachéomètre, théodolite ou station totale) ayant une indication de précision simple et donnée souvent par l'étalonnage de l'instrument en usine. Les centrales à inertie de très haut de gamme permettent d'atteindre une précision de mesure angulaire comparable, voire meilleure, à celle d'un tachéomètre; la dérive au fil du temps est tellement faible qu'on peut considérer la précision comme étant constante. Malheureusement, ce n'est pas le cas pour la plupart des centrales inertielle y compris de celle utilisée dans notre système.

Une centrale inertielle de gamme moyenne souffre d'une imprécision non négligeable lors de la mesure des positions et des angles. Cette imprécision touche directement le géoréférencement direct et il en résulte des nuages de points inexploitable ou entachés d'erreurs importantes. De plus, l'imprécision n'est pas constante, mais elle change significativement selon les conditions et l'instant de mesure. Le contrôle du comportement d'une centrale inertielle à faible coût nécessite une connaissance approfondie de la navigation inertielle et des méthodes de compensation et de correction par une autre source d'information spatiale.

Ce travail aborde le problème d'exploitation d'une centrale à inertie à faible précision dans un système mobile laser (dont on attend une précision centimétrique). Des méthodes et des astuces sont présentées afin de contourner le problème initial lié à la gamme de centrale utilisée. Bien que

la faible précision de la centrale inertielle soit améliorée, elle rend l'ensemble du système imprécis.

1.4 Enjeu des systèmes laser mobiles à moyenne précision

La plupart des systèmes de cartographie mobile à moyenne précision aident normalement à collecter les données nécessaires pour la planification territoriale. Manzoni *et al.* (2005) ont résumé les applications probables de ce type système:

- la topologie et le style architectural des façades des bâtiments,
- l'état de la préservation du bord des trottoirs,
- l'existence des panneaux routiers et leurs conditions de visibilité,
- la présence des équipements collectifs et la surveillance de leur efficacité,
- la surveillance du respect de l'environnement (déchets jetés inconvenablement).

D'autres applications à l'échelle nationale (comme l'analyse de la croissance des zones urbaines au détriment des espaces verts ou encore le déboisement) sont possibles à partir de données de cartographie mobile. Néanmoins la méthode la plus adaptée à une telle exigence est la photogrammétrie aéroportée.

L'analyse de la circulation routière, et la densité des voitures garées en milieu urbain sont aussi des applications possibles de la cartographie 3D laser mobile malgré le fait que la photogrammétrie mobile soit préférable dans ce domaine car elle porte plus d'informations sémantiques.

Le système est conçu pour des objectifs plus élevés. Le système doit fournir des données pour la modélisation tridimensionnelle en zone urbaine et périurbaine. En effet, la densité et la précision des données fournies ne permettraient pas de les adopter comme seule source de modélisation. Néanmoins, elles peuvent être complétées par d'autres techniques d'acquisition (la photogrammétrie rapprochée par exemple) pour réaliser des modèles urbains 3D précis et détaillés. Les données laser sont elles mêmes susceptibles de produire des modèles urbains 3D valables si elles ont traitées par des méthodes semi-automatiques à condition d'intégrer la connaissance architecturale afin de compenser le manque de précision ou de densité.

1.5 La place du sujet par rapport aux systèmes et les techniques comparables

Le système conçu fait partie des systèmes de cartographie mobile laser en post-traitement. Néanmoins, il peut partager quelques concepts avec des disciplines voisines, soit d'un point de vue de sa forme ou de sa conception. Les prochains paragraphes comparent la cartographie mobile réalisée par le système conçu au laboratoire MAP-PAGE avec d'autres techniques brièvement introduites.

1.5.1 Cartographie mobile où voiture autonome ?

Le besoin des personnes handicapées ou âgées de pouvoir conduire, sans le moindre risque, a entraîné le développement des voitures autonomes. Les voitures robots sont des véhicules qui avancent tout seul, qui trouvent leur chemin grâce à leur calculateur de bord, qui ralentissent pour laisser passer les piétons, qui évitent les embouteillages, etc.

En 2007, le concours DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) a été lancé dans sa version urbaine. Le défi est de parcourir un chemin de 96 km en ville (figure 1.1) pendant moins

de 6h doté d'un prix de 2 millions d'euros. Un tel budget a encouragé plusieurs laboratoires de recherche à s'engager dans ce domaine.



Figure 1.1 Course entre deux voitures autonomes lors du challenge urbain DARPA 2007

La cartographie mobile et l'autonomie des véhicules partagent les mêmes notions de localisation et de cartographie mais d'un point de vue complètement différent. La cartographie mobile dépend du positionnement «absolu aveugle» par fusion de données GPS, inertielles et odométriques pour calculer les caractéristiques instantanées et passées de la trajectoire du véhicule (position absolue, orientation, vitesse, accélération). Ceci permet par la suite de numériser l'entourage du véhicule. En revanche, les voitures autonomes analysent les données des capteurs (photo, vidéo, laser, etc.) numérisant l'entourage pour calculer les composantes du trajet aux instants présents et futurs. Les véhicules autonomes utilisent donc le positionnement « relatif proche ».

La différence de concept entre le guidage et la cartographie mobile se retrouve dans les calculs correspondants. Bien que les deux systèmes utilisent les mêmes équations, ils permutent les variables et les inconnues. On résout quasiment le même système à la fois pour les composantes du trajet (cas du guidage) et à la fois pour les coordonnées de l'entourage (cas de cartographie mobile). Les notions de synchronisation, d'interpolation et de prédiction restent les mêmes dans les deux cas.

1.5.2 Cartographie mobile ou SLAM ?

Le SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) est la terminologie anglaise pour la localisation et la cartographie simultanées, une technique largement utilisée par la robotique mobile. Elle met en œuvre des capteurs extéroceptifs (télémètre laser 2D ou 3D, camera, banc stéréo, camera panoramique) pour améliorer les éléments du trajet du robot acquis par des capteurs proprioceptifs (odométrie, centrale, inertielle, GPS), normalement lorsque le niveau de précision est faible. Le principe de cette technique est de détecter quelques entités géométriques repérées dans l'entourage du robot dans deux poses successives et d'en déduire le changement de pose ayant eu lieu. Ces repères, supposés être fixes, s'appelant « amers », participent au calcul de position et d'attitude. La localisation se fera simplement en utilisant les amers pour trouver la position et l'attitude de la plateforme mobile, lorsque la cartographie réutilise ces données pour calculer les coordonnées de l'entourage en même temps. Le problème générique du SLAM est donc un problème d'estimation conjointe des positions du robot (localisation) et des éléments de

l'environnement (cartographie). On peut considérer le SLAM comme une combinaison de la cartographie mobile et du guidage automatique expliqué ci-dessus.

La technique de SLAM est presque indispensable pour la cartographie de l'intérieur et des routes couvertes. Elle est utilisée largement aussi pour constituer des grilles d'occupation.

La correspondance fonctionnelle entre la notion de cartographie mobile et celle de SLAM ne facilite guère la distinction entre elles. Beaucoup de plateformes mobiles sont équipées de capteurs extéroceptifs pour assister la navigation. Néanmoins le terme de SLAM reste propre au domaine de la robotique. Finalement, l'investigation dans les capteurs de navigation épargne le coût élevé du calcul exigé par le SLAM (choix classique de la cartographie mobile). En revanche, l'installation des calculateurs performants au niveau de la fusion des données permet d'économiser beaucoup lors de la conception du système (choix classique de robotique).

Le système conçu dans cette thèse n'utilise pas, a priori, la rétroaction de ses capteurs externes pour pouvoir améliorer les composantes du trajet. Néanmoins il est possible d'intégrer une telle idée dans les futures versions.

1.5.3 Cartographie mobile ou navigation pédestre ?

En navigation pédestre, on cherche à déterminer les six degrés de liberté (position et attitude) pour une personne se déplaçant à la vitesse de marche (malvoyants, pompiers...etc.). Destinée au grand public, la navigation pédestre utilise en général des dispositifs à faible coût (notamment les centrales inertielles). Elle utilise non seulement les données des capteurs de position et d'attitude pour localiser la personne, mais encore un modèle de caractéristiques de la marche. Le pas humain passe normalement par deux phases, le positionnement et l'oscillation. Deux positionnements successifs déterminent la longueur de pas et l'azimut se détermine pendant l'oscillation. Il faut donc, au moins, une centrale à inertie pour suivre les mouvements d'un pied.

La navigation pédestre utilise souvent plus d'une centrale à inertie à divers emplacements du corps humain (pied, cheville, cuisse, poitrine...etc.) pour trouver la typologie de la marche. La précision attendue d'une configuration utilisant deux centrales inertielles MEMS ne dépasse pas 2m ce qui est satisfaisant pour localiser une personne dans un couloir de bâtiment.

Un couplage avec le GPS est possible pour le cas d'une personne qui se déplace à l'extérieur ou qui entre et sort d'un bâtiment souvent (cas des pompiers par exemple). Des capteurs GPS à haute sensibilité sont souvent utilisés pour la navigation pédestre. Pour le cas purement dit « intérieur » des capteurs UWB (Ultra Wide Band) ou des tags RFID (Radio Frequency IDentification) sont utilisés. Le coût d'une telle configuration est encore très important pour l'application de navigation pédestre. Pourtant ce couplage est actuellement le sujet de plusieurs recherches prometteuses.

Le choix fait dans cette thèse est d'utiliser la seule centrale à inertie disponible à bord de la plateforme mobile plutôt que sur la personne qui tire la plateforme. Plusieurs facteurs ont privilégié ce choix comme la dépendance non totale entre le corps de la personne tirant le chariot et le chariot même et les différentes poses possibles pour tirer le chariot (marche avant ou marche arrière). D'ailleurs, la précision envisagée pour la navigation pédestre n'est pas du même ordre de grandeur que pour la cartographie mobile. Pourtant les développements actuels de la navigation pédestre pourraient atteindre un point où elle complèterait la cartographie mobile pour avoir la meilleure détermination de position et d'attitude.

1.5.4 Temps réel ou post-traitement ?

L'acquisition d'un nuage de points laser en temps réel requiert la maîtrise de plusieurs compétences parmi lesquelles :

- L'analyse des signaux (*parsing*) sans aucune latence au niveau des ports séries et de l'analyseur de haut débit ;
- La synchronisation à l'aide de périphériques ;
- Des corrections sur le trajet en temps réel (RTK, Filtre de Kalman avec rétroaction, etc.) ;
- Autonomie complète lors du pilotage du système.

Pour remplir ces conditions, il faut des calculateurs embarqués puissants et des interfaces homme-machine fiables qui sont réalisées à l'aide des langages de programmations les plus proches à la machine. Le défi de produire des données géométriquement correctes n'est pas envisagé à ce stade de la recherche. Le coût de fonctionnement embarqué en temps réel n'est pas justifié dans la plupart des applications de cartographie mobile. Par contre le post traitement assure plus de commodité, notamment en ce qui concerne les corrections d'un point de vue plus global. Les applications de couleurs et de textures se font aussi en post-traitement plus aisément. De toute façon, un nuage de point laser acquis en mode mobile ou fixe ne serait pas exploitable avant une série de nettoyage, de segmentation, de reconnaissance de formes et de modélisation géométrique. Rien n'empêche donc de corriger le nuage acquis en post traitement. Les applications qui exigent un traitement en temps réel comme l'établissement de cartes de risques, le pilotage des avions, l'opération militaire ne sont pas concernées par cette thèse.

1.6 Plan du mémoire

Cette thèse est constituée de quatre parties principales : l'état de l'art, la conception du système, le modèle d'erreurs correspondant aux calculs du nuage de points et enfin les solutions proposées pour améliorer la précision des résultats. L'état de l'art permet d'inspirer des solutions à partir des autres systèmes mobiles existants. Il donne aussi des introductions théoriques nécessaires pour évaluer les capteurs disponibles et pour le traitement des données qui en résulte.

Ensuite, la conception du système consiste à définir les étapes telles que la calibration, la synchronisation, la reconstitution du trajet et le géoréférencement direct. L'évaluation des résultats est faite dans le troisième chapitre à travers une étude théorique et expérimentale.

La dernière partie introduit les solutions possibles pour améliorer la précision du système et pour exploiter ses données. Elle décrit plus précisément la solution photogrammétrique développée dans cette thèse. Les perspectives et les conclusions issues de ce travail sont présentées en fin de ce mémoire.

Partie 1. Etat de l'art

2. La cartographie mobile

2.1 Introduction

Depuis les quinze dernières années, les progrès de la géodésie spatiale et inertielle, ont permis de réfléchir autrement à la cartographie mobile. Au lieu d'utiliser les contrôles au sol pour orienter les photos dans l'espace, la trajectoire et l'attitude de la plate-forme d'imagerie peuvent désormais être déterminées directement. Cela a rendu la cartographie mobile indépendante des activités topographiques préalables.

Le passage de l'analogique au numérique des techniques d'imagerie s'y ajoute aussi comme un changement considérablement accéléré au cours des dernières années. L'intégration des concepts de détermination cinématique de la trajectoire avec l'imagerie numérique a abouti à des systèmes multi-capteurs aux capacités multiples. Ils sont capables d'acquérir, de stocker, de traiter et de géo-référencer les données numériques, fournissant ainsi une solution complète aux problèmes de cartographie à partir d'une seule plate-forme.

La désignation « cartographie mobile » est très vaste ; elle peut être réalisée à partir de satellites, avions, hélicoptères, ou encore de drones. Dans certains cas, des applications sont effectuées à partir de bateaux ou de véhicules sous-marins autonomes (AUV). Pourtant, la tendance est d'attribuer la désignation « cartographie mobile » aux applications terrestres ou aéroportées.

Selon (Tao et Li, 2007), le développement prévu de la cartographie mobile dans les prochaines années est caractérisé par deux tendances : premièrement, l'usage d'un nombre toujours plus grand de capteurs portables à faible coût, notamment en ce qui concerne les dispositifs de géoréférencement direct et deuxièmement, l'exploitation des technologies de télécommunication afin de lier plusieurs plateformes mobiles fonctionnant simultanément. Cette révolution amènerait à un réseau de capteurs mobiles terrestres ou une combinaison de techniques terrestres et aéroportées.

Nous allons plutôt nous intéresser, dans cette thèse, au cas terrestre qui partage beaucoup de notions avec les applications citées ci-dessus. Néanmoins les besoins de précision sont bien inférieurs compte tenu de la distance entre la plateforme mobile et les objets levés et de la vitesse de cette plate forme. Le terme de cartographie mobile terrestre est souvent lié aux systèmes embarqués sur des voitures. Il existe également des exemples sur des wagons de trains (Sternberg, 2001 ; Blug *et al.*, 2007) ou des motos (Qingwu *et al.*, 2007). Nous allons nous concentrer sur le développement de certains systèmes de cartographie mobile terrestre avec des capteurs photogrammétriques ou laser actuels. L'accent sera mis sur deux systèmes nationaux ayant un arrière-plan académique. Notons que le premier système apparu est GPSVan™ à Ohio State, USA (Goad, 1991 ; Schwarz et El-Sheimy 2004).

2.2 Exemples de systèmes de cartographie mobile

2.2.1 LaRA

LaRA, acronyme de "La Route Automatisée" est un véhicule de perception avancée résultant de la fusion de capteurs multiples. Le Centre de Robotique de l'Ecole des Mines de Paris a lancé cet axe de recherche en 1998. Ce projet a été développé en parallèle avec la création du système informatique embarqué ^{RT}MAPS qui permet une mise en place rapide de plusieurs capteurs, actionneurs et algorithmes. ^{RT}MAPS a été commercialisé après avoir élargi sa base de données de telle manière qu'elle puisse comprendre une vaste gamme de capteurs. LARA effectue un balayage laser mobile à l'aide d'un télémètre laser effectuant 10 profils par seconde de 1080 points chacun. Ceci permet d'avancer à une vitesse de 10 km/h pour avoir des nuages de points exploitables en zone urbaine.

La partie navigation de ce système est composée d'un récepteur DGPS avec correction différentielle, une centrale inertielle à faible coût, une odométrie et un capteur pour mesurer l'angle du volant. Cette configuration hybride a permis d'achever une précision estimée inférieure à 5 cm (Abuhadrous *et al.*, 2004) pour les trajets. L'idée générale est d'assister le conducteur pour améliorer la sécurité, le confort et l'efficacité du transport routier. Le véhicule dispose donc d'autres capteurs servant aux autres objectifs comme une caméra CCD couleur frontale, une caméra arrière grand champ, deux caméras installées dans les rétroviseurs externes du véhicule et un radar longue portée. Néanmoins, ces capteurs peuvent être intégrés avec le système de cartographie mobile pour pouvoir améliorer la qualité visuelle du nuage laser acquis. Brun *et al.* (2007) utilisent, par exemple, un capteur œil-de-poisson pour pouvoir texturer les modèles déduits du scanner laser.



Figure 2.1 Véhicule LaRA aménagé pour des relevés mobiles (à gauche) et télémètre laser couplé avec un capteur œil-de-poisson (à droit).

2.2.2 STERÉOPOLIS

STÉRÉOPOLIS est le système mobile de l'Institut Géographique National (IGN). La première version a été développée en 2006 au sein de l'équipe ARCHI avec la collaboration du laboratoire OEMI. STÉRÉOPOLIS est un véhicule équipé d'un ensemble de caméras haute résolution qui

relèvent à la fois les façades, la voirie et le mobilier urbain. Le dispositif était composé, initialement, de trois paires de caméras 4000×4000 pixels.

STÉRÉOPOLIS V2 dispose de dix caméras en configuration omnidirectionnelle qui assurent une couverture horizontale complète. Le choix de la couverture verticale s'est porté sur les deux caméras latérales et jusqu'au point de zénith. Deux scanners laser Riegl™ 2D, avec une ouverture de 80°, ont aussi été fixés dos-à-dos sur le véhicule. Le composant de navigation est un hybride de GPS, INS et odomètre. Sa précision est estimée à 30 cm lors d'une perte de signal GPS de dix secondes. Il est utilisé pour réaliser des modèles pour la réalité augmentée ou la reconnaissance automatique des panneaux routiers ou des textes.

Le système possède un degré élevé de synchronisation grâce au choix des appareils compatibles. Il fonctionne en temps réel à l'aide d'un ordinateur master pourvu d'un logiciel de synchronisation et de pilotage (RTMAPS) qui dirige cinq autres ordinateurs. Ils disposent de volumes de stockage considérables afin d'assurer la continuité des missions mobiles. Depuis 2009, l'imagerie laser de Stéréopolis est assurée par le scanner HDL™-64E exposé dans 6.3 (page 69).



a. Figure 2.2. a : Vue générale du système Stéréopolis avec les capteurs imageurs. b : centrale inertielle et unités pilotage-stockage. c : odomètre installé sur la roue arrière gauche.

2.2.3 Les chariots mobiles

Il existe des systèmes mobiles spécialisés en cartographie à partir de voies ferrées. Les plateformes où on embarque ces systèmes sont plus simples compte tenu de leur application. On peut citer le système « Swiss trolley » de Terra International® qui intègre deux scanners laser faisant 45° avec les rails (Figure 2.3). La partie navigation du système est constituée d'un GPS uniquement qui peut être remplacé par un tachéomètre avec la possibilité de suivi automatique. La présence d'une centrale à inertie est inutile car le chariot ne peut pas prendre deux attitudes différentes sur la voie. En d'autres termes, la trajectométrie n'a pas les six degrés de liberté traditionnels mais elle est contrainte par la géométrie des rails.

Une configuration similaire « GRP System FX » est proposée par AMBERG Technologie®. Le système est pourvu d'un seul scanner et de deux prismes pour le suivi tachéométrique en cas de cartographie des tunnels. La précision de tels systèmes est centimétrique et la densité est liée à la vitesse du déplacement.



Figure 2.3 Chariot Swiss trolley (à gauche) et GRP System FX (à droite)

2.3 Récapitulatif

Dans le tableau ci-dessous nous récapitulons un nombre important de systèmes de cartographie mobile terrestre existants à ce jour. Nous avons essayé d'associer une référence bibliographique pour chaque système et d'analyser les composants de chacun. Nous rappelons qu'il existe encore des systèmes qui ne révèlent guère leurs secrets car ils sont souvent liés à l'industrie et au commerce où la plupart des informations sont confidentielles.

Nom	Développeur / Référence	Capteurs	
		Navigation	Cartographie
GPSVan™	Université d'Ohio State (Grejner-Brzezinska, 2002)	GPS bi-fréquence gyroscope vertical 2 gyroscopes directionnels odomètre	2 appareils photo CCD 2 caméras vidéos analogiques
VISAT (Video-Inertial-SATellite)	Université de Calgary (Niu <i>et al.</i> , 2006)	2 GNSS bi-fréquence IMU lecteur ABS	1 caméra S-VHS 8 CCD appareils photo n/b
KiSS™ (Kinematic Survey System)	Université de Bundeswehr. Institut de la géodésie et GeoDigital international (Allemagne) (Sternberg <i>et al.</i> , 2001)	GPS IMU (2gyros, 3 accéléromètres) odomètre baromètre inclinomètre compas	1 caméra vidéo VHS couleur 2 appareils CDD
MoSES (Mobile road Mapping System)	Université de forces armées fédérales de Munich (Gräfe, 2007)	GPS, IMU baromètre numérique	2 scanners laser 2 appareils CDD

GEOVAN™	Institut de cartographie de Catalogne (Talaya <i>et al.</i> , 2004)	GPS/IMU/odomètre (POSPac Applanix® système).	2 appareils photo 1 télémètre laser
Photobus	Laboratoire de topométrie (EPFL) à Lausanne (Gontran, 2005)	GPS RTK bi-antenne IMU Odomètre optique	1 appareil photo CMOS
VLMS (Vehicle-borne Laser Mapping System)	Centre des informations spatiales de l'université de Tokyo (Manandhar et Shibasaki, 2000 et 2002) (Zhao et Shibasaki, 2004)	GPS/INS/odomètre	3 télémètres laser 6 appareils photos linéaires
GiGi (GPS Integrated with Glonass and Inertial navigation system)	Université de Trieste (Manzoni <i>et al.</i> , 2005 et 2006)	GPS/IMU/odomètre (POSPac Applanix® système). GPS assisté	2 appareils photos n/b+couleur télémètre laser
TruckMap™	John E. Chance, Inc., USA Reed <i>et al.</i> , 1996	GPS multi-antennes gyros	télémètre laser 1 caméra vidéo
GPSvision™	Lambda Tech, Inc., USA (Guangping, 2002)	GPS/INS	2 appareils CCD couleur
ON-SIGHT™	Transmap Corp., USA	GPS/INS	2 appareils CCD couleur
RGIAS (Rapid GIS Acquisition Service)	Rowe Surveying and Engineering Company, Inc. Alabama, USA	GPS Multi-antennes	1 télémètre laser 1 caméra video
WUMMS	Université de Wuhan., Chine (Li <i>et al.</i> , 1999)	GPS	3 appareils CCD couleur 1 télémètre laser
LD2000 –RH, -RE, -RM series	Wuhan Ledor Co.,Ltd, (Chine) (Qingwu <i>et al.</i> , 2007)	GPS/INS	2-8 appareils CCD couleur
DAVIDE (Data Acquisition Vehicle with Inertial and DGPS Equipment)	GIOVE S.r.l. Italie (Spagnol, 2004)	GPS/INS/odomètre	5 caméras vidéo télémètre laser TPL (Traverse Profile Logger)

StreetMapper	IGI GmbH et 3D Laser Mapping (Kremer et Hunter, 2007)	GPS/INS	2-3 télémètres laser 1-2 caméras vidéo
ROADSCANNER	SITECO Informatica s.r.l. Italy	GPS/INS/odomètre	5 caméras vidéo 1 scanner laser 1 profilomètre
LYNX	Optech, Inc.,	GPS/INS	2-4 scanners laser
ILRIS-3D	Optech and Sineco (Zampa, et Conforti, 2008)	GPS/INS DMI odomètre	2 scanners laser
SAM (Système d'Acquisition Mobile)	GeoInvent Sud et SODIPLAN S.A.	GPS/INS/odomètre	4-8 appareils photos
Trident-3D	Géo-3D & CADDEN	GPS+ GLONASS /INS/odometer	3 appareils photos 1 scanner laser

Tableau 2.1 Exemples de systèmes de cartographie mobile existants



Figure 2.4 Exemples de systèmes commerciaux (à gauche LAND Mark™, à droite LYNX™)

2.4 Note de conclusion

Comme on l'a constaté dans ce chapitre, les systèmes de numérisation mobile investissent largement dans les matériels et les périphériques. Certains systèmes ont typiquement le même coût qu'un système LiDAR aéroporté (Barber et Mills, 2007). Un tel choix est justifié par la masse de données spatiales résultante au fil du temps. Pour obtenir la même précision, il faut investir pour le cas terrestre typiquement comme pour le cas aéroporté à cause des masques GPS qui n'existent pas au niveau de l'avion. Néanmoins, pour le terrestre, la distance entre la plateforme et l'objet scanné permet moins de précision que l'aéroporté notamment en ce qui concerne les angles.

Des milliers de kilomètres ont déjà été relevés par les systèmes de cartographie mobile laser terrestre partout dans le monde. Pourtant, nous ne trouvons dans la littérature aucune approche qui aborde le système de A à Z. La plupart des systèmes utilisent des logiciels pour contrôler la synchronisation et le flux des données. La partie navigation du système est rarement abordée.

Plusieurs systèmes sont équipés d'unité d'intégration GPS/INS/Odomètre dont la précision est proportionnelle au prix. Ils présentent donc la navigation par le principe de boîte noire. Les systèmes de cartographie mobile sont élaborés par des équipes de plusieurs spécialistes (topographe, électroniciens, informaticiens, etc.). Il n'existe guère de systèmes à faible coût qui peuvent être opérés intégralement par un seul individu.

Nous constatons par ailleurs que les scanners lasers utilisés sont des télémètres 2D où la troisième dimension est obtenue par le mouvement de la plateforme mobile. Dans quelques cas moins fréquents (Kukko *et al.*, 2007 par exemple), des scanners lasers terrestres sont utilisés mais en bloquant leur rotation horizontale. Ils sont donc l'équivalent du télémètre laser 2D. Si le champ vertical du balayage est supérieur à 180° , un seul scanner suffit pour numériser les deux cotés de la route, sinon il faudrait positionner deux scanners dos-à-dos. Le choix d'utiliser un nombre redondant de scanners avec différents angles d'incidence aide à densifier le nuage de points résultant et à résoudre le problème d'occlusion. La vitesse de numérisation du scanner (mesurée en profil/s) demeure le facteur principal qui détermine la vitesse de déplacement de la plateforme mobile.

3. Le positionnement par GPS

Ce chapitre aborde le composant de positionnement indispensable à tous les systèmes de cartographie mobile : le GPS. Après une brève introduction du système GPS, l'accent sera mis sur les techniques et les solutions utilisées généralement pour la localisation mobile par la majorité des systèmes. Nous nous intéressons aussi aux aspects théoriques des techniques utilisées, dans la perspective du système proposé dans cette thèse. Des techniques comparables sont enfin présentées afin de justifier et d'évaluer nos choix lors de la conception du système. On suppose que le lecteur possède des prérequis sur le positionnement par GPS.

3.1 Introduction générale du GPS

Le Système de Positionnement Global (GPS) est un système de navigation par satellites destiné à fournir la position, la vitesse et l'heure (solution dite PVT). Les satellites GPS envoient des signaux codés qui peuvent être déchiffrés par des récepteurs GPS. Le récepteur mesure sa distance à plusieurs satellites à l'aide des codes C/A ou P. Chaque mesure de distance sur un satellite définit une sphère dont le centre est le satellite. Trois satellites sont donc nécessaires pour déterminer la position 3D du récepteur. Un quatrième satellite est nécessaire pour tenir compte de la non-synchronisation de l'horloge du récepteur et des horloges des satellites. Le système GPS peut se décomposer en trois segments:

- **Le segment spatial:** il s'agit d'un réseau de 24 satellites fonctionnels ; ils se meuvent sur 6 plans orbitaux, à environ 20000 km d'altitude. La constellation GPS a été conçue de telle manière que, partout sur la terre et à tout moment, un minimum de 4 satellites soient visibles au dessus de 15° d'élévation.
- **Le segment de contrôle:** il est constitué de 5 stations qui calculent l'orbite des satellites et contrôlent leur bon fonctionnement ainsi que la qualité de l'horloge à bord de chaque satellite.
- **Le segment utilisateur:** Il est composé des récepteurs GPS, appareils permettant de calculer la position, la vitesse et l'heure d'un observateur, partout et à tout moment sur Terre et dans ses environs, quelles que soient les conditions climatiques.

3.2 Spécifications du signal GPS

Les satellites GPS transmettent leurs données sur deux fréquences (porteuses). Les signaux, qui sont générés à partir de la fréquence standard 10.23 MHz, sont L1 et L2 (fréquence standard $\times 120,154$ respectivement). La longueur d'onde est d'environ 19 cm pour L1 et 24 cm pour L2. Les fréquences sont générées grâce à l'horloge atomique embarquée à bord de chaque satellite.

De plus, les deux porteuses L1 et L2 sont modulées en phase par trois codes binaires appelés codes pseudo-aléatoires (ou PRN : Pseudo Random Noise). Le code C/A (Coarse/Acquisition ou Clear/Access) ne module que L1 contrairement au code (P) qui module L1 et L2. Le code (P) peut être transformé en code Y sur décision du segment de contrôle. La Figure 3.1 montre la génération des porteuses et la transition de code fait au niveau de segment spatial.

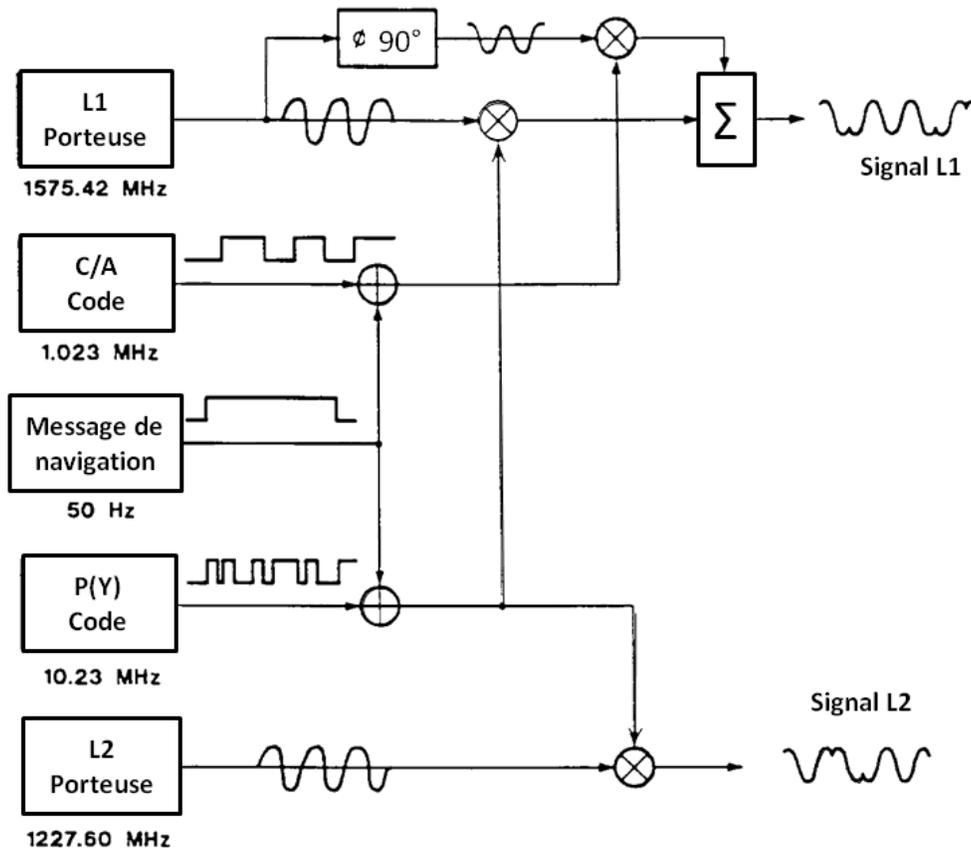


Figure 3.1 Modulation de phase du signal GPS¹

Le troisième code modulant est le message de navigation qui est un code particulier. De fréquence 50 Hz, il contient les informations suivantes :

- Le temps GPS : il est défini par le numéro de la semaine et le temps dans la semaine (l'origine du temps GPS étant le 6 janvier 1980 à 0 heure et l'origine de la semaine le samedi/dimanche à 0 heure).
- Les éphémérides : elles comprennent les paramètres permettant de calculer la position des satellites avec une précision de l'ordre de la dizaine de mètres.
- Les almanachs : ils ont la même fonction que les éphémérides mais avec une précision moindre. Contrairement aux éphémérides où chaque satellite envoie ses propres paramètres, l'ensemble des almanachs est transmis par n'importe lequel des satellites.

¹Figure adaptée de: NAVSTAR GPS user equipment introduction, public release version, 1996.
URL : <ftp://ftp.tapr.org/gps/gpsuser.pdf>

- Les coefficients du module mondial de corrections ionosphériques.
- Les informations concernant l'état de fonctionnement de chaque satellite.
- Le module de comportement des horloges et les paramètres permettant de rattacher le temps GPS au temps mondial.

Pour pouvoir obtenir les informations relatives à toute la constellation, il faut, théoriquement, attendre une durée minimale de 12 minutes et 30 secondes. D'autres solutions plus rapides sont exposées plus loin dans ce chapitre.

3.3 Principe de la mesure de la position par GPS

Les distances entre les satellites GPS et le récepteur ne sont pas mesurées directement mais doivent être calculées. Typiquement, ces distances sont déduites de deux mesures fondamentales en GPS:

- **Les mesures de code (détermination de la pseudo-distance):** il s'agit de la mesure de base que tous les récepteurs GPS peuvent faire, à savoir le temps de vol du satellite au récepteur. Ce temps est alors multiplié par la vitesse de la lumière afin de le convertir en une distance. De manière plus détaillée, à un certain instant, le code (C/A par exemple) est généré par le récepteur et par le satellite. Le code venant du satellite est transmis au récepteur. Ce dernier compare le code entrant avec son code propre pour avoir le temps de parcours. Les horloges du récepteur et du satellite ne sont pas parfaitement synchronisées; cela introduit un délai d'horloge qui apparaît comme une erreur sur la mesure de distance au satellite. C'est pourquoi quatre satellites sont nécessaires pour déterminer trois coordonnées et un délai d'horloge. Grâce à la grande longueur d'onde parcourue pour transmettre un bit de données, la mesure du code n'est pas ambiguë, néanmoins, il subsiste un décalage d'horloge entre le satellite et le récepteur.
- **Les mesures de phase:** elles sont semblables aux mesures de code en ce sens qu'il s'agit aussi de mesurer le temps de vol. Les porteuses L1 et L2 sont utilisées. Puisque leur longueur d'onde vaut respectivement 19 et 24 cm, la distance sera un multiple (ambiguïté entière) de 19 ou 24 cm plus la quantité observée. Le récepteur peut cependant aider l'utilisateur dans la résolution de ces ambiguïtés. Quand le récepteur traque un signal, il assigne une valeur arbitraire à cette ambiguïté pour la première époque de mesure. A partir de là, le récepteur compte le nombre de cycles complets qui se sont écoulés depuis plus d'une fraction de cycle. La formule mathématique utilisée (pour L1 par exemple) est la suivante :

$$\Phi_{L1n} = \Phi_{L1n-1} + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_{D_{L1}} \cdot dt + \phi_{r_{L1n}} \quad \text{avec} \quad \phi_{L1_0} = A_{L1} \quad 3.1$$

où : Φ est la mesure de phase accumulée

n est le numéro de l'époque actuelle de mesure

f_D est la fréquence Doppler en tant que fonction du temps

ϕ_r est la fraction de phase mesurée à l'époque n

A_{IL} est une estimation arbitraire de l'ambiguïté entière

La résolution d'ambiguïté entière est faite normalement au détriment du temps d'acquisition.

Le saut de cycle (cycle slip) est une erreur de comptage du nombre entier de cycles qui se produit lors de la mesure de phase. Cette erreur est fréquente dans un environnement non bien dégagé. Des méthodes comme la triple différenciation sont utilisées pour déterminer ce multiple de cycles.

3.4 La mesure de la vitesse par GPS

Sans même mesurer la différence de position divisée par la différence de temps, il est possible de déterminer la vitesse du récepteur mobile par la simple prise en compte de l'effet Doppler sur les signaux. En effet, la fréquence porteuse du signal perçu par le récepteur GPS n'est plus exactement la même que celle générée par le satellite, car le rapport des fréquences dépend des vitesses relatives du satellite et de l'utilisateur. La vitesse du satellite étant facilement déterminable (à partir de l'information d'altitude de ses éphémérides et connaissant le rayon terrestre, il suffit d'appliquer la formule :

$$v = 2\pi H_s / t_r \quad 3.2$$

où : H_s : Rayon de la terre+altitude de satellite
 t_r : période de révolution

ce qui donne une vitesse d'environ 3,8 km/s. La formule relativiste de l'effet Doppler appliquée aux signaux électromagnétiques est :

$$f_R = f_T \left(1 - \frac{(\overrightarrow{\Delta v} \cdot \overrightarrow{a})}{c} \right) \quad 3.3$$

où : $\overrightarrow{\Delta v}$ est le vecteur de la vitesse relative du satellite par rapport à l'utilisateur
 $\overrightarrow{\Delta v} = \vec{v} - \vec{v}_u$
 f_R fréquence reçue
 f_T fréquence émise par le satellite
 \overrightarrow{a} vecteur unité orienté de l'utilisateur vers le satellite.

La seule inconnue dans les relations précédentes est la vitesse de l'utilisateur \vec{v}_u . Les fréquences de L1,L2 sont connues précisément tandis que les corrections sur leurs valeurs sont transmises par le message de navigation. En développant le produit scalaire dans la relation 3.3 on obtient 3 variables (v_x, v_y, v_z) Une autre variable s'ajoute si l'on considère l'effet de la dérive de l'horloge du récepteur. Il faut aussi donc au moins 4 satellites pour résoudre le problème de la vitesse.

3.5 Les sources d'erreur

Les deux aspects de dégradation volontaire (la disponibilité sélective et l'antibrouillage) ne sont pas abordés dans le contexte de positionnement mobile. La disponibilité sélective est désactivée depuis le 2 mai 2000 et l'antibrouillage, quant à lui, est résolu au niveau des récepteurs utilisés. On va plutôt souligner les erreurs qui touchent le positionnement précis et qui sont susceptibles de disparaître par utilisation du mode différentiel ou des deux fréquences.

3.5.1 Erreur des satellites

Il s'agit des erreurs de modélisation de la dérive de l'horloge des satellites lorsqu'on utilise un polynôme du second degré ainsi que des erreurs liées à la modélisation Képlérienne des orbites des satellites.

3.5.2 Erreur de propagation atmosphérique

Le signal en provenance des satellites traverse différentes couches atmosphériques avant d'atteindre le récepteur. Lorsque les signaux traversent l'ionosphère, les informations du code GPS sont retardées. L'erreur sur la mesure dépend du contenu électronique total (TEC) le long du chemin parcouru par le signal qui est une mesure de la densité d'électron. Le contenu électrique de l'ionosphère change selon plusieurs facteurs comme la température et la radiation solaire. Le délai ionosphérique dépend de la fréquence et peut, dès lors, être éliminé en utilisant deux fréquences GPS.

La troposphère produit également un délai dans les observations mais celui-ci ne dépend pas de la fréquence. La troposphère est généralement séparée en deux composantes: une composante sèche qui représente 90% de la réfraction totale et une composante humide qui représente les 10% restants. Il existe des modèles semi empiriques ou des modèles globaux pour corriger cet effet.

3.5.3 Multi-trajet

Le multi-trajet est le phénomène par lequel les signaux GPS sont réfléchis sur certains objets avant d'être détectés par l'antenne. Cela se produit lorsqu'il y a des surfaces de réflexion dans le voisinage de l'antenne GPS. Cet effet peut engendrer des erreurs de l'ordre de 15 cm sur la mesure de phase et de l'ordre de 15-20 m sur la mesure de pseudo-distance.

3.5.4 Erreurs liées aux récepteurs

Ce sont les erreurs qui proviennent des processus utilisés à l'intérieur du récepteur. Elles dépendent du type d'antenne, de la méthode utilisée pour convertir les données, des processus et de la corrélation entre le signal du satellite et celui du récepteur.

3.6 Les critères de précision

La figure 3.2 montre qu'une constellation trop « ramassée » ou trop « évasée » pourrait produire un mauvais positionnement. Le critère pour quantifier cette géométrie s'appelle le DOP (Dilution Of Precision).

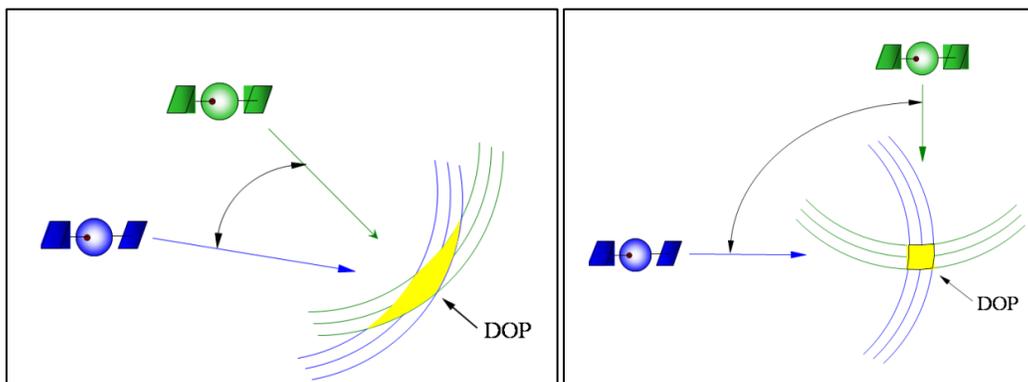


Figure 3.2 Géométrie non favorable des satellites (gauche) et favorable (droite)

Pour pouvoir décrire le DOP mathématiquement, on considère l'équation générale de la pseudo-distance qui est donnée comme suit :

$$c. [(t^R - t^E)_j + dt_i] = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2} \quad 3.4$$

où : $t^R - t^E = \Delta t$ est le temps de vol de chaque onde
 dt_i est le biais d'horloge de récepteur
 j, i les indices de satellites
 X^j, Y^j, Z^j les coordonnées cartésiennes du satellite j

On peut exprimer chaque variable dans l'équation 3.5 comme une valeur approchée mesurée plus une erreur de mesure :

$$\Delta t^j . c = \sqrt{[X_j - (X_0 + dX)]^2 + [Y_j - (Y_0 + dY)]^2 + [Z_j - (Z_0 + dZ)]^2} + (dt_0 + dt) . c \quad 3.5$$

Selon la méthode des moindres carrés, quatre satellites sont suffisants pour trouver les valeurs des inconnues (dX, dY, dZ, dt) à condition d'avoir des valeurs approchées (moyenne des observations brutes sur toute une campagne). Le système d'équations est donné par (Ledig 2009) comme suit :

$$\begin{pmatrix} \Delta psd^1 \\ \Delta psd^2 \\ \Delta psd^3 \\ \Delta psd^4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^1 & b^1 & c^1 & d^1 \\ a^2 & b^2 & c^2 & d^2 \\ a^3 & b^3 & c^3 & d^3 \\ a^4 & b^4 & c^4 & d^4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \\ dt \end{pmatrix} \quad 3.6$$

$$I = A \cdot d\chi$$

avec Δpsd^j la différence (valeur observée – approchée) de la pseudo-distance

La solution par moindres carrés pour le système d'équations 3.6 est :

$$d\chi = (A^T . A)^{-1} . (A^T . -I) \quad 3.7$$

La matrice de variance-covariance correspondante à ce calcul est donnée comme suit :

$$V_{xx} = \sigma_0^2 . (A^T . A)^{-1} \quad 3.8$$

où σ_0 est l'écart type sur une pseudo-distance mesurée.

Enfin, l'écart type moyen sur les quatre variables spatio-temporelles (dX, dY, dZ, dt) est appelé le GDOP (géométrique DOP) qui se calcule par la formule :

$$GDOP = \frac{1}{\sigma_0} \cdot \sqrt{\sum(diag(V_{xx}))^2} \quad 3.9$$

Trois autres DOP sont aussi estimés en considérant certains éléments diagonaux de la matrice V_{xx} . Par exemple, si on limite la somme dans la relation 3.9 aux deux premiers éléments diagonaux, on obtient le DOP horizontal HDOP. Néanmoins, le GDOP demeure le critère le plus exhaustif et le plus utilisé pour évaluer la précision du positionnement.

Comme vu précédemment, il faut des coordonnées moyennées pour estimer le GDOP, c'est pourquoi le récepteur GPS est capable de le faire en mode fixe plus qu'en mode mobile.

3.7 Les récepteurs GPS

Des récepteurs multi-canaux sont utilisés pour des applications précises ou dans des applications de positionnement dynamique. Ces récepteurs disposent d'un canal de réception par satellite, par lequel chaque satellite peut être suivi en continu.

Les récepteurs multiplex peuvent faire un enchaînement entre les différents satellites en moins de 20 millisecondes. Grâce à cette haute fréquence de traitement, on élimine le temps d'initialisation nécessaire pour les récepteurs séquentiels. Le message de navigation est téléchargé, pour chaque satellite, d'une manière asynchrone. C'est pourquoi le premier calcul de position demande plus de temps.

Une autre propriété importante d'un récepteur GPS est le temps de première acquisition (TTFF : Time To First Fix). Cette durée dépend de la validité des derniers almanachs et éphémérides sauvegardés dans la mémoire interne du récepteur. Le TTFF dépend aussi de la constellation des satellites et des conditions de transmission du signal. Les fabricants définissent trois modes de démarrage pour un récepteur GPS :

- Acquisition lente (cold start) : sans almanach et sans éphéméride (45sec à quelques minutes).
- Acquisition rapide (warm start) : avec almanachs mais sans éphéméride (10-45 sec).
- Acquisition ultra rapide (hot start) : almanachs et éphémérides disponibles (1-10 sec).

De toute façon, il est conseillé de laisser le récepteur GPS s'initialiser pendant quelques minutes, non seulement pour acquérir les almanachs, mais également pour résoudre l'ambiguïté entière.

Un système A-GPS (GPS assisté), aide le récepteur mobile à reconnaître quels signaux GPS à suivre. Grâce à cette assistance, la recherche de signal effectuée par le terminal est grandement réduite. Le TTFF passe de plusieurs minutes à seulement quelques secondes. De plus, le récepteur A-GPS est en mesure de détecter et démoduler des signaux de très faibles amplitudes. Le récepteur acquiert un bout de signal et l'envoie, ensuite, au serveur par connexion téléphonique mobile. Le serveur aide le récepteur à mieux connaître le signal et à trouver les verrouillages possibles ce qui accélère l'acquisition. La technique A-GPS ne nécessite guère d'infrastructure, elle est largement comparable avec le HSGPS qu'on décrit dans le prochain paragraphe.

3.8 Le GPS à haute sensibilité HSGPS

La technique dite de GPS à haute sensibilité est conçue initialement pour l'acquisition à l'intérieur. Les signaux GPS émis sont déjà faibles (-160 dBW/-130 dBm), ils diminuent encore de 20-30 dB à l'intérieur ou en cas de visibilité limitée des satellites (canyon urbain par ex.). En outre, les signaux en milieu urbain sont bruités à cause des multitrajets et des réflexions des signaux sur les objets mobiles. Ceci influence le rapport signal sur bruit de la porteuse C/N_0 . Le récepteur bénéficie de la haute répétition du code C/A porté sur L1 pour trouver un rapport C/N_0 optimal. La sensibilité élevée est donc obtenue par l'augmentation du temps d'acquisition pour compenser l'atténuation du signal (Lachapelle *et al.*, 2004) en permettant au récepteur plus de temps de suivi.

Un récepteur GPS normal fait 2 à 4 corrélations pour chaque satellite tandis que le récepteur à haute sensibilité utilise une large banque de corrélations pour augmenter la sensibilité. La caractéristique clé de ce GPS est le couplage d'intégration cohérente et non-cohérente (Schön et

Bielenberg, 2005). L'intégration cohérente se fait entre le spectre de pulsation interne engendré par le récepteur et celui envoyé par les satellites pendant 20 millisecondes. L'intégration non cohérente n'est pas synchronisée avec le message des satellites et se fait sur plusieurs spectres de pulsation jusqu'à un verrouillage avec le signal interne.

Il est évident qu'un GPS à sensibilité élevée met plus de temps pour acquérir une position correcte ce qui a comme inconvénient de capter parallèlement les multi-trajets des signaux et a pour conséquence de diminuer la précision de position acquise. Le GPS Ublox® EVK-5 réussit à produire une position valide à 4Hz (250 millisecondes).

Le HSGPS est utilisé largement par les applications ne nécessitant pas une précision centimétrique comme la navigation pédestre ou véhiculaire. L'utilisation à bord de systèmes de cartographie mobile n'est pas encore envisageable à cause de sa faible précision.

3.9 Utilisation d'un GPS bifréquences

L'utilisation de corrections bifréquentielles est réservée aux capteurs de gamme géodésique. La plupart de récepteurs bifréquences rendent le code P(Y) observable. Ceci permet de faire des mesures de pseudo-distance pour P(Y) comme pour le C/A.

Les ondes L1 et L2 parcourent le même trajet où la densité électrons est la même, d'où les valeurs d'écarts ionosphériques sur les pseudos distances :

$$\begin{aligned}\Delta\rho_{L1}^{iono} &= \frac{A}{f_1^2} \\ \Delta\rho_{L2}^{iono} &= \frac{A}{f_2^2}\end{aligned}\tag{3.10}$$

où : A : constant de l'ionosphère
f = fréquence du signal

D'où on peut écrire: $\Delta\rho_{L2}^{iono} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \cdot \Delta\rho_{L1}^{iono}$

Les pseudos distances mesurées sur L1 et L2 sont différentes de la vraie distance géométrique ρ^{geom}

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \rho^{geom} + \Delta\rho_1^{iono} \\ \rho_2 &= \rho^{geom} + \Delta\rho_2^{iono}\end{aligned}\tag{3.11}$$

$$\Delta\rho_1^{iono} = \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{1 - \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2}\tag{3.12}$$

Cette expression prouve que l'erreur ionosphérique ne dépend que des fréquences et des distances mesurées. Le récepteur bifréquence est configurée pour créer un troisième signal L_{1C} corrigée des effets ionosphériques

$$L_{1C} = L_1 \cdot \left(\frac{f_1}{f_2}\right) L_2\tag{3.13}$$

D'autre part, le récepteur bifréquence permet, à chaque époque de mesure, de combiner les phases de L1 et de L2. Deux combinaisons sont souvent utilisées ; l'addition qui produit une

longueur d'onde de 10.7 cm et la soustraction donnant une longueur d'onde de 86.2 cm. Ces deux combinaisons sont utilisées pour estimer l'ambiguïté entière.

La quasi-totalité des systèmes de cartographie mobile sont pourvus d'un GPS bifréquence au moins. Il peut même aider une autre antenne de fréquence singulière à calculer sa position précisément en interpolant l'autre fréquence (GPSVan par exemple). Les antennes GPS d'une seule fréquence sont conçues pour recevoir aussi les corrections par satellites géostationnaires.

3.10 Le GPS différentiel (DGPS)

Comme les erreurs de GPS sont corrélées entre elles, une antenne GPS subit les mêmes erreurs de phase et de pseudo-distance qu'une seconde antenne située à proximité. L'emploi de deux (ou plusieurs) récepteurs sur des points fixes constitue une méthode beaucoup plus précise qu'une seule antenne. En effet, on procède à la détermination tridimensionnelle reliant deux points tout en permettant l'élimination de certaines erreurs propres au système GPS. Selon (Kaplan et Hegarty, 2005), on peut classer un DGPS selon les critères suivants :

- Si l'antenne considérée comme pivot est installée sur un point connu en coordonnées, le positionnement est absolu. Sinon, il sera relatif à ce point.
- Dans la configuration la plus simple, une seule antenne fournit des corrections pour une zone dans un rayon de 10 km. Néanmoins, il existe des points du réseau géodésique capables de servir jusqu'à 100 km à la ronde. De plus, les satellites géostationnaires, diffusent des corrections différentielles pour des zones beaucoup plus larges.
- Si les corrections différentielles concernent seulement la pseudo-distance, le DGPS est basé sur les codes (P(Y), C\A). Dans l'autre cas où les corrections concernent la mesure de phase, une précision millimétrique peut être atteinte. Le DGPS à corrections de phase est donc le mode le plus adapté à des travaux géodésiques.

Un GPS différentiel aide normalement à corriger les erreurs de l'horloge du satellite, des éphémérides, de la troposphère, de l'ionosphère, du bruit de récepteur et du multitrajet.

3.10.1 Les techniques basées sur le code

La méthode la plus simple d'implanter la technique différentielle est de mettre un récepteur GPS sur un point connu et de le laisser calculer sa position. Les différences en latitude, en longitude et en hauteur ellipsoïde sont transmises pour un récepteur proche en tant que corrections communes aux deux récepteurs. Pour qu'une telle méthode soit correcte, les deux récepteurs doivent capter les mêmes satellites et avoir le même type d'antenne. Dans le cas le plus général, il faut corriger la pseudo-distance mesurée pour chaque satellite.

Comme dans le paragraphe précédent, on peut considérer la pseudo-distance comme une estimation erronée de la distance géométrique correcte entre le $i^{\text{ème}}$ satellite et le récepteur référence m :

$$\rho_m^i = \rho_m^{i\text{geom}} + c\delta t_m + \varepsilon_m \quad 3.14$$

où ε_m représente les erreurs de mesures de pseudo-distance, δt_m est l'erreur d'horloge de la station référence et c représente la vitesse de lumière. La correction de la station référence est donnée donc par :

$$\Delta\rho_m^i = -c\delta t_m - \varepsilon_m \quad 3.15$$

Cette correction algébrique est diffusée pour le capteur itinérant (u) qui l'ajoute à la pseudo-distance mesurée au même satellite :

$$\rho_m^i + \Delta\rho_m^i = \rho_u^{i\text{geom}} + c\delta t_u + \varepsilon_u + (-c\delta t_m - \varepsilon_m) \quad 3.16$$

Considérant $\varepsilon_{um} = \varepsilon_u - \varepsilon_m$, $\delta t_{um} = \delta t_u - \delta t_m$, on peut exprimer la pseudo-distance corrigée comme suit :

$$\rho_{u\text{corr}}^i = \rho_u^{i\text{geom}} + c\delta t_{um} + \varepsilon_{um} \quad 3.17$$

Les corrections différentielles sont, évidemment, dépendantes du temps. Il faut donc avoir des mesures parfaitement synchrones pour pouvoir calculer les corrections. (Kaplan et Hegarty, 2005) ont montré qu'un GPS fonctionnant en mode différentiel (C/A + L1 seulement) atteint une précision de $0.3\text{m} + 1\text{-}6 \text{ cm} \times \text{longueur de base en kilomètre}$.

3.10.2 Les techniques basées sur la phase

L'état de l'art des méthodes de traitement des observations GPS montre que la méthode de double différence est la méthode la plus adaptée pour déterminer le vecteur de base entre deux récepteur GPS mobile et fixe. La technique de double différence est applicable pour la porteuse et le code. On va aborder uniquement la double différence de porteuse en sachant que le cas est pratiquement le même pour le code.

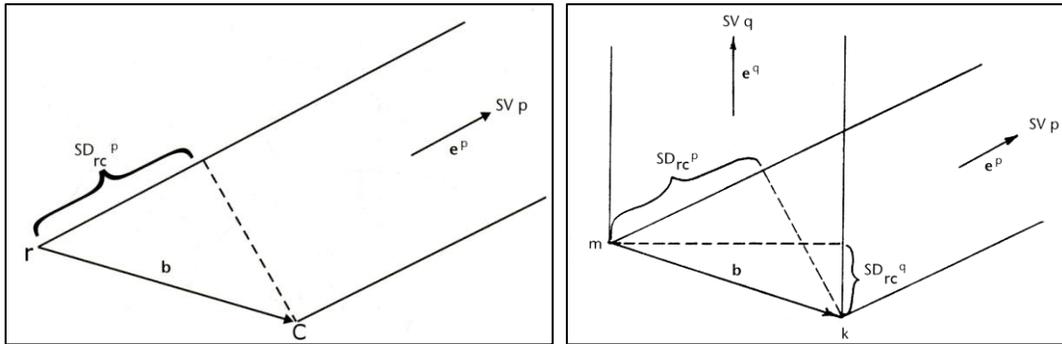


Figure 3.3 Interférométrie singulière par GPS vers un seul satellite (à gauche) et double interférométrie vers deux satellites (à droite)

La figure 3.3 montre deux récepteurs GPS (r : référence, c cinématique) interagissant avec un seul satellite p . La longueur du trajet de propagation de l'orbite moyen du satellite aux deux récepteurs est donnée par la formule :

$$\begin{aligned} \phi_c^p(t) &= \phi_c^p(t) - \phi^p(t) + N_c^p + S_k + f\tau_p + f\tau_c - \beta_{iono} + \delta_{tropo} \\ \phi_r^p(t) &= \phi_r^p(t) - \phi^p(t) + N_r^p + S_k + f\tau_p + f\tau_r - \beta_{iono} + \delta_{tropo} \end{aligned} \quad 3.18$$

où Φ^p est la phase du signal transmis par le satellite comme fonction du temps
 Φ_c^p , Φ_r^p représentent la phase mesurée au niveau des récepteur (r, c) respectivement
 N , inconnu, représente le nombre entier de cycles
 f est la fréquence de la porteuse

τ est le biais de l'horloge du satellite et du récepteur (tout confondu)
 β_{iono} l'avance ionosphérique
 δ_{tropo} le retard troposphérique
 S le bruit de phase dû à toutes les autres sources (multitrajet, bruit de récepteur)

Une variable interférométrique (SD pour single différence) peut être créée par soustraction des équations 3.18:

$$SD_{rc}^p = \phi_{rc}^p + N_{rc}^p + S_{rc}^p + f\tau_{rc} \quad 3.19$$

Si l'on étend l'interférométrie par GPS à un deuxième satellite q comme dans la figure 3.3, on obtient la relation suivante :

$$SD_{rc}^q = \phi_{rc}^q + N_{rc}^q + S_{rc}^q + f\tau_{rc} \quad 3.20$$

La double différence DD est donc formée en se basant sur les équations 3.19, 3.20 comme suit :

$$DD_{rc}^{pq} = \phi_{rc}^{pq} + N_{rc}^{pq} + S_{rc}^{pq} \quad 3.21$$

On note aussi que l'ambiguïté entière et le bruit de phase sont aussi combinés. Pour relier cette double différence à la longueur de base recherchée b , on exprime SD à l'aide du produit scalaire de la base par le vecteur unité \vec{e} en direction du satellite correspondant :

$$\begin{aligned} SD_{rc}^p &= (b \cdot e^p) \cdot \lambda^{-1} = \phi_{rc}^p + N_{rc}^p + S_{rc}^p + f\tau_{rc} \\ SD_{rc}^q &= (b \cdot e^q) \cdot \lambda^{-1} = \phi_{rc}^q + N_{rc}^q + S_{rc}^q + f\tau_{rc} \end{aligned} \quad 3.22$$

où λ est la longueur d'onde de la porteuse. On peut incorporer ces équations à la double différence comme suit :

$$DD_{rc}^{pq} = (b \cdot e^{pq}) \cdot \lambda^{-1} = \phi_{rc}^{pq} + N_{rc}^{pq} + S_{rc}^{pq} \quad 3.23$$

où e^{pq} présente la différence des vecteurs unité e^p, e^q . (Kaplan et Hegarty) négligent le terme de bruit combiné S_{rc}^{pq} et proposent que l'ambiguïté entière N_{rc}^{pq} soit déjà fixée, ce qui réduit les inconnues à la seule base $b(b_x, b_y, b_z)$. Une solution du système d'équations surdéterminé (quatre double différences par exemple) est nécessaire pour trouver les composantes de b . La redondance des mesures (C_n^2 pour n satellites) peut aussi aider à fixer l'ambiguïté entière.

3.10.3 Le GPS en mode dynamique

On distingue quelques différences entre le mode dynamique et le mode fixe du GPS. La phase d'initialisation n'est pas toujours faisable notamment parce qu'il est largement possible de perdre les satellites en cours et de se verrouiller sur d'autres satellites. Le principe des techniques dynamiques consiste à observer des chaînes de points pour lesquels les ambiguïtés sont connues. La trajectométrie par GPS impose, souvent, de s'initialiser sur un point inconnu en mode statique. La rapidité de cette initialisation dépend de la longueur de base, du matériel utilisé et de la visibilité des satellites. L'initialisation en mouvement a été rendue possible grâce aux développements en matière d'algorithmes de post-traitement. Le nombre important de mesures acquises pendant la première (ou même la dernière) minute de la chaîne permettront de calculer

et de fixer les ambiguïtés à leurs valeurs entières. Il faut, toutefois, satisfaire quelques conditions comme la cadence élevée d'enregistrement des mesures, le GDOP précis, la ligne de base inférieure à 10 km et la bi fréquence du récepteur.

3.11 Le RTK

Le GPS RTK (Real Time kinematic ou cinématique temps réel) est un cas spécial du DGPS. Pourtant, plusieurs références (Gontran, 2007 par exemple) considèrent que le DGPS utilise la phase du code seulement alors que le GPS RTK utilise la phase de la porteuse. La solution RTK en mode solo signifie avoir sa propre base correctrice qui envoie les corrections par liaison quelconque au mobile. La résolution d'une mesure de phase est de quelques millimètres. En pratique, l'incertitude de positionnement est de l'ordre de quelques centimètres dans le cas où on reçoit les corrections différentielles.

La commission RTCM CS-104 propose plus d'une quarantaine de messages standardisés pour la localisation différentielle par satellites. Dans le message RTCM, on trouve la position de la référence, sa précision, l'instant de début d'appariement mobile-référence, les corrections à réaliser sur la phase et le code et plusieurs autres informations concernant les satellites qui interagissent avec le récepteur référence.

La diffusion des corrections RTK se fait par liaison radio, par réseau cellulaire, par GPRS ou par un serveur local. Une liaison radio UHF est suffisante pour transmettre les corrections pour une ligne de base de quelques kilomètres.

Le RTK réseau (mode multi stations) se base sur l'idée de faire supporter les corrections issues de la redondance d'informations des stations références par un serveur distant. Les récepteurs GPS modernes, reliés par une liaison Bluetooth à un téléphone portable, communiquent avec un serveur de calcul. Ce centre de calcul disponible sans interruption, communique les corrections au récepteur mobile au moyen d'une liaison GPRS ou UMTS. L'information doit être communiquée à l'utilisateur de façon quasi instantanée. Les réseaux de télécommunication actuels permettent des temps de latence inférieurs à la seconde. Le maillage de stations références est beaucoup moins dense (60 à 70km entre chaque station). Plusieurs technologies ont été développées s'appuyant chacune sur un concept de correction différent.

La performance du RTK peut être augmentée en collectant les données des stations références permanentes par un serveur local pour les traiter et les interpoler. Ce mode de RTK s'appelle les stations combinées (Ledig, 2009) comme MAC, FPK et VRS. La plupart des systèmes de cartographie mobile sont abonnés aux réseaux GPS permanents combinés.

3.12 Calcul de l'attitude par GPS

L'une des applications du GPS différentiel est le calcul de l'attitude d'une plateforme mobile. Cette méthode est utilisée largement en navigation marine ou en avionique. L'attitude (où l'orientation) d'un véhicule peut être considérée comme la rotation transformant son propre repère à un repère géodésique extérieur (annexe D).

Ayant plusieurs antennes GPS (dont une pour le vecteur position du centre de phase p_i) installées sur une plateforme mobile, on peut écrire l'équation :

$$p_i^{geo}(t) = R(t) \cdot p_i^b \quad 3.24$$

où t est l'instant de mesure

R la matrice de rotation recherchée $R = f(\text{roulis, tangage, lacet})$

geo : géodésique, b : le repère attaché au corps du véhicule (body).

La solution par moindres carrés est donnée par (Kaplan et Hergarty, 2005) comme suit :

$$R(t) = p^{geo}(t) \cdot p^{b^T} \cdot (p^b \cdot p^{geo}(t)^T)^{-1} \quad 3.25$$

où p est une matrice $3 \times n$ contenant les positions de toutes les antennes. Cette solution exige trois antennes au moins. Des configurations de quatre antennes avec une seule centrale de traitement (Figure 3.4) sont largement utilisées en navigation marine où le signal GPS est rarement masqué et par conséquent le calcul de l'attitude peut en dépendre totalement.

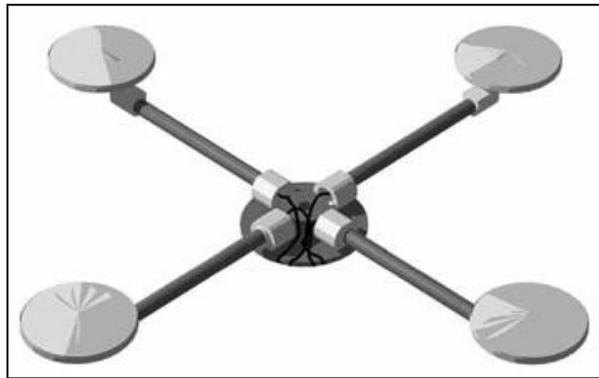


Figure 3.4 Configuration de quatre antennes GPS pour déterminer l'attitude²

Les systèmes de cartographie mobile utilisent généralement les centrales inertielles pour calculer l'attitude. Comme la mesure gyroscopique des angles de roulis et de tangage est plus précise que celle de lacet, les centrales s'aident du GPS pour déterminer le cap. La matrice de rotation dans l'équation 3.25 est ainsi réduite à une matrice de rotation 2D. Ceci nécessite uniquement deux antennes GPS. La solution dite GAMS (GPS Azimuth Measurement Subsystem) est utilisée pour tous les systèmes terrestres mobiles ayant la centrale intégrée POS/LV d'ApplanixTM par exemple.

3.13 Le GNSS (Global Navigation Satellite System)

Le GNSS est la réalisation de l'interopérabilité des différents systèmes de radionavigation par satellites existants. Le système qui actuellement contribue au GNSS à côté du GPS est le système russe GLONASS (GLObal NAVigationnaya Sputnikovaya Sistema). Le segment spatial est constitué de 24 satellites (dont 20 opérationnels en début de 2009). La constellation est différente de celle du GPS notamment en ce qui concerne l'inclinaison des plans orbitaux ce qui augmente la probabilité de capter des satellites visibles lors de déplacements en zones urbaines. Les récepteurs GNSS sont capables de capter parallèlement les signaux GPS et GLONASS par des canaux spécialisés pour chaque système et de calculer le positionnement valide en se basant sur les deux. La figure 3.5 montre la carte du ciel à Strasbourg le 02.03.2009 de 09h30 à 11h30. On peut constater l'amélioration de la constellation qui influe directement sur la qualité du positionnement.

² Propriété de Thales Navigation, Inc.

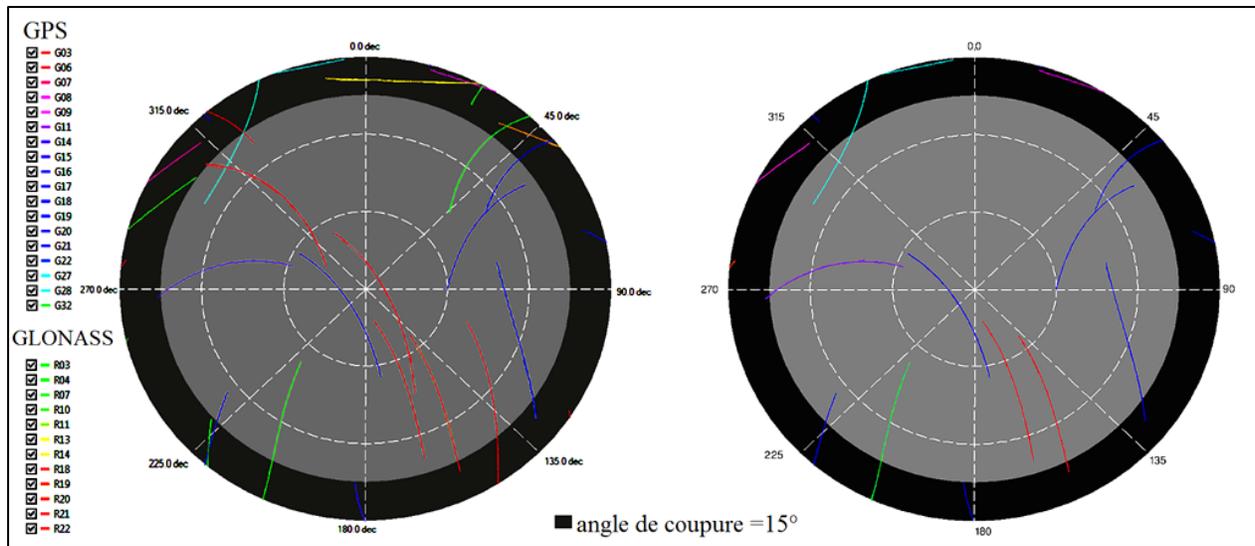


Figure 3.5 Carte du ciel de Strasbourg pour une durée de deux heures (GPS+ GLONASS à gauche, GPS seulement à droite)

(De Agostino et Porporato, 2008) ont montré le gain de précision de trajectométrie lors de l'utilisation de deux récepteurs GNSS intégrés avec une centrale à inertie à faible coût. Pourtant, le coût de passage de GPS au GNSS n'est pas justifiable pour la plupart des systèmes de cartographie mobile qui intègrent des centrales inertielles à précision élevée.

Le système européen de navigation Galileo n'est pas encore opérationnel ; néanmoins les signaux à transmettre sont d'ores et déjà précisément définis. Les concepteurs ont donc pu produire des récepteurs GPS qui sont prêts à utiliser les signaux de Galileo. Pour l'heure, deux premiers satellites (sur les 30 attendus) ont été mis en orbite. Ils serviront à tester les technologies critiques et à sécuriser les fréquences attribuées au système. Galileo présentera deux avantages par rapport au GPS. Tout d'abord, Galileo va proposer un signal continu et garanti. Ensuite, il offrira une précision de positionnement à 2m près, alors que celle du GPS avoisine les 10 m lors de l'utilisation du code uniquement. Cette précision est due à l'émission de trois phases dont deux sont disponibles pour l'utilisation civile. Le système Galileo est conçu pour apporter plus de précision et de disponibilité au positionnement cinématique.

Le GNSS comprend aussi le système de localisation chinois Beidou (ou Compass) qui est constitué de 5 satellites géostationnaires fixes au dessus de la Chine et de 30 satellites orbitaux encore à lancer. D'autres systèmes régionaux comme l'indien IRNSS où encore le japonais QZSS existent. Tous les systèmes précédemment cités sont combinés par le GNSS ce qui impose l'interopérabilité des fréquences émises, la cohérence des systèmes de référence terrestres et la synchronisation de leurs horloges.

Les systèmes SBAS (Satellite Based Augmentation System) qui émettent les corrections différentielles pour une zone du globe rejoignent aussi le GNSS. Par exemple, le service EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System) diffuse actuellement des corrections pour le GPS et le GLONASS. Plusieurs plateformes de cartographie mobile sont munies d'antennes spéciales pour recevoir ce service.

4. La centrale inertielle IMU et la centrale de cap et de verticale AHRS

Ce chapitre aborde les capteurs élémentaires qui compose un système de navigation inertielle. Le passage du niveau du capteur au niveau du système nécessite l'intégration des capteurs, qui fera également partie du sous-chapitre actuel. Le second niveau d'intégration, entre la centrale inertielle et le GPS, sera abordé dans le prochain sous-chapitre. Ainsi, dans cette thèse, le terme « intégration » sera réservé à la fusion des données des instruments (GPS, AHRS, TLS) plutôt que des capteurs élémentaires (gyromètre, accéléromètre, magnétomètre). Nous présentons une large variété de capteurs dans le but de savoir à quelle gamme appartient la centrale utilisée sur notre plateforme mobile.

Les équations de la navigation inertielle et magnétique sont présentées, ce qui aide à comprendre l'évolution des erreurs de chacun des capteurs. Ceci prélude à l'intégration avec le GPS afin de réaliser le calcul du trajet.

4.1 Les détecteurs de vitesse angulaire

Les détecteurs de vitesse angulaire, ou gyromètres, produisent des mesures d'orientation relatives. Ils ne peuvent pas mesurer directement les angles mais ils rendent leur calcul possible par:

$$\theta(t) = \int \omega(t).dt \quad 4.1$$

où : θ est l'angle à déduire et ω la vitesse angulaire mesuré par le gyroscope

4.1.1 MEMS (*microsystème électromécanique*)

MEMS est l'acronyme du terme anglo-saxon (Micro-Electro-Mechanical Systems), qui désigne la conception et la fabrication d'appareils électromécaniques miniatures en exploitant la technologie des semi-conducteurs (Mohinder *et al.*, 2001).

La technique des MEMS, récemment apparue, a permis de se passer des dispositifs volumineux et difficiles à mettre en œuvre (toupies et porteurs par exemple). Il est possible, désormais, d'intégrer ces appareils dans la majorité des plateformes grâce à leur moindre masse et encombrement. La plupart des gyroscopes MEMS sont basé sur le principe du transfert d'énergie entre deux modes de vibration dus à l'effet Coriolis expliqué dans le paragraphe suivant.

4.1.2 L'effet Coriolis

G.G. de Coriolis a montré qu'un point matériel auquel on applique une rotation et une translation est soumis à une accélération due à la combinaison de ces deux mouvements. On peut exprimer cette accélération par le produit vectoriel de la vitesse angulaire $\vec{\Omega}$ de rotation et de la vitesse de translation \vec{v} :

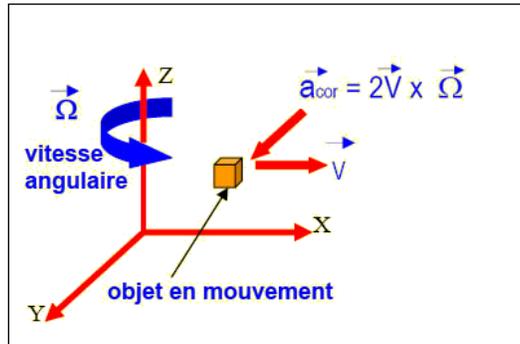


Figure 4.1 Concept de l'accélération de Coriolis

Ou en termes de normes des vecteurs :

$$a_{Coriolis} = 2\omega V \sin(\phi) \quad 4.2$$

où ω est la vitesse angulaire, V est la vitesse linéaire et ϕ représente l'angle entre les deux vecteurs. Si le point a une masse m et si l'angle ϕ est droit, on peut exprimer la force de Coriolis comme suit :

$$F = 2m\omega V \quad 4.3$$

ce qui rend la force proportionnelle à ω . Cette condition est toujours souhaitable lors de la conception des gyroscopes. Le problème de la mesure de la vitesse angulaire devient alors, une mesure de la force ou de l'accélération de Coriolis (par un accéléromètre).

4.1.3 Les gyroscopes MEMS à effet Coriolis (gyroscopes à vibration)

Plusieurs conceptions de gyroscopes dépendant de l'effet de Coriolis sont apparues au cours de la dernière décennie. L'idée de base est d'élaborer un dispositif permettant de générer une force de Coriolis liée à la vitesse angulaire, puis de mesurer cette force tout en minimisant la probabilité des erreurs éventuelles. Pour cela, une translation accompagnant la rotation à mesurer doit être introduite. La vibration fournit, normalement, une solution idéale puisque elle est facile à produire et à contrôler. Cette notion rend la plupart des gyroscopes MEMS dépendant d'une masse vibrante. La classification des gyroscopes MEMS est une tâche difficile compte tenu du développement industriel continu qui invente chaque jour des astuces pour en améliorer la conception. (Nasiri, 2007 ; Bernstein, 2003) classifient les gyroscopes selon leur type de conception dans les classes suivantes:

- Gyroscopie à diapason (tuning-fork gyroscope)
- Gyroscopie à toupie vibrante (Vibrating-wheel gyroscope)

- Gyroscope à cavité (anneau) résonnante (Wine glass resonator gyroscope, silicon ring gyroscope)
- Gyroscope à pendule de Foucault (Foucault pendulum gyroscope)

4.2 Les détecteurs d'accélération

Les accéléromètres ne sont pas seulement utilisés dans le domaine de la navigation inertielle, mais également pour le nivelage numérique des appareils, pour la surveillance de la sûreté des structures, dans les gravimètres, les détecteurs de choc et les sismomètres. Quel que soit leur type ou leur application, les accéléromètres dépendent de la deuxième loi de Newton dont la forme est :

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad 4.4$$

Ils mesurent l'accélération a d'une masse connue m (appelé la masse d'épreuve) par le biais d'une mesure de la force F que cette masse subit. Ce principe a permis l'apparition d'une large gamme de conceptions qui diffèrent entre elles par la façon de mesurer cette force. Les accéléromètres peuvent être classifiés comme étant mécanique ou à semi-conducteur.

4.2.1 Accéléromètres mécaniques

Un accéléromètre mécanique consiste en une masse suspendue par des ressorts, comme le montre la figure 4.2. Le déplacement de la masse est mesuré à l'aide d'un détecteur de déplacement, ce qui donne un signal proportionnel à la force F agissant sur la masse dans la direction de l'axe d'entrée. L'équation 4.4 est ensuite utilisée pour calculer l'accélération agissant sur l'appareil.

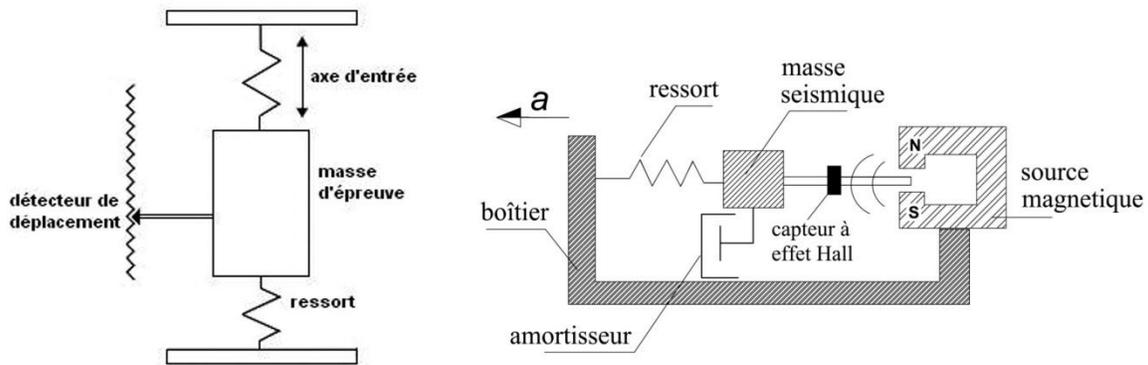


Figure 4.2 Schéma de conception d'accéléromètre mécanique (à droite) et d'accéléromètre à effet Hall

4.2.2 Microaccéléromètre (à semi-conducteur)

Les accéléromètres à semi-conducteur tentent de minimiser la quantité des parties en mouvement. Le principe demeure la transformation de la force résultant de l'accélération d'une masse en courant électrique ou en un autre signal mesurable. Lenz (1990) recense les types suivants d'accéléromètres à semi-conducteur :

- Capacitif
- Piézoélectrique
- Piézorésistif

- Potentiométrique
- A ondes élastiques de surface
- Asservi
- A effet Hall

4.3 Les capteurs magnétiques

Pour pouvoir mieux comprendre le principe d'opération de ces capteurs, il est nécessaire d'abord d'évoquer quelques notions concernant le champ magnétique terrestre, la navigation se basant sur ce champ et le compas mécanique.

Les magnétomètres sont souvent classifiés (Bratland *et al.*, 1998) selon la gamme de sensibilité aux champs magnétiques : faible, moyen, fort. La gamme moyenne est celle utilisée par la navigation car approprié au champ magnétique terrestre.

4.3.1 Le champ magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre représente l'une des méthodes les plus anciennes utilisées pour la navigation. Il se dirige du pôle magnétique sud vers le pôle nord avec une intensité de 0.5-0.6 Gauss dans un environnement ouvert, ce qui est considéré comme champ moyen. Sa composante horizontale est l'origine de la navigation magnétique tandis que la verticale se dirige vers le centre de la terre et a un effet parasite pour la navigation. Il change progressivement de direction, d'horizontale à l'équateur à verticale aux pôles. Ceci rend la navigation à l'aide du champ magnétique terrestre plus difficile lorsqu'on s'éloigne de l'équateur. La différence, à chaque point de la surface de la Terre, entre le Nord géographique et le Nord magnétique est désignée par la déclinaison magnétique. La déclinaison est calculée et cartographiée pour l'intégralité du globe selon des mesures et des modèles mathématiques comme : IGRF (International Geomagnetic Reference Field) et WMM (World Magnetic Model).

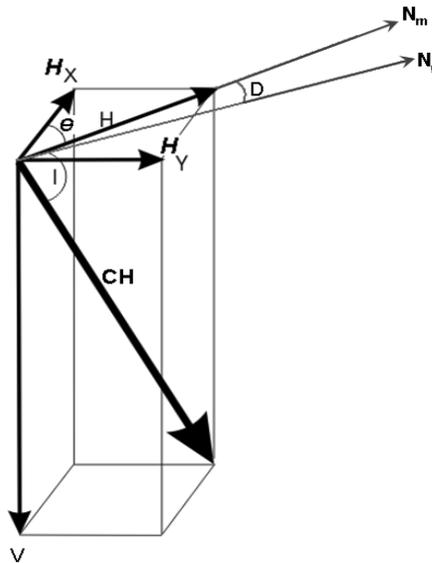


Figure 4.3 Éléments du champ magnétique

CH : vecteur du champ magnétique terrestre
 H, V : composantes horizontale et verticale
 H_x, H_y : composantes selon les axes liés à un objet en déplacement
 N_m, N_g : Nord magnétique et géographique
 D, I : angles de déclinaison et d'inclinaison
 θ : cap magnétique de l'objet

Un compas simple contenant deux magnétomètres est susceptible de mesurer une composante du champ magnétique horizontal selon leur propres axes X_b, Y_b . Ils détectent des valeurs différentes H_x, H_y (figure 4.3) selon l'orientation du compas. On peut calculer ψ , le cap du compas selon la relation simple :

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{H_y}{H_x} \right) \quad 4.5$$

La relation reste correcte tant que le compas est horizontal. Pour cette raison, on remarque que la plupart des boussoles contiennent une bulle de niveau ou sont suspendus à un cardan pour conserver l'horizontalité.

Un assemblage de trois magnétomètres perpendiculaires et de deux détecteurs d'inclinaison (deux gyroscopes verticaux en direction de X, Y) suffit pour détecter et éliminer la composante verticale du champ magnétique. Par conséquent, on peut calculer un cap compensé de l'effet d'inclinaison.

4.3.2 Détecteurs électroniques du champ terrestre (moyen)

Ce type de capteurs exploite le changement des propriétés physiques (perméabilité, inductance, résistance électrique...etc.) d'un cœur métallique à cause du changement des conditions magnétiques extérieures. La conception de ces capteurs permet de transformer le changement des propriétés en une tension mesurable et proportionnelle au champ magnétique appliqué. Les capteurs magnétiques terrestres principaux sont :

- Magnétomètre à entrefer (sonde magnétométrique)
- Capteur magnétoinductif
- Capteur magnétorésistif

4.4 La navigation inertielle/magnétique

Comme nous l'avons vu précédemment, chaque capteur est inapte, à lui tout seul, de fournir une estimation correcte des six degrés de liberté de la trajectométrie, Néanmoins l'intégration de plusieurs capteurs peut satisfaire quelques besoins (comme la détection du cap à l'aide du compas gyroscopique ou du compas compensé de l'effet d'inclinaison). L'intégration a pour avantage aussi de minimiser la taille, le poids, la consommation en puissance et les dispositifs pour traiter le signal. (Gardner *et al.*, 2001) ont présenté un capteur hybride qui est à la fois accéléromètre à ondes élastiques de surface et gyromètre à masse vibrante (figure 4.4).

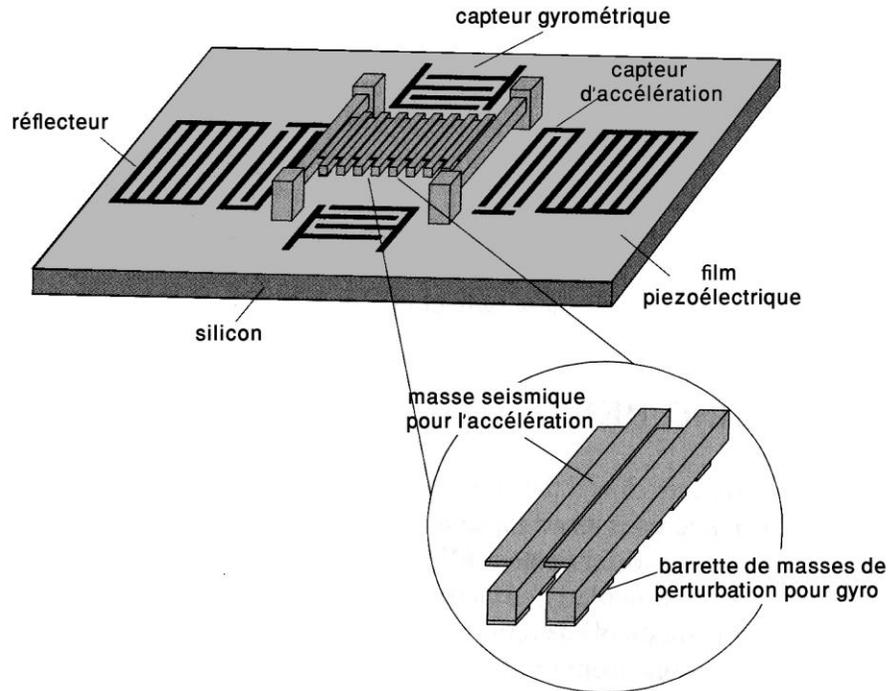


Figure 4.4 Schéma de principe d'un capteur hybride combinant un gyroscope et un accéléromètre sur la même puce: adapté de (Gardner *et al.*, 2001)

L'intégration, essentiellement, entre les accéléromètres et les gyromètres produit une solution de navigation autonome et indépendante. Le défi d'avoir une estimation acceptable des coordonnées et d'angles d'attitude est réussi, essentiellement, en rassemblant trois accéléromètres et gyromètres perpendiculaires dans une configuration appelée : centrale à inertie (IMU : Inertial Measurement Unit). Quand on embarque un calculateur dans le système, on peut désigner l'unité comme un système de navigation inertielle (INS : Inertial Navigation System).

4.5 La centrale inertielle

Supposons que nous avons une configuration de trois accéléromètres deux à deux orthogonaux attachés au corps d'un objet en déplacement. On peut se poser la question suivante : pourquoi la double intégration de l'accélération mesurée sur chaque axe ne suffit pas pour obtenir la distance parcourue en projection sur l'axe correspondant et pour obtenir, en conséquence, les coordonnées actuelles de l'objet ? L'invalidité de cette solution est liée aux trois faits suivants :

- On ne dispose pas des bornes d'intégration. C'est la raison pour laquelle le calcul inertiel demeure toujours dans un espace local (si on ne dispose pas de source de référence externe comme le GPS).
- Si l'objet subit une vitesse angulaire, l'accéléromètre détecte une accélération parasite résultant de la gravité terrestre et de l'effet Coriolis.
- Les valeurs détectées expriment la quantité d'accélération exercée sur l'axe d'entrée de chaque capteur. Comme l'objet ne maintient pas une position fixe, les axes attachés ne constituent pas un repère fixe valide pour accumuler les intégrations calculées au cours du temps.

Pour pouvoir surmonter les deux derniers obstacles, l'industrie propose deux solutions différentes qui produisent deux familles de centrale inertielle:

- Les centrales à plateforme stabilisée : les accéléromètres sont montés sur une plateforme qu'on asservit dans une direction fixe par rapport à la Terre (stabilisation gyroscopique à l'aide d'un moteur d'asservissement). Quelle que soit l'attitude de l'objet, on mesure les accélérations dans un référentiel connu. On peut les intégrer deux fois après avoir compensé l'effet de couple exercé par le moteur maintenant l'horizontalité dans un repère inertiel. Il s'agit de mécanique de haute précision totalement irréalisable sur les petites plateformes mobiles. Néanmoins le calcul est remarquablement plus simple, ce qui minimise l'effet des erreurs de calcul. La figure ci-dessous montre une centrale inertielle contenant trois gyroscopes qui servent comme des détecteurs de zéro pour asservir les moteurs. Les gyroscopes n'interviennent pas dans le calcul de position.

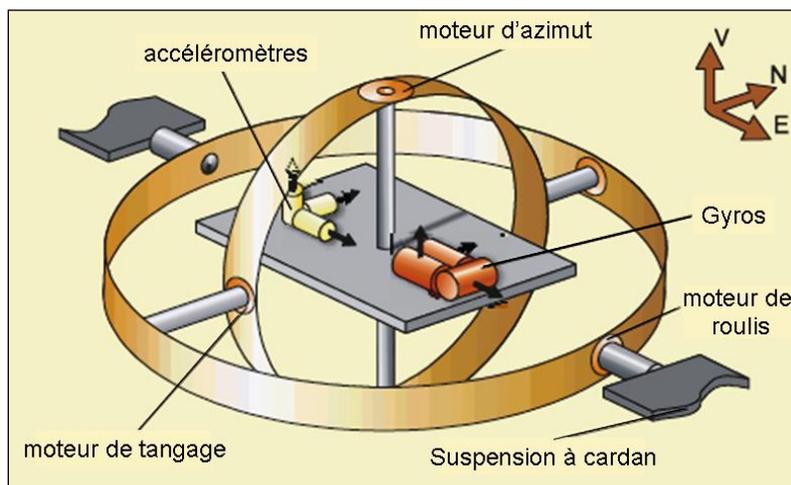


Figure 4.5 Centrale inertielle montée sur cardan (figure de (King, 1998))

- Les centrales à composants liés (dites "strapdown") : dans cette catégorie, les accéléromètres et les gyroscopes sont solidaires du porteur. Les accélérations mesurées le sont dans le repère de l'objet et doivent au préalable être projetées dans un repère fixe donné avant d'être intégrées. Pour cela, il faut d'abord connaître l'attitude de l'objet (roulis, tangage et lacet). On intègre donc les mesures gyrométriques de l'attitude courante à chaque instant. Avec des capteurs de bonne qualité et une certaine capacité de calcul, les gyromètres servent à la double tâche suivante ; détecteurs de vitesse angulaire et compensateurs de l'inclinaison de l'objet à chaque instant.

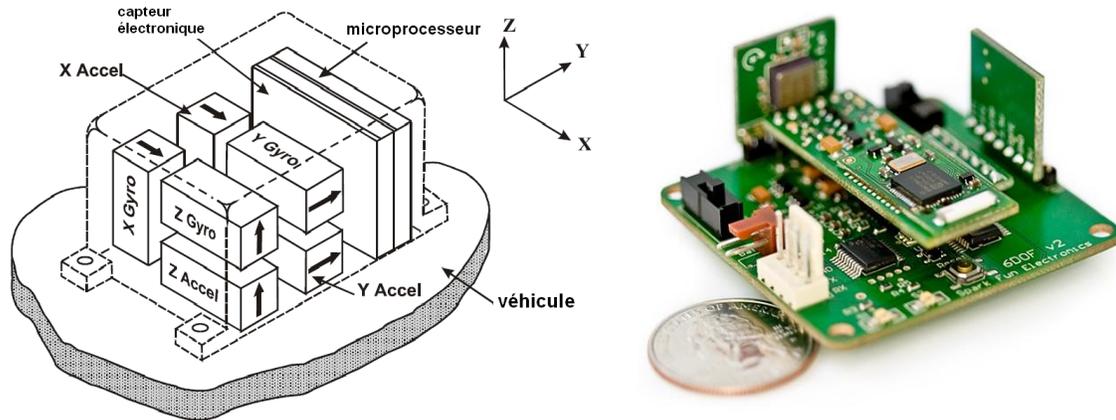


Figure 4.6 Configuration d'une centrale inertielle à composants liés : un schéma simplifié (à gauche) et un montage commercial de SparkFun® (à droite)

Contrairement aux centrales à suspension, les « strapdown » sont de taille et de coût abordables. La plupart des petits avions, véhicules autonomes, bateaux et robots sont pourvus de centrales inertielles à composants liés. Ces centrales utilisent les gyroscopes MEMS, FOG et les accéléromètres à composants fixes.

On peut constater que la simplification effectuée en fixant les capteurs à la structure de l'objet a pour prix des calculs (mécanisation) plutôt compliqués. L'objectif est de changer le référentiel des mesures d'un repère amovible lié à l'objet à un repère fixe valide où on peut exprimer l'attitude et la position à chaque instant. Les prochains paragraphes sont consacrés à la mécanisation de la centrale inertielle à composants liés.

L'initialisation de la centrale inertielle est réalisée en situation fixe où on peut neutraliser les composantes du vecteur de gravité \vec{g} dans le plan horizontal. Le cap est calculé en comparant les composantes de la vitesse angulaire dans le plan horizontal. D'autres capteurs sont utilisés donc pour initialiser l'INS. L'angle de lacet peut être déduit des vitesses Est et Nord mesurées par le GPS ou par le cap magnétique déduit par les magnétomètres.

4.5.1 La mécanisation de l'INS

L'accéléromètre mesure la force spécifique f^b résultant du déplacement du repère attaché au véhicule b . Le gyromètre mesure la vitesse angulaire de rotation ω_i^b du repère b dans le repère inertiel i (annexe D). Or, aucun des deux repères n'est valide pour exprimer l'attitude et la position. Pourtant, l'intégration de ω_i^b produit la matrice de rotation R_i^b qui transforme la force mesurée dans le repère inertiel pour lequel des modèles de gravité terrestre sont disponibles. Par conséquent, on peut soustraire la gravité de la force mesurée et en déduire l'accélération exprimée dans le repère de navigation. La première intégration de cette accélération donne la vitesse et la deuxième donne la position r^i , toutefois dans le repère inertiel.

La vitesse angulaire de la Terre $\omega_i^e = (0, 0, \omega_i^e)^T$ est connue. Elle interagit avec la vitesse calculée par la première intégration pour en déduire la vitesse de l'objet dans le repère e . De même, on peut déduire de la vitesse de rotation de la Terre, par intégration, la matrice de rotation transformant R_i^e le repère de navigation en repère terrestre fixe e .

Malheureusement, le calcul n'admet pas de solution analytique. Chaque fois qu'on change de repère, il faut revenir en amont pour ajouter des corrections concernant les vecteurs qui n'apparaissent pas auparavant. La solution de mécanisation se fait donc par des méthodes itératives ce qui est largement coûteux en terme de temps de traitement notamment quand il s'agit de temps réel. L'autre solution de mécanisation dans le repère terrestre est de rassembler tous les effets dans un système d'équations différentielles comme suit (Chatfield, 1997) :

$$\begin{aligned} \dot{r}^e &\approx v^e \\ \dot{v}^e &\approx R_b^e \cdot f^b - 2 \Omega_{ie}^e \cdot v^e + g^e \\ \dot{R}_b^e &\approx R_b^e \Omega_{eb}^b \end{aligned} \quad 4.6$$

où Ω désigne la matrice antisymétrique du vecteur ω .

ω_{kl}^j désigne la vitesse angulaire entre les repères k, l résolue dans le repère j

L'égalité entre les deux membres de l'équation n'est pas précise à cause des erreurs de mesure. Le terme $2 \Omega_{ie}^e \cdot v^e$ dans la deuxième équation représente l'accélération supplémentaire de Coriolis. Il est un exemple de l'interdépendance entre les équations ; le calcul de l'accélération \dot{v}^e dépend de la vitesse v^e or normalement la vitesse doit être calculée à partir de l'accélération par intégration. Pour des raisons de simplicité, le vecteur de gravité terrestre g^e est considéré comme fixe, tout en sachant qu'il est dépendant de la position r^e ce qui augmente la complexité du calcul. Les trois équations représentent un système différentiel du quatrième ordre qui est résolu par la méthode de Runge-Kutta.

Bien que le repère terrestre e soit un repère valide pour exprimer la position, il n'est pas tout à fait approprié pour exprimer la vitesse ou l'attitude. Ces deux dernières sont, normalement, mesurées dans le repère local de navigation n (NED). La matrice de rotation R_e^n transformant le repère terrestre en navigation ne dépend que de la position calculée r^e : (φ, λ, h) .

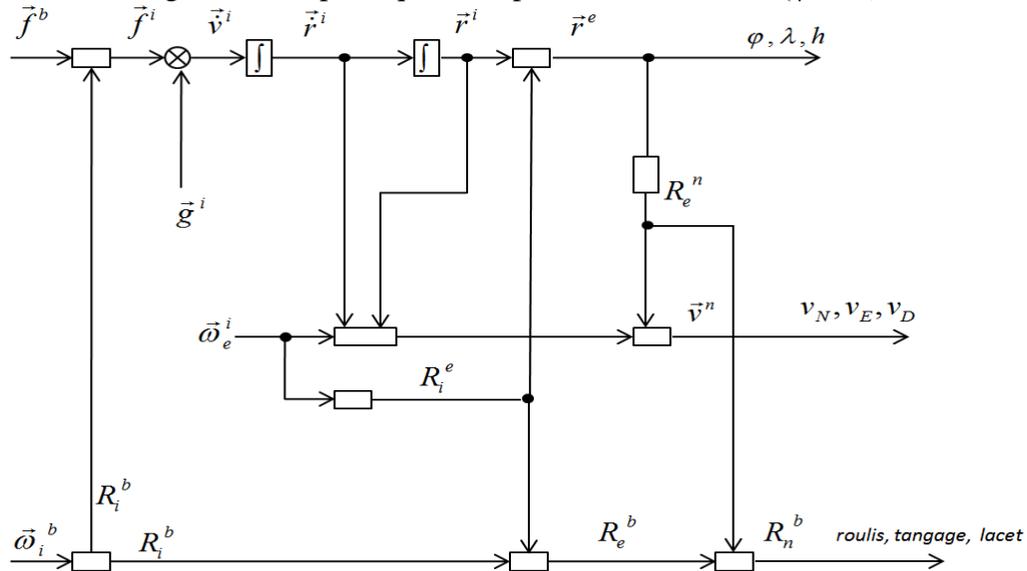


Figure 4.7 Schéma de la mécanisation de la centrale inertielle dans le repère de navigation (avec un vecteur de gravité constant)

Les équations de la navigation dans le repère de navigation sont (Shin, 2001) :

$$\begin{aligned} \dot{r}^n &\approx D^{-1}v^n \\ \dot{v} &\approx R_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v^n + g^n \\ \dot{R}_b^n &= R_b^n (\Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^b) \end{aligned} \quad 4.7$$

$$\text{où } D = \begin{pmatrix} M+h & 0 & 0 \\ 0 & (N+h) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad 4.8$$

M, H sont les rayons de courbure principale et transversale de la position \vec{r}

Il est fréquent d'exprimer l'attitude à travers les quaternions au lieu d'utiliser la matrice de rotation traditionnelle. L'utilisation des quaternions facilite largement le calcul et la dérivation comme on le verra plus tard dans ce chapitre.

Le repère « Wander » résulte de celui de la navigation mais après l'avoir tourné par un angle $\alpha = -\lambda \sin \varphi$ variable en fonction de la latitude φ et de la longitude λ de la plateforme mobile. (Titterton et Weston, 2004) montre que la mécanisation dans ce repère a pour but d'enlever l'instabilité du calcul survenant dans les zones proches des pôles et de faciliter le calcul des erreurs.

4.6 Système de référence d'orientation et de cap AHRS

Les concepteurs de centrales inertielles contenant des gyromètres de gamme élevée (FOG ou RLG) n'ont guère recours à l'aide magnétique de navigation. En revanche, cette aide est largement invoquée dans le cas des centrales à faible coût notamment celles utilisées à bord de petits avions ou bateaux où le champ magnétique terrestre n'est pas perturbé. La désignation AHRS (Attitude and Heading Reference System) de l'assemblage des magnétomètres avec la centrale inertielle prend en considération la contribution des magnétomètres seulement lors du calcul du cap.

On peut considérer l'AHRS comme une combinaison d'un compas compensé en inclinaison et d'une centrale inertielle. Il peut neutraliser l'effet de la composante verticale du champ magnétique terrestre en s'aidant par les angles de roulis ϕ et du tangage θ selon les équations suivantes (Caruso, 2000) :

$$H_x = m_x^b \cdot \cos\theta + m_y^b \cdot \sin\phi \cdot \sin\theta - m_z^b \cdot \cos\phi \cdot \sin\theta$$

$$H_y = m_y^b \cdot \cos\phi + m_z^b \cdot \sin\phi \quad 4.9$$

où m_x^b, m_y^b, m_z^b sont les valeurs du champ magnétique terrestre selon les axes du repère du véhicule.

H_x, H_y les valeurs compensées de l'effet de la composante verticale du champ magnétique terrestre.

Le lacet ψ est alors calculé comme suit (cas du premier quart du cercle trigonométrique) :

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{H_y}{H_x} \right) \quad 4.10$$

La valeur de cet angle s'intègre avec l'attitude par la partie inertielle de l'AHRS en utilisant le filtre de Kalman exposé dans le prochain chapitre.

L'un des avantages de l'utilisation des magnétomètres à côté des capteurs inertiels est la connaissance à tout instant des vecteurs du magnétisme et de la gravité terrestre dans le repère véhicule et navigation. Ce fait implique un problème mathématique bien connu dans lequel on cherche la relation entre les deux repères. On se réfère à ce problème par « Wahba problem » qui a plusieurs solutions comme celles de QUEST (Wertz, 1984) et de SVD (Markley, 1988). Nous allons, à titre indicatif, montrer l'algorithme dit « TRIAD » pour estimer l'attitude optimale. Cet algorithme est utilisé pour orienter les satellites à l'aide de deux vecteurs mesurables : le vecteur entre le satellite et le soleil ou une étoile spécifique et le champ magnétique terrestre (Markley, 2002).

Les deux triplets des vecteurs d'unité i, j, k définissant les repères du véhicule et de la navigation sont données par :

$$\begin{aligned} i^b &= \frac{\gamma^b}{|\gamma^b|} & i^n &= \frac{\gamma^n}{|\gamma^n|} \\ j^b &= \frac{i^b \times m^b}{|i^b \times m^b|} & j^n &= \frac{i^n \times m^n}{|i^n \times m^n|} \\ k^b &= i^b \times j^b & k^n &= i^n \times j^n \end{aligned} \quad 4.11$$

La matrice de rotation R_b^n est obtenue par la relation :

$$R_b^n = i^b \cdot i^{nT} + j^b \cdot j^{nT} + k^b \cdot k^n \quad 4.12$$

Plusieurs AHRS à faible coût ne produisent qu'une mesure d'attitude. La mécanisation de la partie inertielle sert seulement à déterminer le vecteur de gravité dans le repère de navigation pour fournir l'algorithme exposé ci-dessus. Ceci est possible à l'aide des seuls accéléromètres ce qui est le cas pour le compas compensé de l'effet d'inclinaison.

4.7 Les erreurs de navigation inertielle/magnétique

Il existe une gamme d'erreurs communes entre toutes les conceptions des capteurs. Nous allons nous intéresser particulièrement à ces erreurs dans l'objectif de suivre leurs effets sur les résultats de navigation et sur le nuage de point résultants des missions mobiles.

Comme un système mobile terrestre ne se déplace pas à des hautes vitesses, les caractéristiques, comme l'étendue de mesure et les spécifications mécaniques, sont satisfaites par la plupart des capteurs existant à l'échelle commerciale. L'accent sera mis d'avantage sur les erreurs principales. Les erreurs sont classifiées en deux niveaux ; le niveau du capteur et le niveau d'assemblage.

4.7.1 Au niveau du capteur

4.7.1.1 Les erreurs des gyromètres \ accéléromètres

Les figures 4.8 et 4.9 montrent la totalité des erreurs résultant du cycle de fonctionnement du gyroscope et de l'accéléromètre. L'effet de l'erreur de quantification survenue lors de la conversion analogique-numérique et la résolution liée à cette conversion seront négligés dans ce contexte.

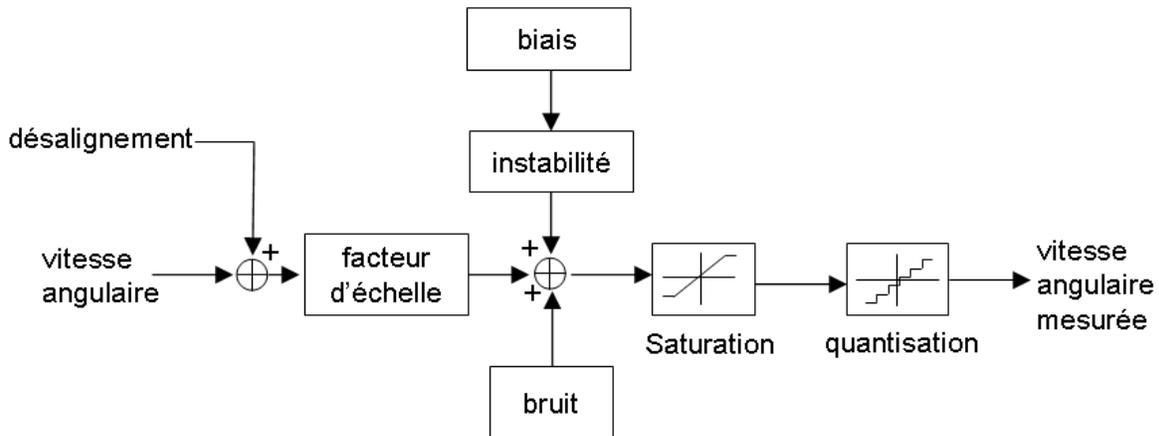


Figure 4.8 Schéma fonctionnel des erreurs du gyroscope

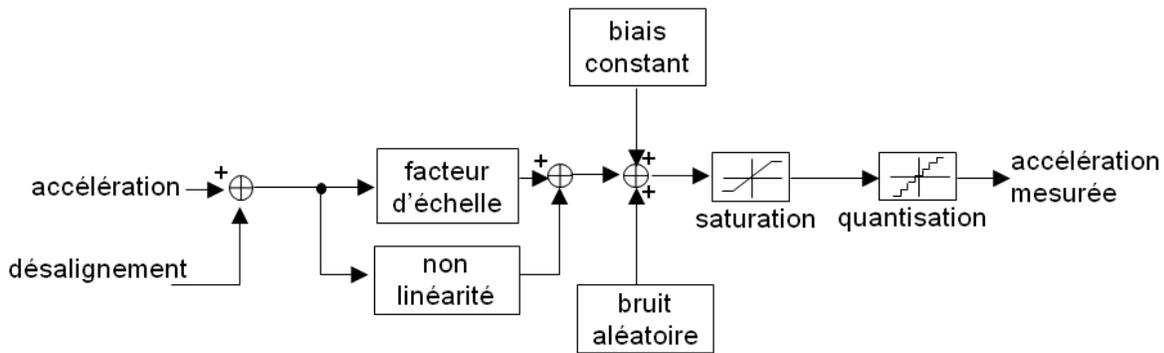


Figure 4.9 Schéma fonctionnel des erreurs de l'accéléromètre (figures adaptées de Smith *et al.*, 2003)

4.7.1.1.1 Le biais

Le biais est l'erreur la plus évidente. Il s'agit tout simplement d'une valeur additionnelle :

$$\omega_{sortie} = \omega_{entrée} + b_{\omega}$$

$$a_{sortie} = a_{entrée} + b_a$$

4.13

où ω : la vitesse angulaire

a : l'accélération

b : le biais

Le biais peut être facilement déterminé quand l'entrée est nulle. Il est mesuré, en général, à travers une tension et transformé en °/s en le divisant par le facteur d'échelle. Néanmoins, il est différent à chaque mise en route du système ce qui ôte le systématisme de cette erreur. Les variations possibles à chaque mise sous tension sont souvent appelés « stabilité de biais » où « la répétabilité ». En outre, le biais évolue souvent légèrement avec le temps selon la mobilité de la centrale. Cette évolution, nommée dérive, est entre autres, due aux variations de température. Nous trouvons souvent dans les données du constructeur des estimations pour la stabilité de biais et la stabilité de biais avec la température. On peut résumer les considérations précédentes par la relation :

$$b_{\omega} = b_{\omega_{constant}} + b_{\omega_{démarrage}} + b_{\omega_{marche-aléatoire}} \quad 4.14$$

Le premier terme est une constante connue, le deuxième est une constante inconnue et le troisième est modélisé généralement comme un processus de marche aléatoire :

$$\frac{d}{dt} b_{\omega} = w(t) \quad 4.15$$

où w est un bruit gaussien blanc avec une variance connue.

Le biais, seul, est suffisant pour déterminer la gamme d'une centrale inertielle. (El-Sheimy *et al.*, 2007) ont classifié les centrales en trois gammes : navigation ($b_{\omega} \approx 0.015$ deg/h et $b_a \approx 50-100 \mu\text{g}$), tactique ($b_{\omega} = 0.1-10$ deg/h et $b_a = 200-1000 \mu\text{g}$) et grand public ($b_{\omega} = 10-3600$ deg/h et $b_a = 0.1-0.5$ g).

4.7.1.1.2 L'erreur du facteur d'échelle

Le facteur d'échelle est un coefficient (en v/°/s) qui transforme la vitesse angulaire d'entrée en tension sortante. Le facteur d'échelle représente alors le facteur de proportionnalité entre la vitesse angulaire (ou l'accélération) entrante (exercée) à celle sortante (mesurée).

$$\begin{aligned} \omega_{sortie} &= k_{\omega} \omega_{entrée} \\ a_{sortie} &= k_a a_{entrée} \end{aligned} \quad 4.16$$

k : facteur d'échelle

La dernière relation exprime le facteur d'échelle comme pente d'une droite. Néanmoins, il pourra être assimilé à une courbe non linéaire ce qui introduit une autre erreur s'appelant la non-linéarité du facteur d'échelle. L'évolution de l'erreur du facteur d'échelle est souvent modélisée par une relation similaire au cas du biais.

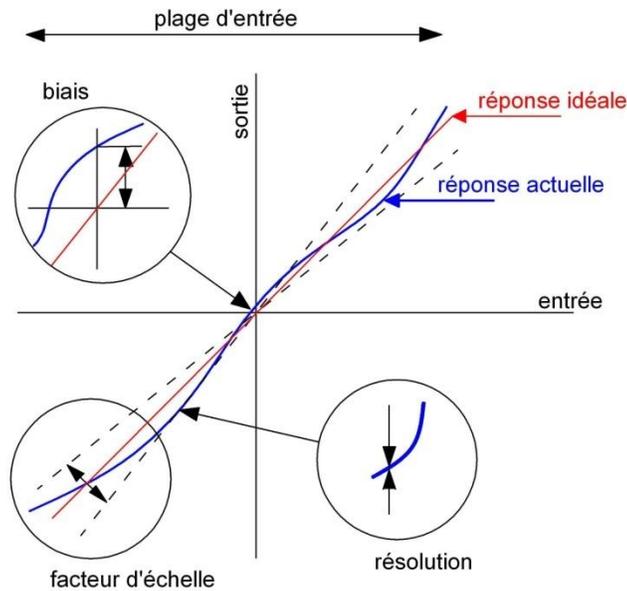


Figure 4.10 Schéma montrant les erreurs de biais, de facteur d'échelle et de résolution d'un gyromètre à fibres optiques. Figure de (Oho *et al.*, 1995)

Le facteur d'échelle et le biais sont, tous les deux, dépendants du temps et de la température. Dans le cas où l'effet de température est compensé (calibration usine) à l'aide d'un capteur de température intégré, nous pouvons rassembler le biais et le facteur d'échelle comme suit :

$$\omega_{\text{corrigée}} = \frac{1}{(1 + s_{\omega})} \cdot \omega_{\text{mesurée}} + b_{\omega}$$

$$a_{\text{corrigée}} = \frac{1}{(1 + s_a)} \cdot a_{\text{mesurée}} + b_a \tag{4.17}$$

Si l'erreur du facteur d'échelle est exprimée en pourcentage : S_{ω} , S_a .

Cette modélisation des erreurs au niveau des capteurs, bien que simple, est largement suffisante pour une grande variété d'applications.

4.7.1.1.3 Le bruit

Il s'agit de l'imprécision des dispositifs électroniques. Il a des propriétés aléatoires et, en général, ne peut pas être supprimé avec des modèles déterministes. Il est plutôt considéré comme une première approximation de bruit blanc gaussien.

$$\omega_{\text{sortie}} = \omega_{\text{entrée}} + v_{\omega}$$

$$a_{\text{sortie}} = a_{\text{entrée}} + v_a \tag{4.18}$$

Dans les fiches techniques, il est souvent caractérisé par la marche aléatoire de la vitesse pour les accéléromètres et la marche aléatoire des angles pour les gyroscopes, avec une densité exprimée en $v/\sqrt{\text{Hz}}$.

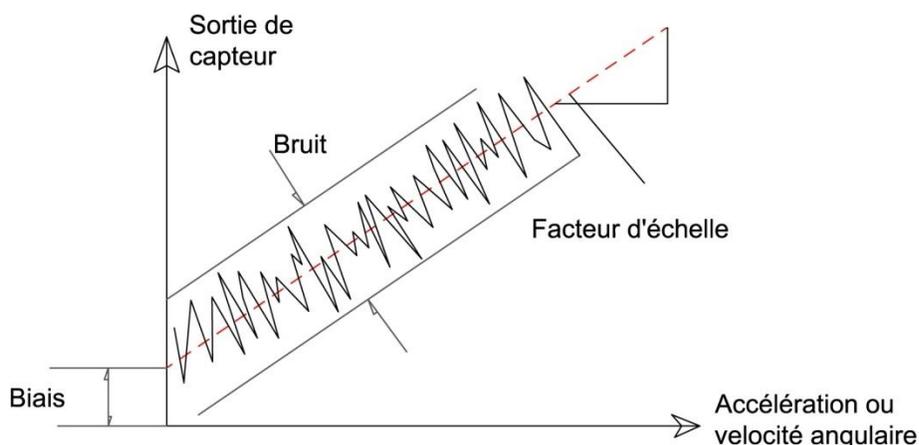


Figure 4.11 Bilan d'erreurs subis par un capteur MEMS (gyromètre, accéléromètre)

4.7.1.2 Les erreurs des magnétomètres

Etant de nature micro-électronique, les magnétomètres subissent les mêmes erreurs que les gyromètres et accéléromètres MEMS. Pourtant, l'effet de ces erreurs n'est pas aussi déterminant en raison de la nature du calcul de l'attitude en fonction du magnétisme. De manière grossière, l'accélération est issue d'une double intégration, la vitesse angulaire est issue d'une seule intégration et les deux interagissent entre elles. Par conséquent l'effet des erreurs des accéléromètres et des gyromètres est une fonction de troisième et de deuxième degré du temps écoulé depuis le démarrage de la centrale. Le cap magnétométrique n'est pas fonction du temps. Les erreurs qui nous intéressent font partie du bruit possible à détecter à côté du champ magnétique terrestre. D'autres erreurs comme l'hystérésis du matériau du capteur, la perturbation du magnétisme terrestre et la précision de la cartographie de l'angle de déclinaison, bien qu'importantes, ne sont pas considérées dans cette thèse.

4.7.1.2.1 Le ferromagnétisme dur/doux

La présence d'éléments ferromagnétiques à proximité d'un magnétomètre influence la mesure du champ terrestre. S'il s'agit d'objets faisant partie du véhicule même, le ferromagnétisme est dur (*Hard iron*), autrement, il sera doux (*Soft iron*). Cette erreur est normalement modélisée comme une valeur additive sur les composantes du champ magnétique détecté. Un test de calibration bien connu est utilisé pour estimer la valeur du ferromagnétisme dur comme une erreur systématique et du ferromagnétisme doux comme une erreur aléatoire. Il s'agit de tourner la plateforme des magnétomètres de plus de 360° dans un plan horizontal, puis de cartographier les valeurs détectées selon les axes x,y. Dans le cas idéal, on trace un cercle centré en (0,0). Le ferromagnétisme dur décale un peu le centre de ce cercle. Les composantes de cette translation sont sauvegardées comme des corrections constantes à appliquer. D'autre part, la trace faite n'est pas tout à fait un cercle mais une ellipse dont on considère l'aplatissement comme un coefficient exprimant la réponse des magnétomètres à un effet extérieur ou autrement dit ; le ferromagnétisme doux.

L'erreur du ferromagnétisme doux est de nature complexe. Des tests standards et des modèles non linéaires sont faits (Gebre-Egziabher, 2006) pour mieux approcher l'effet de cette erreur. Pourtant, la plupart des AHRS adoptent le test expliqué précédemment.

4.7.2 Le niveau du système

On s'intéresse à ce niveau aux erreurs survenant de l'assemblage des triplets orthogonaux des capteurs dans une centrale inertielle. Les effets dynamiques engendrant des erreurs corrélées sur plus d'une direction font partie de cette catégorie également.

L'erreur la plus évidente à ce niveau est la non-orthogonalité des capteurs qui est vraisemblable pour le type MEMS. Ceci rend le repère du véhicule non-orthogonal et nécessite un modèle de correction, établie normalement en usine. La correction se fait en multipliant la vitesse angulaire, l'accélération ou le magnétisme par une matrice antisymétrique des coefficients. Une autre erreur provient de l'effet du changement de la température sur la performance des capteurs. Pour compenser cette erreur, la plupart des centrales inertielles sont équipées de thermomètres à mesure numérique qui assurent la compensation en temps réel.

L'un des effets dynamiques importants à compenser est l'oscillation de Schuler. Le vecteur de la gravité terrestre ne reste pas vertical quand il est conjugué avec une accélération quelconque. Ce constat a été fait par Schuler qui a observé un pendule dont on déplace le point d'origine horizontalement. Il a prouvé que le pendule oscille avec une période de 84.4min. L'accéléromètre subit la même oscillation qui peut être traitée comme une partie de mécanisation ou comme une erreur postérieure. L'effet de ce phénomène sur la navigation inertielle et les méthodes de correction sont expliqués dans (Titterton et Weston, 2004).

L'erreur d'initialisation s'ajoute aussi à cette catégorie. Si l'initialisation se fait en mode fixe où à l'aide d'un GPS, seule l'attitude sera entachée par des erreurs d'initialisation. Sinon le calcul de la position et de la vitesse de départ sera déterminant pour la mécanisation.

4.8 Le modèle d'erreurs pour la centrale inertielle

L'état de l'art correspondant à la modélisation des erreurs de la centrale inertielle est largement diversifié et relativement complet. Ceci est dû au choix des équations dynamiques qui dominent la mécanisation et à la diversité des erreurs éventuelles qui l'affectent. Normalement, le modèle d'erreur est utilisé si l'intégration de la centrale inertielle avec le GPS est prévue.

Tous les modèles d'erreurs dépendant de la loi de propagation d'erreur nécessitent la dérivation des équations de la mécanisation. Cette pratique est désignée par la « perturbation » pour les équations différentielles. La perturbation des équations 4.7 (page 42) donne les relations suivantes (Petovello, 2003):

$$\begin{pmatrix} \delta \dot{r}^e \\ \delta \dot{v}^e \\ \dot{\epsilon}^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta v^n \\ -F^{e \times} \epsilon^e + N^e \delta r^e - 2\Omega_{ie}^e \delta v^e \\ -2\Omega_{ie}^e \epsilon^e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ R_{b\delta}^e f^b \\ R_b^e \delta \omega_{ib}^b \end{pmatrix} \quad 4.19$$

où $\delta r, \delta v, \epsilon$ sont les corrections sur les vecteurs position, vitesse et attitude, alors que $\delta \dot{r}, \delta \dot{v}, \dot{\epsilon}$ sont leurs dérivées par rapport au temps.

$F^{e \times}$ est la matrice antisymétrique des accélérations mesurées dans le repère de navigation

N^e est le gradient du vecteur de gravité (annexe E).

Les deux corrections $\delta r, \delta v$ sont additionnées directement à la position et à la vitesse. La correction angulaire ϵ rejoint la matrice de rotation selon la relation :

$$\hat{R}_b^e = (I - E^n)R_b^e \quad 4.20$$

où E^ϵ est encore la matrice antisymétrique de ϵ

Un tel calcul devient complexe, notamment pour les applications temps réel. La complexité provient essentiellement de la manipulation des matrices de rotation. Pour cela, deux modèles simplifiés sont mis en œuvre ; phi-angle et psi-angle (Bar-Itzhack et Berman, 1988). Le principe est d'appliquer la loi de propagation d'erreur dans deux repères modifiés légèrement de celui de navigation pour la séparer les erreurs de translation et d'attitude.

(Kong, 2004) combine l'utilisation des quaternions avec le modèle de psi-angle afin d'avoir un modèle de calcul très simple et pratique. Son modèle ne traite que le biais comme une erreur dépendant du temps.

Des références comme (Li, 2006) augmentent le modèle d'erreur de neuf états (équation 4.21) par six équations supplémentaires représentant la marche aléatoire des biais :

$$\begin{aligned} \dot{b}_a &= w_a(t) \\ \dot{b}_\omega &= w_\omega(t) \end{aligned} \quad 4.21$$

Quel que soit le modèle d'erreur utilisé, il ne sert guère à produire une estimation de précision pour chaque mesure comme c'est le cas classique en topographie, mais pour établir une base de calcul stochastique lors de l'intégration avec les autres capteurs.

4.9 Le modèle d'erreurs de l'AHRS

Le modèle d'erreurs caractérisant le comportement d'un AHRS dépend du degré d'intégration des magnétomètres avec la centrale inertielle. Si on augmente la modélisation inertielle par le cap magnétique en utilisant le filtre de Kalman, le bilan des erreurs résulte directement du filtre. (Adiprawita *et al.*, 2007) utilisent la solution de TRIAD pour estimer l'attitude ; néanmoins le modèle d'erreur ne diffère pas de celui de l'INS expliqué plus haut. L'attitude calculée sert de correction lors de l'application du filtre ce qui ne nécessite pas une modélisation complexe des erreurs. Les équations de correction représentent la différence entre les valeurs mesurées et calculées. Le filtre de Kalman sera exposé dans le prochain sous-chapitre.

5. Le Filtre de Kalman et ses applications à la navigation

Ce sous-chapitre aborde l'intégration du GPS avec l'INS ou l'AHRS. L'état de l'art actuel en navigation montre, à quelques exceptions près, que la méthode la plus adaptée pour l'intégration de données issues de différents capteurs est le filtre de Kalman. Ce filtre n'est pas seulement utilisé pour intégrer les GPS/INS, mais encore à l'intérieur de la centrale inertielle pour fusionner les données des gyromètres et des accéléromètres et à l'intérieur des capteurs GPS pour lier la vitesse et la position.

(Seifert et Kleusberg, 2003) ont présenté une méthode de l'intégration GPS/INS en post-traitement par moindres carrés. (Xu et Petr, 2000) ont aussi présenté une solution par l'analyse du potentiel du positionnement. Les positions précises jouent le rôle d'un champ de force qui attire le trajet. Les algorithmes présentés ne sont pas encore suffisamment testés pour être adaptés comme un équivalent du filtrage de Kalman.

Les modèles de calcul utilisés diffèrent entre eux par la notion de continuité du temps et par la composition des vecteurs d'état et de mesure. Le filtre de Kalman sera donc brièvement présenté dans ce chapitre. Puis, nous nous arrêterons aux modèles concernant les capteurs principaux de navigation.

5.1 Les espaces état-mesures :

En général, un système peut être décrit par un ensemble de paramètres et de variables. Les variables d'intérêt représentent un point x dans l'espace d'état à chaque instant k . Il faut que quelques variables (ou la totalité) soient estimables à l'aide de mesures qui représentent, elles aussi, un point z dans l'espace de mesure. Il est important donc d'établir une version dynamique du problème qui utilise les observations faites à quelques instants pour connaître l'état du système à chaque instant $t = 0 \dots k$

L'estimation de l'état x en prenant en compte les mesures faites jusqu'au moment k (compris) est appelée x_k^+ et désignée par « finale ». Par opposition, si les données à l'instant k (non compris) sont utilisées, l'estimation est appelée x_k^- et désignée par « intermédiaire ».

La modélisation comportementale décrit comment l'état $x(k)$ change en fonction du temps, du vecteur de commande $u(k)$ et du bruit $v(k)$. Le modèle de mesures $z(k)$ décrit comment les données des capteurs varient en fonction de l'état et d'un bruit de mesure.

5.2 Le Filtre de Kalman

Après avoir exprimé convenablement les équations d'état et de mesure, il suffit de trouver une manière optimale pour introduire leurs incertitudes dans une somme pondérée pour pouvoir trouver l'estimation optimale de l'état. Le filtre de Kalman ne nécessite pas seulement un modèle en cours mais encore une estimation continue des matrices de covariance.

Les hypothèses faites sont les suivantes (Dudek et Jenkin, 2000) :

- Le système est de bruit moyen nul $E[v_i] = 0$ où $E[]$ est compris au sens de l'espérance mathématique.
- Les bruits des états sont indépendants entre eux : $E[v_i v_j] = 0$ si $i \neq j$, sinon $E[v_i v_i] = \sigma_i$ (k). Ce bruit est désigné par modèle blanc gaussien ($v_k \sim N(0, Q_k)$ distribution normale de covariance Q_k).
- L'évolution du modèle du système au cours du temps est linéaire.
- La relation entre un état du système (la position par exemple) et sa mesure est linéaire.

Ces conditions sont rarement assurées. Si elles ne le sont pas, jusqu'à un certain point, le filtre pourrait fonctionner quand même. La version classique du filtre de Kalman est optimale pour les problèmes linéaires, avec une approche temporelle discrète ou continue.

Le filtre de Kalman définit une estimation récursive, optimale au sens d'un critère quadratique de l'état du système à partir d'une séquence d'observation. Il met à jour un estimateur \hat{x}_k^- qui tient compte de toutes les informations disponibles jusqu'à l'instant k considéré. Il minimise la trace de la matrice covariance associée P_k^+ (Durieu *et al.*, 1996) :

$$P_k^- = E[(\hat{X}_k^- - X_k)(\hat{X}_k^- - X_k)^T] \quad 5.1$$

5.2.1 Le modèle de temps discret

Par temps discret, on entend que l'évolution du système n'est pas prise en compte de façon continue par le calculateur et que les mesures ne sont disponibles qu'à certains instants et non en continu. Cette considération est largement suffisante pour de faibles vitesses de déplacement. L'approche semi-continue, qui autorise une évolution continue du modèle du système tout en conservant un échantillonnage des mesures, n'est pas abordée dans le contexte de cette thèse.

Le modèle dynamique linéaire du système, ou l'équation d'état à l'instant $k, k-1$:

$$x_k = \Phi_{k-1} \cdot x_{k-1} + v_{k-1} + G_k \cdot u_k \quad 5.2$$

avec : Φ_k la matrice de transition décrivant l'évolution du système d'un état à l'autre, supposée connue.

G_k matrice de commande

Le modèle de mesure est :

$$z_k = H_k \cdot x_k + w_k \quad 5.3$$

où H_k est la matrice de mesure

w_k est le bruit de mesure, quant à lui aussi, blanc gaussien (distribution normale de covariance R_k : $w_k \sim N(0, R_k)$).

Supposons que nous connaissons toutes les matrices “finales” à l’instant k_I . La prédiction de l’état (ou extrapolation du vecteur d’état) exprime comment propager l’estimation au pas suivant :

$$\hat{x}_k^- = \Phi_{k-1} \cdot \hat{x}_{k-1}^+ + G_{k-1} \cdot u_{k-1} \quad 5.4$$

\hat{x}_k^- est l’estimation de x à l’instant k .

Cet état extrapolé permet de fournir une estimation intermédiaire. En utilisant un pas de discrétisation entre les instants $k-1$ et k , on peut alors fournir des estimations à plusieurs instants entre deux calculs du filtre.

La prédiction de la covariance de l’erreur d’estimation (ou l’extrapolation de la covariance d’estimation) est donnée par :

$$P_k^+ = \Phi_{k-1} \cdot P_{k-1}^- \cdot \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad 5.5$$

L’étape clé est d’utiliser le gain de Kalman pour pondérer la contribution relative des nouvelles mesures aux précédentes prédictions. Le gain de Kalman varie en raison directe de la covariance de l’état et en raison inverse de celle de mesure :

$$K_k = P_k^- \cdot H_k^T \cdot (H_k \cdot P_k^- \cdot H_k^T + R_k)^{-1} \quad 5.6$$

Ce gain permet par la suite d’effectuer la correction de la covariance d’erreur d’estimation (ou la mise à jour de la covariance d’estimation) :

$$P_k^+ = (I - K_k \cdot H_k) \cdot P_k^- \quad 5.7$$

Pour des raisons de sensibilité aux erreurs de modélisation du problème, on la trouve aussi écrite de la façon suivante (Brown et Hwang, 1997) :

$$P_k^+ = (I - K_k \cdot H_k) \cdot P_k^- \cdot (I - K_k \cdot H_k)^T + K_k \cdot R_k \cdot K_k^T \quad 5.8$$

À la fin, la correction de l’état (ou la mise à jour observationnelle de l’état estimé) est calculé par la relation :

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k \cdot (z_k - H_k \cdot \hat{x}_k^-) \quad 5.9$$

Par rapport au modèle du filtre de Kalman, les moindres carrés récursifs, bien connues dans le monde de la compensation des mesures, sont un cas particulier très simplifié. Il n’y a pas de signaux ni de bruit en entrée du système, la seule caractéristique aléatoire est la présence d’un bruit de mesure. Cependant les principes utilisés dans le filtre de Kalman (minimisation de la trace de la matrice d’erreur, et expression récursive du résultat grâce au lemme d’inversion matricielle) sont déjà présents.

5.2.1.1 La boucle prédiction – correction

La mise en route du filtre se passe à deux niveaux : la prédiction (ou la propagation) et la mise à jour ou la correction.

5.2.1.1.1 La prédiction

Elle constitue la partie temps continue du filtre. Il s'agit d'intégrer à haute fréquence les dérivés du vecteur d'état et la covariance d'état comme suit :

$$\begin{aligned}\hat{x}_k^- &= \Phi_{k-1} \cdot \hat{x}_k^+ \\ P_k^- &= \Phi_{k-1} \cdot P_{k-1}^- \cdot \Phi_{k-1}^T + Q_k\end{aligned}\tag{5.10}$$

où encore une fois Q_k est la matrice de covariance du bruit de modèle ($Q_k = E[u_k, u_{k+1}]$)

5.2.1.1.2 La correction

La mise à jour des éléments du filtre se fait grâce à la prise en compte des informations données par les mesures. Suivant leur disponibilité, dans le cas de la navigation, la correction se fait relativement à basse fréquence. Le processus de mise à jour à l'instant k commence premièrement par le calcul du gain de Kalman. L'étape suivante est l'estimation a priori des paramètres :

$$\begin{aligned}v_{k+1} &= z_{k+1} - H_{k+1} \cdot \hat{x}_{k+1}^- \\ S_{k+1}^- &= H_{k+1} \cdot P_{k+1}^- \cdot H_{k+1}^T + R_{k+1} \\ K_{k+1} &= P_{k+1}^- \cdot H_{k+1} \cdot (S_{k+1}^-)^{-1} \\ \hat{x}_{k+1} &= \hat{x}_{k+1}^- + K_{k+1} \cdot v_{k+1} \\ P_{k+1}^+ &= (I - K_{k+1} \cdot H_{k+1}) \cdot P_{k+1}^-\end{aligned}\tag{5.11}$$

v_{k+1} est le résidu entre la mesure prédite et la mesure réelle.

S_{k+1}^- est appelée la matrice de covariance de la prédiction.

5.2.2 Filtre de Kalman étendu

Dans le cas de notre application où les équations d'état et d'observation sont non linéaires, on utilise une approximation qui consiste à considérer ces équations linéarisées autour de l'estimation courante pour pouvoir appliquer les équations du filtrage de Kalman comme dans le système linéaire.

Lorsque les défauts inertiels sont trop importants, la linéarisation des équations régissant l'évolution du modèle inertiel intégré au sein du filtre de Kalman n'est plus valide. Il est donc impératif d'appliquer les corrections pour rester dans le domaine linéaire. L'estimée a posteriori des erreurs de la centrale inertielle calculée dans le filtre sert non seulement à l'élaboration de l'estimation optimale des variables, mais aussi de recalage de la mesure. L'hybridation est alors dite en boucle fermée.

Une version linéarisée autour de l'état courant constitue le filtre de Kalman étendu (EFK). La seule différence entre le filtre étendu et linéarisé est que la linéarisation se fait autour des points corrigés du trajet nominal à l'aide de *feedback*. L'ensemble de ces points est appelé l'état courant estimé.

La plupart des processeurs des centrales inertielles (dont l'AHR440) utilisent EFK comme algorithme du calcul. Pourtant, les composantes de l'état et de la mesure ainsi que les paramètres

de mise en œuvre de cet algorithme sont toujours des informations confidentielles. Les erreurs du système inertiel sont retournées et les corrections sont faites à l'intérieur du système inertiel ; ainsi nous n'avons pas les données inertielles brutes à la sortie du système inertiel.

En général, le modèle non linéaire de l'état s'écrit :

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + v_{k-1} \quad 5.12$$

L'équation différentielle stochastique doit avoir la forme de (Joffrion, 2005) :

$$\frac{dx}{dt} = F \cdot x + G \cdot u \quad 5.13$$

où F est la Jacobienne de f calculée à l'aide de l'estimation \hat{x}_{k-1}

G est la matrice des coefficients du bruit exprimé par le vecteurs u

Le modèle de mesure est exprimé par l'équation :

$$z_k = h(x_k) + w_k \quad 5.14$$

où v_k est encore le vecteur de bruit gaussien blanc de mesure.

Le développement limité autour des valeurs estimées à posteriori à l'instant précédent $k-1$ donne :

$$\begin{aligned} x_k &\approx x_k^- + \Phi(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + v_{k-1}^d \\ z_k &\approx \hat{z}_k + H_k(x_k - x_k^-) + w_k \end{aligned} \quad 5.15$$

où : x_k, z_k : les vecteurs d'état et de mesure actuel respectivement

\hat{x}_k, \hat{z}_k : l'estimation a posteriori de l'état et de la mesure.

Φ_k : la matrice de transition de telle manière que : $\frac{d}{dt} \Phi_k^- = F(t) \Phi_k^-$

v_{k-1}^d : le bruit dynamique de l'état en temps discret : $v_{k-1}^d = \int_{k-1}^k \Phi_k \cdot G \cdot u \cdot dt$

H_k : la Jacobienne de h_k calculée à l'aide de l'estimation \hat{z}_{k-1}

Il est démontré que la matrice de transition peut être calculée comme suit :

$$\Phi_k^- = \exp(F \cdot \Delta t) = I + F \cdot \Delta t + \text{des termes négligeables} \quad 5.16$$

et que la matrice de covariance du bruit de modèle Q_k correspondante au vecteur v_{k-1}^d peut être calculée à l'aide d'une estimation initiale Q comme suit:

$$Q_k \approx G Q G^T \Delta t \quad 5.17$$

Les équations 5.15 peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{aligned} \delta x_k &\approx \Phi_{k-1} \cdot \delta x_{k-1} + v_{k-1} \\ \delta z_k &\approx H_k \cdot \delta x_k + w_k \end{aligned} \quad 5.18$$

Cette écriture est similaire aux équations initiales 5.2, 5.3, d'où on peut appliquer la même boucle de prédiction-corréction mentionnée ci-dessus. Ces étapes seront montrées pour le cas d'application concernant la navigation.

5.3 L'intégration des capteurs de trajectométrie

Comme vu auparavant, la mesure de la position et de la vitesse par GPS (ou même par GNSS) est largement perturbée dans un milieu confiné. D'autre part, la position et l'attitude déduite d'un IMU de faible précision ne sont fiables que pour quelques secondes. Le GPS (ou plus exhaustivement le GNSS) est une technique largement suffisante pour combler l'incertitude de l'INS, tant qu'il est disponible. L'interruption du signal GPS et l'exacerbation de l'erreur de multi trajets dans le milieu urbain limitent l'intégration de GPS/INS. Pour pouvoir, donc, regagner en précision supplémentaire tout en restant dans la gamme de faisabilité et de coût abordable, on a recours aux autres capteurs, normalement, de faible coût aussi. Cette technique s'appelle l'augmentation de GPS/INS par un autre capteur. Dans une optique plus générale, on peut trouver des cas où le GPS est intégré à des capteurs non-inertiels et des cas où l'INS est intégré à des instruments autres que le GPS (Ladetto et Merminod, 2002).

Les capteurs les plus utilisés dans ce domaine sont ceux qui fournissent une ou plusieurs composantes de position ou d'attitude puisqu'ils sont compatibles avec le calcul d'intégration GPS/INS. Tableau 5.1 récapitule la variété des capteurs susceptibles d'être utilisés dans un système de cartographie mobile avec une référence bibliographique de leur utilisation.

Capteur	Mesures	Référence
Radio-network	Position 3D	(Labbé <i>et al.</i> , 2007)
LORAN-C	Position 2D	(Carroll, 2006)
Compas	Cap	(Ellum et El-Sheimy, 2001)
Pseudolite /WAAS	Position 3D / vitesses	(Wang, 2004)
Baro- altimètre	Altitude	(Labbé <i>et al.</i> , 2007)
ZUPT (détekté par l'INS ou le GPS)	Vitesses nulles	(Huddle, 1998)

Tableau 5.1 Techniques susceptibles d'être intégrées à la navigation inertielle pour des applications extérieures

Il existe encore une autre gamme de capteurs qui remplacent totalement le GPS dans les cas de navigation intérieure, ou qui s'appuient sur le GPS dans le cas de navigation mixte (intérieur et extérieur). Ils sont utilisés dans les configurations de SLAM et de navigation pédestre plutôt que dans la cartographie mobile à cause de leurs portées. On peut citer par exemple UWB, WLAN et RFID, qui partagent avec le GPS la caractéristique d'avoir un certain nombre d'émetteurs de positions connues et un récepteur fixé à l'objet mobile. Ils se différencient par la longueur d'onde du signal émis et par les dispositifs nécessaires pour propager ce signal. Bien que ces techniques soient de précision métrique (Grejner-Brzezinska *et al.*, 2008), elles sont susceptibles de plusieurs développements et sont sujets de recherche actuellement.

Les systèmes de poursuite optique ou laser ne sont pas aptes à aider à la navigation dans la cartographie mobile à cause de la limitation de portée et de l'échec de suivi en cas d'interruption

par un masquage quelconque. Pourtant il est possible d'utiliser de tels capteurs pour des tests de calibration.

Il est courant pour ces systèmes de parler de Local Positioning System (LPS) contrairement au Global Positioning System (GPS). Ils ne visent qu'à donner la position dans un lieu précis (une chambre, un entrepôt, un bâtiment) et non pas une position absolue sur le globe terrestre. Les grandes forces des LPS résident dans leur précision (quelques dizaines de centimètre pour l'UWB) et dans leur capacité à fonctionner à l'intérieur.

Nous allons plutôt nous intéresser à l'intégration des capteurs utilisés largement à bord des plateformes de cartographie mobile. L'intégration GPS/AHRS sera abordée d'une manière plus détaillée comme elle est utilisée par notre système.

Le ZUPT (Zero velocity UPdaTe) est un mode de fonctionnement de l'INS ou des GPS/INS intégrés. Comme les accéléromètres ne peuvent pas séparer l'accélération de la gravité terrestre de celle du mouvement sans l'aide de gyromètres et comme les mesures des gyromètres dérivent avec le temps, des arrêts toutes les 3-5 minutes pour 20 sec (Smith, 1997) peuvent éliminer les erreurs de la dérive du biais. La mise à jour « vitesse nulle » permet à la centrale inertielle de retrouver la direction du Nord et de la verticale en cas de INS seule et au filtre de Kalman de réinitialiser les boucles de prédiction-correction.

5.4 Intégration GPS/IMU

5.4.1 L'architecture de l'intégration

L'intégration entre le GPS et l'INS se fait à plusieurs niveaux. La solution la plus simple est d'interpoler une position GPS pour chaque mesure de l'INS sans aucune interférence entre elles. Le GPS fournit donc la position de chaque point du trajet et l'IMU quant à elle, fournit l'attitude. Bien que ce mode soit très rarement utilisé, il est applicable dans certains cas, par exemple, si le GPS fournit des coordonnées de manière permanente à haute fréquence et si l'IMU est de gamme supérieure et qu'il est utilisé pour des missions courtes. Ce mode non couplé est utilisé donc pour réinitialiser la navigation à inertie quand le GPS détecte une vitesse nulle.

Dans notre première expérience (Alshawa *et al.*, 2007), nous nous intéressons à la faisabilité du système et au modèle d'erreurs (GPS/INS + TLS) plutôt qu'aux valeurs numériques de la précision du trajet.

Plusieurs références considèrent le mode non couplé comme un des modes d'hybridation GPS/INS (Groves, 2004. par exemple). Néanmoins, pour nous, ce mode n'est qu'une juxtaposition de deux techniques indépendantes des mesures avec un degré faible de synchronisation et d'interopérabilité. Les véritables modes d'intégration sont le mode lâche, fort, et profond.

La différence entre les modes d'hybridation mentionnés est due à la manière dont les observations du GPS sont considérées. Soit on considère la position et la vitesse de la plateforme mobile résolues par le récepteur GPS même (on parle alors d'hybridation lâche), soit on considère les pseudo-distances et les pseudo-vitesses extraites en amont par le récepteur GPS (on parle alors de couplage serré).

(Gautier, 2003) a introduit un autre mode de couplage qui a été accueilli rapidement par l'industrie ; il s'agit d'utiliser les corrections déduites par le filtre de Kalman pour aider à démoduler les signaux de navigation reçus au niveau de l'antenne GPS (la phase *I* et la phase

quadratique Q) et même pour exclure les satellites qui fournissent des signaux très bruités (Bahtti *et al.*, 2006). On se réfère à ce mode par « couplage profond » ou « ultraserré ».

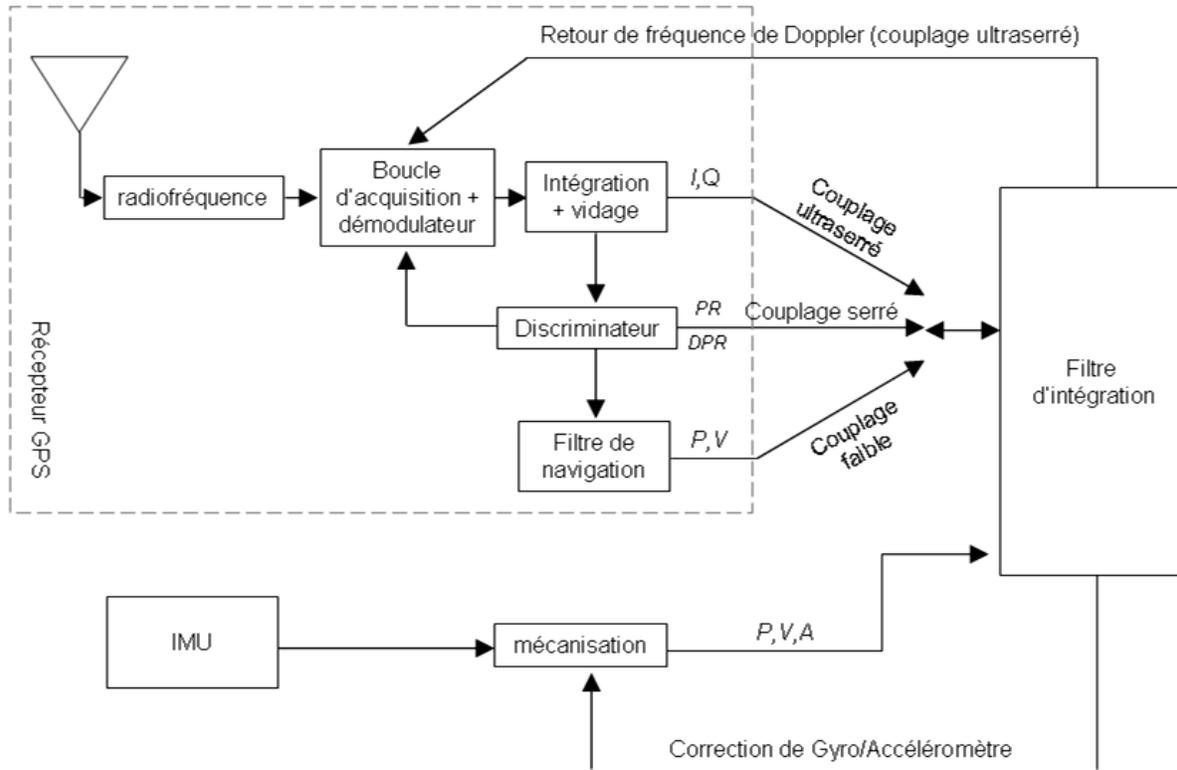


Figure 5.1 Trois modes du couplage GPS/INS ; I : la phase du signal, Q : la phase quadrature, P : la position, V : la vitesse, A : l'attitude, PR : les mesures de pseudo-distance, DPR : pseudo-distance différentielle (figure adaptée de (Bhatti *et al.*, 2007))

Nous pouvons constater sur la figure 5.1 que les trois modes d'intégration influent directement sur le vecteur d'état lors du calcul. La majorité des références existant dans le domaine d'intégration GPS/INS considère que l'INS est aidé par le GPS (GAINS) ce qui signifie que l'INS fournit l'état tandis que le GPS fournit les mesures. Le terme « navigation aidée par GPS » s'est mis à changer avec la mise en œuvre du couplage serré. Nous pouvons même constater l'existence de modules GPS avec position à l'estime (comme LEA-4R[®] d'Ublox[™] qui intègre aussi les mesures d'un odomètre). Les mesures GPS ne sont plus de précision intouchable, mais on peut les corriger par les mesures inertielles. Plusieurs augmentations de vecteur d'état sont constatées comme (à titre indicatif) :

- Le biais et la dérive de l'horloge interne du récepteur GPS
- Le retard ionosphérique
- Les éphémérides
- L'ambiguïté entière
- Le saut de cycle

Les mesures, quant à elles, sont le plus souvent effectuées sur le code et la phase et leur différence.

5.4.2 La mise au point du filtre

5.4.2.1 Intégration GPS/INS

La mise en œuvre du filtre de Kalman est largement dépendante du modèle de mécanisation de l'INS (cf. 4.5.1 page 40). La sortie de la mécanisation sera une entrée du filtre. Le vecteur d'état minimal utilisé en navigation est composé de 9 éléments (3 positions, 3 vitesses et 3 rotations). Le vecteur d'état est augmenté souvent par les erreurs tridimensionnelles de biais et facteur d'échelle des gyromètres et des accéléromètres (Honghui et Moore, 2002). Les applications de navigation dans des zones largement étendues, augmentent le vecteur d'état par le vecteur de gravité terrestre. Nous n'aborderons pas dans le contexte de cette thèse l'intégration entre un GPS multi-antenne mesurant les angles d'attitude (Wolf *et al.*, 1996) mais le cas d'un GPS mesurant la position et la vitesse seulement. Dans le cas du couplage lâche, le vecteur de mesure contient donc ces deux mesures après les avoir récupérées du récepteur GPS à une haute fréquence. Si on considère le vecteur minimal d'état estimé dans le repère de navigation, on peut impliquer le biais du gyroscope et de l'accéléromètre dans le calcul en formant l'équation suivante :

$$\delta x = F \cdot x + G \cdot u \quad 5.19$$

où $F = \frac{\partial(\delta x)}{\partial p}$ et $p \in \{\varphi, \lambda, h, v^N, v^E, v^D, \phi, \theta, \psi\}$ latitude, longitude, hauteur, vitesse Nord, vitesse Est, vitesse verticale vers le bas, roulis, tangage et lacet respectivement. Les dérivées partielles existent dans (Shin, 2001).

δx : exprime les corrections à ajouter à l'estimation initiale du vecteur d'état.

u : le vecteur du bruit de l'état considéré égale au biais des accéléromètres et des gyromètres.

G : la matrice du design qui transforme le vecteur u du repère attaché au corps du véhicule centrale b au repère de navigation n .

$$\delta x = \begin{pmatrix} \delta r^n \\ \delta v^n \\ \delta \epsilon^n \end{pmatrix}_{9 \times 1} \quad u = \begin{pmatrix} \delta f^b \\ \delta \omega_{ib}^b \end{pmatrix}_{6 \times 1} \quad G = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ R_b^n & 0 \\ 0 & -R_b^n \end{pmatrix}_{9 \times 6} \quad 5.20$$

La matrice de covariance du vecteur u , appelée encore la matrice de densité spectrale, est sous la forme : $Q = \text{diag}(\sigma_{ax}^2 \ \sigma_{ay}^2 \ \sigma_{az}^2 \ \sigma_{\omega x}^2 \ \sigma_{\omega y}^2 \ \sigma_{\omega z}^2)$. La matrice de covariance à l'instant k peut être calculée selon l'équation 5.8. Le modèle des mesures dépend de l'équation des observations :

$$\delta z_k \approx H_k \cdot \delta x_k + w_k \quad 5.21$$

où δz_k : la matrice des écarts entre la position et la vitesse mesurées par la centrale à inertie et celles données par le GPS.

$$H_k = \frac{\partial(\delta z)}{\partial p} \quad \text{et} \quad p \in \{\varphi, \lambda, h, v^N, v^E, v^D\} \quad 5.22$$

Comme la position est exprimée en coordonnées sphériques et la vitesse en m/s, ceci engendre de l'instabilité lors du calcul des étapes suivantes. Pour cela, (Shin, 2001) a introduit les rayons de courbure (méridional M et transversal N) dans le calcul des matrices Z et H comme suit :

$$Z_k = \begin{pmatrix} r_{INS}^n - r_{GPS}^n \\ v_{INS}^n - v_{GPS}^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_{INS} - \varphi_{GPS} \\ \lambda_{INS} - \lambda_{GPS} \\ h_{INS} - h_{GPS} \\ v_{INS}^E - v_{GPS}^E \\ v_{INS}^N - v_{GPS}^N \\ v_{INS}^D - v_{GPS}^D \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} (M+h)(\varphi_{INS} - \varphi_{GPS}) \\ (N+h) \cos \varphi (\lambda_{INS} - \lambda_{GPS}) \\ h_{INS} - h_{GPS} \\ v_{INS}^E - v_{GPS}^E \\ v_{INS}^N - v_{GPS}^N \\ v_{INS}^D - v_{GPS}^D \end{pmatrix} \quad 5.23$$

$$H_k = \begin{pmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} M+h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (N+h) \cos \varphi & 0 & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0 & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0 \end{pmatrix} \quad 5.24$$

Il n'est techniquement pas faisable de faire coïncider le centre de masse de l'INS avec le centre de phase de l'antenne GPS. C'est pourquoi, le calcul du bras de levier est encore nécessaire. Cette distance est normalement mesurée dans le repère attaché au corps b et transformée dans le repère de navigation.

Comme les mesures GPS ont une fréquence inférieure aux mesures de l'INS, la boucle de prédiction tourne moins vite que la boucle de mise à jour. Si les deux jeux de mesure n'ont pas le même référentiel chronologique, on interpole une mesure GPS à l'instant de la mesure INS le plus proche pour l'impliquer dans le calcul.

La première étape est l'initialisation du vecteur d'état et de sa matrice de covariance P . Les équations 5.11 sont applicables, par la suite, après avoir remplacé x par δx et z par δz . En fin de chaque boucle de correction, on ajoute les corrections δx à l'état actuel. La solution la plus efficace est de fournir ces corrections à l'algorithme de mécanisation de la centrale, ce qui limite fortement la dérive de qualité de ses mesures. Cette solution (figure 5.1 et 5.2) s'appelle le « feedback » qui est même utilisée en temps réel grâce à la puissance des processeurs embarqués.

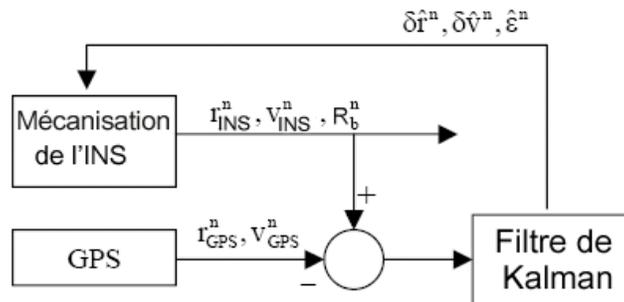


Figure 5.2 *Feedback* de la solution de Kalman à la mécanisation de l'INS

5.4.2.2 Intégration de GPS/IMU/Odomètre

Peu coûteux, l'odométrie est intégrée dans les nouveaux modèles de voitures à travers les capteurs ABS. Dans le cas où on ne dispose pas d'accès à l'odomètre de la voiture ou si la précision de l'odomètre interne n'est pas assez grande, les systèmes mobiles rajoutent un odomètre optique externe (Stéréopolis ou Photobus par exemple).

Un odomètre est composé d'un élément codeur que l'on associe mécaniquement à l'axe tournant de la roue du véhicule. Cet élément codeur est associé à un capteur, optique ou mécanique, qui récupère une information directement liée à la rotation de l'élément mécanique. La mesure à faire dans le cas mécanique est l'intensité du champ magnétique résultant de la rotation et qui lui est proportionnel. Dans le cas optique, un motif simple et répété tout le long de l'élément codeur, fait réagir un capteur optique à chaque répétition. Un signal carré binaire résulte du capteur optique qui peut être transformé en vitesse angulaire à l'aide de la géométrie des motifs.

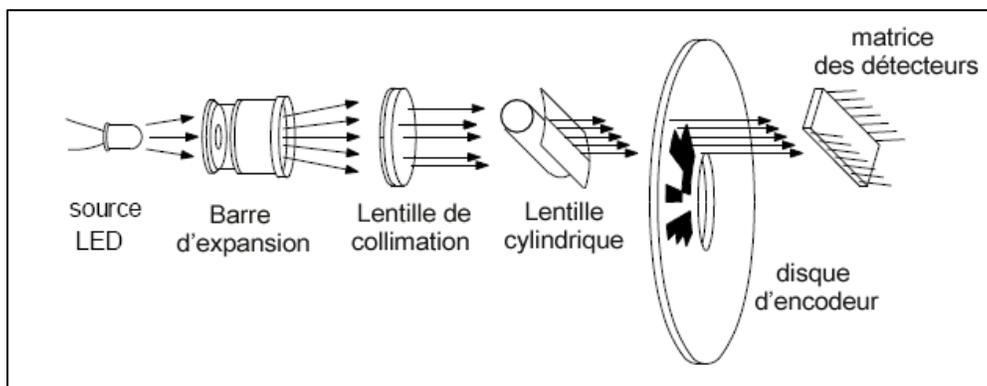


Figure 5.3 Principe d'un odomètre optique à disque d'alternance opaque-transparente adapté de (Agent, 1991)

La modalisation bidimensionnelle dynamique d'un véhicule à roues directrices nécessite la connaissance de deux angles : l'angle de braquage mesuré par le système ABS ou par un détecteur spécifique et le lacet mesuré par la centrale inertielle. Les équations de la mécanisation sont montrées par (De Cecco, 2003). (Abuhadrous, 2005) intègre les mesures des GPS/INS/odomètre dans un filtre de Kalman décentralisé. L'intégration GPS/INS se fait parallèlement et séparément. La moyenne pondérée par la matrice de covariance P est considérée pour les éléments communs du vecteur d'état résultants de deux calculs (la position et la vitesse). Un filtre de Kalman intégral se trouve dans (Hemerly, 2008). Le vecteur d'état classique de l'intégration GPS/INS est augmenté par les erreurs du facteur d'échelle et de biais d'odomètre modélisés par un modèle de Gauss-Markov du premier ordre.

5.4.2.3 Intégration GPS/AHRS

L'intégration du GPS avec une centrale AHRS dépend en premier lieu du modèle dynamique de l'AHRS et de la manière dont les magnétomètres sont impliqués dans le calcul. Si, par exemple, les magnétomètres sont utilisés seulement pour initialiser les mesures gyroscopiques, le cas revient à l'intégration GPS/INS typique. En revanche, si les magnétomètres servent à calculer l'angle de lacet, plusieurs modèles de filtre sont mis en œuvre. Il est possible d'utiliser le filtre de

Kalman deux fois successivement. Pour la première, le vecteur d'état ne contient que les angles d'attitude et le biais de gyromètres tandis que le vecteur de mesure contient l'angle de lacet calculé par les magnétomètres (cf. 4.3.2). Le second filtrage ressemble à une intégration GPS/INS comme celle exposée plus haut. Une telle approche est utilisée commercialement (Rios et White, 2002).

(Budyono *et al.*, 2008) conçoit un AHRS pour mesurer l'attitude comme première priorité. Pour eux, le filtre de Kalman n'agit que sur l'attitude. Le vecteur d'état contient les composantes de l'attitude, calculées par la partie inertielle de l'AHRS, et le biais des gyromètres, alors que le vecteur de mesures est composé de l'attitude calculée par l'algorithme de TRIAD (quatre quaternions au lieu des trois angles d'Euler) à une fréquence égale à celle de sortie du GPS.

De manière générale, l'état de l'art actuel de l'intégration GPS/AHRS est moins riche que pour le GPS/INS. Ceci semble dû à la faible précision des magnétomètres qui restreint leur utilisation comme complément de navigation. Pourtant, la dérive limitée des mesures magnétiques présente une contribution intéressante à l'exactitude des données. Notre choix de modèle du filtre de Kalman est présenté dans le chapitre 9.

6. Le scanner laser terrestre TLS

Ce sous-chapitre est consacré à exposer quelques aspects concernant le capteur imageur principal utilisé à bord de la majorité des systèmes mobile terrestres dont le nôtre fait partie. Le principe de fonctionnement des scanners terrestres est présenté afin de les classer et de les qualifier pour un usage dynamique. Le modèle d'erreur concernant notre scanner est présenté sans beaucoup d'approfondissement sur l'origine physique ou électronique de chaque terme. En général, les erreurs liées au scanner laser sont d'un ordre de grandeur bien inférieur à celles de la trajectométrie.

Les scanners laser aéroportés sont aussi présentés rapidement car ils sont susceptibles d'être embarqués sur un système mobile terrestre. En revanche, il existe une gamme de scanners qui n'ont pas vocation à être utilisés à bord d'un système mobile. Ces scanners sont conçus pour de petits objets placés à proximité de l'instrument dans des conditions standards intrinsèquement statiques. On peut citer dans cette gamme d'appareils les scanners à image flash de profondeur, à repérage de position, à lumière structurée et à triangulation-ligne (figure 6.1). Ces scanners ne sont pas abordés dans cette thèse.



Figure 6.1 Scanners non-topographiques : scanner à image flash de profondeur (MESA-SR 3000), à repérage de position (Handyscan-REV), à lumière structurée (David-3D) et à triangulation-ligne (Minolta-Vi -910).

6.1 Classification des systèmes de mesure terrestre par laser

Le terme « Laser » provient de l'anglais « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation » ce qui signifie amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement. Il s'agit d'un dispositif permettant de créer de la lumière par émission stimulée. Une telle source lumineuse artificielle produit des éclairs ou des flux continus très intenses de lumière cohérente.

L'utilisation du laser dans les techniques de mesure permet de nombreuses applications dans le domaine de la topographie qu'on appelle télémétrie si la mesure est faite en 1D ou 2D et plutôt le balayage en cas de mesures 3D. La mesure par laser est devenue une technique incontournable pour une large gamme d'utilisateurs grâce à sa rapidité et à la facilité d'acquisition. On peut mieux comprendre les aspects du Laser qui sont en relation avec la mesure à travers la classification présentée ci-dessous. Elle est plutôt conçue pour le cas terrestre où la distance entre la source et l'objet à numériser ne dépasse pas quelques centaines de mètres.

6.1.1 Selon la dimensionnalité de la mesure

Des références (comme la société Z+F³) classifient les systèmes de mesure par laser en trois classes suivants :

1. Télémètre 1D : il envoie normalement une impulsion laser vers un objet pour mesurer la distance à celui-ci. Certains télémètres 1D sont configurés pour envoyer des impulsions à une cadence temporelle constante pour des applications comme l'auscultation des bâtiments.
2. Télémètre 2D : il résulte de la combinaison d'un télémètre 1D à impulsions régulières et d'une rotation ou déflexion du faisceau autour d'un axe perpendiculaire au rayon par un angle quelconque. Ce type de scanners constitue la majorité des scanners dynamiques utilisés habituellement par les systèmes de cartographie mobile.
3. Scanner 3D : il résulte de la conjugaison d'un télémètre laser 2D avec une base assurant une rotation perpendiculaire à la précédente. L'étendue des deux rotations détermine si le scanner est un scanner à fenêtre (Optech[®] ILRIS-3D par exemple) ou hémisphérique (comme Z+F 3D IMAGER 5006). Cette classe de scanners représente le niveau le plus haut de mesure laser qu'on abordera avec un peu plus de détail dans ce chapitre.

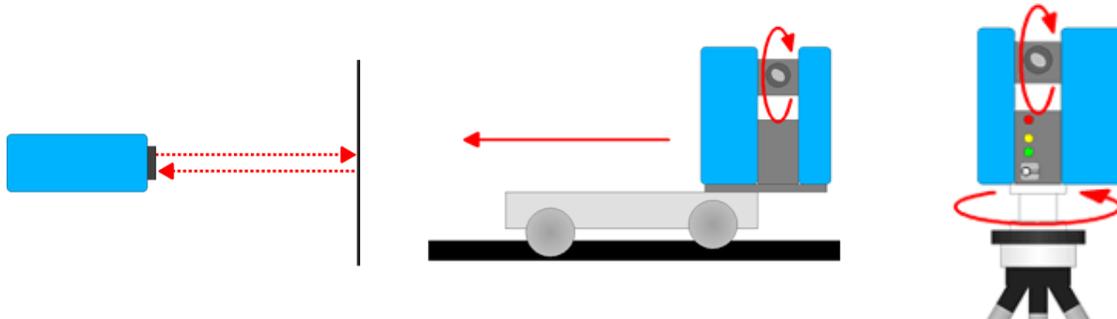


Figure 6.2 Scanners 1D, 2D et 3D de gauche à droite (figures de Z+F GmbH)

Bien que la terminologie TLS soit utilisée pour le scanner 2D, nous allons réserver ce terme pour le scanner 3D terrestre comme le définissent (Mills et Barber, 2003).

6.1.2 Selon le principe de la mesure de distance

Par principe de fonctionnement, on entend comment l'instrument peut mesurer la distance à la cible à l'aide de tirs lasers. On distingue les principes suivants :

- Mesure de distance par temps de vol
- Mesure de distance par différence de phase
- Mesure de distance par triangulation

³ Zoller+Fröhlich GmbH : http://www.zf-laser.com/e_index.html

Seules les deux premières techniques sont utilisées pour la cartographie mobile, alors que la troisième ne l'est pas à cause de sa limitation de portée ou encore à cause du principe physique non approprié à un usage mobile. Pour cette raison, on aborde seulement les scanners à temps de vol et à déphasage.

6.1.2.1 Par mesure de temps de vol

Cette technologie utilise la mesure du temps de parcours d'un rayon laser entre le scanner et le point de la surface de l'objet mesuré.

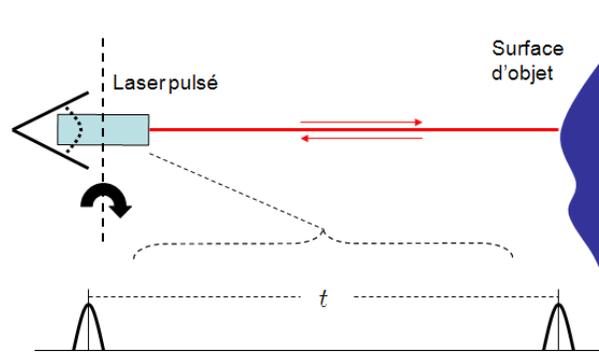


Figure 6.3 Principe de mesure de distance par mesure de temps de vol

Le temps t de parcours du rayon laser (se propageant à la vitesse de la lumière c) entre le scanner et le point de la surface d'objet entre dans la formule de calcul de distance donnée par la relation suivante:

$$D = c * t / 2 \quad 6.1$$

En raison de la grande vitesse de propagation de la lumière ($\approx 3.10^8$ m/s), la précision est limitée par la capacité de l'électronique à mesurer des temps très brefs avec une bonne précision. On constate que la précision de mesure de distance dépend un peu de la puissance du signal réfléchi, qui dépend beaucoup de la réflectivité de l'objet et, bien évidemment, de la distance. Cependant, il est possible d'augmenter la précision de mesure de distance en effectuant des observations multiples d'une même distance et en considérant la valeur moyenne obtenue (nombre de tirs n par point observé). Néanmoins, l'erreur moyenne quadratique ($emq = 1 / \sqrt{n}$) obtenue par transmission d'erreurs simple diminue au fur et à mesure que le temps de mesure augmente, mais seulement jusqu'à un certain seuil (éventuellement très petit) en raison des erreurs systématiques entachant les observations. Les chronomètres utilisés pour les scanners à temps de vol mesurent avec une précision de quelques picosecondes ce qui produit une mesure de distance au millimètre près.

6.1.2.2 Par mesure de différence de phase

Ce type de scanner mesure la différence de phase, par un phasemètre numérique, entre le signal émis et le signal reçu pour en déterminer la distance scanner-objet. Ce procédé est utilisé dans la plupart des tachéomètres électroniques. Les scanners à différence de phase ont une portée fondamentalement limitée, contrairement aux scanners à temps de vol (76 m pour FARO[®]-LS 880 contre 200m pour Trimble[®] GX) mais généralement une meilleure précision.

Le principe de fonctionnement est le suivant : l'intensité du faisceau laser est modulée par une fréquence relativement basse (par exemple 2 MHz pour le FARO®-LS). La mesure de déphasage permet de déterminer la distance à mesurer à une longueur d'onde près selon l'équation suivante :

$$2D = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \times \frac{c}{f} + n \times \frac{c}{f} \quad 6.2$$

avec : $\Delta\phi$: la différence de phase mesurée par le phasemètre
 f : la fréquence de modulation

Le problème consiste encore à compter le nombre entier n de longueurs d'onde de parcours aller-retour pour en déduire D . Dans les scanners laser à modulation, on s'oblige à rester dans la gamme où $n = 0$.

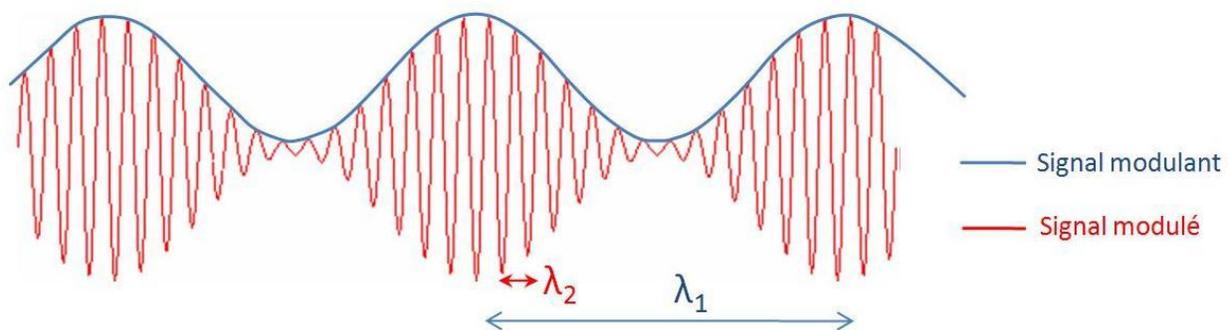


Figure 6.4 Modulation de la porteuse laser (en rouge) par le signal (en bleu)

Comme la mesure se fait en continu et simultanément avec l'émission d'ondes, les scanners à différence de phase sont plus rapides que ceux à temps de vol (Pfeiffer, 2007).

6.1.3 Selon les dispositifs de déflexion de la lumière laser

Le balayage laser se fait en déviant la lumière laser par un ensemble de miroirs contrôlés mécaniquement. On peut classer les scanners topographiques selon ces dispositifs en trois classes principales :

1. Les scanners à un miroir oscillant : ces scanners contiennent un miroir à un seul axe qui oscille avec un angle limité ce qui fait balayer le rayon laser dans un plan. Dans des TLS comme le Trimble GX, le miroir oscille horizontalement. Après chaque oscillation, tout le dispositif tourne verticalement ce qui assure un balayage tridimensionnel.
2. Les scanners à deux miroirs oscillants : ces scanners contiennent deux miroirs qui oscillent alternativement selon deux axes perpendiculaires. Ce type de scanners n'a pas besoin d'une rotation mécanique externe pour balayer une fenêtre en 3D dont les étendues sont définies par les deux angles d'oscillations. On peut citer parmi ces scanners à fenêtre le Leica® HDS 2500.

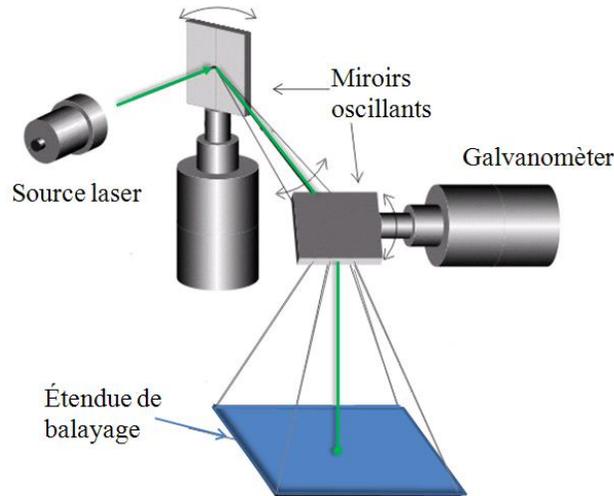


Figure 6.5 Principe de scanner à deux miroirs oscillants

3. Les scanners à miroir tournant : le principe de ces scanners est le même que ceux à miroir oscillant sauf que le scanner fait un tour complet. Des exemples de ces scanners sont le FARO-Photon (3D) et le SICK-LMS200 (2D). On souligne, dans ce contexte, le fait qu'un scanner 3D résulte du 2D par une simple motorisation. (Zhang *et al.*, 2008) installe le scanner LMS200 sur un moteur asservi ce qui rend possible son utilisation en scanner 3D.



Figure 6.6 Scanner SICK-LMS 200 : le principe du miroir tournant à 2D et la migration en 3D (Zhang, 2008).

Pour éviter l'angle mort causé par le porte-miroir ou par le corps du scanner, les concepteurs ont tourné le miroir autour de la source laser dans une configuration appelée scanner à tête rotative (spinning head scanner). Un exemple de ces scanners est le LYNX™ d'Optech.

4. Les scanners à miroir polygonal : ces scanners utilisent un polygone tournant, dont les surfaces sont réfléchissantes, pour dévier le rayon laser. Le passage de chaque facette du polygone vaut une oscillation du miroir pour un scanner à miroir oscillant. Néanmoins la rotation continue du moteur accélère remarquablement le balayage et le rend extrêmement régulier. Il est évident que l'étendue du balayage est limitée à un angle inversement proportionnel au nombre de facettes du polygone tournant. La figure 6.7 illustre le principe de déflexion utilisé par le scanner Riegl LMS-620 ; les quatre facettes du polygone assurent un champ maximal de balayage de 80°.

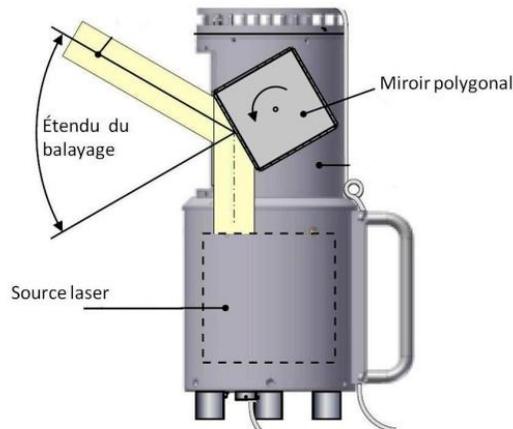


Figure 6.7 Principe du scanner à miroir polygonal (figure adapté de Riegl⁴)

6.2 La caractéristique d'un scanner Laser terrestre TLS

Comme vu dans le paragraphe ci-dessus, le TLS 3D est un scanner à deux miroirs ou à un miroir combiné à une embase rotative. Le balayage s'effectue selon une trame régulière, c'est-à-dire que l'utilisateur fixe les deux pas angulaires : le pas vertical et le pas horizontal. Le pas de l'angle vertical γ détermine la distance entre deux points successifs sur un profil (vertical). Le pas de l'angle horizontal ϕ définit la distance entre deux profils verticaux voisins. Pratiquement, le scanner forme une grille 2D (matrice) de résolution égale à deux trames choisies. De plus, il mesure la distance pour chaque point et l'affecte à la matrice précédente. Ainsi, le scanner produit une image dite « de profondeur » transformée ensuite en un nuage de points donnés par leurs coordonnées cartésiennes.

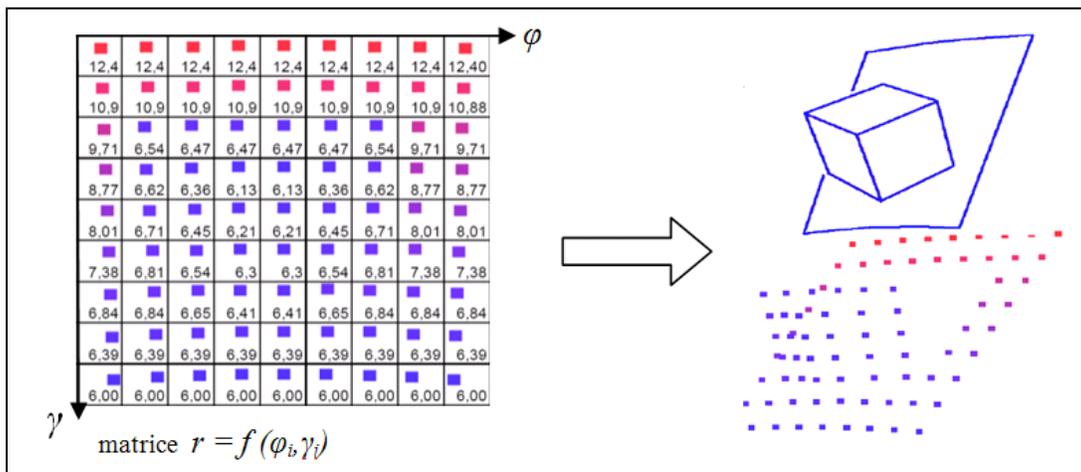


Figure 6.8 Processus d'acquisition de surface par un scanner

Le nombre de points acquis par unité de surface définit la densité du nuage de points qui est inversement proportionnel au pas angulaire. Les coordonnées cartésiennes d'un point p dans le repère du scanner sont calculées comme suit :

⁴ LMS-Q120 : http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/10_DataSheet_LMS-Q120_17-09-2007.pdf

$$X_p^s = r \cos \gamma \cos \varphi$$

$$Y_p^s = r \cos \gamma \sin \varphi$$

$$Z_p^s = r \sin \gamma$$

6.3

où r est la distance mesurée, φ est l'angle horizontal et γ est l'angle vertical.

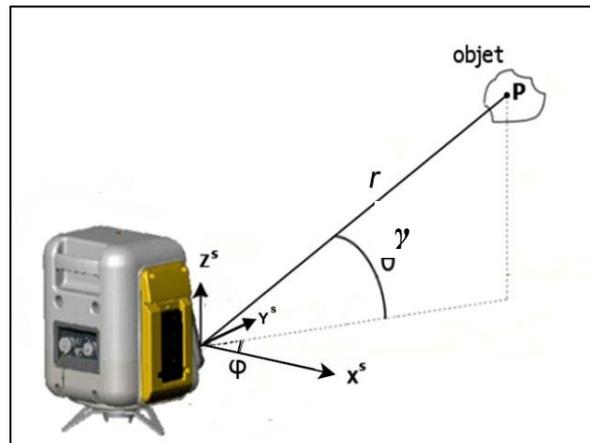


Figure 6.9 Cordonnées sphériques du TLS

Quelques scanners sont équipés d'une fonction tachéométrique qui permet de numériser des cibles installées sur des points connus en coordonnées géodésiques. Le scanner peut ainsi exprimer directement le nuage de points en coordonnées géodésiques.

6.3 La caractéristique d'un scanner dynamique terrestre

(Shan et Toth, 2008) rassemble sous le terme de « scanner dynamique terrestre » tous les scanners utilisés à bord des véhicules mobiles soit pour la cartographie mobile ou pour le guidage et la localisation. Ces scanners sont typiquement des télémètres 2D faisant des profils en continu alors que le déplacement du scanner est susceptible de transformer ces profils en 3D par géoréférencement direct. Pourtant un scanner 3D échappe à la règle : le Velodyne[®] HDL-64E qui intègre 16 groupes d'émetteurs laser et 32 groupes de récepteurs qui assurent la mesure d'un profil de 26.8° d'ouverture en permanence et sans aucun mouvement. La rotation du scanner sur lui-même à 15 Hz balaye ainsi un cylindre (au lieu d'un profil circulaire pour les scanners traditionnels). Ce scanner peut acquérir jusqu'à 1.3 millions point/s.



Figure 6.10 Scanner HDL-64E S25⁵ installé sur un système de cartographie mobile

En général, pour qualifier un scanner de mobile ou dynamique, il doit remplir les conditions suivantes :

1. Grande vitesse de numérisation : elle permet à la plateforme mobile de rouler plus vite et même de scanner pendant les virages. Les scanners à miroir rotatif ou polygonal sont les plus utilisés dans cet objectif. L'état de l'art correspondant montre que la vitesse minimale d'un scanner dynamique est de 10 profils/s (Ibeo-LD).
2. Grand champ de vision : l'utilisation des scanners à tête rotative assure un champ de balayage de 360°. La numérisation des deux côtés du trajet est donc possible, même des câbles, des panneaux routiers et des plafonds des tunnels. Les scanners à miroir tournant souffrant d'un angle mort sont installés de façon à ce que cet angle soit orienté vers le haut. Ceci aide à scanner la totalité de la surface de la route. Cette configuration est adoptée par des systèmes comme Roadscanner⁽⁶⁾. L'utilisation de scanners à champ de vision limité est possible mais on embarque deux (ou plusieurs) scanners afin de couvrir davantage d'espace.
3. Caractéristiques mécaniques : résistance aux vibrations, aux chocs et aux poussières. Il existe une gamme de scanners à usage industriel extérieur qui sont utilisés avec succès sur des plateformes mobiles. La figure 6.12 présente un exemple de ces scanners.



Figure 6.11 Configuration de l'angle mort du scanner vers le haut choisi par RoadscannerTM

⁵ <http://www.velodyne.com/lidar/>

⁶ Siteco Informatica S.r.l. <http://www.sitecoinf.it/>



Figure 6.12 Scanners SICK LD-LRS ⁽⁷⁾ à usage industriel

4. Possibilité d'horodatage ou de synchronisation : l'intégration avec la trajectométrie dépend largement de la gestion du temps par le scanner. La méthode générale appropriée pour le traitement en temps réel ou postérieur est le déclenchement par le PPS. Le signal PPS (pulse per second) est un signal horloge qui marque le début de la seconde avec une précision valant celle de l'horloge interne du récepteur (quelques nanosecondes pour un GPS géodésique). Contrairement à ce qu'indique son nom, l'impulsion PPS peut être programmée à plusieurs fréquences. Le scanner contient un déclencheur qui débute un profil dès qu'il reçoit le signal PPS. Il obtient le temps UTC d'ordinateur à une seconde près par la connexion avec l'ordinateur. Une simple conversion permet d'étiqueter le début de chaque ligne de balayage avec une erreur de latence quasi négligeable. La figure 6.13 montre l'adoption par Riegl LMS-Zx de la méthode expliquée ci-dessus.

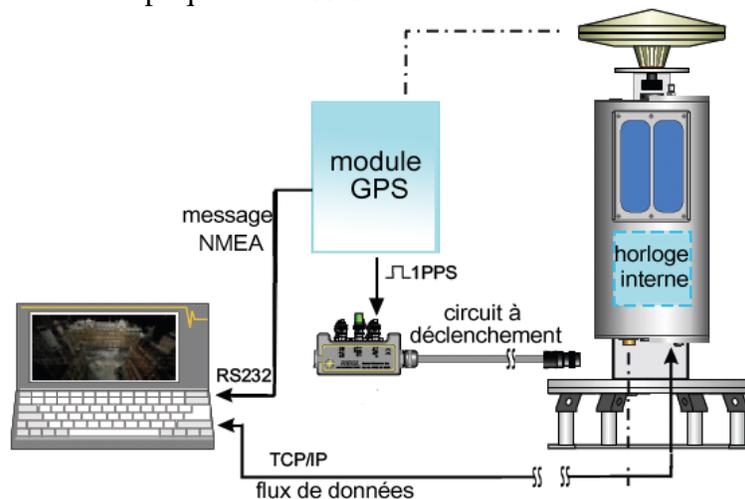


Figure 6.13 Principe de la synchronisation active (figure adapté de Riegl⁽⁸⁾)

L'autre solution dépend de l'horloge interne du scanner à condition qu'il soit synchronisé avec l'ordinateur et qu'il ait une précision acceptable (inférieure à 1 milliseconde). Cette solution est adoptée par la société FARO.

⁷http://www.sick.nl/nl/sicknificant/sick_insight_02_2006/nl.toolboxpar.0014.file.tmp/LD%20LRS%20datasheet.pdf

⁸ Riegl document : International Sync timer for GPS-synchronized time stamping of scan data

6.4 Les scanners laser aéroportés ALS

Le scanner aéroporté (ou le LiDAR) apporte un moyen efficace de cartographie à grande échelle ; il permet d'obtenir un levé de terrain naturel, de canopée en forêt et de zones urbaines et périurbaines. L'ALS peut être à miroir oscillant, rotatif ou encore polygonal. Deux autres mécanismes sont disponibles pour les ALS : les scanners palmiers (à miroir rotatif à axe incliné) et à fibres optiques (Wehr et Lohr, 1999). Les scanners aéroportés sont normalement capables de capter plusieurs retours d'ondes réfléchies et d'en construire des données multi-écho. Les caractéristiques des scanners dynamiques sont valables pour un ALS. Il doit avoir une vitesse de numérisation très élevée (jusqu'à 200 kHz d'après (Pfeifer et Briese, 2007)). La distance entre le scanner et la cible dépasse souvent le km, ce qui impose des conditions strictes pour la calibration en usine des scanners aéroportés. Bien que l'utilisation d'un ALS sur un véhicule de cartographie mobile ne soit pas justifiable, on trouve quelques rares expérimentations menées spécifiquement par les concepteurs de scanners.



Figure 6.14 Scanner LMS-Q560, à retour d'onde complet, embarqué sur le véhicule Fallbeispiel MLS am Auto.

6.5 Les erreurs du scanner laser terrestre

Comme tous les instruments topographiques, un TLS a deux types d'erreurs ; systématique et aléatoire. L'élimination des erreurs systématiques se fait au laboratoire par balayage d'un réseau standard de cibles réfléchissantes connues en coordonnées dans un référentiel externe. La comparaison entre les coordonnées connues de la mire et celles acquises par le scanner aide à trouver les coefficients des modèles mathématiques de la calibration. Par exemple (Lichti et Licht, 2006) proposent un modèle de 19 inconnues pour la calibration.

Toutefois, dans le cadre de notre étude, nous nous contentons de la calibration faite par le fabricant. En ce qui concerne les erreurs aléatoires, nous adopterons la classification faite par (Reshetyuk, 2006) car il souligne l'influence de l'objet scanné sur l'exactitude du nuage de points acquis. Par conséquent, les erreurs de numérisation sont classées en trois grands groupes, comme suit:

6.5.1 Les erreurs aléatoires instrumentales

On peut distinguer entre les erreurs qui affectent la mesure de distance de celles qui affectent les mesures d'angles. Les erreurs instrumentales de distance sont en relation directe avec le mécanisme d'estimation du temps de retour de l'impulsion laser émise. L'application de la loi de propagation sur l'équation 6.1 donne $\sigma_D = \frac{c}{2} \sigma_t$ où σ_D, σ_t représentent l'erreur moyenne quadratique sur la distance et le temps. Comme l'intensité et la forme de l'impulsion laser réfléchie changent par rapport à l'impulsion émise à cause de l'absorption et de l'atténuation du signal, ceci engendre du bruit (figure 6.15) au niveau du discriminateur de temps. Ces deux effets sont fonction du rapport signal-bruit (SNR) qui est, à son tour, fonction de la puissance, du diamètre du rayon laser et de la distance à l'objet balayé.

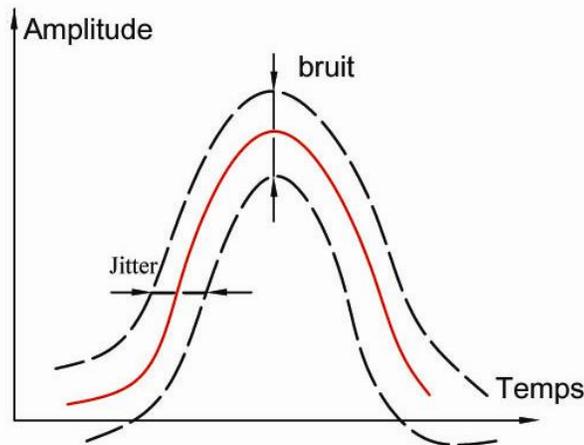


Figure 6.15 Effet du bruit et du sautillerment (jitter) au niveau du discriminateur de temps

Les erreurs de mesures angulaires varient selon le type d'unité de déflexion utilisée. On peut généraliser les erreurs suivantes :

1. L'imperfection du miroir interne du scanner : différence entre les angles théoriques et réels des facettes du miroir polygonal.
2. Les erreurs mécaniques : le montage du miroir sur son axe (excentricité) et la vitesse non régulière de rotation. L'erreur significative correspond au mécanisme de mesure de l'angle de rotation de l'axe du miroir (par un galvanomètre par exemple).
3. La divergence du faisceau Laser : Lichti et Gordon, (2004) considèrent l'expansion du faisceau Laser comme une erreur angulaire proportionnelle à la distance. La position apparente du point mesuré se trouve sur la ligne centrale du faisceau, or la vraie position se décale vers les éléments les plus réfléchissants dans l'emprise du faisceau.

L'évolution de l'industrie a permis de minimiser l'effet des erreurs précédentes à tel point qu'elles sont considérées comme négligeables. Les erreurs optiques comme la distorsion des lentilles focalisant les impulsions réfléchies sont corrigées en usine par l'étalonnage.

Les TLS à un seul miroir qui utilisent une base motorisée pour fournir la rotation horizontale souffrent des erreurs habituelles des tachéomètres comme l'erreur de verticalité de l'axe principal, le tourillonnement, la collimation, la non-orthogonalité et l'excentricité des trois axes.

Néanmoins, ces erreurs angulaires ne doivent être prises en considération que pour autant qu'elles s'approchent des valeurs de la divergence du faisceau laser, qui est impossible à réduire en dessous de quelques 0.1 mrd, ce qui en pratique est beaucoup moins exigeant que la précision requise pour les tachéomètres, même de bas de gamme. Ces erreurs angulaires sont donc généralement peu visibles dans le bilan d'erreur global.

6.5.2 Les erreurs en relation avec l'objet

Ces erreurs sont dues aux conditions réfléchives et géométriques de l'objet scanné. La modélisation de telles erreurs nécessite plusieurs expérimentations standardisées comme celles faites par (Voegtle *et al.*, 2008). On peut résumer les effets engendrant ce type d'erreur comme suit :

1. Les propriétés de surface du matériau comme sa réflectivité, sa rugosité et sa couleur.
2. L'angle d'incidence du rayon laser.
3. Les problèmes d'échos multiples (figure 6.16)

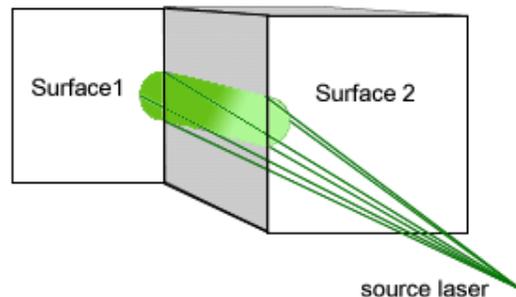


Figure 6.16 Emprise du rayon laser sur deux surfaces écartées qui engendre des retours multiples du signal

6.5.3 Erreurs environnementales

Ces erreurs sont dues à la différence de propagation de l'onde laser dans l'atmosphère extérieure. Elles résultent des variations de température et de la pression de l'air, et des radiations externes (ensoleillement par exemple). Ces effets modifient le retard du signal réfléchi et affectent le niveau de bruit, ce qui peut être compensé par des modèles mathématiques semi-empiriques comme ceux mentionnés dans (Reshetyuk, 2006).

6.6 La modélisation des erreurs du TLS

Le calcul des erreurs élémentaires du scanner laser ne fait pas partie des sujets évoqués dans cette recherche. Nous exposons néanmoins un modèle simplifié des erreurs d'un TLS à miroir assurant le balayage vertical et à embase motorisée assurant le balayage horizontal.

Normalement, l'imprécision de la distance est indépendante de celle des angles à cause du principe différent de la mesure de chaque grandeur. La correction de la distance indiquée r par un TLS est calculée par la relation (Reshetyuk, 2006) :

$$\Delta r = -\Delta r_{inst} - \Delta r_{reflect} + \Delta r_{ref.ob} - \Delta r_{multi.ref} \quad 6.4$$

où Δr_{inst} , $\Delta r_{reflect}$, $\Delta r_{ref.ob}$, $\Delta r_{multi.ref}$ sont les corrections instrumentales, en relation avec les conditions environnementales, puis avec l'objet scanné et de multi-pixel. D'où la variance sur cette mesure, qui est :

$$\sigma_d^2 = \sigma_{inst}^2 + \sigma_{reflect}^2 + \sigma_{ref.ob}^2 + \sigma_{multi.ref}^2 \quad 6.5$$

Il est possible de réduire toutes les erreurs mécaniques et optiques du miroir tournant en une erreur de la mesure angulaire, modélisée par la relation :

$$\Delta \gamma = -(\gamma_0 + \gamma_{scan} \cdot \delta \gamma) \quad 6.6$$

où $\Delta \gamma$ est la correction de l'angle vertical mesuré θ_{scan} , θ_0 est l'angle mesuré au début de chaque ligne du balayage et $\delta \gamma$ l'erreur du facteur d'échelle. On peut ainsi calculer la variance comme suit :

$$\sigma_\gamma^2 = \sigma_{\gamma_{scan}}^2 + \sigma_{\gamma_0}^2 + \gamma_{scan}^2 \cdot \sigma_\gamma^2 \quad 6.7$$

L'angle horizontal φ souffre des erreurs tachéométriques comme l'erreur d'axe de collimation e_c et de l'axe horizontal e_h . Pour calculer la correction de l'angle horizontal, on applique la relation :

$$\Delta \varphi = \left(\frac{e_c}{\cos \gamma_{scan}} + e_h \cdot \tan \gamma_{scan} \right) \quad 6.8$$

La variance est aussi calculée par application de la loi de transmission d'erreurs :

$$\sigma_\varphi^2 = \sigma_{\varphi_{scan}}^2 + \frac{\sigma_{ec}}{\cos^2 \gamma_{scan}} + \tan^2 \gamma_{scan} \sigma_{eh}^2 \quad 6.9$$

La précision finale de chaque point dans le nuage 3D peut être calculée par application de la loi de transmission des erreurs sur les équations de calcul des coordonnées sphériques à partir de r, γ, φ (équation 6.3).

Partie 2. La conception du système

7. Opérations préalables aux missions mobiles

Ce chapitre présente le système mobile proposé dans cette thèse. Le système est d'abord présenté à travers ses composants. Quelques spécifications techniques sont mentionnées afin de bien comprendre la problématique de la précision évoquée par la suite. Le schéma de connexion et les opérations nécessaires pour mettre le système en œuvre sont détaillés. Les questions de calibration et d'horodatage sont expliquées. En fin de chapitre, on montrera que le géoréférencement direct des nuages de points sera possible sans aucun souci technique.

7.1 Composants du système

Les trois composants principaux du système sont le GPS, la centrale inertielle (AHRS) et le TLS. On peut résumer les caractéristiques majeures des capteurs comme suit :

GPS : le GPS Leica® TP1200 fonctionne en mode RTK solo. L'unité mobile permet un paramétrage pour mesurer une position pour des intervalles égaux de distance ou de temps. La mesure par intervalle de distance empêche la répétition quand le système ne se déplace pas. La fréquence maximale de numérisation est de 20 points/s quand le récepteur « verrouille » sur des signaux valides. La précision de positionnement par ce GPS peut atteindre quelques millimètres en mode statique, elle est d'ordre centimétrique en mode de trajectographie. Le récepteur GPS permet aussi un contrôle qui élimine les points acquis en dessous d'un certain GDOP.

Un deuxième GPS de haute sensibilité (Ublox® EVK-5) est rajouté pour surmonter les interruptions du signal pouvant affecter le premier GPS. Il peut suivre des faibles signaux jusqu'à -160 dBm. Les positions sont mesurées à la fréquence de 4 Hz. La précision générale estimée par le constructeur est de 2.5 m.

AHRS : une centrale de cap et de verticale Crossbow® AHRS440 équipée d'accéléromètres, de gyromètres et de magnétomètres triaxiaux de type MEMS (Micro-Electro- Mechanical Systems). Ce type de centrales est utilisé normalement pour le guidage de petits avions ou des drones. Le biais du gyroscope est égal à $\pm 0.1^\circ/\text{s}$ et le facteur d'échelle à 1% (données du constructeur). La centrale est munie d'un microprocesseur embarqué effectuant l'intégration des données de ses propres mesures avec celles du GPS. Les résultats de la mécanisation et de l'intégration réalisées par le processeur interne sont écrits dans un fichier journal en temps réel. Bien que la précision angulaire change au fil du temps selon plusieurs facteurs, le fabricant l'estime à 1° pour le roulis et le tangage sans l'aide du GPS et à 0.5° en présence du GPS. Ce chiffre est à doubler pour le lacet. Comme c'est une AHRS, l'alignement se fait toujours à l'aide du GPS et des

magnétomètres ce qui rend le lacet et le cap identiques (appelés lacet réel par le logiciel de pilotage).

TLS : Le scanner Trimble® GX 3D fonctionne sur le principe du temps de vol avec une portée de mesure jusqu'à 200 m. Il balaye des profils verticaux (colonnes) grâce à un miroir oscillant dans le plan vertical. La rotation horizontale est assurée par un moteur intégré. Son champ de vision vertical est limité à 60° ce qui contraint le système à balayer l'un des deux côtés du trajet parcouru. La vitesse maximale du scanner est estimée à 3-4 profils par seconde lorsqu'une résolution angulaire verticale de 0.05° est utilisée. Cette vitesse est atteinte quand on utilise une unique mesure laser sans les fonctions d'autofocus et de coloration du nuage en temps réel. La précision de position est estimée à 12 mm à 100 m pour chaque point mesuré.

Le code informatique nécessaire pour bloquer la rotation horizontale du scanner n'est pas fourni par le constructeur, ce qui nous restreint à utiliser le scanner avec sa double rotation horizontale et verticale. Cette utilisation cumule ainsi deux effets responsables de l'obtention de la troisième dimension ; la rotation horizontale du scanner et le déplacement de la plateforme mobile. La rotation horizontale affecte l'uniformité de distribution des points dans le nuage final. L'angle du profil laser avec les axes du repère du véhicule augmente avec le temps ce qui rend les profils scannés moins (ou plus) rapprochés. Nous allons essayer de limiter cet effet par le mode opératoire. D'autre part, la participation de l'angle horizontal sera prise en compte lors du géoréférencement direct des données.

La vitesse limitée du mode de balayage du scanner associée à la gamme moyenne de la centrale inertielle utilisée nous impose une vitesse de déplacement limitée. Ceci correspond à la vitesse d'un marcheur (environ 2km/h). La première version du système est donc embarquée sur un chariot tractée par l'homme. La figure 1 présente le chariot avec les composants du système.



Figure 7.1 Prototype de plateforme mobile

7.2 Mise en route du système

Le mode d'emploi du système est relativement simple dans la mesure où il suffit de mettre tous les instruments en marche et d'enregistrer leurs données pour le post-traitement. Il est fortement

conseillé de laisser la centrale s'initialiser pendant quelques minutes en pose fixe avant de commencer le déplacement. Ceci permet aussi au GPS de récupérer les almanachs qui lui manquent et d'effectuer le type de démarrage nécessaire. L'expérience montre que les hautes fréquences de la centrale inertielle n'affinent guère la trajectographie. Un taux de 20 Hz est largement suffisant comme fréquence pour le message de navigation.

L'initialisation du scanner consiste à l'orienter dans une direction quasi perpendiculaire au trajet à parcourir et à définir une fenêtre de mesure d'une taille proportionnelle au temps estimé de la séquence de balayage en mode mobile. Le choix de la taille de la fenêtre et du pas angulaire utilisés pendant le balayage se fait à l'aide de Pointscape™, le logiciel de pilotage du scanner (figure 7.2). Le cadrage d'une fenêtre rectangulaire étroite de hauteur maximale associé à un pas angulaire horizontal minimal peut réduire l'effet indésirable de la rotation horizontale du scanner. Le pas angulaire minimal (ou la résolution) du scanner GX est égale à 0.0018° . L'utilisation d'un tel pas garantit quasiment le non-balayage du même profil deux fois si le déplacement est fait en sens contraire de la rotation horizontale. Le déplacement dans la même direction que la rotation ne pose pas ce dernier problème mais génère un nuage de point légèrement moins dense et moins homogène. La différence entre les deux modes opératoires est quasi négligeable lors de l'utilisation de la résolution horizontale minimale.

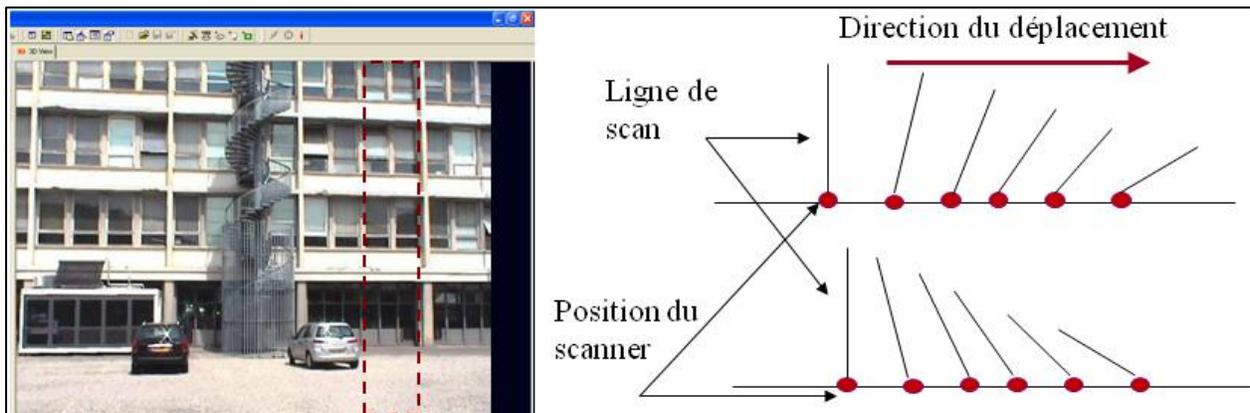


Figure 7.2 Cadrage de la fenêtre à balayer (à gauche) et deux concordances possibles entre la direction du déplacement et la rotation horizontale (à droite).

La résolution influence largement le temps de trajet à parcourir. La résolution verticale basse est choisie comme constante (0.05°) pour accélérer la cadence du balayage et pour obtenir un nuage de densité homogène. La taille de la fenêtre à cadrer par l'utilisateur demeure donc le seul facteur dont dépend la durée du trajet.

7.3 La liaison entre les capteurs

Les trois capteurs sont liés à un ordinateur portable à deux niveaux ; le premier est séquentiel, GPS à AHRS puis AHRS à l'ordinateur et le deuxième est direct, scanner à ordinateur. La centrale AHRS440 permet une connexion avec un seul récepteur GPS ce qui impose la récupération des données du deuxième GPS à partir de sa carte mémoire interne. De toute façon, le stockage des données GPS est indispensable pour des opérations comme la correction différentielle en post-traitement en cas de perte de liaison radio.

La centrale AHRS exige que les données GPS soient formulées selon certains protocoles et une certaine fréquence. Un protocole NMEA avec les phrases GGA, VTG (annexe A) à 4 Hz présente la norme générale de communication GPS/AHRS. Cette norme peut être remplacée par des messages propres à l'entreprise Ublox® (annexe A) en cas d'utilisation de HSGPS. Le processeur embarqué dans l'AHRS intègre les données qui lui sont parvenues par le GPS avec ses propres données inertielles et magnétiques et les envoie en tant que message de navigation facilement lisible par l'ordinateur. Plusieurs types de messages sont disponibles selon l'intérêt de l'utilisateur (annexe B). L'utilisateur a toujours accès aux données brutes ou aux données traitées selon le paramétrage du message de navigation souhaité. Le scanner est lié directement à l'ordinateur en connexion réseau.

Dans la figure 7.3, le récepteur GPS mobile envoie ses mesures de vitesse et de position à la centrale AHRS qui rajoute, à son tour, l'estimation de l'attitude et renvoie la totalité sous forme de messages de navigation à l'ordinateur. Le GPS garde aussi les données brutes utilisées sur sa carte mémoire interne pour des utilisations possibles en post-traitement. La communication GPS/AHRS en temps réel impose le non-contrôle des mesures, ce qui peut être rattrapé à l'aide des données stockées en post-traitement. De plus, l'AHRS sort la coordonnée Z à dix centimètres près (ce qui est cohérent avec ses utilisations de base). Les coordonnées verticales plus précises sont extraites des données sauvegardées sur la carte interne du récepteur géodésique.

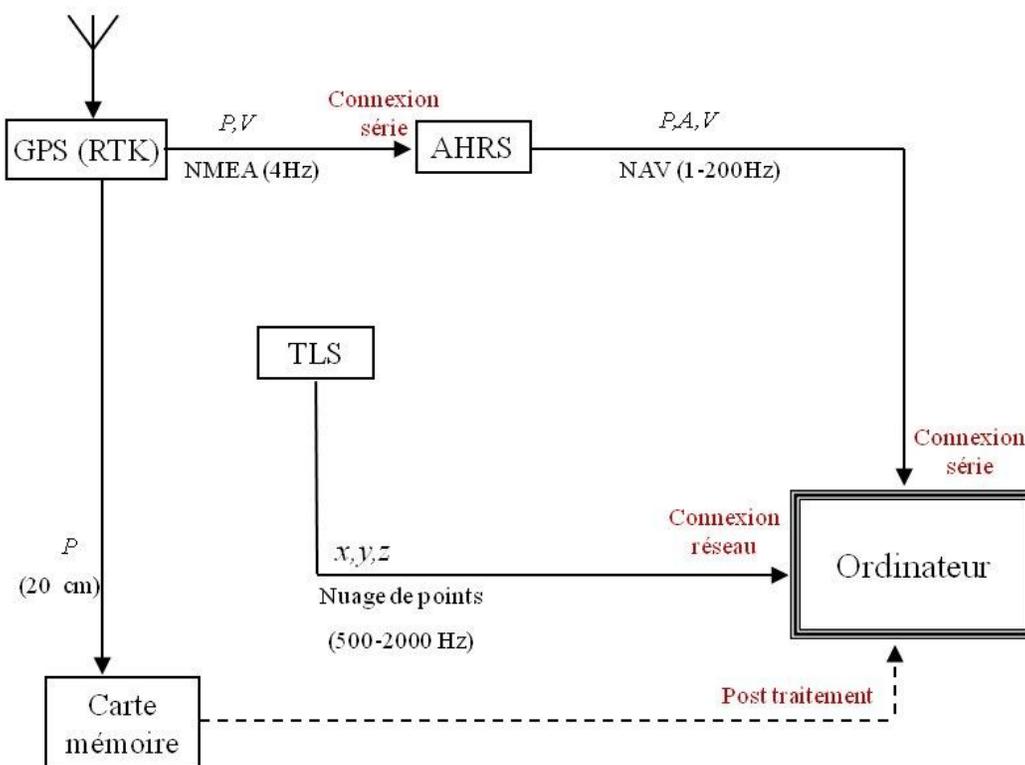


Figure 7.3 Schéma de connexion avec un seul récepteur GPS

Deux opérations sont indispensables avant la mise en route de la plateforme mobile : la calibration et la synchronisation. Ces deux opérations sont préalables aux missions mobiles et rarement rattrapables en post traitement. Les prochains paragraphes sont consacrés à ces opérations.

7.4 Étalonage du système

La calibration dans le contexte mobile désigne l'ensemble des procédures nécessaires pour estimer les constantes de calcul : la distance entre le centre de phase de l'antenne GPS et le centre de masse de l'AHRS (bras de levier a^b), la distance entre le centre de masse de l'AHRS et le centre du capteur laser, ainsi que la matrice (R_s^b) rotation qui sert à changer de référentiel, c'est-à-dire qui permet de passer de celui de la centrale à celui du scanner. La calibration suppose que le système est totalement rigide et qu'il n'existe aucun déplacement relatif entre ses composants. Les deux distances précédentes sont exprimées comme vecteur à trois composantes ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) dans le repère attaché au corps du chariot (ramené à celui de la centrale inertielle).

Le but de cette étape, donc, est de déterminer les composantes des excentricités linéaires et angulaires entre les instruments et non pas l'étalonnage des instruments mêmes. Le calibrage se fait statiquement pour pouvoir obtenir la meilleure précision possible. Cette opération est indépendante du temps et ne nécessite pas de synchronisation entre les instruments.

La méthode s'inspire du mode d'emploi du scanner qui permet facilement de connaître son orientation lorsqu'il est utilisé en mode topographique (station connue en coordonnées et nivelée). Pour cela, la procédure suggérée est une utilisation simple du scanner GX en présence d'un GPS et d'un INS. Ensuite, on compare les résultats et on en déduit les variables cherchées. Il faut, désormais, embarquer les composants du système sur la plateforme mobile de manière fixe et permanente.

La plateforme mobile est fixée dans un endroit où la visibilité de trois points connus, en coordonnées locales (NTF, Lambert 1), est assurée. La réception GPS et les conditions magnétiques doivent être non perturbées. Des cibles standards reconnaissables par le scanner sont installées sur les points, ce qui permet d'effectuer des visés arrières et de connaître, par conséquent, les coordonnées du scanner et la direction du zéro du disque horizontal du scanner. La précision d'une telle détermination dépend largement de la précision des coordonnées connues des cibles et aussi de la collimation du scanner (cas du calcul tachéométrique d'une station libre). Elle a été estimée inférieure à 1-2 cm dans les trois axes.

Puisque le nivellement de la bulle horizontale a été fait à une seconde près, on peut considérer la rotation du scanner autour des axes horizontaux comme nulle, et la rotation autour de l'axe Z égale au gisement donné par le logiciel de pilotage du scanner.

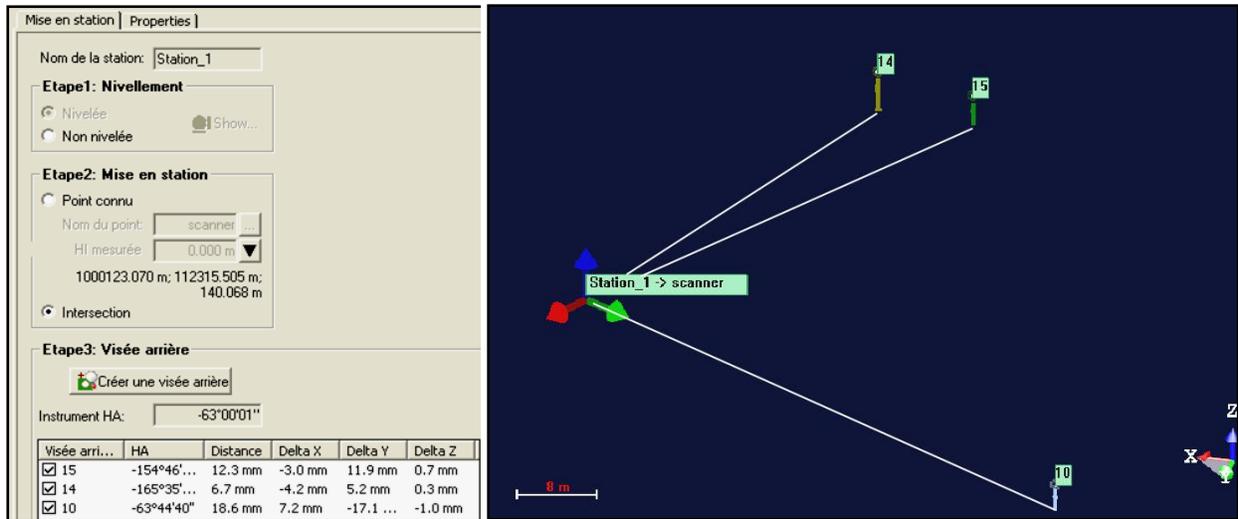


Figure 7.4 Interface de PointScape™ avec le calcul du stationnement

Les valeurs obtenues par PointScape™ peuvent être calculées autrement ; supposons les coordonnées des cibles dans le repère géographique r_g^P et dans le repère du scanner r_s^P . Le changement du repère serait effectué selon la relation :

$$r_g^P = R_g^S \cdot r_s^P + T_g^S \quad 7.1$$

où R_g^S, T_g^S sont la rotation et la translation du repère géographique vers le repère du scanner (transformation rigide). Ils sont les inconnues de cette relation.

(Lorusso *et al.*, 1995) ont présenté 4 techniques pour résoudre un tel problème dont les différences de précision sont insignifiantes notamment pour une redondance faible (3 observations dans notre cas). Nous avons donc choisi d'utiliser la décomposition en valeurs singulières qui est la plus stable quand les points sont quasi-coplanaires. La solution bénéficie de faite que les centroïdes de deux ensembles de points coïncident après la transformation. Elle se base donc sur l'analyse de la matrice de corrélation :

$$H = \sum_{i=1}^{i=N} (r_s^P(i) - r_s^P \text{ moyenne}) \cdot (r_g^P(i) - r_g^P \text{ moyenne})^T \quad 7.2$$

La décomposition en valeurs singulière de cette matrice s'écrit comme suit :

$$H = U \cdot S \cdot V^T \quad 7.3$$

La rotation optimale se calcule selon la relation :

$$R_g^S = V \cdot U^T \quad 7.4$$

Comme les angles de rotation autour des axes de l'Est et du Nord (ω_s, φ_s) sont petits, la matrice de rotation est approximée par :

$$R_g^s = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\omega_s \\ 0 & \omega_s & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & \varphi_s \\ 0 & 1 & 0 \\ -\varphi_s & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \kappa_s & -\sin \kappa_s & 0 \\ \sin \kappa_s & \cos \kappa_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_g^s = \begin{pmatrix} \cos \kappa_s & -\sin \kappa_s & \varphi_s \\ \sin \kappa_s & \cos \kappa_s & -\omega_s \\ -\varphi_s \cos \kappa_s + \omega_s \sin \kappa & \varphi_s \sin \kappa_s + \omega_s \cos \kappa_s & 1 \end{pmatrix} \quad 7.5$$

D'où l'angle κ :

$$\kappa_s = \arctan(R_s^g(2,1) / R_s^g(1,1)) \quad 7.6$$

Les angles ω, φ se calculent indirectement à partir des expressions des éléments $R_{g(3,1),(3,2)}^s$. On doit faire attention au fait que l'axe z est dirigé vers le bas dans la plupart des systèmes de navigation (repère NED). Le signe du lacet doit donc être inversé (figure 7.5) quand on compare le résultat de l'équation 6 avec l'angle zéro du disque horizontal donné par Poinscape™.

La translation du repère du scanner vers le repère géographique est calculée en substituant la valeur de R_s^g dans l'équation 7.7:

$$T_g^s = r_g^p - R_g^s \cdot r_s^p \quad 7.7$$

La comparaison entre les équations 7.1 et 7.7 montre que :

$$a^b = R_b^s \cdot T_g^s \quad 7.8$$

La méthode expliquée ci-dessus fait partie des méthodes de calcul numérique des moindres carrés, elle ne dispose alors pas d'une estimation des erreurs ou de covariance propre à la méthode. On trouve pourtant des méthodes indirectes d'estimation d'erreur (Fitzpatrick et al. 1998 par exemple).

La mesure tachéométrique de cette distance est plus précise que le calcul indirect par l'équation 8. Pourtant, elle peut servir de vérification de l'exactitude du calcul.

La matrice R_b^s est donnée par la relation :

$$R_b^s = R_s^g \cdot R_b^g \quad 7.9$$

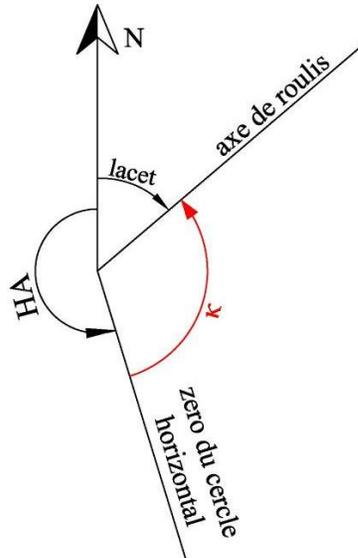


Figure 7.5 Sens de mesure des angles

D'un autre côté, le GPS fonctionnait, tout au long de l'expérimentation, de manière différentielle et en mode statique. Ceci produit les coordonnées de l'antenne GPS installée sur le scanner. Les composantes du vecteur GPS-scanner seront donc calculées par la soustraction des deux coordonnées.

Pour éviter, autant que possible, la dérive de l'AHRS, le choix adopté était de la réinitialiser plusieurs fois au lieu de se contenter d'une seule série de mesures pendant tout le temps de l'expérimentation. Un tel choix permet d'avoir plusieurs valeurs de biais des gyroscopes plutôt que de dépendre des corrections apportées par la position du GPS pour corriger un seul biais. De plus, la complexité de calcul du filtre de Kalman est bien supérieure à une simple procédure qui consiste à moyenner plusieurs valeurs d'angles pour pouvoir éliminer l'erreur de biais. La confiance s'est donc portée sur le calcul le plus simple.

L'intégration du GPS a tout de même été utilisée à côté de deux options concernant le mode statique :

- Désactivation du mode dynamique : pour stabiliser les gyroscopes le plus vite possible. Cette configuration met en valeur la participation d'inclinaison calculée à l'aide des accéléromètres par le biais du gain élevé du filtre de Kalman. Ceci permet une marge de temps pour que le GPS puisse se mettre en route et que le microprocesseur interne de l'INS puisse moyenner les données reçues à partir du GPS.
- Verrouillage stationnaire du lacet : cette option revient à considérer la vitesse de déplacement par rapport au sol, transmise par le code VTG de la trame NMEA du GPS, comme constante. Le changement de vitesse GPS devient donc du bruit qui n'atteint pas les corrections apportées par le filtre de Kalman.

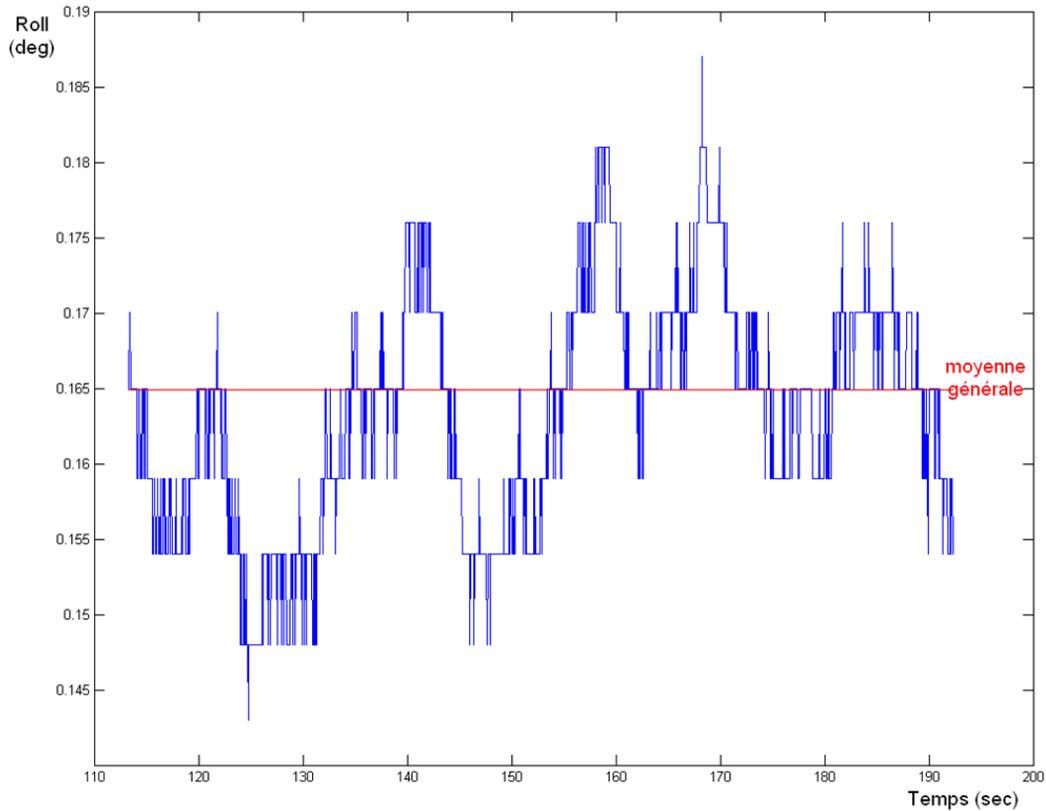


Figure 7.6 Roulis mesuré au 4^{ème} test

Dans le tableau 7.1, nous montrons les 8 essais admis (par une simple comparaison du Nord donné avec celui d'une boussole). La durée de chaque essai est presque de 10 min à une fréquence de 20Hz. La moyenne et l'écart type ont été calculés, ainsi que la moyenne pondérée par l'inverse des écarts types.

N° fichier	Roulis°	écart type	Tangage°	écart type	Lacet°	écart type
1	0.1982	0.0077	0.5746	0.0104	49.3303	0.0163
2	0.1569	0.0304	0.5741	0.0176	49.2673	0.0229
3	0.1194	0.0122	0.5204	0.032	49.1945	0.0302
4	0.1665	0.0081	0.5983	0.0097	49.8641	0.0077
5	0.1633	0.0077	0.5892	0.0109	49.8479	0.0715
6	0.1689	0.0062	0.6242	0.0125	49.7424	0.0816
7	0.1478	0.0139	0.6036	0.0093	49.7228	0.0439
8	0.1721	0.0285	0.6218	0.0184	49.9044	0.0764
moyenne pondérée	0.1649		0.59346		49.6054	

Tableau 7.1 Calcul d'une attitude moyenne de l'INS en statique

Comme les points de contrôle sont de précision millimétrique et puisque les erreurs des mesures lasers sont très faibles, on peut considérer que les erreurs de l’AHRS sont la seule source d’erreur de la calibration.

Ayant les coordonnées géodésiques du GPS, les angles mesurés par l’AHRS et les autres paramètres de la calibration, on peut recalculer les coordonnées des points de contrôle et en déduire les écarts « connus – calculés »

7.4.1 Validation des résultats

La méthode directe pour vérifier le calcul fait ci-dessus est de recalculer les coordonnées des cibles, elles mêmes, mais cette fois en se basant sur l’équation d’intégration (7.10) expliquée plus loin dans ce chapitre. La comparaison entre ces coordonnées et celles connues auparavant donne un indice de la précision de calibration du système.

$$r_p^g = r_{INS}^g + R_b^g \cdot [R_s^b \cdot r_p^s + a^b] \quad 7.10$$

où : l’indice p représente les cibles

R_s^b : la matrice calculée qu’on souhaite vérifier

a^b : l’excentricité calculée qu’on souhaite vérifier aussi

r_p^s : la position des points dans le repère du scanner (il suffit de réinitialiser la position du scanner au zéro).

Les autres éléments de l’équation sont expliqués dans le paragraphe 7.6 sauf qu’ils sont, dans ce cas, indépendants du temps.

Le tableau 7.2 présente les coordonnées de référence pour les trois cibles utilisées et les valeurs calculées en fonction des valeurs de l’étalonnage. La différence entre ces deux coordonnées est seulement due à la précision de la calibration du système.

N° cible	Δx cm	Δy cm	Δz cm
10	1.7	-1.9	-0.1
14	1.8	2.4	-0.2
15	1.4	2.4	-0.6

Tableau 7.2 Comparaison entre les coordonnées de référence et celles calculées après l’étalonnage.

Les cibles utilisées pour cette expérimentation sont éloignées d’environ 15 m du scanner, ce qui représente la distance entre la plateforme mobile et les façades à balayer dans la plupart des cas. Les écarts montrés dans le tableau 7.2 peuvent donner un indice de contribution de l’erreur de la calibration dans le bilan général des erreurs d’un nuage acquis en mode mobile.

L’acquisition d’un nuage de points en mode fixe permet d’observer l’effet des erreurs de la calibration sur la précision totale. L’acquisition en mode statique et le nouveau calcul multi-sensoriel (équation 7.10) aident à estimer la précision absolue du système. Or, cette expérimentation ne donne guère un indice de la précision relative qui serait déterminée en mode mobile. Le traitement des données se fait selon les étapes suivantes:

- On garde la position et l’orientation du scanner comme étant calculées à l’aide des cibles

- On lance le scan d'un objet, l'enregistrement du journal de l'INS et la réception des données GPS simultanément et ce, jusqu'à la fin du balayage.
- A partir du logiciel de pilotage du scanner, on récupère deux fichiers : le premier contient les coordonnées réelles calculées des points et le deuxième contient les coordonnées des points mais dans le repère du scanner (origine et gisement égaux à zéro)
- On intègre les mesures GPS et INS au deuxième fichier, en utilisant les paramètres de la calibration calculés ci-dessus et en utilisant l'équation 7.10.
- Le calcul doit être fait de manière à ce qu'il garde l'ordre des points comme dans le premier fichier.
- La distance entre les deux jeux des points (figure 7.7) représente l'effet d'étalonnage du système.

Après avoir apparié les couples de points ayant le même numéro d'ordre lors de l'acquisition, on peut appliquer la série des équations 7.1-7.7 pour estimer la rotation et la translation relatives entre les deux nuages. Si l'on considère que les coordonnées acquises par le mode nivelé sont les plus probables et que les coordonnées calculées sont les plus douteuses, l'écart entre elles pourrait représenter l'incertitude ou l'erreur d'étalonnage. Le tableau 7.3 montre les écarts moyens de translation (δT_x , δT_y , δT_z) entre les deux nuages.

$\delta T_x (cm)$	$\delta T_y (cm)$	$\delta T_z (cm)$
1.9	2.0	0.4

Tableau 7.3 Ecart entre un nuage de points acquis et calculé en mode statique du scanner et par l'intégration de GPS/INS

On peut encore intégrer les valeurs citées ci-dessus dans le calcul des paramètres de la calibration, quoique la confiance dans les points acquis dans ce mode ne soit pas comparable à celle des cibles. On s'est donc contenté du calcul à l'aide des cibles.

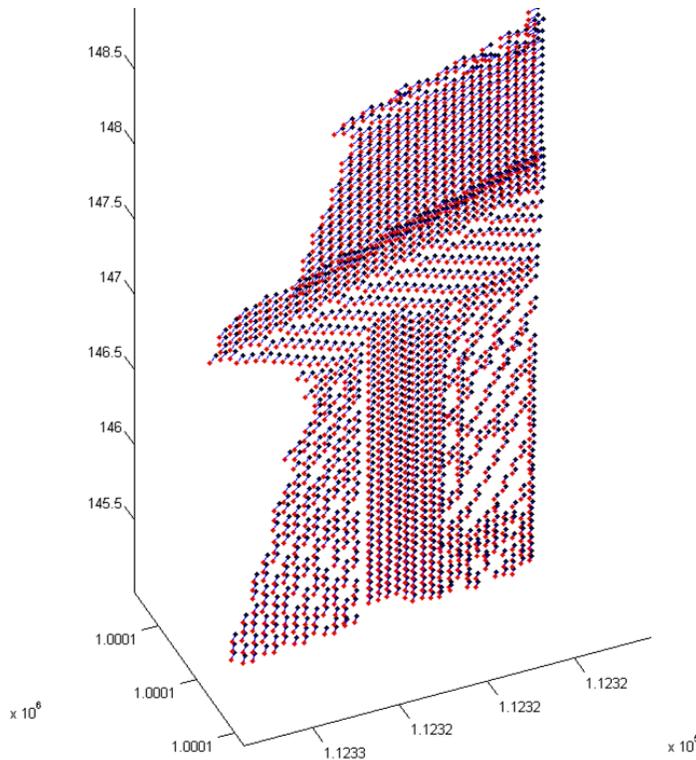


Figure 7.7 Nuage de points acquis en mode statique du scanner (noir) et calculé à l'aide de GPS/INS (rouge)

7.5 La synchronisation entre les composants du système

7.5.1 Introduction

L'intégration correcte des données impose la détermination précise des instants où les mesures ont été effectuées sur la même échelle de temps. Etant le plus précis et le plus uniforme, le temps GPS fournit toujours l'échelle de temps sur laquelle les autres capteurs peuvent se caler. Plusieurs solutions, de différentes précisions, sont proposées. Ces solutions se situent dans deux catégories; la première dépend de l'ordinateur reliant les capteurs comme un terminal de synchronisation. La deuxième va plus loin dans l'électronique des capteurs en utilisant la nature de leurs signaux pour obtenir la synchronisation.

Nous appellerons la première catégorie : synchronisation au niveau du software (ou synchronisation passive). Comme exemple de cette solution, on peut citer (Abuhadrous, 2005) qui utilise le logiciel ^{RT}MAPS pour mettre en commun les données collectées des différents capteurs; les données sont donc datées précisément lors de leur acquisition par ^{RT}Maps. Ce logiciel permet également de décoder la trame NMEA du GPS et certains paquets de données d'INS.

La deuxième catégorie peut être appelée : synchronisation au niveau du hardware (ou synchronisation active). On trouve dans cette catégorie plusieurs exemples pour référencer le temps local de l'INS ou du scanner à la base de temps GPS. En revanche, on trouve très peu d'explications concernant les scanners. Le principe reste toujours le même : acheminer les

signaux selon la logique (FIFO First-In-First out). (Mumford *et al.*, 2006) utilise un hardware qui achemine les pulses PPS avec les trames des données INS en les étiquetant par une valeur donnée par un compteur interne. L'ordinateur traduira ce type de journalisation en temps d'acquisition de signaux, mais toujours en référant les paquets venants de l'INS au pulse PPS.

(Madeira *et al.*, 2007) utilise la carte d'intégration SBR-LS de U-blox pour synchroniser et intégrer le signal de GPS avec celui d'un gyroscope directionnel. En effet, nous pouvons trouver sur le marché de la micro-électronique plusieurs types de ces cartes (GWGDR-K⁹, Jupiter 21¹⁰) qui peuvent résoudre à la fois le problème de synchronisation ainsi que l'intégration avec un seul gyroscope et un odomètre. Elles ne sont donc pas conçues pour fournir les observations d'attitude ni pour se positionner à une précision inférieure à 2 m.

La solution suggérée considère la simplicité et le coût faible des équipements. Elle se situe dans la première catégorie car elle utilise l'ordinateur lui-même comme un terminal de synchronisation.

Comme le scanner GX utilisé est un scanner 3D à utilisation fixe, il ne fournit pas l'horodatage associé à chaque tir laser. On peut avoir l'instant de début et de fin du balayage à une seconde près dans le logiciel de pilotage du scanner, ce qui n'est pas suffisant pour des applications mobiles. Par contre, on trouve les instants correspondant à chaque mesure AHRS sur l'échelle de temps du GPS et de l'ordinateur dans le message de navigation. Seul le scanner donc, pose un problème d'horodatage.

La connexion entre l'ordinateur et le scanner est observée. Cette opération se fait à l'aide d'un logiciel « espion » qui permet de surveiller les trames passant par la carte réseau. Le logiciel suggéré pour cette tâche est : Ethereal^{®11} (ou Wireshark^{®12}) qui aide à analyser de multiples connexions à la fois. Ce logiciel, ainsi que d'autres similaires, n'est pas capable de décoder tous les types de paquets de données. Il faut donc déchiffrer les paquets des données reçus par l'ordinateur et enregistrer le temps d'arrivée de chaque paquet. La relation entre les paquets transmis et les points numérisés doit être établie pour connaître les constantes qui lient l'instant d'arrivée des trames de données à l'instant vrai de la mesure où autrement dit, le temps de latence.

7.5.2 Tests et observations

Tous les tests d'horodatage sont faits au laboratoire. On scanne une fenêtre rectangulaire similaire à ce qu'on fait dans les sorties mobiles, puis on essaie d'analyser les fichiers enregistrés par le logiciel qui observe la communication scanner-ordinateur.

Suite aux différents tests, nous avons pu remarquer en observant simultanément le scanner et le programme espion que l'arrivée des trames de données correspond généralement à deux profils balayés. Pour confirmer cette constatation, il faut compter les trames de données et les colonnes du balayage.

En effet, un profil scanné correspond à un angle horizontal « quasi » constant, le changement « brutal » de l'angle horizontal correspond au changement de profil. On peut détecter ces

⁹ Korea Electric Terminal Co., Ltd.

¹⁰ Navman NZ Ltd

¹¹ <http://www.ethereal.com/>

¹² <http://www.wireshark.org/>

changements en dérivant l'angle horizontal par rapport au temps et en trouvant les valeurs supérieures au seuil égal à la résolution horizontale fournie par l'utilisateur.

En examinant le trafic des données réseau, on peut remarquer plusieurs types de transactions (au sens de trames échangées). Une transaction par protocole TCP (Transmission Control Protocol) qui sert à envoyer des paramètres, ou à donner un ordre de transfert FTP. La transaction par protocole FTP (File Transfer Protocol) est utilisée afin d'envoyer les mesures à l'ordinateur.

Nous nous sommes intéressés aux commandes TCP envoyées par le scanner : nous avons remarqué une instruction « PSH » qui contient le nom d'un fichier binaire : « .bin ». Cette instruction est antérieure au transfert FTP-Data. En calculant les intervalles de temps entre l'arrivée de ces instructions, nous avons remarqué qu'ils sont quasiment uniformes.

Cette instruction semble donc avertir l'ordinateur que le fichier binaire peut être transféré. Le scanner n'ayant pas une grande mémoire tampon, cette instruction est générée dès que le scanner a créé le fichier binaire, donc dès qu'il a fini de scanner deux lignes de points.

On émet ici l'hypothèse que l'intervalle de temps entre l'acquisition du dernier point des deux lignes, et l'envoi de la commande « PSH » par le scanner, est constant tout au long d'un scan. L'estimation de cette constante et de la durée de numérisation des deux premières colonnes est l'origine de l'imprécision de la méthode d'horodatage. L'intervalle chronologique entre le transfert des données d'une paire de colonnes et le dernier point scanné est supposé égal à 0.01-0.02 sec (valeur empirique). La durée du scan des deux premières colonnes est considérée égale à la moyenne de toutes les paires scannées pendant tout le scan observé.

Nous pouvons désormais filtrer les communications scanner-ordinateur enregistrées par l'espion de réseau et en conserver ce qui nous est utile : les commandes de transfert en fin de chaque paire de colonnes portant l'horodatage et les détails du transfert portant les mesures laser brutes. La figure 7.8 montre l'interface du logiciel Wireshark® où on trouve seulement les commandes filtrées qui portent des informations pertinentes pour l'horodatage.

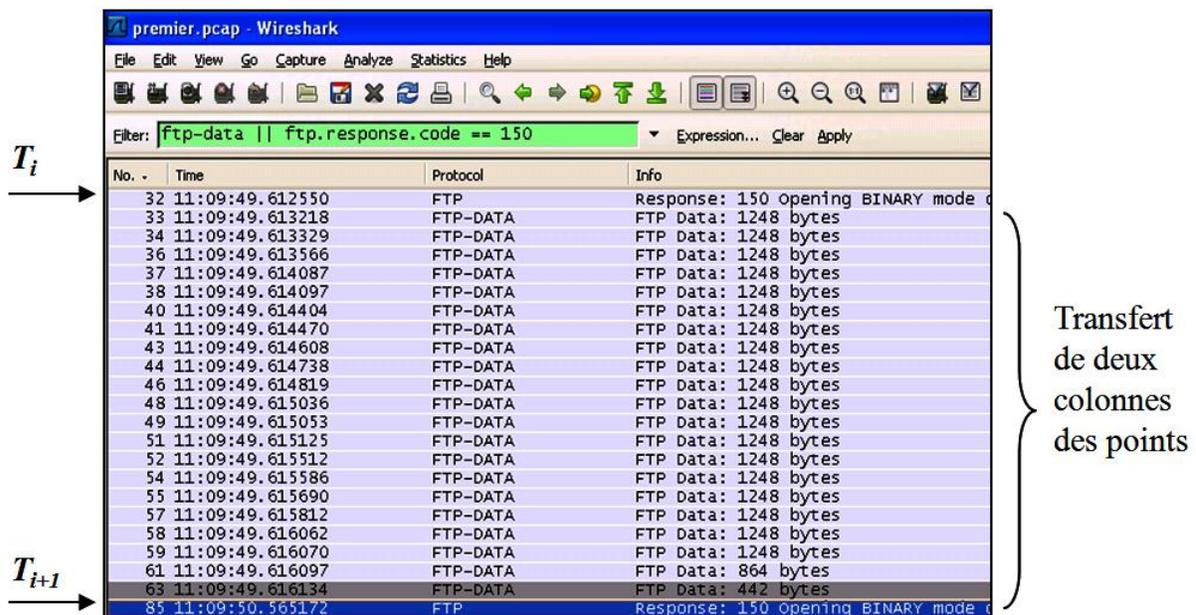


Figure 7.8 Interface de Wireshark® ; (T_i, T_{i+1}) l'instant de transfert des couples de colonnes $i, i+1$

Dans chaque paire de colonnes, on suppose que la durée de la rotation horizontale ayant lieu au milieu est égale au temps entre deux points successifs dans la même colonne. Par conséquent, on peut effectuer une interpolation linéaire entre les instants de début et de fin de la numérisation afin d'horodater chaque point. Il faut encore décrypter les paquets de données envoyés pour retrouver les mesures laser effectuées. Les points numérisés dans Pointscape ne peuvent pas fournir les informations nécessaires. Le logiciel omet les cas où le rayon laser part dans le vide, or ces cas ont pris du temps.

Le scanner GX effectue des arrêts aléatoires pendant le scan. Ces pauses semblent dues aux erreurs de communications TCP. Lorsqu'une pause est détectée, on divise l'objet scanné en deux et on réalise la chaîne d'analyse et d'interpolation pour chaque objet séparément.

7.5.3 Décodage des fichiers binaires

7.5.3.1 Lecture en mode texte

La première étape est de reconstituer les fichiers binaires à partir des données recueillies par Wireshark : il s'agit, dans un premier temps, d'extraire les données de chaque paquet «FTP-DATA», puis de les assembler en juxtaposant les fichiers.

En lisant ces fichiers en mode ascii, on peut noter deux séquences marquées par les mots « en-tête, fin de trame » qui se répètent autant de fois que le nombre de colonnes scannées. Ceci laisse supposer que les informations d'une colonne de points sont délimitées entre les deux mots. L'« en-tête » contient des informations sur la colonne scannée, en plus de l'heure et de la date du scan (à une seconde près).

7.5.3.2 Lecture en mode binaire

La méthode la plus simple est de coder les informations d'une colonne sur 8 octets. On peut à ce stade noter des valeurs numériques lisibles limitées de 0 à 255. En confrontant les deux fichiers (binaire et numérisé par Pointscape), on s'aperçoit que les composantes Rouge, Vert, Bleu et l'intensité ont les mêmes valeurs. Ce sont d'ailleurs les dernières données du fichier décrypté. Ces valeurs se répètent périodiquement tous les 39 octets pour le scan correspondant à une acquisition vidéo. Seule la valeur d'intensité existe pour les scans sans couleurs, elle se répète tous les 36 octets.

Après avoir déterminé la longueur d'écriture de chaque point, plusieurs essais sont faits pour trouver le codage correct pour le reste des entiers (annexe C). Les données brutes d'une mesure laser par le scanner GX sont constituées des coordonnées cartésiennes (x,y,z), des coordonnées sphériques (ρ, φ, θ), d'intensité et des couleurs RVB si paramétrées par l'utilisateur. Quand le rayon laser émis ne revient pas, les valeurs de la distance et des coordonnées cartésiennes sont mises à zéro.

La lecture du fichier filtré venant du logiciel « espion » se fait donc à deux niveaux et en trois étapes :

1. Détection de commande portant l'horodatage pour chaque paire de colonnes (niveau texte ascii).
2. Détection et suppression des entêtes séparant les deux colonnes (niveau texte ascii)
3. Codage des données de chaque colonne séparément (niveau binaire)

Les trois étapes s'encapsulent dans un algorithme séquentiel. La distribution des instants trouvés en première étape sur les points déduits en troisième se fait antérieurement.

7.5.4 Validation de la méthode

Pour qu'on puisse détecter les mouvements du scanner, nous avons accroché une centrale à inertie sur la face avant du scanner. L'axe Y_b de la centrale était quasiment tangentiel à l'arc dessiné par le scanner lors de son mouvement horizontal (figure 7.9). La centrale doit être reliée à l'ordinateur fonctionnant avec le scanner.

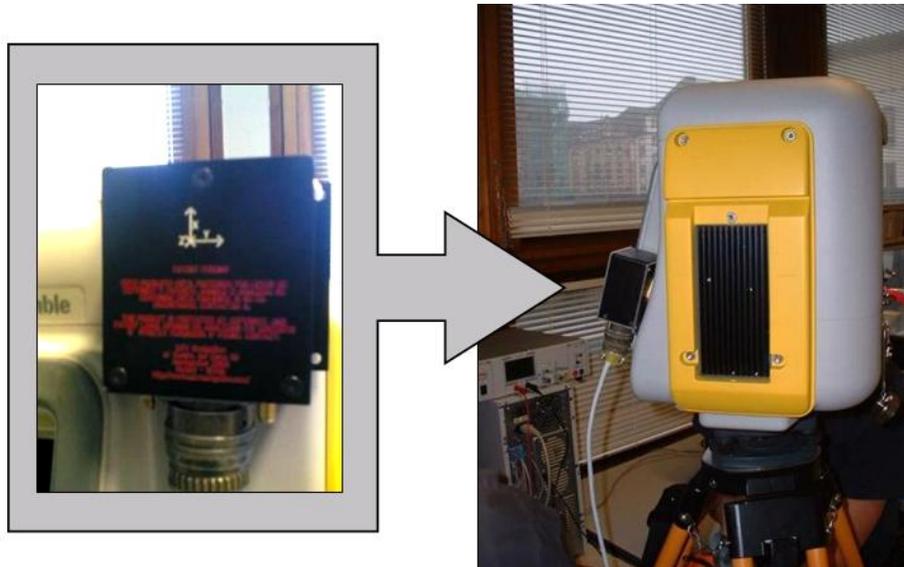


Figure 7.9 Montage de la station inertielle

En effet, chaque accélération et décélération détectées correspondent à une rotation horizontale entre deux colonnes de scan. On vérifie ainsi que chaque trame de données, issues du « sniffer », correspond bien à deux colonnes de scan. De plus, on peut calculer des valeurs moyennes de constantes censées représenter la latence entre la fin du scan des deux colonnes et le transfert des données. Cette constante se rapproche de zéro et peut être négligée dans bien des cas. La figure 7.10 illustre les accélérations horizontales du scanner et les instants du transfert. La moyenne non nulle des accélérations s'explique par le fait que l'axe Y_b de l'INS n'est pas horizontal, l'accéléromètre en question détecte donc une partie de la gravité terrestre. Le scan a lieu entre deux accélérations successives ce qui coïncide, une fois sur deux, au transfert des données.

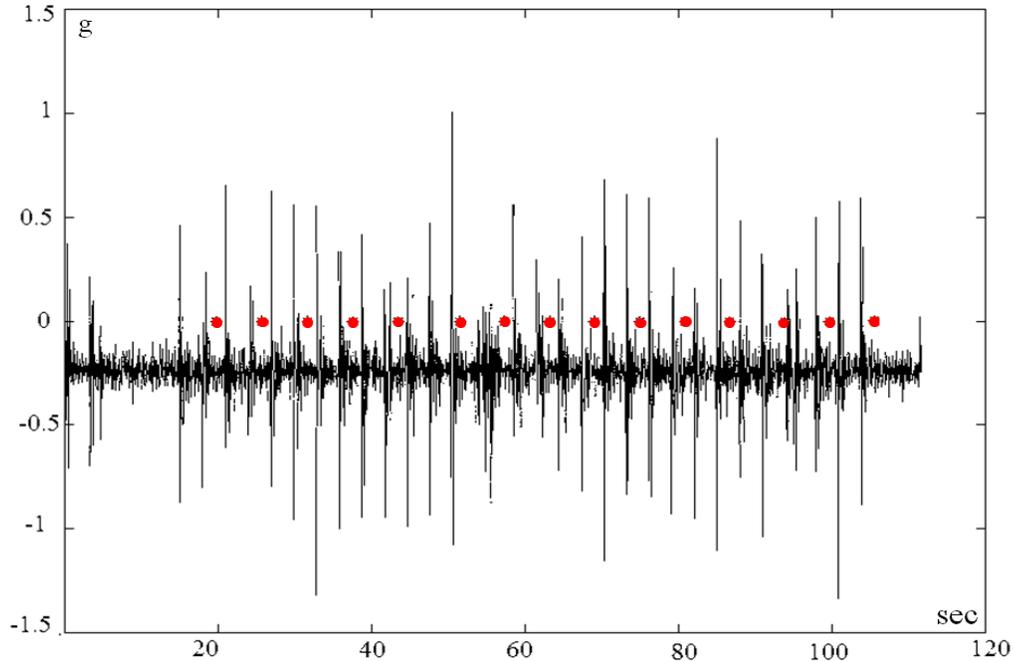


Figure 7.10 Accélérations mesurées selon l'axe Yb (noir) avec une représentation des instants PSH déduits de fichiers du programme « espion ».

L'imprécision d'horodatage par la méthode exposée est abordée encore plus loin dans cette thèse notamment quand la précision du nuage de points est discutée.

7.6 Le géoréférencement direct

La méthode indirecte de géoréférencement se base sur l'utilisation de cibles ou de sphères d'ajustage connues en coordonnées objet bien scannées. Elle est applicable uniquement pour le scan 3D fixe où peu de facteurs peuvent affecter la précision. Le géoréférencement direct se fait à l'aide de capteurs produisant la position et l'attitude à haute fréquence et de manière indépendante du contenu du scan. Cette technique d'intégration a rendu possible l'acquisition mobile de milliers de kilomètres, dans presque tous les milieux. Les capteurs capables de fournir la position et l'attitude avec une précision suffisante peuvent être utilisés pour le géoréférencement direct, pour autant qu'ils puissent être calibrés et synchronisés avec une précision acceptable.

Les éléments de l'orientation externe peuvent aussi être définis pour chaque point du nuage laser. Ils changent rapidement et leur évolution doit être suivie par des mesures en temps réel. Plusieurs formes de l'équation de géoréférencement direct sont en œuvre. La différence réside dans le référentiel où on veut exprimer le nuage de points et où les mesures sont exprimées. La différence essentielle qui distingue notre cas vient du fait que le scanner acquiert ces coordonnées en repère tridimensionnel. Or le cas général en cartographie mobile est le balayage en deux dimensions.

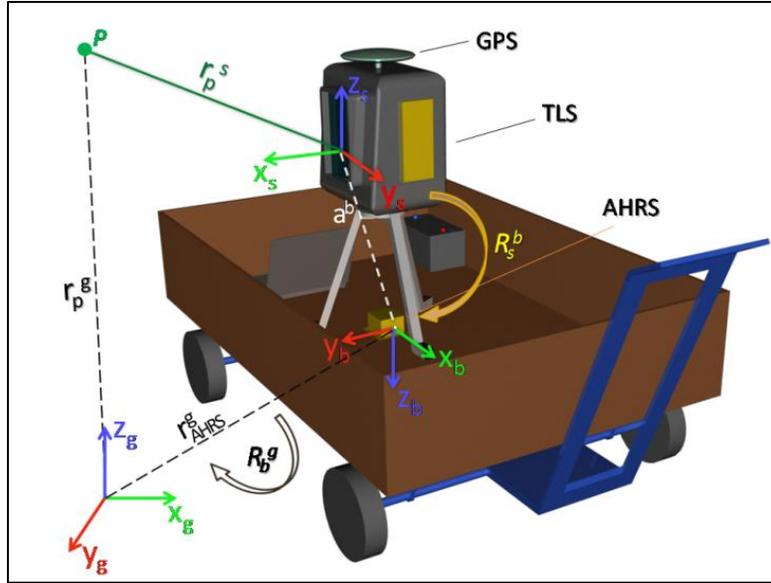


Figure 7.11 Plateforme mobile et les dénominations essentielles concernant le géoréférencement direct laser.

Dans la figure ci-dessus on peut exprimer r_p^g le vecteur position d'un point p dans un repère cartésien local g comme la somme des deux vecteurs :

$$\vec{r}_p^g = \vec{r}_s^g + R_s^g \cdot \vec{r}_p^s \quad 7.11$$

\vec{r}_s^g est le vecteur position du scanner dans le repère géodésique local. Le vecteur liant le scanner et le point n'est pas mesurable dans le repère géodésique mais dans celui du scanner même r_p^s . Il subit quand même une rotation R_s^g du repère du scanner vers le repère géodésique. Cette rotation, non mesurable également, peut être exprimée en fonction de la rotation mesurée par l'AHRS R_b^g et de la calibration des excentricités angulaires R_s^b :

$$R_s^g = R_b^g \cdot R_s^b \quad 7.12$$

D'autre part, on ne possède pas le vecteur position du scanner dans le repère géodésique mais celui de l'AHRS mesuré par le GPS. L'excentricité linéaire entre les deux peut être mesurée seulement dans le repère du véhicule (ramené à celui de l'AHRS), c'est pourquoi, elle doit subir la rotation R_b^g pour rejoindre le reste des vecteurs.

$$\vec{r}_s^g = \vec{r}_{AHRS}^g + R_b^g \cdot \vec{a}^b \quad 7.13$$

La forme finale de l'équation d'intégration est obtenue en substituant les relations 7.12 et 7.13 dans 7.11:

$$r_p^g(t) = r_{AHRS}^g(t) + R_b^g(t) \cdot [R_s^b \cdot r_p^s(t) + a^b] \quad 7.14$$

La notation (avec flèche) des vecteurs est omise à condition qu'ils soient représentés par leurs composantes x, y, z . Il est plus convenable d'exprimer les mesures du scanner sous forme cartésienne lors du calcul du nuage et sous forme sphérique lors du calcul des erreurs correspondantes. Les deux jeux des coordonnées existent déjà dans le fichier brut du scanner (cf . 7.5.3).

$$\begin{pmatrix} x_p^g \\ y_p^g \\ z_p^g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{AHRS}^g \\ y_{AHRS}^g \\ z_{AHRS}^g \end{pmatrix} + R_b^g \left[R_s^b \cdot \begin{pmatrix} \rho \cos \varphi \cos \theta \\ \rho \cos \varphi \sin \theta \\ \rho \sin \varphi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \right] \quad 7.15$$

Cette équation doit être appliquée autant de fois qu'il y a des mesures laser r_p^s . La différence en fréquence doit être comblée par l'interpolation et par la compensation des masques GPS. Les systèmes de cartographie mobile fonctionnant en temps réel disposent d'un calculateur qui peut appliquer cette équation à la cadence de sortie des données. Le calcul en post-traitement impose de développer des techniques pour réaliser le calcul sur des périphériques de gamme grand public.

7.7 Analyse préalable des erreurs

Dans ce paragraphe, on entend analyser les erreurs de synchronisation et de calibration sur la précision finale du nuage de points. Bien que ces erreurs ne soient pas tout à fait indépendantes des conditions de déplacement, nous avons choisi de les isoler et de les traiter a priori. Ceci pourrait faciliter la compréhension de l'effet de chaque erreur, ce qui aiderait le concepteur à décider si la précision est suffisante ou s'il faut encore investir sur quelque partie.

Pour pouvoir appliquer la loi de transmission des erreurs, on considère l'équation 7.14 comme une fonction $Y = f(X)$. Le développement de Taylor limité à la première dérivée autour de la valeur la plus probable donne une approximation de l'écart recherché :

$$Y - Y_{X_0} \approx \sum \left(\frac{\partial Y}{\partial X} \right)_{X_0} \cdot (X - X_0) \quad \text{ou :} \quad \delta Y \approx \sum \left(\frac{\partial Y}{\partial X} \right)_{X_0} \delta X \quad 7.16$$

avec : $Y = \widehat{r_p^g}(t)$ la valeur la plus probable,

$Y_{X_0} = r_p^g(t)$ la valeur calculée à partir des mesures disponibles,

$X \in (\omega_s, \varphi_s, \kappa_s, a_x, a_y, a_z)$ les éléments de la calibration quand elle est en question et

$X = t$ pour le cas de la synchronisation et l'horodatage.

Les erreurs de calibration et de synchronisation sont indépendantes. On traite donc chaque cas à part.

7.7.1 Cas de la calibration

Pour faciliter la lisibilité des relations, on va traiter les constantes de calibration ($R_b^g, \delta a^b$) comme variables. La dérivation de l'erreur due à la calibration est donnée par la relation :

$$\delta r_p^g \text{ calibration} = R_b^g \cdot \delta a^b + R_b^g \cdot \delta R_s^b \cdot r_p^s \quad 7.17$$

On suppose que les erreurs sur les excentricités angulaires sont petites. (Mikhail *et al.*, 2001) On introduit les relations suivantes pour faciliter la linéarisation d'une matrice de rotation (R_s^b en l'occurrence) :

$$\frac{\partial R_s^b}{\partial \omega_s} = R_s^b \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial R_s^b}{\partial \varphi_s} = R_s^b \begin{pmatrix} 0 & \sin \omega_s & -\cos \omega_s \\ -\sin \omega_s & 0 & 0 \\ \cos \omega_s & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad 7.18$$

$$\frac{\partial R_s^b}{\partial \kappa_s} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} R_s^b$$

$$\delta R_s^b = \frac{\partial R_s^b}{\partial \omega_s} \cdot \delta \omega_s + \frac{\partial R_s^b}{\partial \varphi_s} \cdot \delta \varphi_s + \frac{\partial R_s^b}{\partial \kappa_s} \cdot \delta \kappa_s \quad 7.19$$

L'excentricité linéaire est mesurée par un tachéomètre. L'erreur sera ainsi la même (estimée à 1 mm) sur toutes les composantes (δa^b).

7.7.2 Cas de la synchronisation

L'équation d'intégration (7.14) peut être considérée comme une fonction composée :

$$Y = X \circ t \quad 7.20$$

$$Y = f(X) \text{ avec } X \in [x_{AHRS}^g, y_{AHRS}^g, z_{AHRS}^g, \text{roulis}, \text{tangage}, \text{lacet}]$$

$$X = f(t) :$$

$$\begin{aligned} x_{AHRS}^g &= x_{AHRS_0}^g + v_e \cdot (t - t_0) \\ y_{AHRS}^g &= y_{AHRS_0}^g + v_n \cdot (t - t_0) \\ z_{AHRS}^g &= z_{AHRS_0}^g + v_u \cdot (t - t_0) \\ \text{roulis} &= \text{roulis}_0 + \omega_x \cdot (t - t_0) \\ \text{tangage} &= \text{tangage}_0 + \omega_y \cdot (t - t_0) \\ \text{lacet} &= \text{lacet}_0 + \omega_z \cdot (t - t_0) \end{aligned} \quad 7.21$$

On suppose ci-dessus que la précision de l'acquisition par le scanner (r_p^s) est indépendante du temps. Selon la règle de dérivation d'une fonction composée :

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{\partial Y}{\partial X} \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \quad 7.22$$

Le premier terme $\frac{\partial Y}{\partial X}$ se réfère à la sensibilité de l'équation d'intégration par rapport aux erreurs de position et d'attitude. Cet effet sera abordé plus loin dans cette thèse quand on discutera la précision finale du nuage de points. Le deuxième terme est égal à :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = (v_e \quad v_n \quad v_u \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z)^T \cdot \delta t \quad 7.23$$

où δt est l'erreur de synchronisation. On appelle ce terme « la composante de synchronisation dans l'erreur générale ». La démonstration précédente suppose l'existence d'une seule erreur sur l'échelle de temps qui serait, dans notre cas, égale à l'erreur d'horodatage du scanner (0.01-0.02 sec).

On peut noter à ce stade de l'analyse que l'erreur de synchronisation est difficile à isoler des autres facteurs. Elle amplifie les erreurs d'attitude et de trajet de manière proportionnelle aux vitesses linéaires et angulaires. Par exemple, pour un mouvement axial à une vitesse angulaire nulle et à une vitesse linéaire fixe de 1 m/s, un centième de seconde d'erreur d'horodatage produit une composante d'erreur de 1 cm.

8. Le traitement de trajectométrie et la production du nuage de points

8.1 Traitement de trajectométrie

Comme mentionné dans le mode opératoire, on parcourt normalement des trajets courts et moyens à cause des limitations du scanner et de l’AHRS utilisés. On essaie aussi de faire des tronçons rectilignes pour maintenir, tant qu’il est possible, l’homogénéité du nuage de points (figure 8.1).

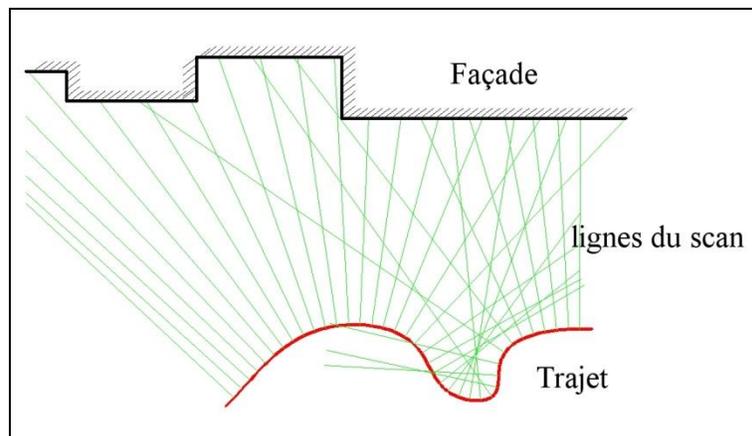


Figure 8.1 Distribution des profils lors de la numérisation à partir d'un trajet non « droit »

Étant donné que la centrale inertielle délivre son message de navigation à 20 Hz (souvent paramétré pour notre système) et que le scanner fonctionne à 2000 points/seconde, une interpolation est indispensable. Le calcul du trajet est fait à une fréquence égale au taux d'échantillonnage de l'AHRS, il faut encore une interpolation linéaire pour suivre le débit du scanner (figure 8.2).

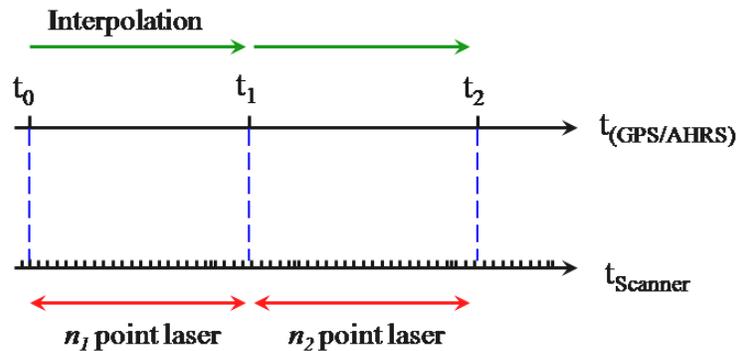


Figure 8.2 Interpolation nécessaire pour accorder les mesures GPS/AHRS +TLS

En l'absence de signal GPS, la centrale inertielle ne produit pas de position dans son message de navigation car les erreurs du gyromètre ne permettent pas un tel calcul. Nous allons analyser l'intégration AHRS/GPS faite en temps réel pour mieux comprendre les conditions de l'expérimentation avant de montrer la méthode de traitement.

8.1.1 Intégration GPS /AHRS

L'intégration du GPS avec les données inertielles et magnétiques se fait à l'intérieur de la centrale en temps réel. On ne dispose pas d'informations suffisantes sur l'algorithme utilisé pour l'intégration (a priori basé sur le principe d'un filtre de Kalman étendu). En tant que boîte noire, on peut caractériser l'algorithme de l'intégration avec le message NMEA standard d'un GPS comme suit :

- L'architecture du couplage GPS/IMU est de type lâche : ceci s'explique par le fait que la centrale exige le protocole NMEA du GPS avec des trames GGA, VTG.
- L'algorithme ne tient pas compte de la qualité de la position 3D du GPS étant donné qu'elle n'est pas transmise par les trames GGA, VTG.
- La boucle de correction tourne à 4 Hz (en cas de non interruption du GPS) tandis que la boucle de prédiction peut tourner de 20 à 100 Hz. Une telle constatation est faite par une simple observation des taux d'entrée/sortie de la centrale AHRS 440.

Les notes citées ci-dessus sont applicables pour tous les GPS y compris le modèle Leica® TP1200 qui peut fournir un code NMEA via une communication série.

Une solution pour améliorer les résultats est de réappliquer un filtre de Kalman d'un modèle mathématique simulant ce qui est cité plus haut mais en inversant l'échelle du temps dans un processus traditionnel (lissage de Kalman). On peut ainsi limiter la dérive de biais des gyromètres et des accéléromètres par une double contrainte.

La dérive de la centrale est tellement forte en cas d'absence du signal GPS qu'elle ne peut plus être contrôlée par le signal à venir. On peut constater qu'une période de 20 secondes sans GPS est suffisante pour produire des mesures angulaires totalement inexploitable. Cependant, la centrale permet d'utiliser deux techniques pour contenir cet effet indésirable : l'utilisation augmentée des magnétomètres et la mise à jour d'attitude lors des vitesses basses. L'exploitation de ces deux techniques a fourni des résultats intéressants. Le seul inconvénient de cette utilisation est la perte

d'un modèle mathématique unique du filtre de Kalman ce qui empêche le lissage en post-traitement.

8.1.1.1 Reconstitution de la position

Dans une première exploitation des matériels existant, nous avons choisi de laisser l'AHRS 440 gérer totalement l'attitude. La reconstitution et l'interpolation de la position seront faites par la méthode d'ajustage des polynômes.

On essaie premièrement d'isoler les données GPS/AHRS correspondantes au mouvement. Plusieurs options sont possibles pour séparer les données statiques et dynamiques. On préfère, tout de même, utiliser les mesures les plus élémentaires (vitesse angulaire ou accélération) pour cet objectif. Il suffit de trouver un seuil qui distingue le bruit de la vraie dynamique énonçant le début et la fin du déplacement. La figure 8.3 montre l'isolement du mouvement par un seuil de changement de la vitesse angulaire autour de Z égale à 0.2 deg/s.

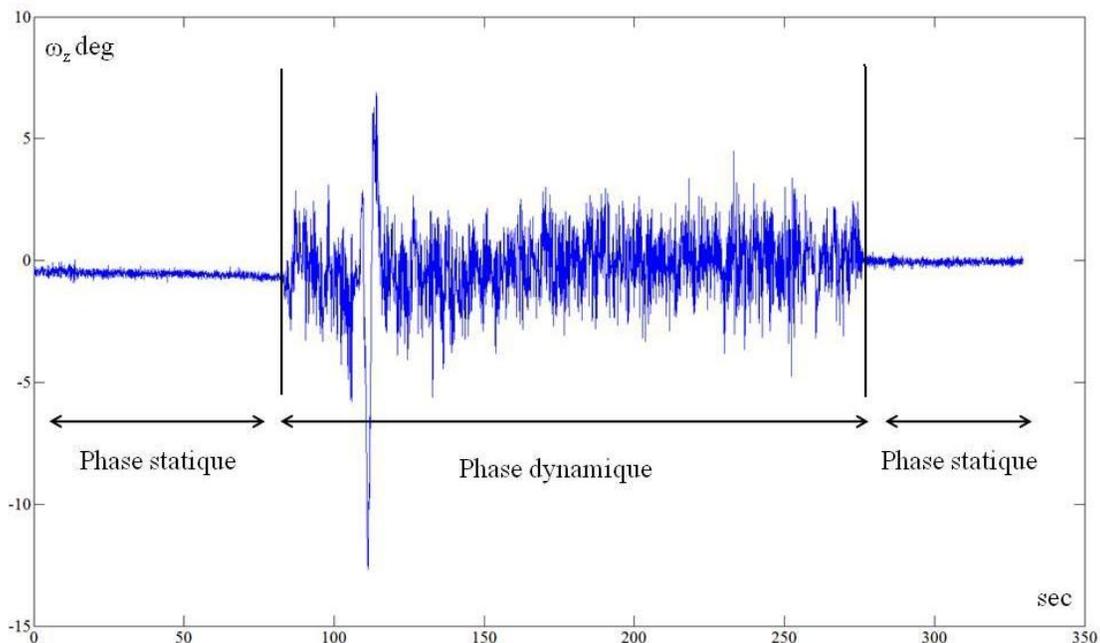


Figure 8.3 Distinction entre la phase mobile et la phase statique de la mission dépendant de la vitesse angulaire

8.1.1.2 La méthode d'ajustage des polynômes

La méthode expliquée est valable pour les coordonnées cartésiennes (x, y, z) comme pour les coordonnées géographiques $(lat, long, h)$. Si la transformation des coordonnées géographiques en coordonnées planaires est faite à l'aide d'algorithmes à précision moyenne (Circé de l'IGN par exemple), on note que plusieurs points se transforment en un point unique. Ceci nécessite une interpolation linéaire entre ces points uniques transformés pour rétablir la précision de base.

On exprime chaque coordonnée comme un polynôme de $k^{ème}$ degré du temps t . On peut écrire l'équation suivante pour la coordonnée x par exemple :

$$x \cong (a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_k \cdot t^k)$$

$$x \cong \sum_{j=0}^k a_j t^j \quad 8.1$$

où $a_j = a_0, a_1, a_2 \dots a_n$ représente les coefficients recherchés.

Pour n mesures, la fonction d'erreur est formée comme suit :

$$Err = \sum_{i=1}^n [x - (a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_k \cdot t^k)]^2 \quad 8.2$$

La recherche des coefficients a_j qui minimisent cette fonction passe par la dérivation par rapport aux coefficients (méthode des moindres carrés). Les dérivées forment la matrice de Vandermonde V . La forme normalisée de l'équation 8.2 est :

$$V \cdot \hat{a}_j \cong b \quad 8.3$$

$$\begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n t_i & \dots & \sum_{i=1}^n t_i^k \\ \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n t_i^{k+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n t_i^k & \sum_{i=1}^n t_i^{k+1} & \dots & \sum_{i=1}^n t_i^{2k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n t_i x_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n t_i^k x_i \end{pmatrix}$$

La solution par moindres carrés est donnée comme suit :

$$\hat{a} = (V^T W V)^{-1} (V^T W b) \quad 8.4$$

avec W est la matrice des poids. Pour calculer cette matrice, on doit récupérer les estimations de la qualité du positionnement ($v_1, v_2 \dots v_n$) données par le récepteur GPS. Ces informations ne se trouvent pas dans le message de navigation de l'AHRS440, mais sur la carte mémoire du récepteur.

$$W = \text{diag} (1/v_1 \quad 1/v_2 \quad \dots \quad 1/v_n) \quad 8.5$$

L'incorporation de la matrice des poids dans le calcul permet de prendre en compte toutes les mesures quelle que soit leur précision. On tolère donc des valeurs plus fortes de DOP (GDOP < 10 par exemple) lors de la configuration du récepteur mobile.

Les résidus qui correspondent à un tel calcul sont donnés par la formule :

$$r = x - V \hat{a} \quad 8.6$$

Cette formule donne les résidus correspondants aux points pris par le GPS, le reste des résidus est calculé par interpolation linéaire.

Le degré du polynôme est choisi de manière expérimentale de telle façon à ce que les résidus du calcul soit minimums. Bien que ce soit préférable, on n'utilise pas le même degré pour ajuster la

latitude, longitude et l'altitude. Il est toujours conseillé de soustraire les coordonnées du centroïde du trajet traité pour garantir la stabilité du calcul.

Après avoir obtenu les valeurs des coefficients, on les substitue dans la relation 8.1. On calcule les coordonnées pour une plage complète des instants de balayage laser du début jusqu'à la fin du mouvement. L'intervalle entre les instants doit être égal à celui de sortie de l'AHRS pour avoir une solution cohérente en attitude et en position.

Bien que la méthode exposée ci-dessus soit simple à mettre en œuvre, elle souffre des inconvénients suivants :

- Elle ne prend pas en compte les données de navigation inertielle, mais seulement les mesures du GPS.
- Elle traite indépendamment les trois coordonnées x , y , z . La considération qu'une coordonnée est fonction de l'autre ($y = f(x)$ au lieu de $y = f(t)$ par exemple) néglige les changements de vitesse pendant le déplacement. Ceci produit des résultats erronés facilement détectables sur le nuage de points final.
- Elle suppose que le trajet le plus probable est identique à la courbe ajustée aux points mesurés par le GPS. Ceci ne correspond pas forcément aux conditions du déplacement notamment quand il s'agit des dynamiques brusques locales. De toute façon, il est conseillé d'éviter ce type de dynamiques car il peut produire des nuages non-homogènes au niveau de la densité.

La méthode d'ajustement des courbes montrée aboutit à de bons résultats en cas de bonne réception GPS de façon à ce que le nombre de points fournis soit suffisant pour contraindre le trajet. Quand le trajet parcouru s'éloigne considérablement de la ligne droite, un polynôme seul ne suffit pas pour modéliser le trajet. Nous avons recours à la méthode d'ajustage de plusieurs courbes plutôt que par une courbe de Bézier ou par les *Splines*. L'expérimentation montre qu'elles sont très sensibles au changement local. De telles courbes ne peuvent pas fournir une reconstitution fidèle aux conditions de déplacement.

8.1.1.3 La modélisation par plusieurs polynômes

L'application de cette méthode passe par deux étapes : le découpage du trajet qui signifie la détermination des points où on change le polynôme et la détermination des coefficients des polynômes sous condition de continuité (tangence mutuelle) entre les courbes.

8.1.1.3.1 Découpage du trajet

On peut résumer les procédures nécessaires pour cette étape comme suit :

- 1- On ajuste un polynôme de premier degré (une ligne droite) à la totalité des points acquis selon la méthode expliquée ci-dessus. On suppose à ce stade que $y = f(x)$ et on traite le trajet comme un trajet bidimensionnel sans prendre en considération l'altitude z .
- 2- On construit une fonction de distance « pondérée » de tous les points du trajet vers la ligne droite calculée par l'étape 1 :

$$d_{p_i} = \frac{|a_1 x_i - y_i + a_0|}{\sqrt{a^2 + 1}} \times \frac{1}{v_i}$$

8.7

où x_i, y_i, v_i sont les coordonnées et la précision du point i du trajet.

- 3- On cherche le point le plus éloigné de la ligne droite (d_{p_i} maximale) et on « découpe » le trajet en deux trajets connectés en ce point-là.
- 4- On répète les étapes 1, 2, 3 pour chaque fraction du trajet tant que la distance d_{p_i} maximale est supérieure à un certain seuil d_s .

Le seuil d_s représente la limite dans laquelle on accepte qu'un seul polynôme modélise fidèlement la partie du trajet en question. Le choix d'un petit seuil engendre une sur-segmentation du trajet de sorte que les points existants dans chaque segment ne suffisent plus à modéliser avec un haut degré de redondance.

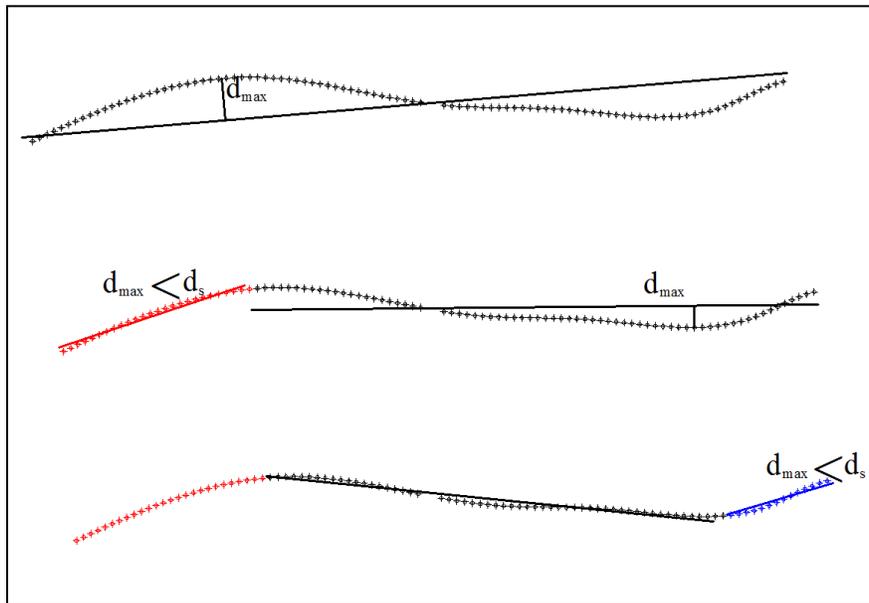


Figure 8.4 Découpage d'un trajet en trois sous-trajets selon un seuil d_s donné

Comme valeur empirique, on peut fixer ce seuil à 1% de la longueur totale du trajet initial. A la fin de cette étape on garde les indices id_i par l'étape 3.

8.1.1.3.2 Ajustage contraint des polynômes

L'ajustage des courbes se fait de manière séquentielle avec ou contre le sens de la marche. Pour la première courbe $x_1(t)$, on applique la méthode expliquée plus haut. La courbe suivante $x_2(t)$ doit être contrainte à son extrémité par les deux conditions suivantes :

- Le dernier point de la première courbe est le premier de la courbe suivante

$$x_1(t_{id}) = x_2(t_{id}) \quad 8.8$$

- La tangente à ce point est la même pour les deux courbes :

$$\frac{dx_1(t_{id})}{dt} = \frac{dx_2(t_{id})}{dt} \quad 8.9$$

L'ajustage des courbes se fait donc sous les conditions d'égalité avec une limite inférieure. En terme des moindres carrés, on doit résoudre le système surdéterminé de :

$$x_2 \cong \sum_{j=0}^k a_j t^j \quad 8.10$$

avec les conditions :

$$x_{1_{id}} = x_{2_{id}} = \sum_{j=0}^k a_j t^j(t_{id}) \quad 8.11$$

$$\frac{dx_{1_{id}}}{dt} = \frac{dx_{2_{id}}}{dt} = \sum_{j=0}^k j \cdot a_j t^{j-1}(t_{id}) \quad 8.12$$

La solution mathématique d'un tel problème d'optimisation est abordée dans (Coleman et Li, 1996), (Gill *et al.*, 1981)¹³. On peut ainsi construire une séquence de polynômes tangentiels deux à deux. Le degré 3 des polynômes est le degré minimal permettant à la courbe d'interpoler plusieurs points et deux tangentes. On choisit le premier polynôme contenant le maximum de points GPS (ou les points les plus précis).

8.1.1.3.3 La modélisation par position-vitesse

Lors de l'absence de réception GPS, on ne trouve pas de position dans les messages standards de la centrale AHRS 440. Le fabricant de cette centrale considère qu'en cas d'absence d'aide externe du GPS, la précision des données inertielles peut amener à calculer la vitesse linéaire (première intégration) et non pas la position (deuxième intégration). Pour les précédentes analyses, on considère que l'ajustage des courbes peut produire des données plus précises que l'implication de la vitesse déduite par la technique inertielle. Néanmoins, cette considération devient moins correcte lors d'une longue absence du signal GPS (10 sec comme seuil). Dans ce cas, il est plus crédible d'utiliser les données de vitesse à condition d'harmoniser les repères de mesures. On préfère utiliser les coordonnées GPS exprimées dans le repère WGS84 transformé en repère de navigation (annexe D). La méthode proposée se divise en trois étapes :

- On repère les intervalles $(k, k+1)$ essentiels correspondants à l'absence d'acquisition GPS : ces intervalles sont normalement délimités par des points GPS à faible précision. On commence par considérer les intervalles depuis des points suivants.
- A partir de la borne inférieure k de l'intervalle, on commence à cumuler les mesures comme suit :

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + v_{E_i} \cdot \Delta t \\ y_i &= y_{i-1} + v_{N_i} \cdot \Delta t \\ z_i &= z_{i-1} - v_{D_i} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad 8.13$$

¹³ La fonction (lsqin) de MATLAB[®] dépend de ces deux références

avec $i \in [k, k + 1]$ l'indice des points déduits à une cadence Δt égale à celle de sortie de l'AHRS (0.05 sec par exemple).

- On calcule l'erreur de fermeture au niveau de la borne supérieure (coordonnée calculée à l'aide de la vitesse – coordonnée mesurée par GPS). Cette erreur est distribuée également sur les coordonnées calculées par les équations 8.13. Plus loin dans cette thèse, on simule le filtre de Kalman pour avoir, entre autres, la précision des mesures de vitesses. Ceci permet une distribution de l'erreur inversement proportionnelle à la précision de la vitesse.

Après avoir comblé les longues interruptions GPS, le cas étudié devient un des deux cas précédents. On choisit un seul ou plusieurs polynômes selon la complexité du trajet.

8.1.2 Intégration GPS RTK/HSGPS

L'utilisation d'un GPS de haute sensibilité sur notre système est conçue en premier lieu pour stabiliser la centrale inertielle plutôt que pour donner une position précise. Nous avons choisi un récepteur EVK-5T d'Ublox®. A côté de son faible coût et de sa sensibilité élevée, l'Ublox® possède l'atout de pouvoir transmettre en temps réel des informations concernant la précision en plus de ce qui existe dans un code NMEA. Par exemple, dans le message NAV-POSLLH du code binaire Ublox, on trouve une estimation de l'incertitude horizontale et verticale de la position. L'AHRS analyse la syntaxe du dernier message et aussi de NAV-VELNDE : la vitesse en North, East et Down (où on trouve aussi des informations sur le cap) et de NAV-STATUS : le statut du récepteur GPS (différentiel, DOP, TOW... etc.). On attend donc un meilleur fonctionnement de l'algorithme interne embarqué dans la centrale puisque l'entrée GPS est plus fréquente et plus riche en informations.

Au regard de l'analyse précédente, la décision prise est de brancher la centrale au GPS Ublox® pour avoir des données de navigation plus précises en attitude mais moins précises en position. Parallèlement, Le GPS Leica® fonctionne en mode cinématique avec des corrections différentielles en temps réel. Les données sont à récupérer sur la carte de mémoire interne du récepteur.

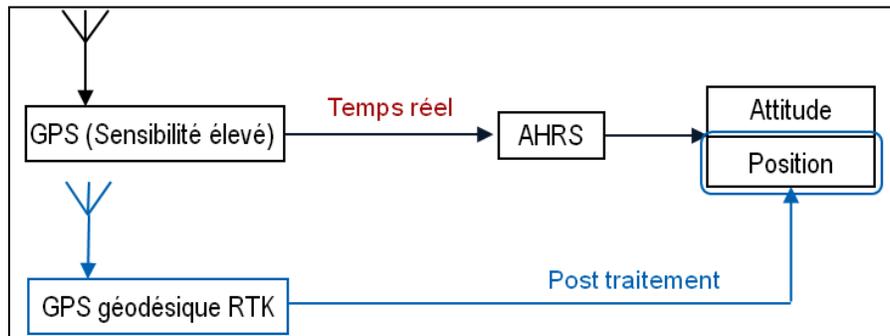


Figure 8.5 Schéma de la liaison GPS/AHRS utilisée sur le système

La précision « nominale » du récepteur EVK-5T sans correction différentielle est de 2,5 m. Pourtant, il se peut qu'il trouve des positions d'une précision inférieure. Quelle que soit la précision d'une position obtenue, on en possède toujours une estimation qu'on va prendre en compte comme expliqué plus loin.

La figure 8.6 montre les points pris par les deux récepteurs : Leica® (en rouge) et Ublox® (en bleu) lors d'un trajet d'environ 100 m.

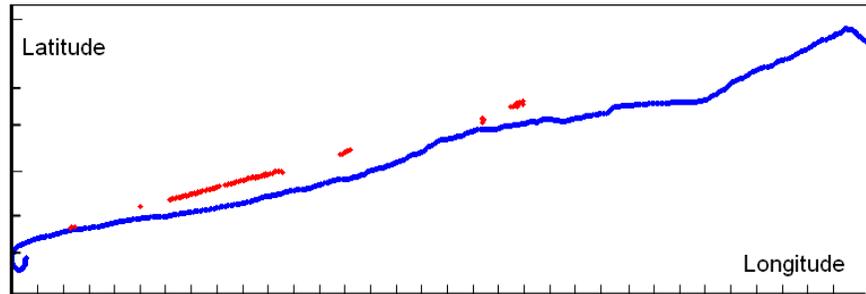


Figure 8.6 Trajectographie 2D mesurée par deux récepteurs GPS (RTK en rouge et haute sensibilité en bleu)

Pour pouvoir traiter une telle configuration, on fait subir aux données deux étapes successives. La première consiste à réduire l'écart entre les deux échantillons en appliquant une transformation à l'ensemble du trajet à faible précision pour le faire coïncider au mieux avec celui à précision élevée. L'étape suivante est un ajustement de la courbe au trajet dit « mixte ».

Comme elle conserve la forme du trajet, une transformation de corps rigide est choisie pour la première étape. Afin de trouver les six paramètres (3 translations + 3 rotations) d'une telle transformation, il faut appairer chaque point du trajet précis avec l'un du trajet moins précis. Ce type de couplage se fait facilement en se basant sur le temps GPS qui est commun aux deux types de mesures.

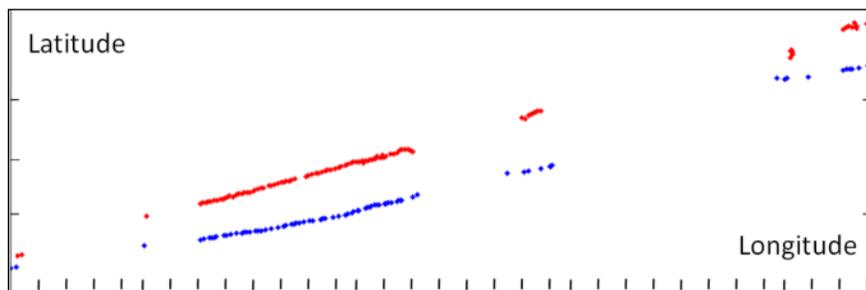


Figure 8.7 Plan 2D des points appariés entre les trajets GPS (précis en rouge et à haute sensibilité en bleu)

Appairons le point $P_d^i (lat, long, h)$ mesuré en mode différentiel RTK par le récepteur Leica® avec le point $P_h^i (lat, long, h)$ mesuré en haute sensibilité par le récepteur Ublox®. Pour connaître la rotation R et la translation T entre les deux ensembles ($i=1 \dots n$) où n est le nombre de points appariés, il suffit de résoudre le système d'équations 8.14 dans un processus équivalent à celui montré par les équations 7.4 et 7.7 (page 84 et 85).

$$Pd^i = R \cdot Ph^i + T \quad 8.14$$

L'expérimentation montre qu'une telle méthode peut servir d'alternative pour corriger différentiellement les mesures du récepteur à haute sensibilité pour de courts trajets. Sans quoi, il faut avoir une autre unité « pivot » à haute sensibilité qui assure des mesures dans les mêmes conditions et à la même cadence que l'unité « mobile ». Dans ce cas, le traitement différentiel devient possible en post-traitement.

Il est possible de configurer l'unité pivot du GPS Leica® pour qu'il puisse à la fois transmettre et sauvegarder les corrections différentielles. Le récepteur Ublox® doit avoir un double câblage pour qu'il puisse transmettre les paquets à la centrale AHRS et à l'ordinateur simultanément. Les données sauvegardées par les deux unités sont exportées dans un fichier d'échange standard (format RINEX). Les corrections différentielles sont confiées à un logiciel de traitement des données GPS comme LEICA Geo Office (LGO).

Après avoir recalé le trajet tracé en haute sensibilité vers celui tracé plus précisément, on obtient un ensemble de données comme montré sur la figure ci-dessous.

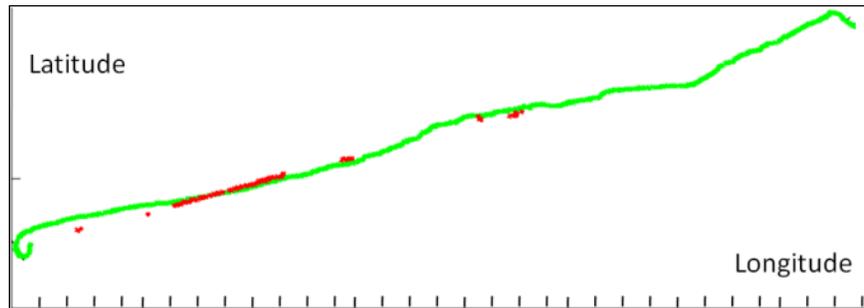


Figure 8.8 Trajet mesuré à haute sensibilité (vert) recalé vers les points RTK (rouge)

Une fois les données fusionnées, on peut appliquer l'ajustage d'une seule ou plusieurs courbes comme montré auparavant. La figure 8 montre la forme finale du trajet tracée dans le plan horizontal.

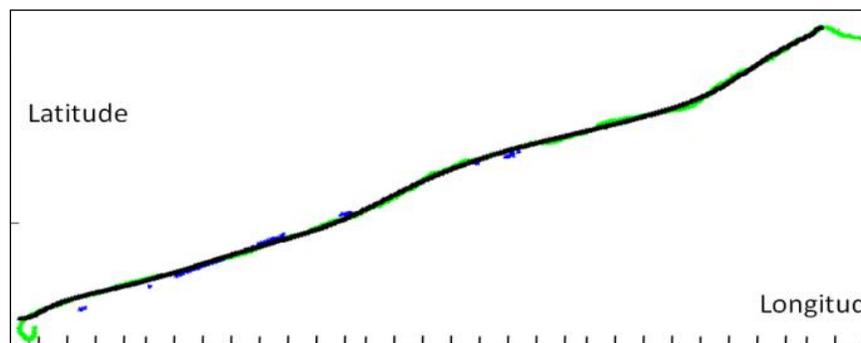


Figure 8.9 Trajet reconstitué par ajustement des courbes à partir des données précédentes

8.1.3 La corrélation position/attitude

Par les différents traitements précédemment expliqués, nous essayons de reconstruire et d'interpoler des points du trajet sans prendre en considération l'attitude. Ce type de traitement n'est pas tout à fait exact car la position et l'attitude sont fortement corrélées. Dans ce paragraphe, on considère la relation entre le trajet en plan horizontal et le lacet donné par la centrale AHRS. Ce cas est le plus significatif vu l'importance de l'erreur de cap par rapport à celles de roulis et de tangage. En outre, dans la plupart des cas, la variation en x,y est plus forte qu'en z .

La figure 8.10 montre le changement entre deux instants successifs ($i, i+1$) de journalisation AHRS. Le lacet peut être calculé comme suit (cas du premier quart du cercle trigonométrique) :

$$\theta_{i-1} = \tan^{-1} \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad 8.15$$

On peut produire une courbe (temps, lacet) dépendant de cette relation. En même temps, l'AHRS produit une autre estimation de cet angle.

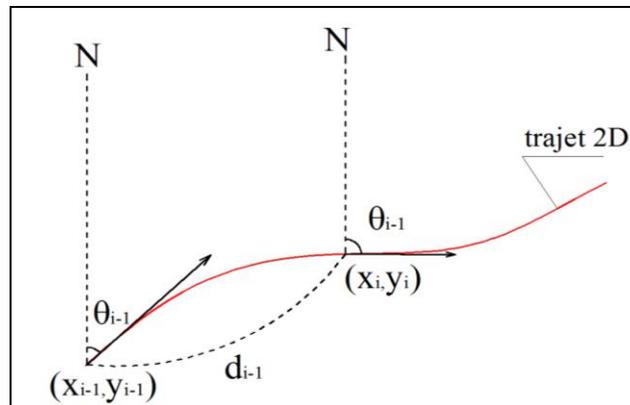


Figure 8.10 Principe de navigation à l'estime (corrélation des coordonnées planaires-cap)

L'équation 8.15 est instable dans le cas des déplacements quasi parallèles à la direction Nord ($x_i - x_{i-1} \approx 0$). Il faut donc filtrer ces déplacements locaux de la courbe de cap avant les futurs traitements. Il est possible que la courbe du signal soit bruitée à cause de la précision faible de conversion du repère Terre vers le repère de navigation. Dans ce cas, nous appliquons un filtre passe bas sur l'échantillon des données pour avoir des données moins bruitées.

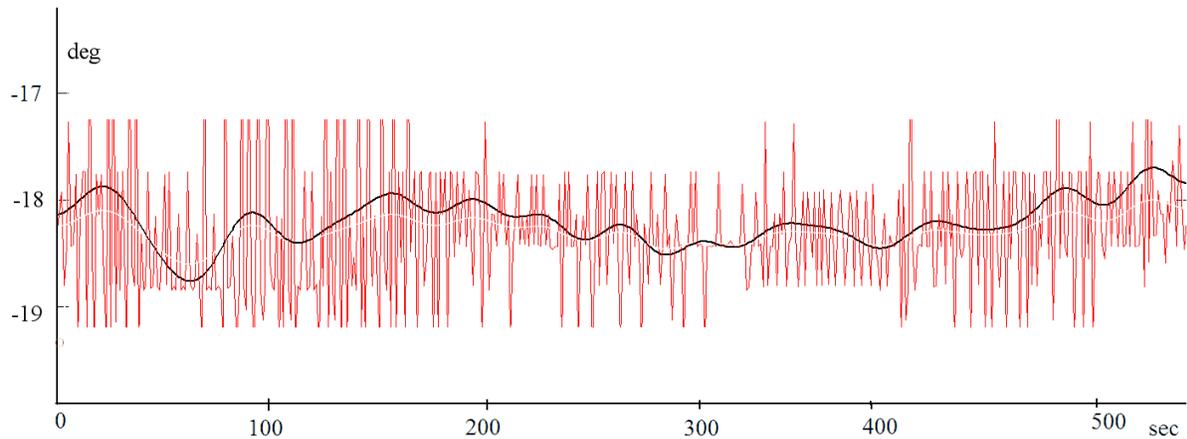


Figure 8.11 Bruit du cap calculé par la navigation à l'estime (rouge) et filtrage par un filtre passe bas (filtre moyen, taille de fenêtre = $7 \times$ le taux d'échantillonnage de l'AHRS)

Dans une configuration comme celle montrée par la figure 8.11 on recalcule la coordonnée y (ou x) par l'équation 8.15.

Faute d'absence de la matrice de covariance dans les sorties standard de l'AHRS, on ne dispose pas de moyen pour savoir quel angle de lacet est le plus précis : celui mesuré par l'AHRS ou celui déduit par la navigation à l'estimé. Pourtant, il est vraisemblable que ce dernier soit le plus probable, notamment quand il existe des points GPS à précision millimétrique dans le trajet. Cette étape n'est ainsi qu'une étape de validation. On distingue quatre cas lors de la comparaison des deux courbes.

- 1- Les deux courbes sont presque identiques : ce cas est l'idéal mais hélas le moins fréquent.
- 2- Les deux courbes sont « parallèles » mais avec un « grand » écart : ceci révèle une erreur de calibration du bras de levier GPS/AHRS. Il faut donc refaire la calibration. Ce cas n'est pas survenu pendant nos expérimentations.
- 3- Les deux courbes ont une inclinaison totalement différente : si les deux courbes ne sont pas sécantes en plusieurs points, on peut en déduire que les résultats de l'AHRS sont erronés, et que le signal GPS n'arrive pas à corriger l'angle tout au long de la mission.
- 4- Les deux courbes s'entrelacent plusieurs fois mais avec de grands écarts entre les deux : c'est le cas le plus fréquent lors de l'utilisation d'une centrale AHRS de gamme moyenne (figure 8.12). Les magnétomètres aident à limiter la forte dérive des gyromètres sans la corriger totalement. Les mesures GPS corrigent plus efficacement les angles, ce qui explique les intersections entre les deux courbes. Par ailleurs, ce cas est typiquement rencontré lors de la configuration de mise à jour lors des vitesses basses (stationary yaw lock). Cette configuration réinitialise la chaîne d'intégration (accélérations et vitesses angulaires) lors des vitesses inférieures à 0.75 m/s. La centrale utilise les mesures GPS de position pour calculer un cap qui sera utilisé pour initialiser la mécanisation inertielle.

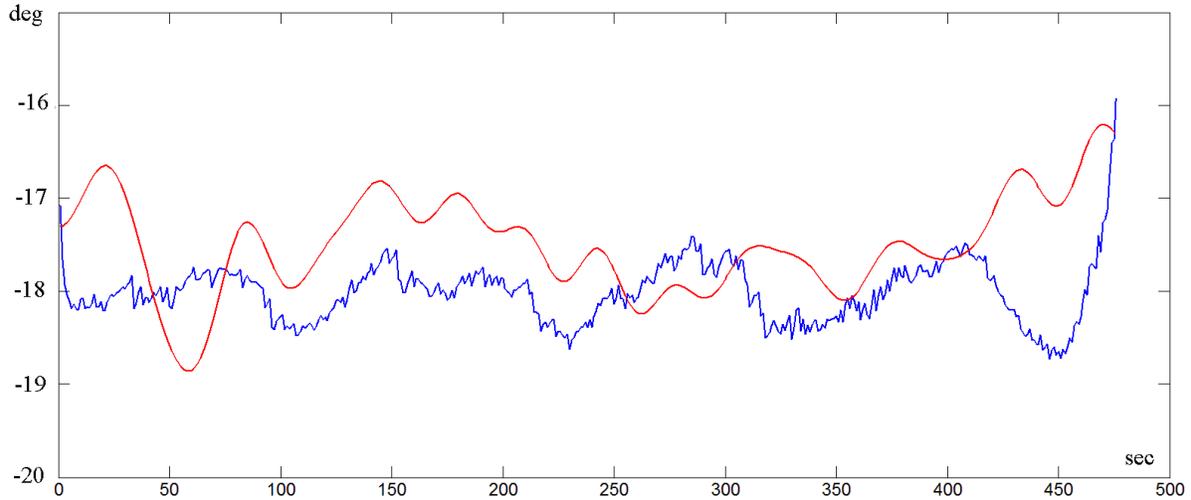


Figure 8.12 Comparaison entre le cap calculé par navigation à l'estime après filtrage (rouge) et le cap sortant de l'AHRS440 (bleu)

On peut à ce niveau là décider si le jeu de données est exploitable ou s'il faut refaire le relevé mobile. On traite les données de navigation GPS/AHRS, déjà traitées par l'algorithme de Kalman, comme des observations.

D'autre part, la précision du cap calculé par la navigation à l'estime peut être déduite par le principe de transmission d'erreurs :

$$\delta\theta_{i-1} = \delta x_i \cdot \frac{\partial\theta_{i-1}}{\partial x_i} + \delta x_{i-1} \frac{\partial\theta_{i-1}}{\partial x_{i-1}} + \delta y_i \cdot \frac{\partial\theta_{i-1}}{\partial y_i} + \delta y_{i-1} \frac{\partial\theta_{i-1}}{\partial y_i} \quad 8.16$$

$$\delta\theta_{i-1} \cong 2 \cdot \left(\delta x_i \cdot \frac{1}{(1+x_i^2)y_i} + \delta y_i \cdot \frac{1}{(x_i^2+y_i^2)} \right)$$

où : $\delta x_i, \delta y_i$ sont les résidus résultants de l'algorithme d'ajustage des courbes (équation 8.6 page 104).

On normalise les deux erreurs ($\delta\theta_i, \varepsilon_i$) entre 0 et 1 pour obtenir des erreurs relatives plus explicites que les erreurs absolues. Le cap final est calculé par la relation suivante :

$$\theta_i = \frac{\theta_i^{nav} \cdot \frac{1}{\varepsilon_i} + \theta_i^{AHRS} \cdot \frac{1}{\delta\theta_i}}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\delta\theta_i}} \quad 8.17$$

dans laquelle θ_i^{nav} est le cap de la navigation à l'estime et θ_i^{AHRS} est le cap donné par l'AHRS. L'erreur ε_i résulte de la simulation de filtre de Kalman exposé dans le chapitre prochain. La figure 8.13 montre le cap final moyenné selon l'équation 8.15.

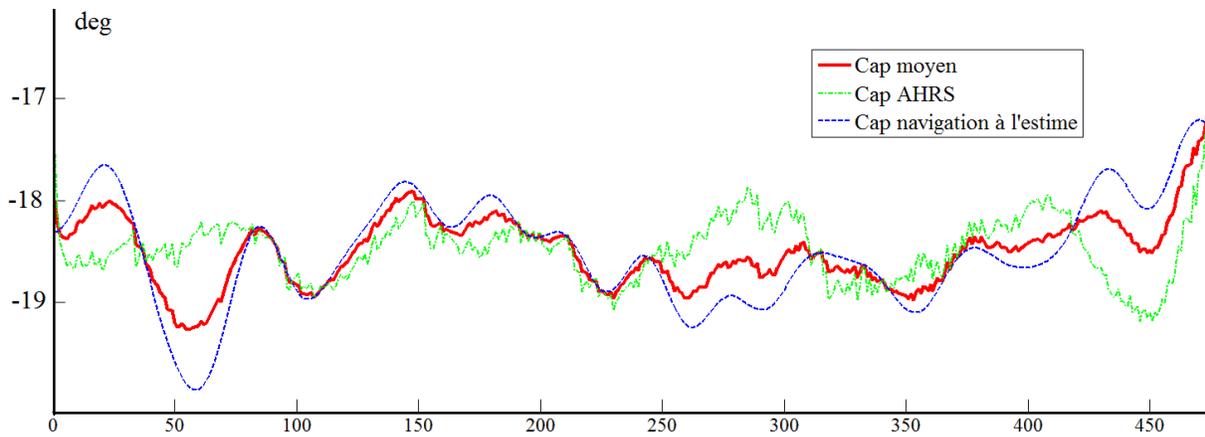


Figure 8.13 Forme finale du lacet qui garantit au mieux la corrélation entre la position et l'attitude

On mentionne, en fin, que la relation de navigation à l'estime 8.15 ne fait pas partie des équations standards de mécanisation de l'AHRS. Elle est totalement indépendante de l'estimation par le filtre de Kalman. On la considère comme une étape de filtrage postérieur au filtre de Kalman.

8.2 Le nuage de points

Dans les paragraphes précédents, les données du trajet et de l'orientation sont filtrées, interpolées et complétées. Le traitement du trajet, la calibration et l'horodatage rendent possible l'application de l'équation 7.14 (page 96). L'aspect géométrique et spatial du nuage résultant est décrit dans les paragraphes suivants. De plus, on montre deux résultats secondaires de la méthode d'horodatage expliquée précédemment : les points zéros et la segmentation en profils. Ils sont applicables en balayage fixe, néanmoins on souligne qu'ils résultent de notre méthode de traitement.

On consacre le prochain chapitre entièrement à la précision qui est l'attribut le plus important pour un nuage de points.

La figure 8.14 montre le nuage comme numérisé par PointScape® qui ne balaye que la fenêtre rectangulaire encadrée par l'utilisateur. L'intégration de la position et de l'attitude calculées donne la forme correcte au nuage.

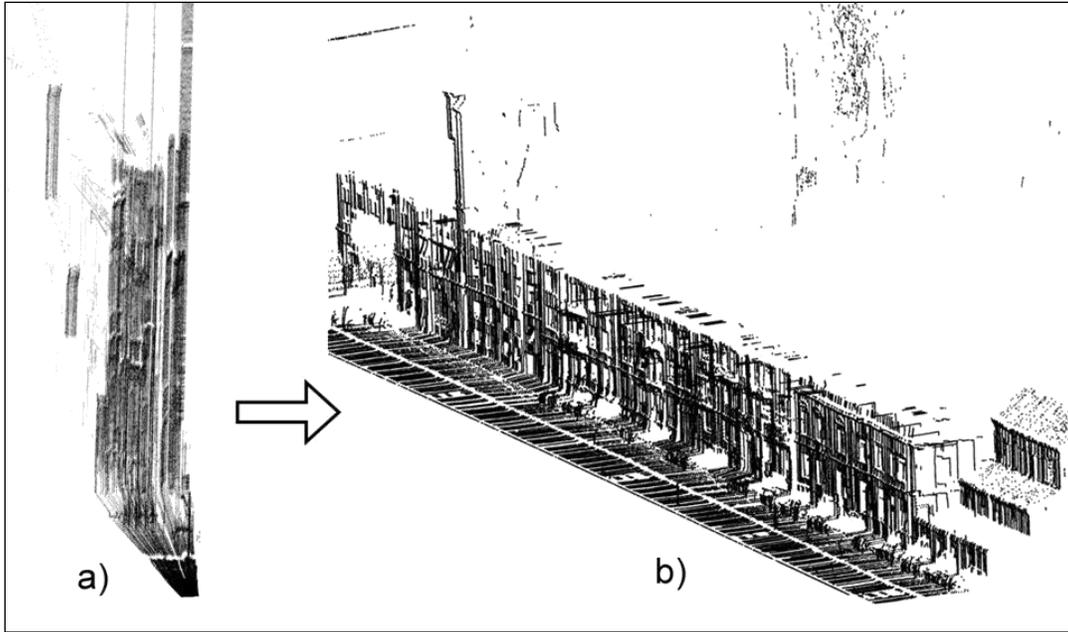


Figure 8.14 Nuage de point comme numérisé dans PointScape® (a) et corrigé spatialement (b)

8.2.1 La résolution

On remarque que la résolution horizontale du nuage mobile est plus faible que la résolution verticale (figure 8.15). Ceci est expliqué par le temps écoulé pendant les rotations horizontales cumulées avec le temps de déplacement. La résolution horizontale moyenne (ou la distance entre deux profils successifs en m) est donnée par le taux :

$$r_h = \frac{v_m}{nbp} \quad 8.18$$

où r_h : résolution horizontale moyenne pour la partie étudiée du nuage
 nbp : nombre de profils balayés par seconde
 v_m : vitesse moyenne du trajet parcouru déduite sur n mesures de la centrale AHRS

$$v_m = \frac{\sqrt{\sum(v_N^2 + v_E^2 + v_D^2)}}{n} \quad 8.19$$

On utilise la configuration du scanner décrite dans le mode opératoire qui aboutit à la vitesse maximale du balayage (4 profils/s). La seule variable affectant la résolution est ainsi la vitesse de déplacement. Par exemple, une vitesse de marche de 2km/h produit un nuage de résolution verticale de 13.88 cm.

Comme les angles de roulis et de tangage sont normalement faibles ($<5^\circ$), la résolution verticale ne s'éloigne pas de ce qui est paramétré par l'utilisateur. Toutefois, on a recours aux résolutions faibles pour accélérer le balayage.

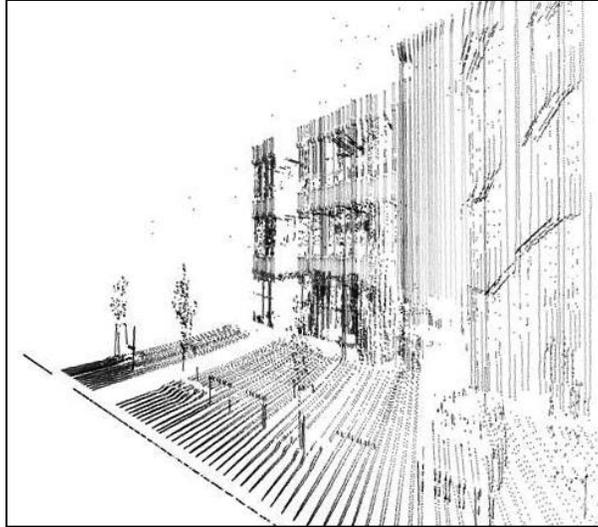


Figure 8.15 Nuage mobile acquis avec une vitesse de marche $\sim 3\text{km/h}$. (résolution verticale de 5 cm, résolution horizontale de 20 cm sur l'objet)

8.2.2 *L'angle d'incidence*

L'utilisation d'un scanner 3D sur une plateforme mobile permet de changer volontairement l'angle d'incidence des rayons laser sur les objets à balayer. Bien que la tendance générale du balayage mobile soit de mettre le scanner perpendiculaire au trajet, un scanner d'angle d'incidence oblique permet d'accéder à la géométrie perpendiculaire à l'axe du trajet (par exemple, des façades dans les rues transversales). Une telle optimisation se fait facilement à l'aide du logiciel pilote du scanner et aide efficacement à surmonter le problème d'occlusion.

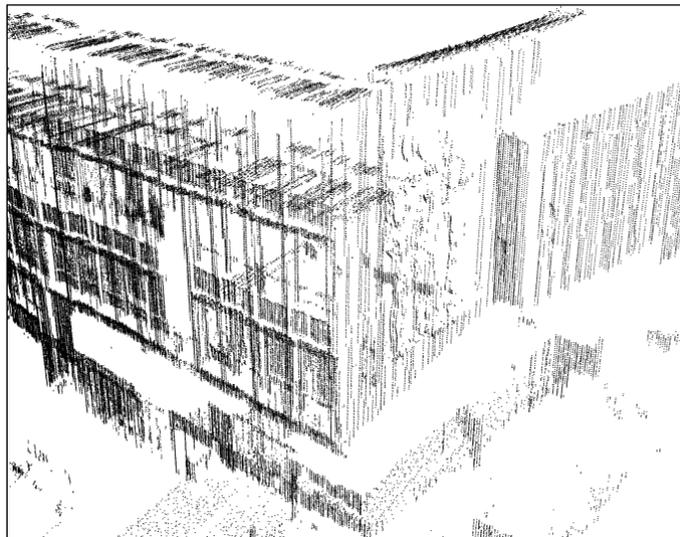


Figure 8.16 Deux façades balayées grâce à l'orientation du scanner par rapport à l'axe perpendiculaire au bâtiment

8.2.3 Les points « zéro »

Lors du décryptage du flux de données du scanner afin de réaliser l'horodatage, quelques mesures intéressantes sont notées : pour chaque tir laser, le scanner fixe sa direction de vue selon deux angles qu'il sauvegarde : si un retour laser est capté, le champ de distance sera rempli. Quand le rayon laser part dans le vide, la valeur de la distance est mise à zéro et on ne trouve que les angles préalablement fixés dans les données brutes du scanner. On appelle ces mesures dépourvues de distance : « les points zéro ». Le scanner se débarrasse de ces mesures dans le fichier de sortie standard car elles n'apportent aucune information. Néanmoins, elles sont récupérables à partir du fichier traité venant du logiciel « espion ».



Figure 8.17 Points zéro (en rouge) et leurs voisins (en bleu)

Ces points doivent être filtrés pour les objectifs mobiles mais après avoir gardé leur indice. Cet indice est important lors de l'interpolation des mesures AHRS sur les instants lasers. En outre, il aide à détecter les points voisins de cette rupture de numérisation engendrée par l'absence d'onde réfléchie. Les points voisins aux points zéro sont très importants lors de la segmentation de la végétation et des arêtes de saut non verticales (figure 8.17) comme nous le montrerons à la fin de cette thèse.

Les points voisins des mesures zéros ne sont pas propres au balayage mobile mais existent aussi pour le balayage fixe. Pourtant, ils sont plus nombreux dans le cas mobile grâce au changement continu de la position du scanner par rapport à l'objet.

8.2.4 La séparation en profils

Comme vu auparavant, le scanner ne diffuse pas les données en flux mais en paquets pour chaque paire de profils. L'application de l'équation de géoréférencement direct (7.14 page 96) peut être faite pour chaque profil séparément. Le nuage de points se voit ainsi comme un ensemble de profils quasi-verticaux ordonnés. Ceci peut aider à fournir des données appropriées pour une

gamme d'utilisateurs adoptant la méthode de modélisation par profils et par sections (González, 2007 par exemple). Comme le système relève aussi une partie des surfaces des routes et des trottoirs adjacents aux façades, on peut déduire automatiquement des profils à intervalles fixes. De telles données sont essentielles pour le service de maintenance de la voirie. La figure 8.18 montre les profils d'un nuage de points colorés différemment.

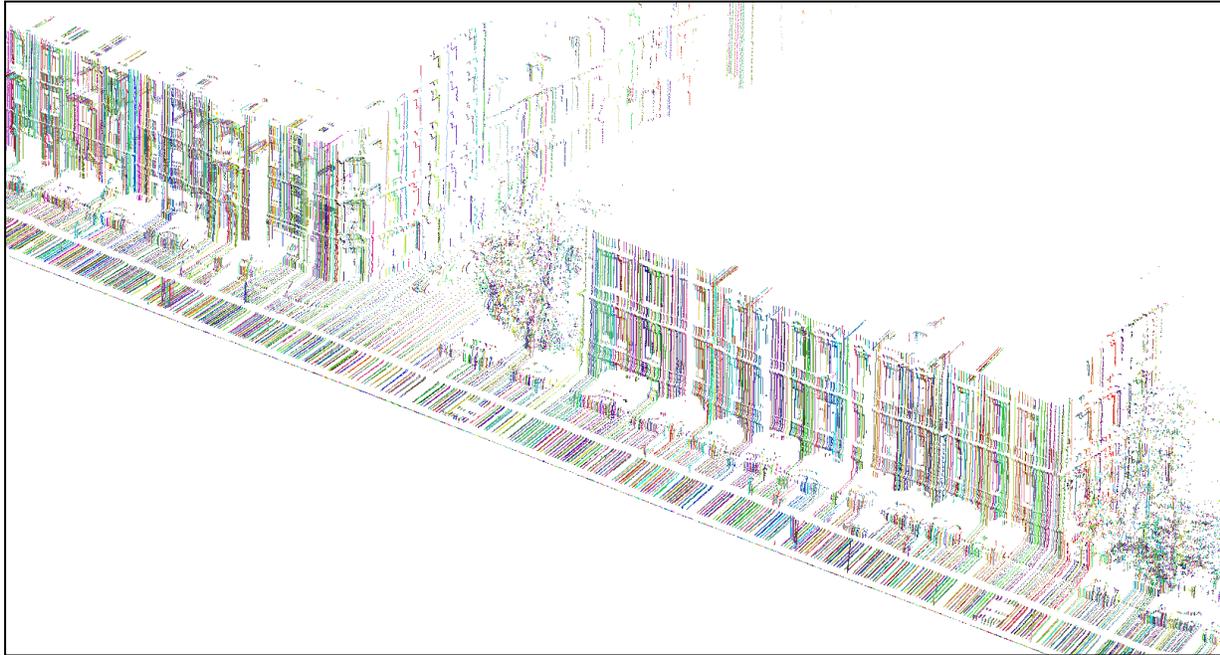


Figure 8.18 Nuage de points séparé automatiquement en ensemble de profils

8.2.5 Note de conclusion

L'ensemble des opérations nécessaires pour intégrer les données des trois capteurs (GPS, AHRS et TLS) est exposé dans ce chapitre. Plusieurs paramètres sont fixés par l'utilisateur de sorte que la géométrie du trajet soit optimale. Portant, la validation de l'étape du traitement de la trajectométrie ne se fait que quand le nuage de points est calculé. La précision du nuage de point peut servir comme un retour qui peut aider à choisir au mieux l'ordre des polynômes utilisés pour modéliser le trajet ou encore à choisir le degré de lissage appliqué sur l'attitude. Le chapitre prochain donne une idée plus exhaustive sur le calcul en laser mobile.

Partie 3. L'évaluation des résultats

9. Les erreurs du système

9.1 Introduction

Ce chapitre aborde la précision et l'exactitude du nuage de points obtenu par les procédures expliquées dans les chapitres précédents. Que ce soit pour l'exactitude ou pour la précision, un nuage de points est caractérisé à deux niveaux : relatif et absolu. La notion d'absolu concerne la totalité du nuage, tandis que la notion de relatif concerne la position de chaque point par rapport à l'autre. Les termes relatif et absolu peuvent être mieux compris par analogie avec la photogrammétrie. Les deux notions ne sont certainement pas séparables, pourtant une distribution normale des erreurs relatives rend leur bilan général nul. Une précision ou une exactitude importante en absolu ne signifie pas forcément la même chose en relatif mais elle signifie une distribution normale des erreurs locales. Une tendance répétée en absolu laisse penser à une erreur systématique non éliminée ou fortement réduite. Or les erreurs aléatoires (accidentelles) agissent plutôt sur le niveau relatif.

On discute de l'exactitude à travers plusieurs comparaisons avec des données spatiales de référence censées être plus précises que le nuage mobile. La précision est abordée du point de vue de la transmission des erreurs. Toutes les erreurs susceptibles d'affecter le nuage de points sont discutées et développées dans ce chapitre. La précision et l'exactitude sont confrontées à la fin de ce chapitre afin d'établir une relation entre l'étude théorique et empirique de la précision d'un nuage de points laser mobile.

9.2 L'exactitude

Une mesure est exacte quand on peut la confondre avec sa valeur vraie (dite aussi valeur nominale ou valeur réelle) (Grussenmeyer, 1994). L'exactitude est toujours délicate à estimer car on ne dispose pas de la mesure réelle. Dans cette thèse, on chiffre l'exactitude par les écarts obtenus lors de la comparaison avec une source « référence » de données. Nous allons montrer plusieurs cas de comparaison en fonction de la source des données spatiales.

9.2.1 Comparaison du nuage mobile avec un plan cadastral

La plupart des zones urbaines et périurbaines sont couvertes par des plans cadastraux numériques. On suppose qu'un concepteur d'un modèle tridimensionnel urbain aurait accès à un tel type de données notamment en format CAO ou SIG (BD PARCELLAIRE® par exemple). Étant donné que les plans cadastraux sont bidimensionnels, on peut contrôler l'emprise au sol des bâtiments. Ceci contribue efficacement à valider le nuage en absolu.

Dans l'exemple montré ci-après on compare un nuage avec un plan CAO conçu à l'échelle du 1/1000. Pour faciliter la comparaison, un profil horizontal est extrait du nuage au niveau du sol. Pour les extrusions présentées sur le plan CAO (comme les balcons), des coupes locales horizontales sont extraites.

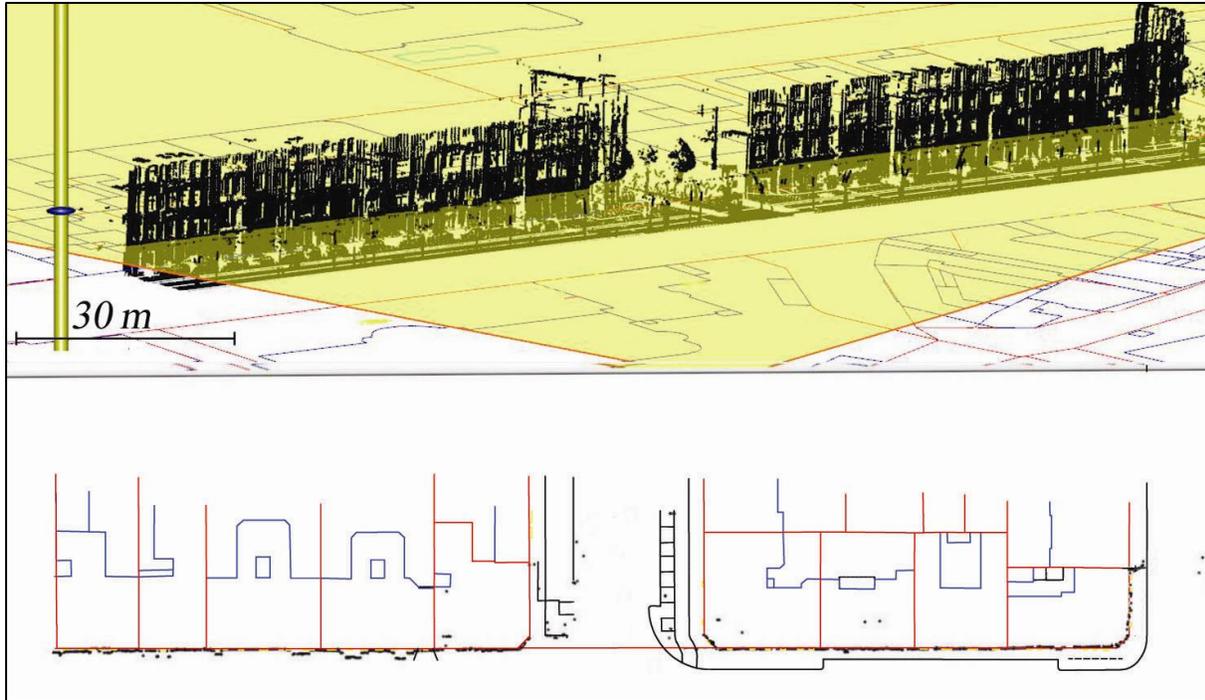


Figure 9.1 Coupe horizontale dans une superposition CAO- nuage de points

9.2.2 Comparaison du nuage mobile avec un nuage fixe

Nous entendons par nuage de points fixe, le nuage acquis par un TLS fixe. Comme la vocation initiale du scanner Trimble® GX est le balayage fixe, des nuages de points fixes sont acquis pour des façades déjà relevées par le mode mobile. De plus, le scanner permet selon son mode opératoire de se géoréférencer à l'aide de visées avant et arrière sur des cibles installées sur des points connus. La comparaison entre les nuages fixes et mobile est donc possible s'ils sont acquis dans le même référentiel.

Un nuage mobile possède des propriétés géométriques largement différentes d'un nuage fixe. Dans le cas général, sa densité et sa précision sont significativement plus faibles. L'angle d'incidence des rayons laser dans un nuage fixe fait partie d'une séquence de déflexions ordonnées formant un balayage hémisphérique. En situation mobile, les rayons laser interceptent les objets selon un angle choisi par l'utilisateur (l'orientation du scanner par rapport aux façades). Ils sont quasiment parallèles pour un trajet quasi linéaire. Ces différences imposent quelques subtilités lors de la comparaison fixe et mobile.

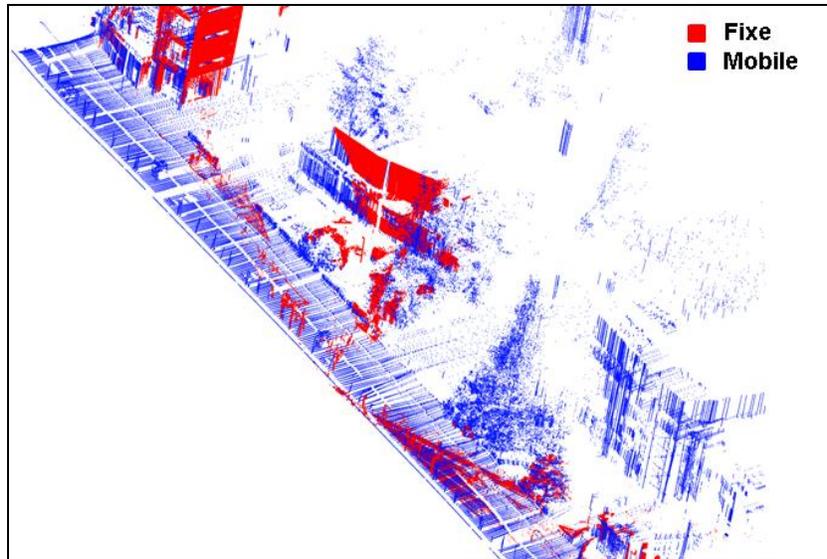


Figure 9.2 Superposition mobile – fixe et constat de différence de propriétés géométrique entre les nuages.

Pour pouvoir établir une première estimation de l'exactitude à travers la comparaison fixe-mobile, on applique les deux premières étapes de la méthode ICP (Iterative Closest Point). Cette méthode proposée par (Besl et McKay, 1992) est utilisée très souvent pour recalculer un nuage de points \vec{p} sur un nuage référence \vec{x} . On couple les deux ensembles de points (\vec{x}_i, \vec{p}_i) en associant chaque point au point le plus proche. Le nombre de points couplés N_p est égal au nombre de points du nuage le moins dense qui se situe dans la zone de recouvrement. Soit R la matrice de rotation et T le vecteur de translation, les deux matrices définissent les paramètres de la transformation rigide et ICP minimise la fonction :

$$f(R, T) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|\vec{x}_i - R\vec{p}_i - \vec{T}\|^2 \quad 9.1$$

Une fois ces paramètres calculés, l'ensemble P sera transformé. Les étapes précédentes sont réappliquées de manière itérative jusqu'à ce que les distances entre les deux nuages ne dépassent plus un certain seuil.

Pour notre application, les procédures s'arrêtent lors du calcul de R, T qu'on considère comme l'estimation de l'exactitude du nuage mobile comparé au nuage fixe. Toutes les distances entre les points les plus proches sont alors réduites en une seule rotation et une seule translation. Nous cartographions ces distances sur le nuage mobile avec une palette de couleurs appropriée.

Il existe des logiciels commerciaux d'inspection 3D (comme 3DReshaper[®]) qui comparent un nuage de point avec un maillage effectué sur le nuage référence. Le logiciel considère les distances entre les points et les triangles comme réalisé par la méthode ICPatch (Habib *et al.*, 2006). La correspondance est établie entre chaque point du nuage mobile et le triangle le plus proche. Les distances considérées représentent l'écart entre le nuage fixe et mobile. 3DReshaper[®] permet de cartographier ces distances sur le nuage mobile ou sur le maillage du nuage fixe. Des exemples sont présentés à la fin de ce chapitre.

9.2.3 Comparaison du nuage mobile avec un nuage LiDAR aéroporté

Tous les facteurs qui peuvent affecter la précision d'un nuage terrestre affectent aussi un nuage LiDAR aéroporté. Néanmoins, les centrales inertielles utilisées à bord des avions sont de haut de gamme et la réception GPS souffre de moins de masquage. Comme une seconde de vol correspond en moyenne à 60 m de balayage, la dérive de la centrale inertielle se constate moins dans les nuages à étendue limitée. Pour toutes ces raisons, le nuage LiDAR pourrait servir de référence à une précision relativement supérieure aux nuages obtenus par notre système.

La confrontation du nuage mobile terrestre avec un nuage aéroporté de même étendue est plus exhaustive que la comparaison avec un plan CAO mais moins qu'avec un nuage fixe. Si le recouvrement est suffisant (cas des bâtiments bas avec des toitures en pente) nous analysons les écarts entre les deux nuages comme pour le cas fixe-mobile. Dans le cas où le recouvrement est quasi inexistant (figure 9.3), nous avons recours à la comparaison entre les emprises au sol des bâtiments avec la coupe au niveau du sol dans le nuage mobile. Les emprises au sol extrait par la méthode expliquée dans (Tarsha Kurdi, 2008).

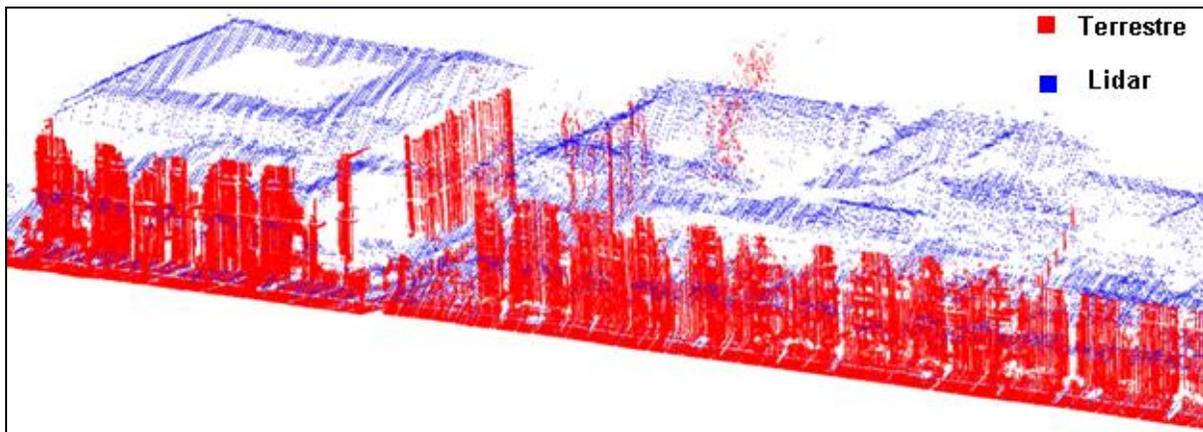


Figure 9.3 Superposition des deux nuages mobile terrestre et LiDAR

9.3 La précision

La précision est le degré d'accord entre une série de mesures d'une même quantité : c'est une mesure de la reproductibilité des résultats. La précision est déterminée par la confrontation d'une mesure avec la valeur la plus probable de la quantité en question : normalement une valeur moyennée d'une série assez large de mesures. La remesure d'un point plusieurs fois en mobile est quasiment impossible ; la consolidation de plusieurs nuages mobiles ne signifie donc pas la valeur moyennée des mesures. Par conséquent, la détermination de la précision d'un nuage laser mobile est difficile voire infaisable.

Dans les prochains paragraphes, nous essayons d'obtenir une estimation a priori de la précision. Cette estimation résulte en première place des spécifications techniques des capteurs indiquées par le fabricant. A chaque étape de l'intégration, les erreurs élémentaires des capteurs interagissent entre elles pour produire une estimation de précision a priori des grandeurs physiques calculées. La transmission des erreurs de chaque instrument est suivie afin de déterminer les facteurs qui affectent le plus un nuage de points.

Quant aux récepteurs GPS utilisés, on leur attribue une estimation de la qualité du positionnement pour chaque point du trajet. Nous adoptons ce chiffre comme un bilan final des erreurs GPS et du calcul différentiel. La méthode d'ajustage des polynômes (cf. 8.1.1.1) produit aussi une estimation de la fidélité de la courbe par rapport au trajet réel parcouru (équation 8.6). L'estimation de la précision a priori de la position ne pose ainsi aucune difficulté.

Le constructeur du scanner fournit une estimation des erreurs en fonction de la distance et des angles horizontaux et verticaux. Nous pouvons procéder avec ces valeurs sans faire appel à des modèles d'erreurs plus compliqués. La discussion faite à la fin de ce chapitre montre l'inutilité de poursuivre les recherches sur les erreurs du scanner.

L'AHRS est le composant le plus difficile à prendre en compte dans le calcul de la précision. Le paragraphe suivant est totalement dédié à la construction d'un modèle de précision a priori pour la centrale AHRS.

9.4 Le modèle des erreurs de l'AHRS

Dans la plupart des centrales de faible ou moyenne gamme, dont l'AHRS440, l'estimation de la précision est ignorée. Ceci semble dû à la vocation initiale d'un tel produit : le guidage en temps réel. Le constructeur fournit des spécifications techniques pour les accéléromètres et les gyromètres. L'interaction et le développement avec le temps de ces erreurs ne sont données dans aucun des messages de sortie de l'AHRS440. Nous avons vu dans le chapitre 6 qu'un filtre de Kalman part du modèle d'erreur de la centrale inertielle pour obtenir une estimation acceptable de la précision de l'intégration avec le GPS. Deux choix sont possibles : soit la récupération des données brutes des accéléromètres, des gyromètres et des magnétomètres et l'intégration avec les positions GPS par un filtre de Kalman, soit l'adoption de la solution de Kalman embarquée dans le processeur interne de l'AHRS et la reconstitution d'un filtre équivalent pour en avoir une estimation de la précision. Pour ne pas perdre les qualités de la synchronisation du calcul en temps réel (comme le « feedback » du filtre), nous avons opté pour garder le filtre embarqué dans l'AHRS et simuler sa précision. Le défi à relever est le choix d'un modèle mathématique le plus fidèle possible au filtre de Kalman embarqué pour lequel nous ne disposons pas de suffisamment d'informations.

9.4.1 Simulation du filtre embarqué sur l'AHRS

Le constructeur décrit brièvement les algorithmes embarqués sur une centrale (AHRS 500 de Crossbow®) semblable à la nôtre. Rios et White (2002) montrent que le vecteur d'état de l'intégration GPS/AHRS est composé de 3×8 valeurs : position, vitesse, attitude, biais, facteur d'échelle et désalignement des accéléromètres, des gyromètres et des magnétomètres. Le vecteur des corrections est obtenu à partir de la vitesse et de la position GPS. Néanmoins, ces vecteurs sont modulables : lors d'une « longue » interruption GPS, l'attitude serait corrigée par une attitude calculée en dépendant du vecteur de gravité mesuré par les accéléromètres et par un cap calculé à partir du vecteur champ magnétique terrestre mesuré par les magnétomètres. L'architecture du filtre est de type lâche au vu de la nature des connexions GPS/AHRS. Les équations et les seuils concernant le calcul sont évidemment confidentiels.

La décision prise est la simulation du filtre intérieur de l'AHRS par un filtre à deux procédures en cascade (réseau neuronal statique simple). Deux filtres sont exécutés consécutivement : le premier concerne le GPS/IMU et le deuxième rajoute l'effet des magnétomètres. Nous pouvons

ainsi modéliser les erreurs de l’AHRS en cas d’activation ou non activation des magnétomètres. La figure 9.4 schématise les deux niveaux du filtre cascadié qui sont détaillés dans les prochains paragraphes.



Figure 9.4 Deux étapes de filtre cascadié suggéré pour simuler le filtre embarqué sur la centrale AHRS-440 de Crossbow®

9.4.1.1 Le filtre GPS/IMU

Bien que l’objectif soit la conception d’un filtre simplifié pour reconstruire un modèle d’erreur pour le nuage de point laser, nous préférons traiter le biais des gyromètres et des accéléromètres comme « état » plutôt que comme « bruit d’état ». Le bruit d’état provient de la dérive du biais au fil du temps. Ce choix est favorisé par la différence en gamme entre les GPS et l’INS utilisés ce qui nécessite la mise en évidence du biais à travers un modèle mathématique adéquat. Petovello (2003) adopte ce choix pour l’intégration entre un GPS de haute précision et une INS de gamme tactique. Le facteur d’échelle ne sera pas traité ainsi car les mesures corrigées de cette erreur sont fournies au filtre.

Nous augmentons les équations mentionnées dans l’état de l’art (cf. 5.4.2.1 page 59) par six nouveaux états : le biais des accéléromètres δf^b et des gyroscopes $\delta \omega_b$ dont l’évolution avec le temps est modélisée par une marche aléatoire (cf. 4.7.1.1.1 page 44) :

$$\begin{aligned} \delta \dot{f}^b &= \alpha. \delta f^b + w_a \\ \delta \dot{\omega}^b &= \beta. \delta \omega^b + w_b \end{aligned} \quad 9.2$$

où w_a, w_b : dérive du biais avec le temps des accéléromètres (0.015 mg/s) et des gyromètres (0.0055 °/sec²).

α, β : bruit gaussien blanc des accéléromètres (1 m/s/hr^{1/2}) et des gyromètres (4.5 °/hr^{1/2}) respectivement.

Nous utilisons ces valeurs comme données par le fabricant après les avoir testées sur la phase statique qui précède la phase de mouvement. Les équations du filtre sont (cf. 5.4 page 57) :

$$\delta \dot{x} = F. \delta x + G. u$$

$$\begin{pmatrix} \delta \dot{r} \\ \delta \dot{v} \\ \dot{\epsilon} \\ \delta \dot{f}^b \\ \delta \dot{\omega}^b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ N^e & -2\Omega_{ie}^e & -F^e & R_b^e & 0 \\ 0 & 0 & -\Omega_{ie}^e & 0 & R_b^e \\ 0 & 0 & 0 & -diag(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -diag(\beta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta r^e \\ \delta v^e \\ \epsilon \\ \delta f^b \\ \delta \omega^b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_b^e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b^e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta f^b \\ \delta \omega^b \\ w_a \\ w_b \end{pmatrix} \quad 9.3$$

avec : N^e , $-2\Omega_{ie}^e$, $-F^e$ les matrices dynamiques concernant la vitesse et l'attitude (annexe E). Les équations restantes du filtre sont prises identiquement à ce qui est expliqué dans l'état de l'art (cf. 5.4.2.1 page 59). La boucle de prédiction tourne à la même cadence que la sortie paramétrée pour la centrale, tandis que la boucle de correction tourne quand on possède une mesure GPS valide. Le filtre étudié dans ce paragraphe fournit ses résultats au filtre suivant.

9.4.1.2 Le filtre Mag/IMU

La division en deux filtres successifs équivaut physiquement à l'utilisation d'une centrale inertielle aidée par le GPS plus une boussole compensée de l'effet d'inclinaison. Le filtre Mag/IMU hérite du roulis et du tangage corrigés du filtre GPS/IMU, en conséquence de quoi il est placé en deuxième place et c'est lui qui produit l'attitude finale. D'après les paragraphes (4.3.1 page 36, 4.6 page 42) les magnétomètres apportent essentiellement leur aide à la mesure du cap. Cette aide constitue le vecteur d'état pour cette étape. Pourtant, la considération d'un vecteur d'état si simple $x = \delta\psi$ produit une matrice dynamique F nulle et par conséquent une matrice de transition Φ unité. Quel que soit le choix du vecteur de commande, il n'est pas capable de développer la boucle de prédiction.

Nous allons composer l'état de l'erreur de l'attitude ϵ et du biais δf^b , $\delta \omega^b$. Le vecteur de commande u est considéré comme auparavant, d'où l'équation stochastique caractérisant le modèle :

$$\delta \dot{x} = F . \delta x + G . u$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\epsilon} \\ \delta \dot{f}^b \\ \delta \dot{\omega}^b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\Omega_{ie}^e & 0 & R_b^e \\ 0 & -diag(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & -diag(\beta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \epsilon \\ \delta f^b \\ \delta \omega^b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_b^e & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \omega^b \\ w_a \\ w_b \end{pmatrix} \quad 9.4$$

Le modèle de mesures jumelé avec le modèle d'état est donné par :

$$\delta z = H . \delta x + w$$

$$\delta z = \begin{pmatrix} \sin^{-1} \frac{\delta g_x}{\delta g} \\ \sin^{-1} \frac{\delta g_y}{\delta g \cos \theta_{GPS/IMU}} \\ \psi_{Mag} - \psi_{GPS/IMU} \end{pmatrix} \quad 9.5$$

$$E[w_i, w_j] = \begin{cases} R_i & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

Pour déterminer les composantes du vecteur de gravité dans le référentiel du véhicule, nous appliquons la formule suivante :

$$a_{mesurée} = a_{dynamique} + \omega_{ib}^b \times v_b - g_b \quad 9.6$$

où $a_{mesurée}$: vecteur d'accélération mesuré par les trois accéléromètres

$a_{dynamique}$: vecteur d'accélération causée par le mouvement

$\omega_{ib}^b \times v_b$: accélération de Coriolis associée au mouvement.

Les deux derniers termes peuvent être obtenus du filtre précédent ce qui rend le vecteur g_b seule inconnue dans l'équation précédente. Après cette analyse, nous constatons que le vecteur de correction est fortement corrélé au vecteur d'état à travers le vecteur de gravité qui est, à son tour, une fonction de l'attitude. Nous utilisons les équations des boucles prédiction-correction (5.10 et 5.11) avec Q matrice de covariance du bruit de modèle :

$$Q_k = GQG^T \Delta t$$

La matrice Q est une matrice diagonale 3×3 dont les éléments diagonaux sont égaux aux éléments diagonaux concernant l'attitude dans la matrice de covariance résultant du filtre GPS/IMU.

Pour la mise à jour, il faut encore calculer la matrice R , covariance du bruit de mesure. Les éléments de cette matrice sont déduits par l'application de la loi de transmission des erreurs sur les composantes du vecteur δz (annexe E). Comme la précision des magnétomètres est quasiment fixe, la précision du vecteur des mesures dépend directement de la mesure de roulis et de tangage. Pour les trajets quasi horizontaux, la précision du vecteur de mesure est presque invariable.

D'abord, la boucle de prédiction n'ajoute pratiquement rien au premier filtrage. C'est à partir de la première correction que l'attitude commence à changer de sa valeur initiale.

La détermination du cap à l'aide des magnétomètres est généralement de précision faible. De plus, il est quasiment impossible de prévoir l'effet des objets ferromagnétiques existant sur le trajet parcouru. Nous devons donc être sélectifs lors de la correction de l'attitude à l'aide du cap magnétique, ou autrement dit, lors du choix de l'instant de l'application de la boucle de correction. Trois conditions sont prises en considération pour faire tourner la boucle de correction :

1. Indisponibilité du signal GPS pour plus de 5 sec.
2. Biais de la vitesse angulaire verticale résultant du filtre GPS/IMU de plus de $1^\circ/s$.
3. Mesures magnétiques non perturbées.

Les deux précédents seuils sont déduits empiriquement. Ils sont souvent liés entre eux, pourtant il est préférable de valider les deux. La boucle de correction tourne tant qu'aucune mesure GPS n'est acquise.

9.4.2 Le modèle d'erreur du nuage de points

Ayant les modèles d'erreur concernant les trois capteurs interagissant entre eux pour produire un nuage de points, nous pouvons établir une estimation des erreurs a priori pour ce nuage. Comme le trajet est reconstitué par un ajustage de polynômes, ses erreurs sont déduites par la méthode d'ajustage et non pas par le filtrage montré ci-dessus.

Les erreurs de synchronisation et de calibration sont déjà abordées dans la pré-analyse des erreurs (cf. 7.7 page 97). Nous continuons avec les erreurs dues à la dynamique du déplacement. Le principe est toujours le même : la linéarisation par développement de Taylor et la loi de transmission d'erreur :

$$\sigma r_p^g = \frac{\partial r_p^g}{\partial u} \cdot \sigma u \text{ avec } u \in \{x_{AHRS}^g, y_{AHRS}^g, z_{AHRS}^g, \phi, \theta, \psi, \varphi, \gamma, \rho\} \quad 9.7$$

L'erreur totale est une somme d'une série de neuf termes représentant l'effet de chaque variable u dans l'erreur totale. Ces termes sont discutés chacun à part pour une meilleure compréhension.

9.4.2.1 Effet des erreurs de position

$$r_{AHRS}^g = (x_{AHRS}^g, y_{AHRS}^g, z_{AHRS}^g)^T$$

$$\sigma r_p^g \text{ position} = \sigma r_{AHRS}^g \quad 9.8$$

L'effet de l'erreur de position n'est pas augmenté par aucune interaction avec d'autres variables dynamiques.

9.4.2.2 Effet des erreurs de l'attitude

Contrairement aux erreurs de position, les trois angles d'attitude n'agissent pas de la même manière, c'est pourquoi les effets de ces angles sont traités séparément. Le cas de faible roulis et tangage est souligné en tant que cas caractéristique pour la plupart des trajets en cartographie mobile:

Roulis ϕ :

$$\delta r_p^g \text{ roulis} = \left(R_b^g \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot [R_s^b \cdot r_p^s + a^b] \right) \cdot \delta \phi \quad 9.9$$

où r_{jk} est l'élément j,k de la matrice de rotation R_b^g

Le roulis n'a aucun effet sur la coordonnée x du nuage de points quand elle est mesurée dans le repère du véhicule et tout l'effet est porté sur les coordonnées y,z proportionnellement à l'erreur

de roulis. Ces effets se répartissent autrement lors de la rotation R_b^g vers le référentiel de navigation. Pour le cas de faible roulis et tangage :

$$\delta r_p^g_{roulis} = \begin{pmatrix} 0 & -\sin \psi & \phi \\ 0 & \cos \psi & -\theta \\ 0 & \theta \sin \psi + \phi \cos \psi & 1 \end{pmatrix} \cdot [R_s^b \cdot r_p^s + a^b] \cdot \delta \phi \quad 9.10$$

Tangage θ :

$$\delta r_p^g_{tangage} = \left(R_b^g \cdot \begin{pmatrix} 0 & \sin \phi & -\cos \phi \\ -\sin \phi & 0 & 0 \\ \cos \phi & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot [R_s^b \cdot r_p^s + a^b] \right) \cdot \delta \theta \quad 9.11$$

Contrairement au cas du roulis, nous ne pouvons pas isoler l'effet de tangage sur aucune des coordonnées. Le cas de petit roulis et tangage donne :

$$\delta r_p^g_{tangage} = \begin{pmatrix} \phi + \phi \sin \psi & \phi \cos \psi & -\cos \psi \\ -\psi - \phi \cdot \cos \psi & -\phi \sin \psi & \sin \psi \\ 1 & 0 & \theta \cos \psi - \phi \sin \psi \end{pmatrix} \cdot [R_s^b \cdot r_p^s + a^b] \cdot \delta \theta \quad 9.12$$

Lacet ψ :

$$\delta r_p^g_{lacet} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} R_b^g \cdot [R_s^b \cdot r_p^s + a^b] \cdot \delta \psi$$

$$\delta r_p^g_{lacet} = \begin{pmatrix} y_p^n \\ -x_p^n \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \delta \psi \quad 9.13$$

Le lacet influence directement les coordonnées x, y du nuage de points exprimées dans le repère de navigation (ou le nuage final si translaté par les coordonnées GPS). L'effet sur l'abscisse est proportionnel aux ordonnées et vice versa. La coordonnée z ne souffre d'aucun effet venant du lacet. De plus l'effet du lacet est totalement libre de l'effet du roulis et du tangage.

9.4.2.3 Effet des erreurs du scanner

Comme pour l'attitude, les trois éléments constituant les coordonnées polaires du balayage n'agissent pas de la même manière. C'est pourquoi, chacun est traité séparément dans ce qui suit :

L'effet de l'angle horizontal φ :

$$\delta r_p^g_{angle -horizontal} = R_b^g \cdot R_s^b \cdot \begin{pmatrix} -\rho \cos \gamma \sin \varphi \\ \rho \cos \gamma \cos \varphi \\ \rho \sin \gamma \end{pmatrix} \cdot \delta \varphi$$

$$\delta r_p^g \text{ angle -horizontal} = R_b^g \cdot R_s^b \cdot \begin{pmatrix} -y_p^s \\ x_p^s \\ z_p^s \end{pmatrix} \cdot \delta\varphi \quad 9.14$$

Effet de l'angle vertical γ :

$$\delta r_p^g \text{ angle -vertical} = R_b^g \cdot R_s^b \cdot \begin{pmatrix} -\rho \sin \gamma \cos \varphi \\ \rho \sin \gamma \sin \varphi \\ \rho \cos \gamma \end{pmatrix} \cdot \delta\gamma$$

$$\delta r_p^g \text{ angle -vertical} = R_b^g \cdot R_s^b \cdot \begin{pmatrix} -z_p^s \cos \varphi \\ z_p^s \sin \varphi \\ \sqrt{x_p^{s2} + y_p^{s2}} \end{pmatrix} \cdot \delta\gamma \quad 9.15$$

Effet de la distance ρ :

$$\delta r_p^g \text{ distance} = R_b^g \cdot R_s^b \cdot \begin{pmatrix} \cos \gamma \cos \varphi \\ \cos \gamma \sin \varphi \\ \sin \gamma \end{pmatrix} \cdot \delta\rho$$

$$\delta r_p^g \text{ distance} = R_b^g \cdot R_s^b \cdot \frac{r_p^s}{\rho} \cdot \delta\rho$$

$$\delta r_p^g \text{ distance} = r_p^{s1} \cdot \delta\rho \quad 9.16$$

avec r_p^{n1} les coordonnées d'un point numérisé à un mètre sur la même direction du point étudié (repère de navigation où l'excentricité linéaire n'est pas prise en considération)

9.4.3 La matrice de covariance

L'effet de chaque erreur est exposé antérieurement. Pour partir de ces résidus et parvenir à la matrice de covariance finale du nuage de points, la loi générale de propagation des variances est appliquée (la covariance σ remplace l'erreur ou les résidus δ):

$$\Sigma_{r_p^g} = J \Sigma_{uu} J^T = \begin{pmatrix} \sigma_{x_p^g}^2 & \sigma_{x_p^g y_p^g} & \sigma_{x_p^g z_p^g} \\ \sigma_{x_p^g y_p^g} & \sigma_{y_p^g}^2 & \sigma_{y_p^g z_p^g} \\ \sigma_{x_p^g z_p^g} & \sigma_{y_p^g z_p^g} & \sigma_{z_p^g}^2 \end{pmatrix} \quad 9.17$$

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_p^g}{\partial x_s^g} & \frac{\partial x_p^g}{\partial y_s^g} & \frac{\partial x_p^g}{\partial z_s^g} & \frac{\partial x_p^g}{\partial \phi} & \frac{\partial x_p^g}{\partial \theta} & \frac{\partial x_p^g}{\partial \psi} & \frac{\partial x_p^g}{\partial \varphi} & \frac{\partial x_p^g}{\partial \gamma} & \frac{\partial x_p^g}{\partial \rho} \\ \frac{\partial y_p^g}{\partial x_s^g} & \frac{\partial y_p^g}{\partial y_s^g} & \frac{\partial y_p^g}{\partial z_s^g} & \frac{\partial y_p^g}{\partial \phi} & \frac{\partial y_p^g}{\partial \theta} & \frac{\partial y_p^g}{\partial \psi} & \frac{\partial y_p^g}{\partial \varphi} & \frac{\partial y_p^g}{\partial \gamma} & \frac{\partial y_p^g}{\partial \rho} \\ \frac{\partial z_p^g}{\partial x_s^g} & \frac{\partial z_p^g}{\partial y_s^g} & \frac{\partial z_p^g}{\partial z_s^g} & \frac{\partial z_p^g}{\partial \phi} & \frac{\partial z_p^g}{\partial \theta} & \frac{\partial z_p^g}{\partial \psi} & \frac{\partial z_p^g}{\partial \varphi} & \frac{\partial z_p^g}{\partial \gamma} & \frac{\partial z_p^g}{\partial \rho} \end{pmatrix} \quad 9.18$$

$$\Sigma_{uu} = \text{diag}(\sigma_{x_s^g}^2, \sigma_{y_s^g}^2, \sigma_{z_s^g}^2, \sigma_{\phi}^2, \sigma_{\theta}^2, \sigma_{\psi}^2, \sigma_{\varphi}^2, \sigma_{\gamma}^2, \sigma_{\rho}^2) \quad 9.19$$

L'application de ces équations n'est qu'une somme vectorielle des covariances des valeurs exposées ci-dessus (où on trouve les dérivées partielles de la matrice jacobienne J). Chaque covariance est encore égale à la norme des covariances calculées pour chaque axe x, y, z :

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_{xu}^2 + \sigma_{yu}^2 + \sigma_{zu}^2} \quad u \in \{x_{AHRS}^g, y_{AHRS}^g, z_{AHRS}^g, \phi, \theta, \psi, \varphi, \gamma, \rho\} \quad 9.20$$

Nous pouvons finalement nous prononcer sur notre estimateur global de la précision $\sigma_{P_{3D}}$:

$$\sigma_{P_{3D}} = \sqrt{\sigma_{x_p^g}^2 + \sigma_{y_p^g}^2 + \sigma_{z_p^g}^2} \quad 9.21$$

Bien que cet estimateur ne prenne pas en considération les éléments non diagonaux de la matrice de covariance de la position, il constitue la valeur la plus logique pour résumer la matrice en un seul chiffre. Nous avons recours souvent, dans nos expérimentations, à la représentation graphique de $\sigma_u, \sigma_{P_{3d}}$ comme estimations partielles et globales de la précision de chaque point laser.

9.5 Discussion

Si on ne tient pas compte des erreurs de synchronisation et de calibration, neuf sources d'erreur agissent différemment sur la précision du nuage de points. Chaque élément est corrélé à plusieurs autres éléments. La présentation graphique est limitée, dans l'espace euclidien, à trois dimensions. C'est pourquoi, certains exemples avec seulement deux variables sont discutés. Sept valeurs sont fixées pour permettre d'en faire varier deux autres.

Dans les figures 9.5, 9.6 et 9.7 nous exprimons l'erreur δr_p^g pour un point numérisé selon les conditions suivantes :

Excentricité angulaire R_b^s	ω_s°	0
	φ_s°	0
	κ_s°	90
Excentricité linéaire a^b	a_x^b cm	0
	a_y^b cm	0
	a_z^b cm	100
Position r_{AHRS}^g	x_{AHRS}^g	0
	y_{AHRS}^g	0
	z_{AHRS}^g	0
Attitude R_b^g	ϕ°	$[-5^\circ : 5^\circ]$
	θ°	-5
	ψ°	$[-180^\circ : 180^\circ]$
Coordonnées polaires (référentiel scanner)	φ°	0°
	γ°	30°
	ρ m	15

Tableau 9.1 Valeurs correspondantes à la numérisation mobile du point étudié

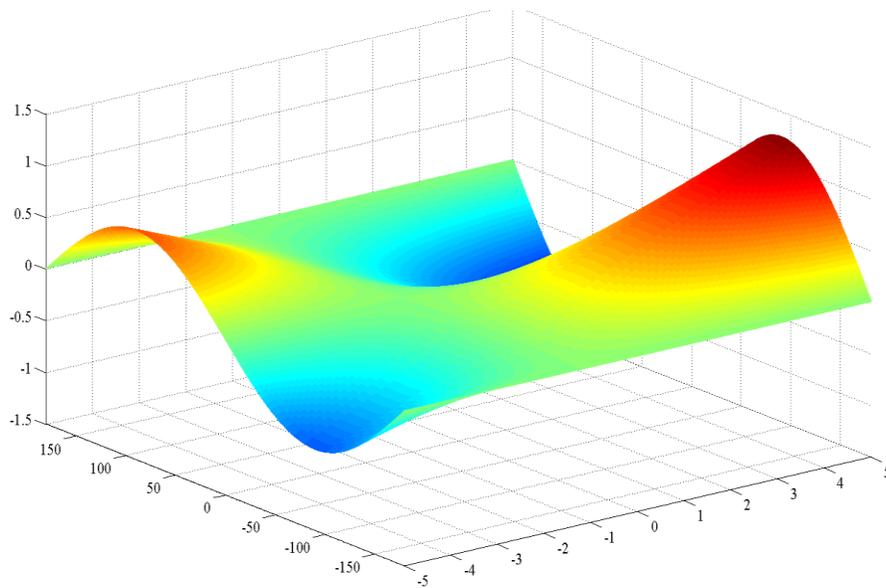


Figure 9.5 Variation de la composante $\left(\delta r_p^g_{roulis}\right)_x$ sur le point étudié (en cm). Intervalle du changement du roulis en abscisse et du lacet en ordonnées

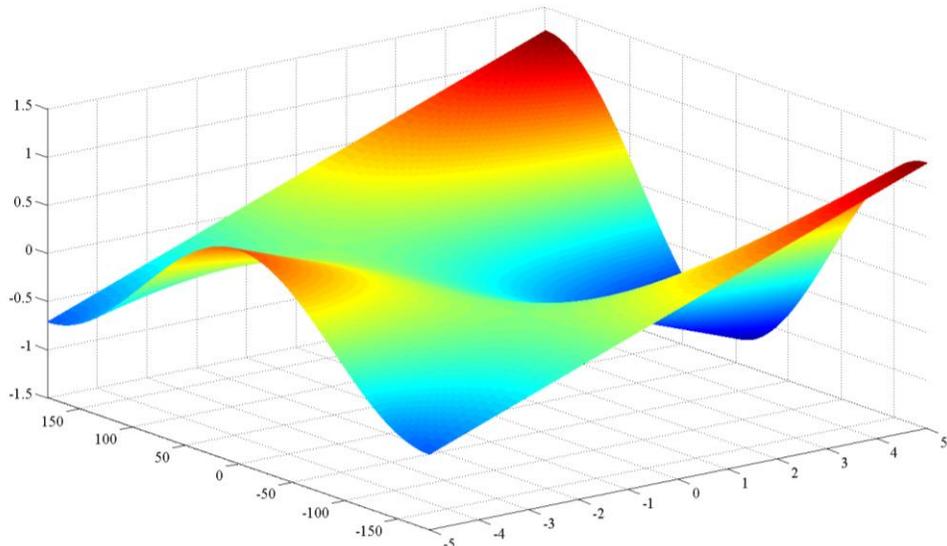


Figure 9.6 Variation de la composante $(\delta r_p^g)_{roulis}_y$ sur le point étudié (en cm).

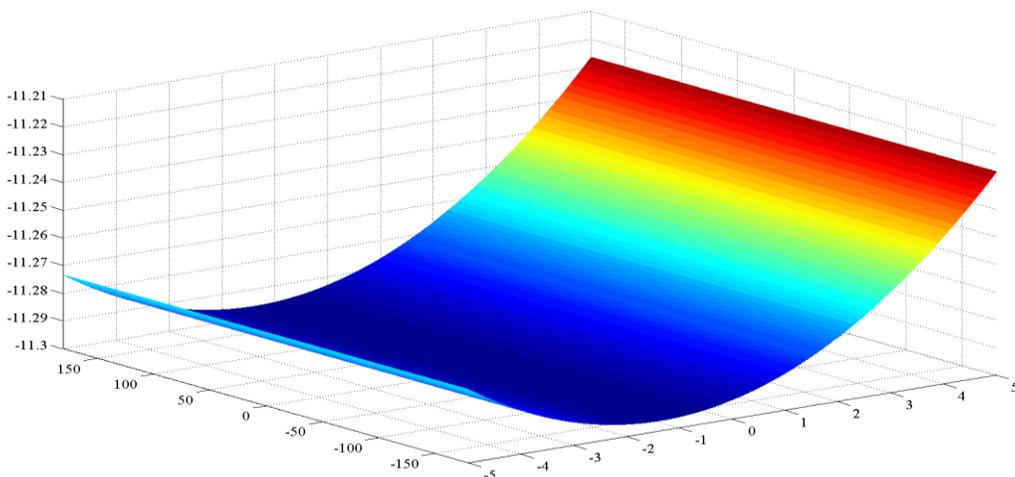


Figure 9.7 Variation de la composante $(\delta r_p^g)_{roulis}_z$ sur le point étudié (en cm)

Il est clair que la grande partie de l'effet de l'erreur de roulis affecte la coordonnée Z qui est insensible à la variation du lacet. La norme de l'erreur δr_p^g (équation 9.10) est constante. Il n'existe donc pas de combinaison des trois angles d'attitude qui minimise la propagation de l'erreur de roulis. D'ailleurs, l'attitude est imposée dans la pratique par la géométrie de la route sur laquelle le chariot se déplace.

Une autre méthode est la présentation des effets de l'imprécision des éléments dynamiques pour quelques points significatifs. L'erreur de position est cependant exclue en raison de sa simplicité. Les valeurs de calibration sont fixées comme suit:

Excentricité angulaire (R_b^s)			Excentricité linéaire a^b		
ω_s°	φ_s°	κ_s°	a_x^b cm	a_y^b cm	a_z^b cm
2.25	1.40	14.83	2.1	-1.2	82.4

Tableau 9.2 Paramètres de calibration du système pour le prochain l'exemple

Considérons un échantillon de points numérisés dans la même position du chariot ($r_{AHRS}^g = 0$) comme suit :

N°	ϕ°	θ°	ψ°	γ°	φ°	ρ m
1	0	0	0	0	0	10
2	1	1	10	10	0	10
3	5	5	20	20	0	10
4	-5	-5	30	20	5	10
5	2	2	40	30	-5	20
6	0	0	50	30	5	20
7	0	0	60	38	3	20
8	-2	-2	70	-20	-5	20
9	5	5	80	0	0	15
10	3	2	90	20	1	30

Tableau 9.3 Jeu des mesures (attitude – coordonnées polaires du scanner) représentant un échantillon pour l'étude de propagation des erreurs

Nous considérerons encore que ces points sont acquis à un intervalle de temps très court où l'erreur estimée de l'attitude est constante. Les valeurs mentionnées dans le tableau ci-dessous représentent les erreurs les plus fréquentes lors de l'utilisation de notre système mobile.

ϕ°	θ°	ψ°	γ''	φ''	ρ
0.5	0.5	1	12	14	$7 \times 10e^{-5} \rho$

L'application des relations (9.10- 9.16) fournit les erreurs « partielles » dues à chaque variable dynamique comme suit :

N°	$\delta r_p^g \phi (cm)$			$\delta r_p^g \theta (cm)$			$\delta r_p^g \psi (cm)$			$\delta r_p^g \gamma (cm)$			$\delta r_p^g \varphi (cm)$			$\delta r_p^g \rho (cm)$		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	0	-0.5	2.2	-0.5	0	8.4	-4.2	-16	0	~0	0.5	~0	~0	~0	0.5	~0	~0	~0
2	~0	0.5	3.6	-0.6	0.12	7.9	-9.9	-14	0	~0	~0	~0	~0	~0	0.1	0.1	~0	~0
3	-0.1	0.6	4.8	-1.4	0.5	7.1	-14	-9.9	0	-0.1	~0	~0	~0	~0	~0	0.1	~0	~0
4	0.76	0.43	5	-0.1	0.1	7.2	-15.9	-7	0	-0.1	~0	~0	~0	~0	0.1	0.1	-0.1	0
5	-1	-0.6	12	0.5	-0.4	12	-34	-3.2	0	-0.1	~0	~0	~0	~0	0.1	~0	-0.1	~0
6	1.1	0.9	12.7	-0.9	1.1	12	-34	2.9	0	-0.1	~0	~0	~0	~0	0.1	~0	-0.1	0
7	0.7	0.4	13.8	-0.4	0.7	10.5	-32	13	0	-0.1	~0	~0	~0	~0	-0.1	0.1	0.1	~0
8	-1	0.3	-1.7	0.6	-1.5	17.2	-31	-14	0	-0.1	~0	~0	~0	~0	0.1	~0	-0.1	~0
9	0.5	0.4	3.3	-0.3	1.7	12.5	-25	2	0	-0.1	~0	~0	0	0	0.1	~0	-0.1	~0
10	0.9	0.5	14.8	~0	1.6	21.5	-42.9	29.7	0	-0.1	0.1	~0	~0	~0	0.2	-0.1	-0.2	~0

Tableau 9.4 Valeurs calculées des erreurs triaxiales du semis de points

La première constatation à faire est l'augmentation quasi linéaire des erreurs avec l'augmentation de distance de telle manière que le système sorte des conditions d'exploitation pour des objets éloignés de plus de 30 m (même si le filtrage réussit à diminuer les erreurs d'attitude de moitié). Les erreurs montrées dans le précédent tableau sont libres des effets de synchronisation et de calibration, il faut encore prévoir les erreurs de position qui ne sont pas négligeables.

Les erreurs de roulis et de tangage se propagent aléatoirement dans le plan horizontal. La quasi-totalité des erreurs se cumulent sur l'axe z. Ceci est dû à la concordance entre l'excentricité angulaire et l'attitude (des faible roulis et tangages). D'ailleurs ce cas est général dans les systèmes de cartographie mobile. L'erreur de lacet émigre de l'axe x vers l'axe y avec le changement de lacet du zéro à un angle droit. La figure 9.8 présente la contribution des erreurs de l'attitude dans l'erreur totale du semis de points proposé dans le tableau 9.3. L'ordonné représente σ_u où $u \in \{\phi, \theta, \psi\}$ calculée comme norme des covariances sur les trois axes. L'abscisse représente le numéro du point.

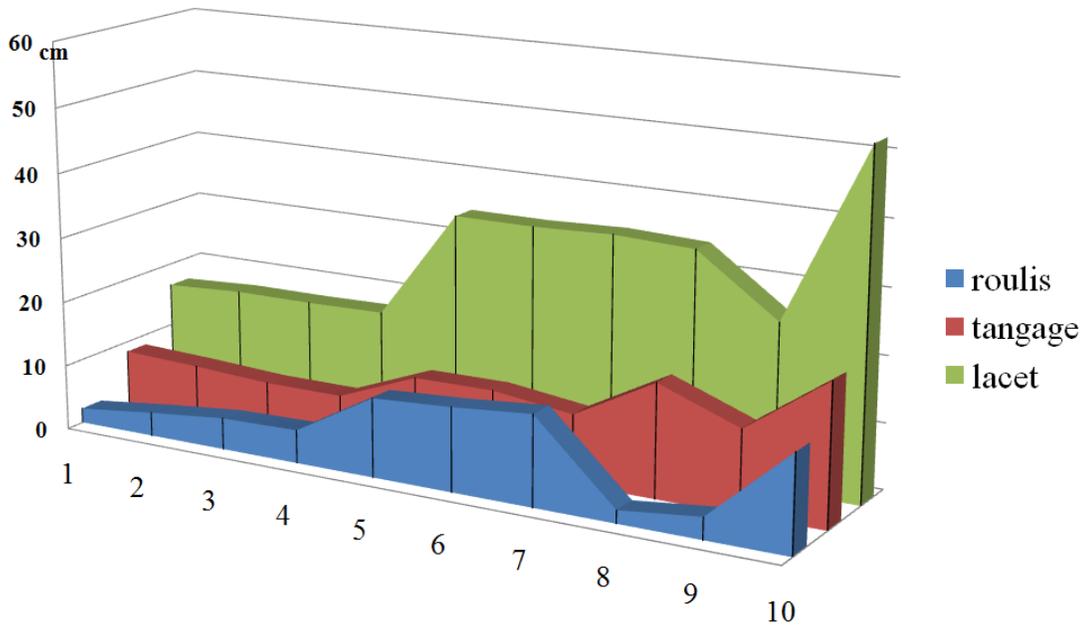


Figure 9.8 Effet des erreurs d'attitude sur le semis de points acquis selon les paramètres et les mesures des tableaux 9.3 et 9.4

Comme les angles de déflexion laser φ, γ sont d'ordre bien inférieur à ceux de l'attitude (12-14" contre 1-2°), nous avons tendance à négliger leur participation à la précision finale. Les équations 9.14 et 9.15 (page 131) montrent que l'erreur des angles de balayage se traduit par une proportion des coordonnées-scanner dans le repère de navigation. L'angle vertical est délimité entre (-20° et 38°) et l'angle horizontal ne dépasse guère quelques degrés selon le paramétrage de l'utilisateur. L'erreur due à ces deux angles n'atteint donc pas des valeurs inattendues à cause des cas limites qui peuvent aggraver l'erreur. Nous pouvons, en conséquence négliger l'erreur des deux angles de balayage ou la considérer comme une proportion de la distance mesurée ($5 \times 10e^{-5} \cdot \rho$ par exemple). Ainsi, toutes les erreurs du scanner, distance incluse, peuvent être considérées comme une proportion de la distance.

La précédente discussion, en totalité, traite de la propagation des erreurs dynamiques selon la variation de ces grandeurs. La variation des erreurs au fil du temps n'est pas encore abordée. Nous avons choisi de discuter la variation des erreurs dynamiques (attitude et position) avec le temps à travers les prochaines expérimentations (chapitre 10). La validation de la simulation du filtre de Kalman embarqué sur l'AHRS est également faite de manière expérimentale.

10. Expérimentation

Plusieurs tests ont été mis en œuvre en parallèle de l'avancement théorique de cette thèse. La partie expérimentale a permis d'avoir un retour d'expérience qui a fortement contribué au développement du système mobile. Grâce aux expérimentations réalisées, la configuration et les paramètres définitifs du système ont été déterminés et optimisés.

La plupart de nos expérimentations sont concentrées sur le Boulevard de la Victoire sur lequel est situé notre laboratoire de recherche. Ce boulevard, long de 700 m, a été relevé plusieurs fois par notre système. Deux passages en sens inverse sont nécessaires pour numériser les deux côtés du boulevard car le système ne peut couvrir qu'un seul côté à chaque passage. De plus, le balayage est décomposé en plusieurs tronçons qui débutent et se terminent par les carrefours comme le montre la figure suivante :



Figure 10.1 Image aérienne du boulevard de la victoire à Strasbourg



Figure 10.2 Nuage de points superposé au plan CAO du boulevard de la victoire (le cas étudié «1» est signalé par l'ellipse rouge et le cas «2» par l'ellipse verte)

Comme le système est doté d'une centrale inertielle de faible gamme, une prévision de constellation GPS est conseillée avant de sortir sur le terrain. La prévision est réalisée à l'aide des logiciels spécialisés de disponibilité des satellites comme par exemple Leica™ Geo-Office® (figure 10.3)

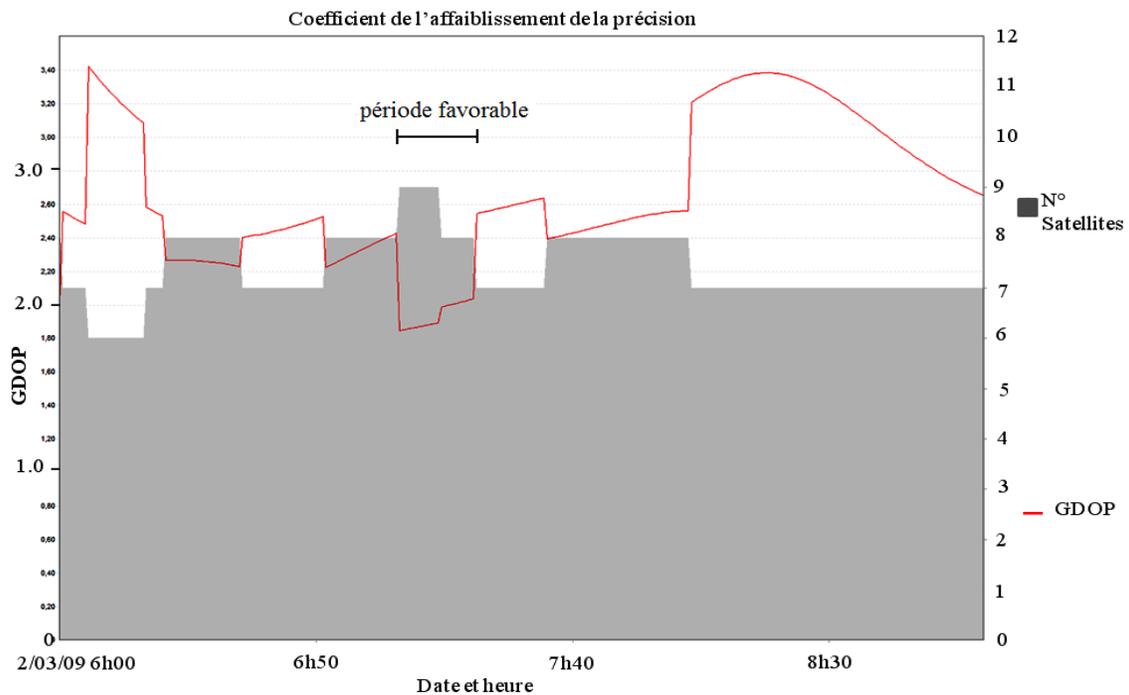


Figure 10.3 Disponibilité des satellites (en gris) et GDOP (en rouge) sur une période de 3h

Nous trouvons dans cette figure une seule fourchette d'environ 20 min où le nombre de satellites dépasse 8 et où le GDOP est inférieur à 2,5. Pour un récepteur affecté de masques, la probabilité de capter un signal GPS valide est largement inférieure.

La disponibilité des satellites peut être calculée en fonction des bâtiments existants. Pourtant, on peut penser qu'une telle analyse ne correspond pas à la notion de cartographie mobile censée couvrir de grands terrains avec un haut degré de flexibilité.

10.1 Cas d'étude n° 1

10.1.1 Calcul du nuage

Nous exposons un segment de 100 m signalé en rouge sur la figure 10.2. La vitesse du déplacement est d'environ 0.65 m/s (1,7 km/h). Cette partie est choisie parce qu'elle cumule une séquence de mauvaises et de bonnes réceptions GPS. Seuls les deux points du début et de la fin du trajet sont acquis par le GPS RTK. Ceci est dû au stationnement long sur ces deux positions. Les parties acquises par le HS GPS et par le GPS RTK sont montrés sur la figure 10.4.

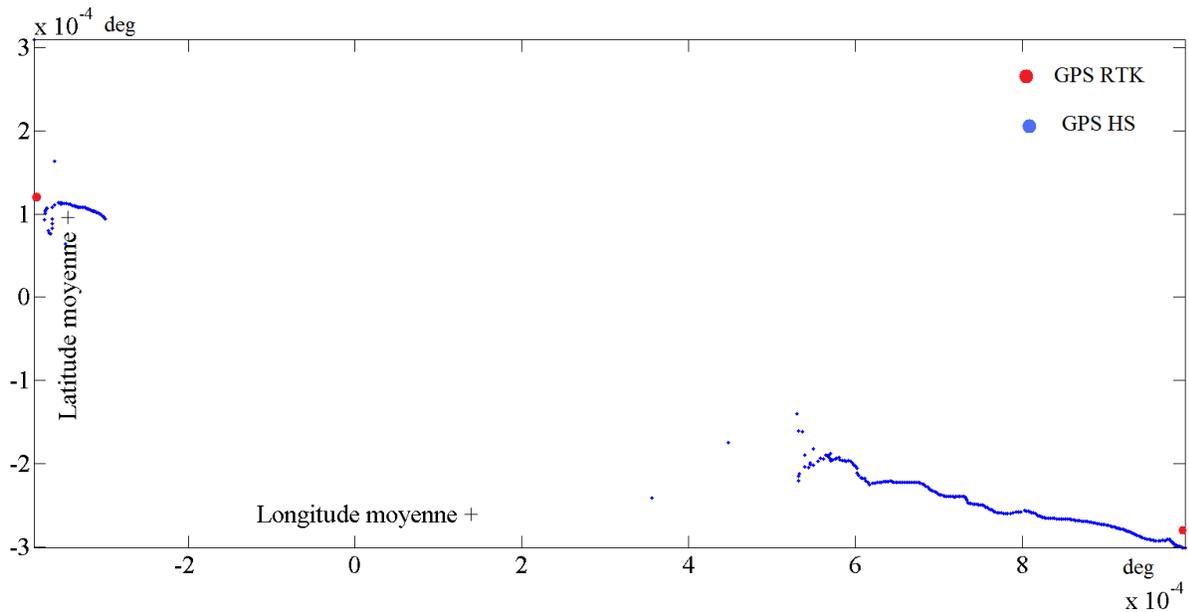


Figure 10.4 Points du trajet mesurés par le GPS

La figure 10.5 montre les vitesses Nord, Est et Bas comme sorties dans le message A1 de la centrale (annexe B). La vitesse vers le bas est déjà filtrée par un filtre moyenné d'une fenêtre glissante de taille égale à cinq fois le taux d'échantillonnage de l'AHRS.

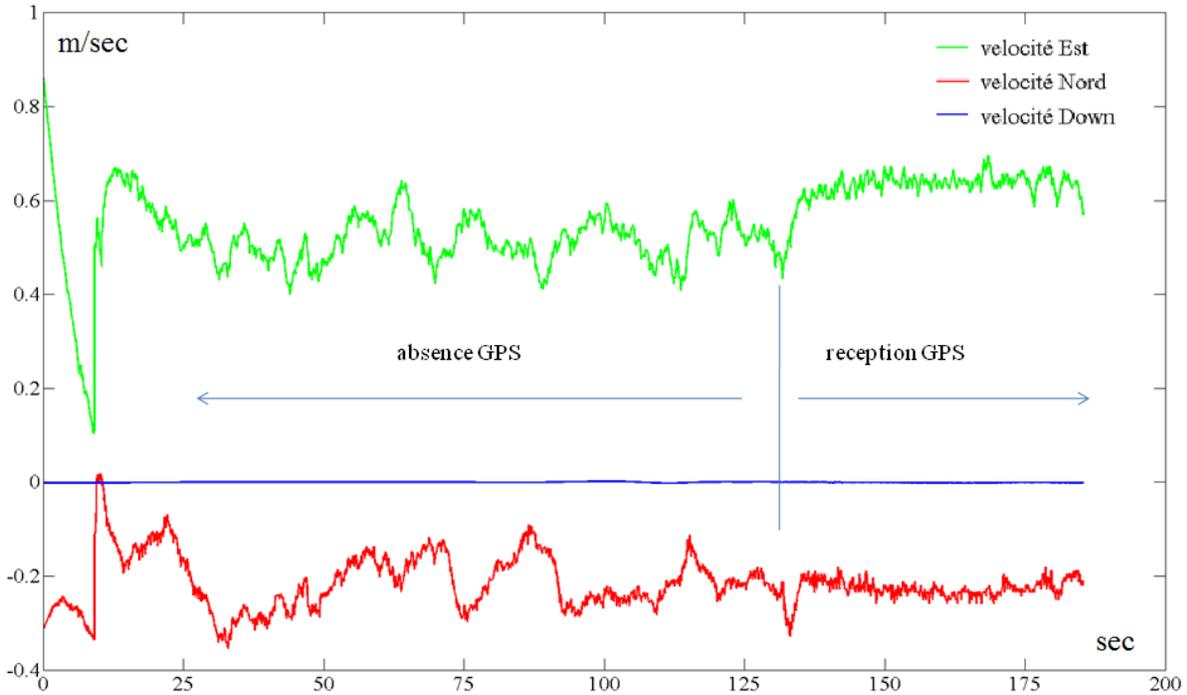


Figure 10.5 Vitesses NED calculées par la centrale AHRS 440

Nous pouvons constater que la vitesse est plus homogène lors de la réception GPS. Malgré la perturbation en absence du signal GPS, les vitesses ne sont pas entachées de fautes et sont exploitables pour le calcul qui suit. Le trajet est calculé en ajoutant la somme cumulée des vitesses multipliées par l'intervalle d'échantillonnage (0.05 sec) aux coordonnées du premier point GPS RTK. La comparaison du dernier point calculé avec le deuxième point GPS RTK conduit à :

$$\delta_r = r_2^{GPS RTK} - (r_1^{GPS RTK} + \sum v \cdot \Delta t) = (1.33 \quad -0.44 \quad 0.11)^T m \quad 10.1$$

Cet écart se distribue sur tous les points du trajet selon l'erreur de la vitesse estimée plus loin. Le trajet calculé par cette méthode est ensuite filtré en ajustant deux polynômes de neuvième et de premier degré et en prenant la moyenne des deux. Le trajet calculé à partir des vitesses et le trajet filtré sont illustrés sur la figure 10.6. Nous allons considérer, à titre de simplification, que l'erreur de position est égale à la distance entre le trajet calculé à partir des vitesses et le trajet ajusté. Cette considération signifie que les vitesses sont exemptes d'erreurs.

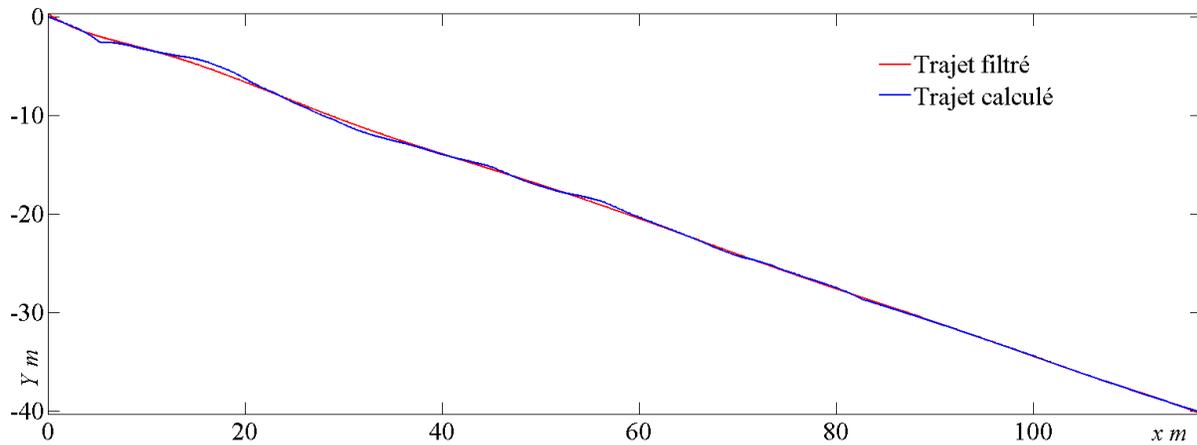


Figure 10.6 Trajet calculé et filtré ramené au point de départ $r_1^{GPS_RTK} = (0, 0, 0)$

Avant de passer au balayage, il faut encore filtrer le lacet à l'aide du trajet calculé. L'application des équations 8.15 (page 111) fournit les valeurs illustrées à la figure 10.7 :

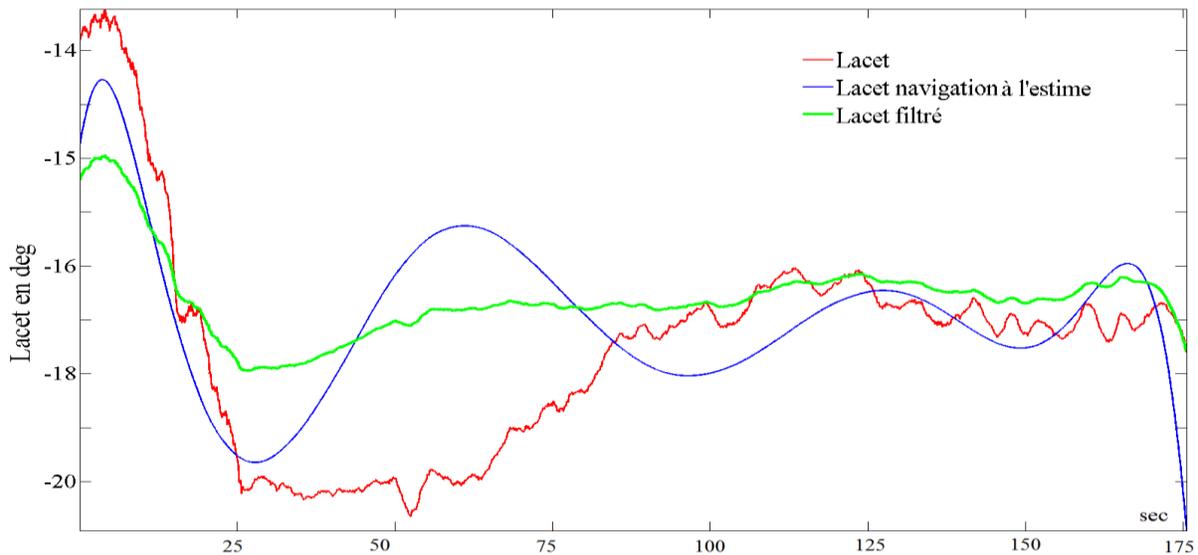


Figure 10.7 Filtrage du lacet selon le principe de la navigation à l'estime

Le nuage de points est acquis par un seul tir laser sans couleurs. La résolution horizontale est égale à 20 mm à 100 m et la résolution verticale est égale à 200 mm à 100 m. Le scanner fait 1114 profils couvrant un trajet parcouru de 140 m ce qui vaut environ 8 lignes de balayage par mètre de longueur en moyenne.

L'équation de géoréférencement direct 7.14 intègre la position, l'attitude et le nuage de points brut pour obtenir le nuage final présenté sur la figure 10.8.

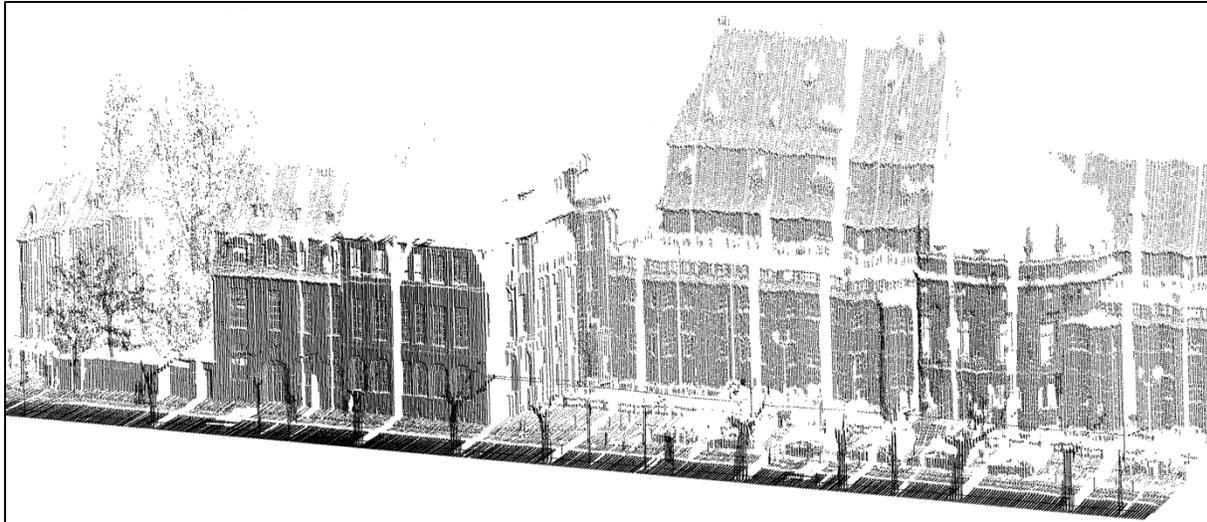


Figure 10.8 Nuage de points résultant

Nous pouvons noter l'effet de la distance sur la précision du nuage : la façade saillante (16-20 m de la plateforme) est nettement plus précise et dense que la façade en retrait (40-60 m). Davantage d'analyses sont faites dans le paragraphe suivant.

10.1.2 Le modèle d'erreurs

Si l'on appliquait seulement le filtre GPS/AHRS sans prise en compte de la participation des magnétomètres, les différences entre l'attitude calculée et donnée par l'AHRs seraient semblables à celles de la figure 10.9.

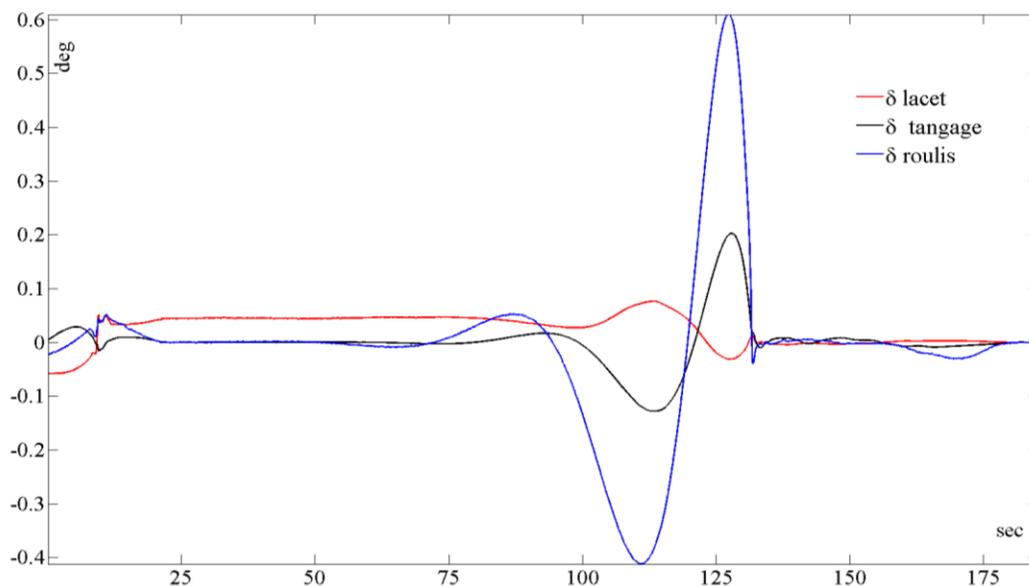


Figure 10.9 Attitude comme sortie du filtre embarqué sur l'AHRs – attitude simulée par notre filtre GPS/INS

En effet, le filtre de Kalman en cascade est appliqué pour reconstituer le filtre embarqué sur le processeur de l'AHRs. Le cap magnétique calculé selon la relation 4.5 (page 37) est très bruité.

Cette vibration semble due au champ électromagnétique variable au niveau du scanner. Pour utiliser le cap magnétique comme vecteur de correction, le filtrage est indispensable. Un filtre moyen avec une taille de fenêtre glissante égale à cinq fois le taux d'échantillonnage de l'AHRS (5×20) donne le résultat suivant :

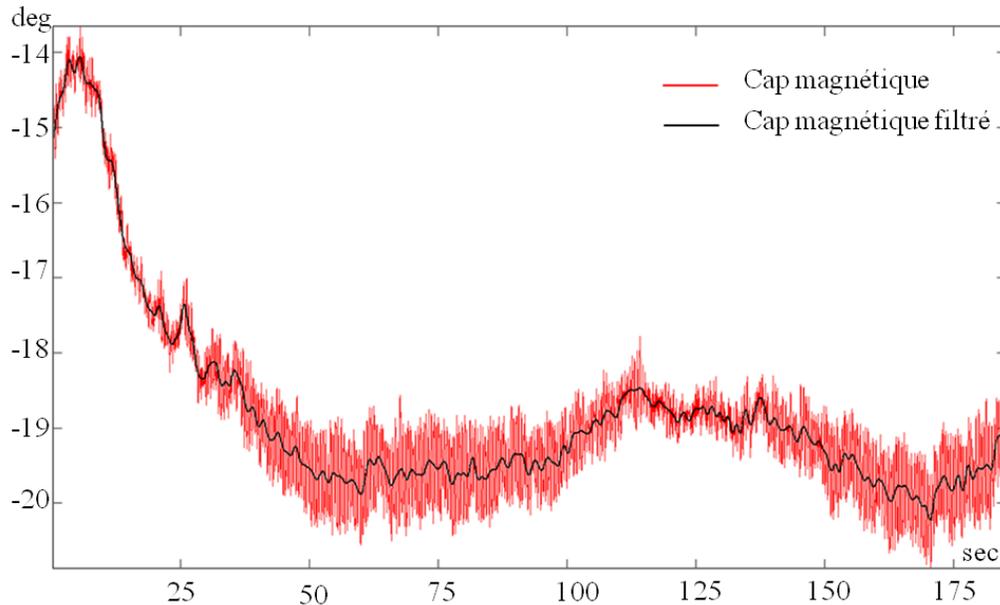


Figure 10.10 Cap magnétique compensé mesuré par l'AHRS (en rouge) et filtré (en noir)

La forme générale de la courbe ne présente pas de grosses erreurs lors de la comparaison avec le cap donné par l'AHRS ou celui déduit par navigation à l'estime (figure 10.7). Elle est donc exploitable en totalité pour notre estimateur.

Les deux filtres de Kalman (GPS/INS, INS/Mag) fonctionnent au même taux d'échantillonnage que l'AHRS (20 Hz). Les corrections magnétiques sont appliquées même quand le HSGPS capte un signal car sa précision n'est pas particulièrement meilleure que celle des magnétomètres. Les écarts entre l'attitude donnée par le filtre embarqué et notre simulation sont donnés par la figure 10.11. Ces écarts sont nettement meilleurs que dans le cas du calcul sans prise en compte des magnétomètres (figure 10.9).

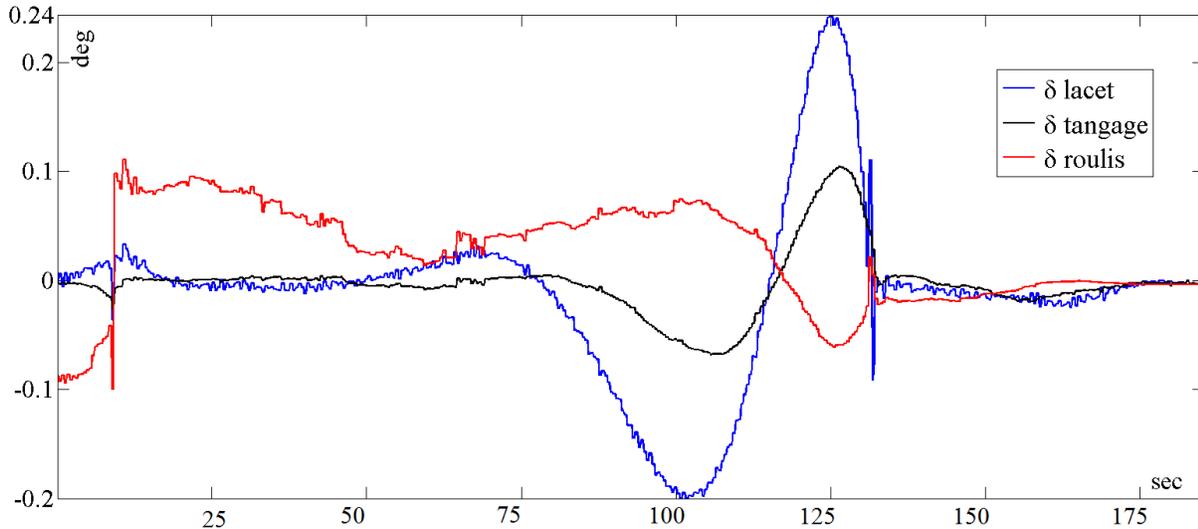


Figure 10.11 Différence entre l'attitude calculée par le filtre de Kalman embarqué sur le processeur interne de l'AHRS et notre calcul

Nous pouvons constater que la différence maximale a lieu quand le GPS commence à fournir ses corrections. Ceci laisse penser à une autre technique de mise à jour utilisée par la centrale où d'autres coefficients sont utilisés lors de longues absences du signal GPS. Quoiqu'il en soit, la différence est inférieure à 0.25 degré ce qui permet d'adopter la simulation comme équivalent de l'attitude dont on peut obtenir la covariance. L'attitude et les vitesses résultantes de notre simulation ne nous intéressent pas autant que leur covariance. Nous rappelons que la covariance d'un élément est isolée de la matrice de covariance du filtrage comme suit :

$$\sigma_i^k = \frac{\sqrt{P_k^+(i,i)}}{\text{norme}(\text{diag}(P_k^+))} \quad i \in \{x \ y \ z \ v^N \ v^E \ v^D \ \phi \ \theta \ \psi\} \quad 10.2$$

i symbolise un état du filtre et k symbolise l'instant de mesure.

Les covariances du roulis et du tangage sont quasiment stables (comme l'illustre la figure 10.12). En revanche, la covariance du lacet est fortement perturbée (figure 10.13). Nous remarquons qu'elle est moins importante lors de la réception GPS (entre les secondes 100-170), elle ne dépasse pourtant pas 1.2 deg en aucun cas grâce à la participation efficace des magnétomètres. La covariance du lacet subit encore un changement équivalent au filtrage par la navigation à l'estime.

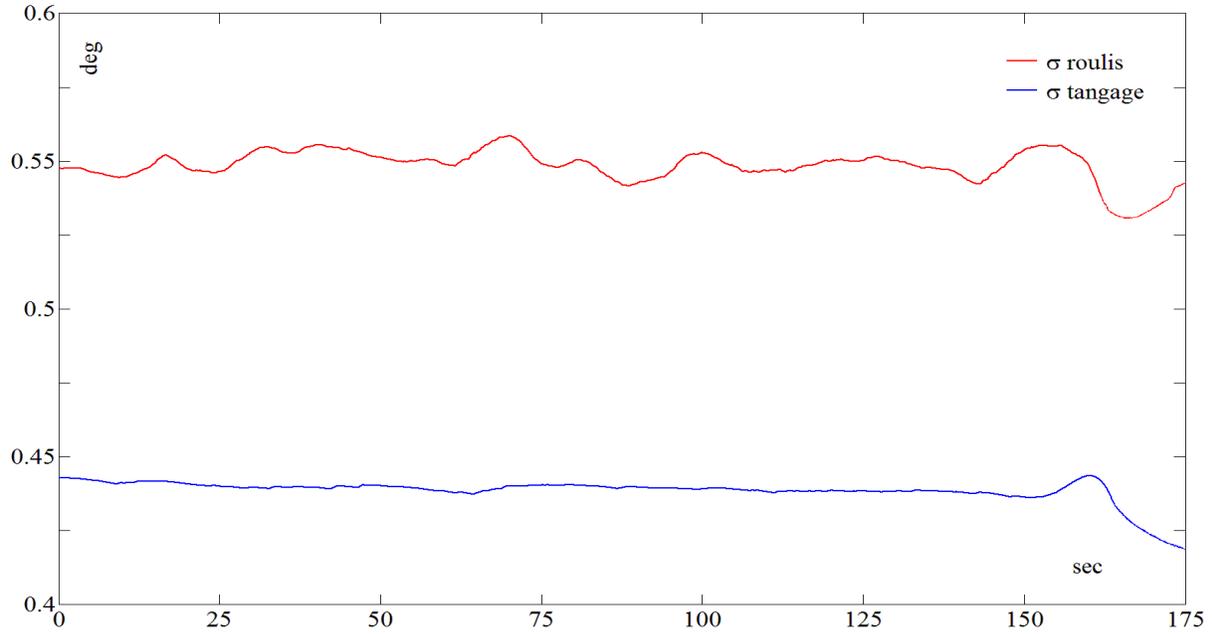


Figure 10.12 Covariances du roulis et du tangage selon notre simulation du filtre embarqué

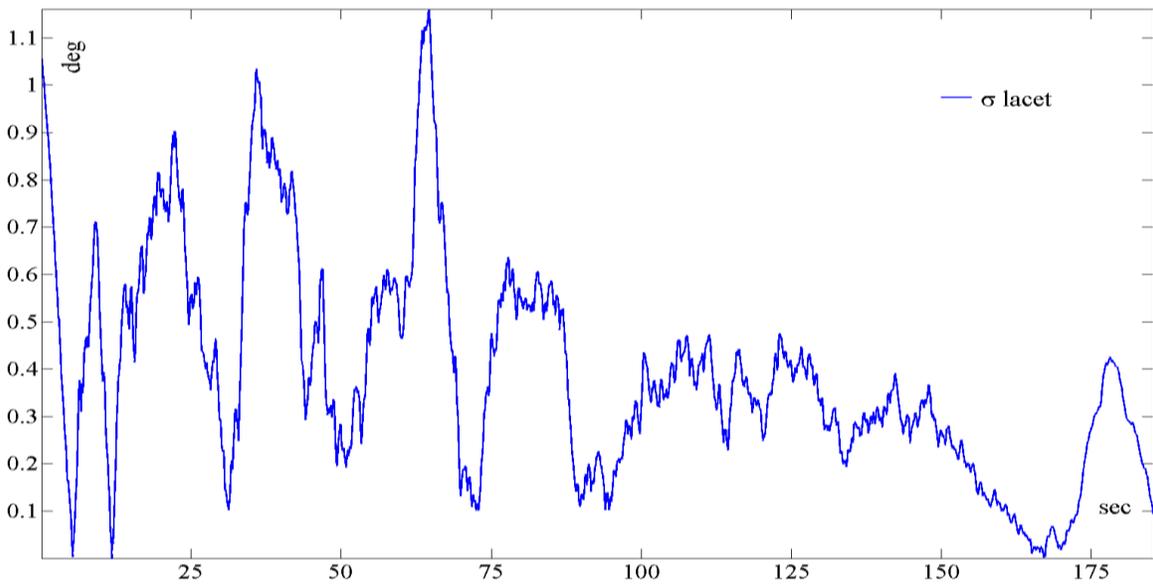


Figure 10.13 Covariance du lacet

Après avoir obtenu toutes les covariances, elles sont interpolées linéairement pour s'harmoniser avec la densité du nuage laser. Nous pouvons ensuite, appliquer la loi de transmission des erreurs (9.17) pour obtenir l'écart type $\sigma_{P_{3D}}$ de chaque point du nuage. Cette estimation est cartographiée sur le nuage (figure 10.14). La distance reste toujours le facteur qui impacte le plus la précision. Pourtant, une certaine ondulation de la précision peut être remarquée sur le nuage. Il est possible de cartographier l'effet de chaque élément dynamique (équations 9.8- 9.16 pages 129-131) séparément, mais faute de place, nous nous contentons de l'estimation générale.

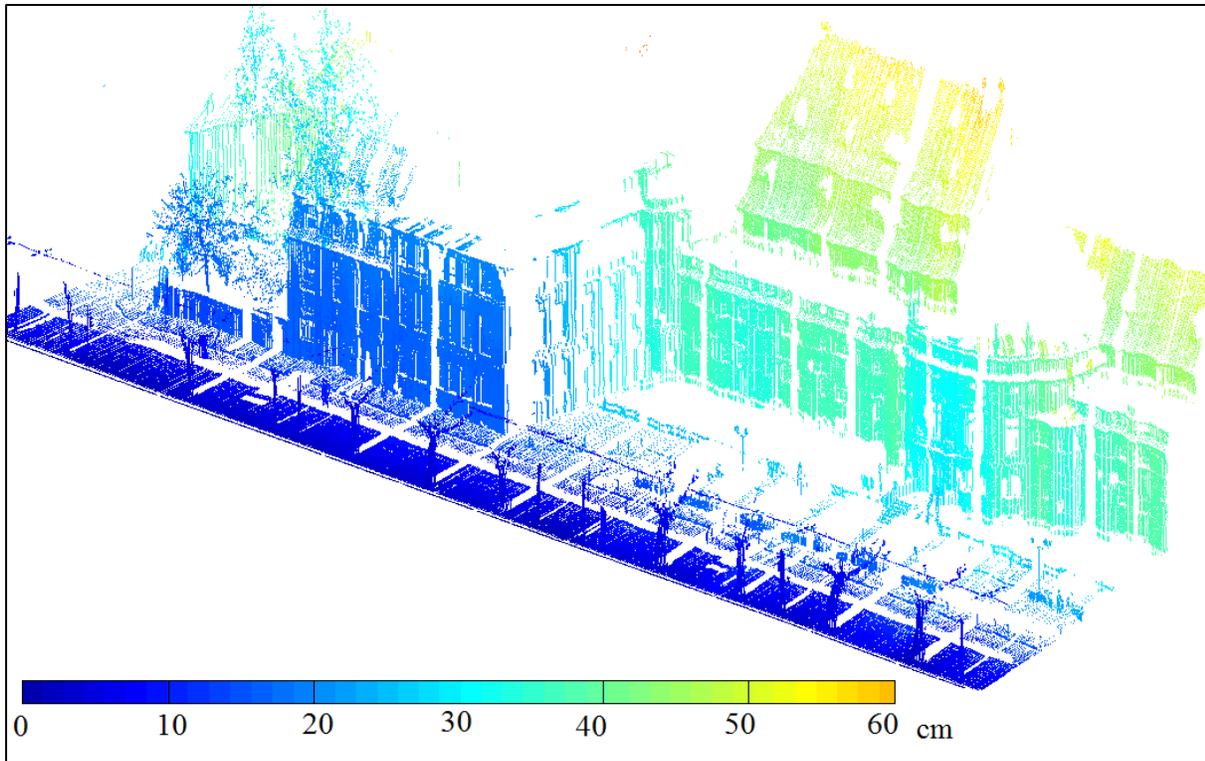


Figure 10.14 Cartographie de l'écart-type calculé pour le nuage étudié

10.1.3 L'exactitude

Un nuage LiDAR aéroporté disponible est utilisé pour l'objectif de validation du calcul. La densité du nuage LiDAR est d'environ 1.3 pts/m². En raison de cette faible densité et du chevauchement des deux nuages, il est difficile d'entamer une comparaison dépendante des distances mutuelles. Deux toits inclinés sont communs entre les deux nuages ; le plus proche de la plateforme souffre d'un bilan d'erreurs inférieur à celui de l'autre toit.

Des plans mathématiques sont ajustés aux sous-nuages LiDAR et terrestre représentant les deux toits. Le tableau 10.1 présente les écarts types associés au calcul d'ajustage des plans, tandis que le tableau 10.2 montre les différences entre ces plans.

Sous-nuage	σ_{3d} LiDAR <i>cm</i>	σ_{3d} terrestre <i>cm</i>
Toit «proche»	1.9	4.3
Toit «éloigné»	3.1	10.7

Tableau 10.1 Ecarts-types du calcul d'ajustement du plan moyen ($\sigma_{3d} = \sqrt{\frac{\sum \delta_n^2}{n-1}}$: δ_n la distance plan-point, n nombre des points)

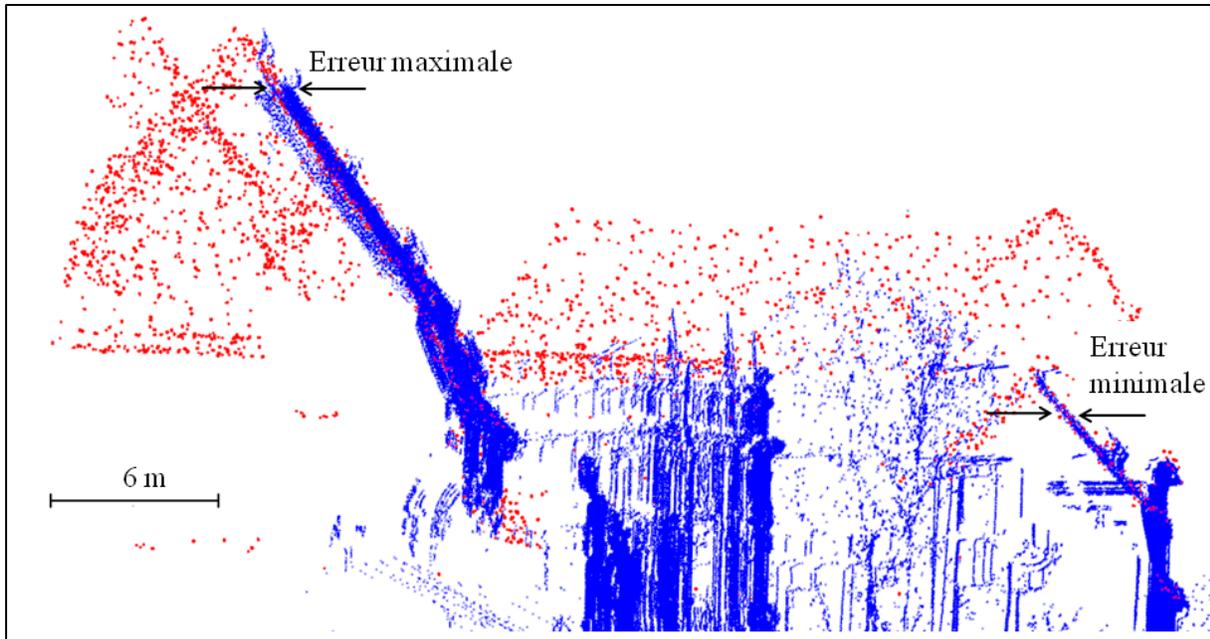


Figure 10.15 Vue latérale de la superposition des nuages LiDAR aéroporté et laser terrestre

Plan \ écart en :	Distance (cm)	Angle avec le plan horizontal (deg)	Angle avec le plan vertical (deg)
Toit «proche»	7.3	0.58	- 0.14
Toit «loin»	14.7	0.67	0.24

Tableau 10.2 Ecart (distance et angle) entre les plans «LiDAR » et «terrestre »

Nous constatons que l'écart-type sur le calcul du plan moyen pour le sous-nuage terrestre représentant le toit éloigné est du même ordre que la distance entre le plan «LiDAR » et le plan «terrestre ». Ceci est dû au bruit important dans cette partie du nuage. Cependant, l'écart en distance « plan LiDAR – plan laser terrestre » est largement meilleur que l'estimation déjà faite par transmission des erreurs. Deux raisons expliquent cette différence : premièrement, l'estimateur σ_{3d} peut être imaginé comme rayon d'une sphère (équivalent de l'ellipsoïde d'erreur) autour de chaque point, tandis que la distance entre les deux plans est perpendiculaire à eux (après les rotations horizontales et verticales). Deuxièmement, la répartition presque aléatoire des erreurs amortit leur effet lors de l'ajustement du plan moyen. Nous soulignons ici la possibilité d'améliorer la précision d'un nuage mobile terrestre par la modélisation.

10.2 Cas d'étude n°2

Ce cas est semblable au précédent, à ceci près que les façades balayées sont plus proches de la plateforme mobile et que la couverture GPS est légèrement meilleure. En effet, le trajet parcouru est celui montré aux figures 8.6- 8.9 (page 109) lors de l'explication théorique de l'intégration HSGPS avec les autres composants des systèmes. Nous allons nous intéresser aux résultats finaux davantage qu'au modèle d'erreurs spécifique à chaque élément dynamique. La vitesse moyenne du déplacement est de 2.3 km/h. Le balayage est réalisé avec une résolution verticale de 3 cm à

100m et une résolution horizontale de 3mm à 100 m. La figure 10.16 montre la géométrie du nuage calculé et l'écart type total cartographié sur le nuage.

10.2.1 Le modèle d'erreurs

Comme la distance mesurée pour ce nuage ne varie pas beaucoup (environ 14-25m), l'effet des erreurs d'attitude commence à être plus évident que dans le cas précédent.

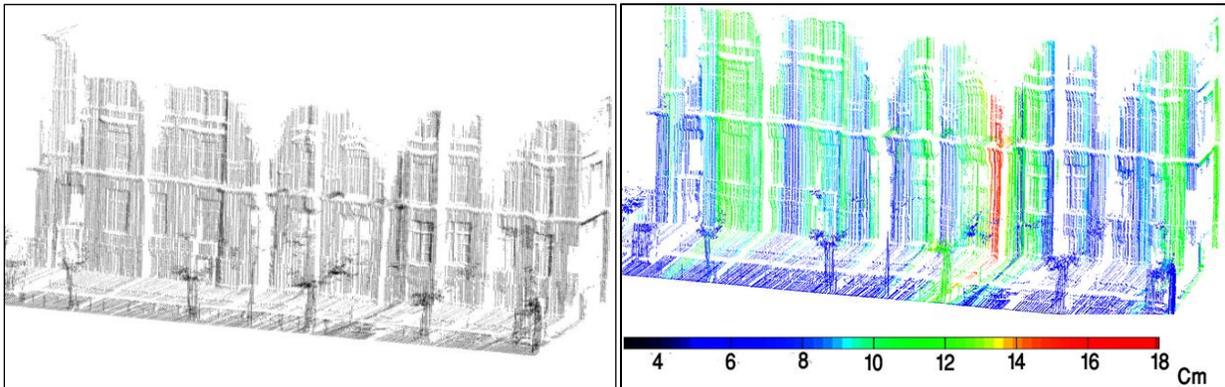


Figure 10.16 Nuage de point cartographié selon la précision estimée

On constate des variations de la précision tout au long du nuage (sous la forme d' « ondulations »), ce qui peut être expliqué par les conditions d'acquisition du signal GPS. Les parties rouges (précision d'environ 18 cm) correspondent à une absence de signal GPS, qui sont précédées et suivies par des acquisitions à faible précision ce qui affecte non seulement la qualité des positions interpolées, mais également celle des composantes d'attitude. La distance amplifie toujours l'effet des autres imprécisions ; les parties les plus précises sont les plus proches du scanner (au sol), contrairement aux parties supérieures des façades

10.2.2 L'exactitude

D'après les résultats du paragraphe précédent, la précision théorique calculée pour le nuage de points varie entre 0-18 cm. Nous avons privilégié ici la comparaison avec un nuage de points acquis par le scanner en mode fixe (correspondant à l'utilisation classique du scanner). Une telle comparaison permet simultanément de déterminer l'exactitude relative et absolue. Le nuage fixe (figure 10.17) est considéré comme nuage de référence (précision a priori de l'ordre du centimètre).

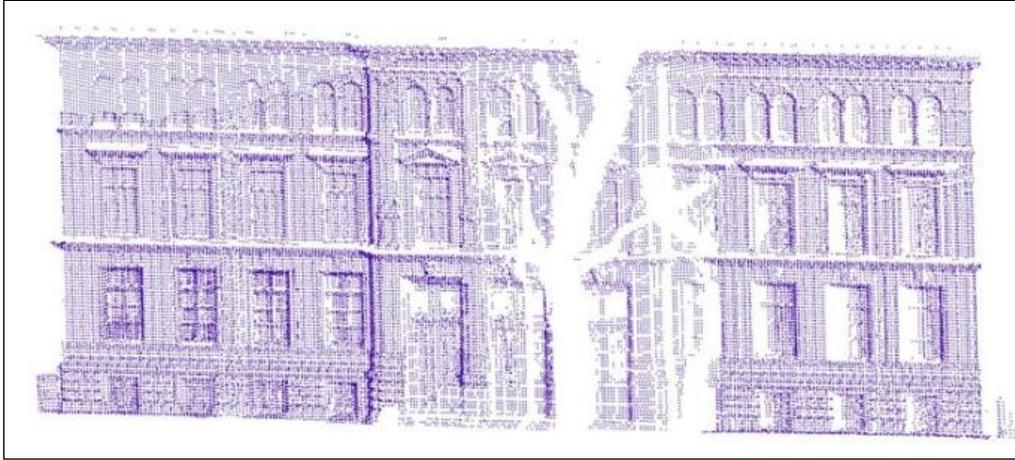


Figure 10.17 Nuage fixe considéré comme référence

Afin de rester fidèle au nuage d'origine, on applique une triangulation élémentaire de Delaunay en conservant tous les points du nuage de référence. Les pics du maillage sont ensuite éliminés localement sans appliquer de lissage global de surface.

On peut dès lors cartographier la distance algébrique entre les points du nuage mobile et le maillage du nuage de référence :

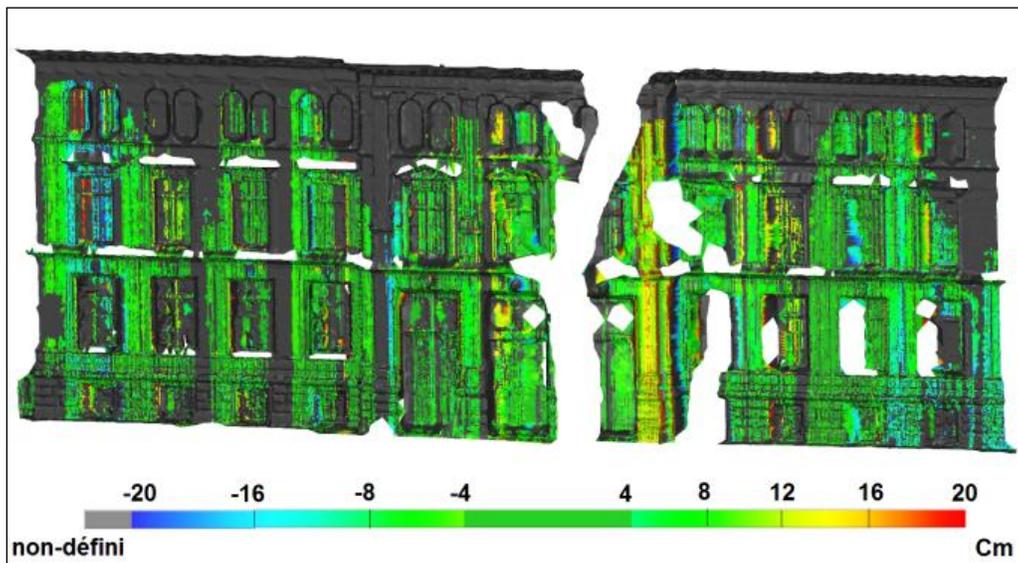


Figure 10.18 Ecart entre le nuage mobile et le maillage construit à partir du nuage fixe servant de référence

Bien que les distances exprimées sur la figure 14 soient algébriques (positive pour les points situés devant la surface maillée), une certaine ressemblance avec la figure 12b peut être notée. Néanmoins, l'évaluation de l'exactitude à travers la distance (l'écart) entre un nuage mobile et fixe semble plus optimiste que la précision théorique calculée au paragraphe précédent. Les écarts constatés se situent dans un intervalle de ± 8 cm pour la plupart des points. Les écarts les plus importants sont constatés sur les vitres où les mesures lasers sont aléatoires dans les deux cas (mobile et fixe).

L'exactitude est exprimée en tant que distance perpendiculaire à la surface du maillage. Cette distance est probablement horizontale (pour des façades verticales) tandis que la précision théorique est donnée dans toutes les directions. L'imprécision verticale serait ainsi à l'origine de différences entre la précision et l'exactitude évoquées dans ce paragraphe. La comparaison des précisions horizontales σ_x, σ_y et verticale σ_z (équations 9.19 et 9.20 page 132) confirme cette hypothèse. En remontant dans les étapes du calcul, on peut mettre en évidence l'imprécision de la composante verticale de la position calculée par le GPS notamment par rapport à ses composantes horizontales.

10.3 Cas d'étude n°3

Notre troisième cas d'étude s'inscrit dans la validation de l'appropriation des méthodes utilisées dans cette thèse à des versions futures plus performantes du système. Le système est embarqué dans une remorque tirée par une voiture à la vitesse d'environ 12 km/h (figure 10.19). Comme la vitesse de numérisation du scanner GX de Trimble® ne suffit pas pour telle application, nous ne prévoyons pas un nuage de points dense. Néanmoins, ce type d'expérimentation a permis d'aborder l'erreur de l'horodatage et le comportement du GPS et de l'AHRS à des vitesses plus importantes. Cette expérimentation est menée sans le HSGPS.



Figure 10.19 Test du système mobile après montage sur une remorque attelée à un véhicule.

On constate l'amélioration de la réception GPS et des signaux AHRS. Les dynamiques fortes réduisent le taux du bruit pour les signaux des gyromètres et des accéléromètres. De plus, le passage plus rapide d'un ciel masqué à un ciel sans masque améliore la répartition des mesures GPS au fil du temps ce qui renforce son apport à la navigation.

Le trajet parcouru est composé de tronçons rectilignes et courbes. La première séparation entre ces deux types de trajet se fait à l'aide de la courbe du lacet ; les parties rectilignes correspondent à un lacet de changement faible tandis que les parties courbées correspondent à un changement

rapide. La figure 10.20 montre le lacet et les instants signalant les virages. La méthode de découpage du trajet (cf. 8.1.1.3.1 page 106) est appliquée sur les parties rectilignes avec un seuil de distance entre les points et la ligne droite de 1.2 m. La figure 10.21 montre les points captés par le GPS RTK du trajet étudié et les points du virage et de changement de courbes.

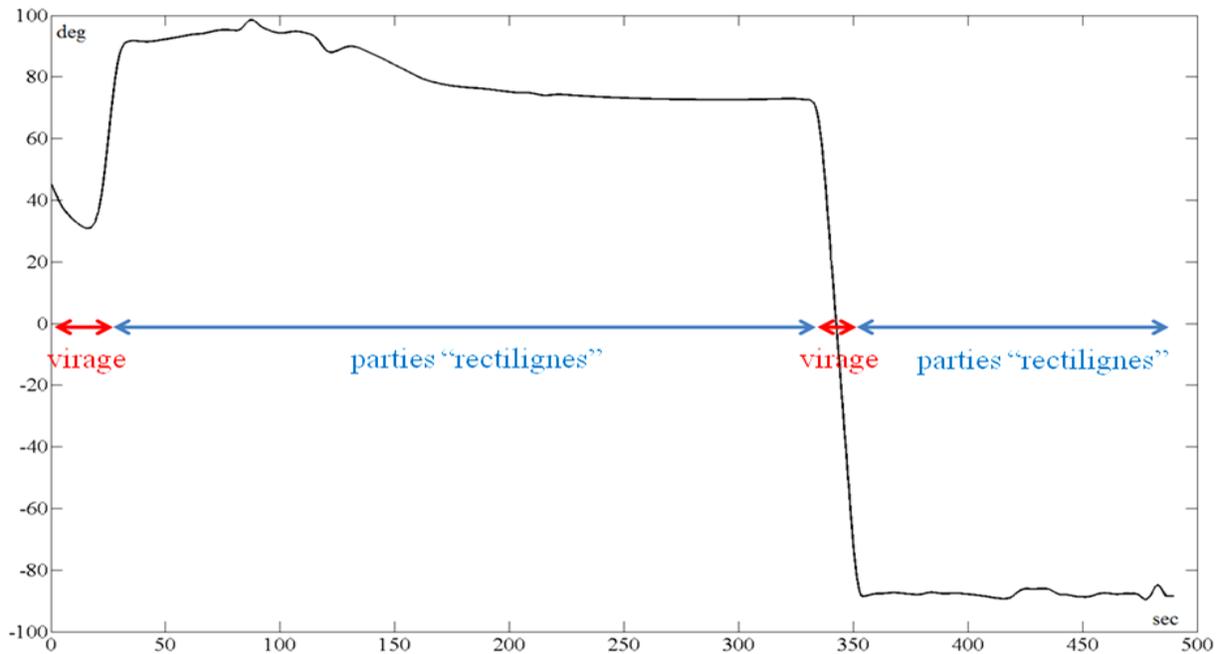


Figure 10.20 Distinction entre les parties linéaires et les virages à l'aide de la courbe du lacet

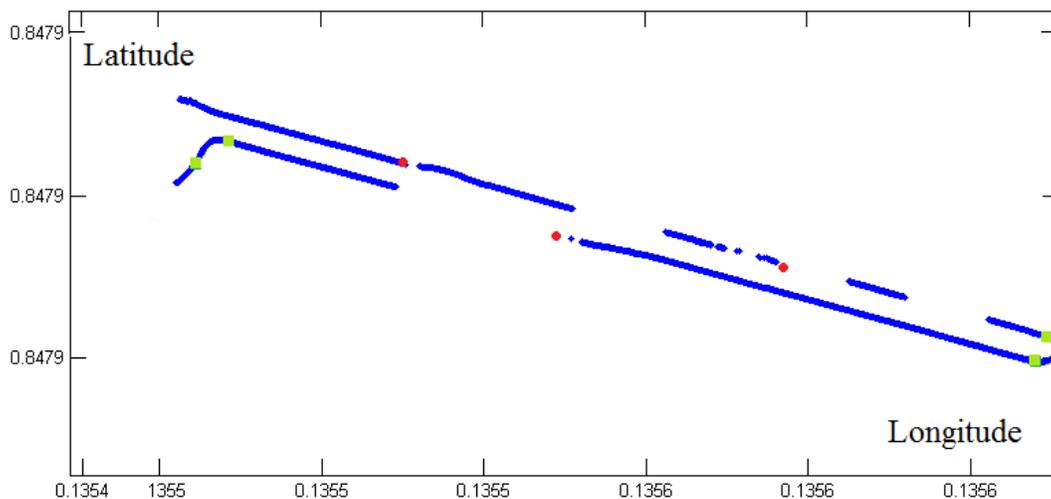


Figure 10.21 Mesures GPS RTK pour l'échantillon étudié. Les points verts présentent le début et la fin du virage et les points rouges présente la jonction entre deux courbes.

Des polynômes continus de septième degré sont utilisés pour reconstruire les parties rectilignes du trajet parcouru. Les deux virages sont reconstitués par une simple densification des mesures

GPS par interpolation linéaire. En effet, moins d'attention est faite aux virages car ils sont totalement couverts par des mesures GPS (moins de masque dans les carrefours). L'attitude est également traitée à l'aide de l'équation de navigation à l'estime. Puis nous avons appliqué l'équation de géoréférencement direct pour obtenir le nuage de points exposé à la figure 10.22.

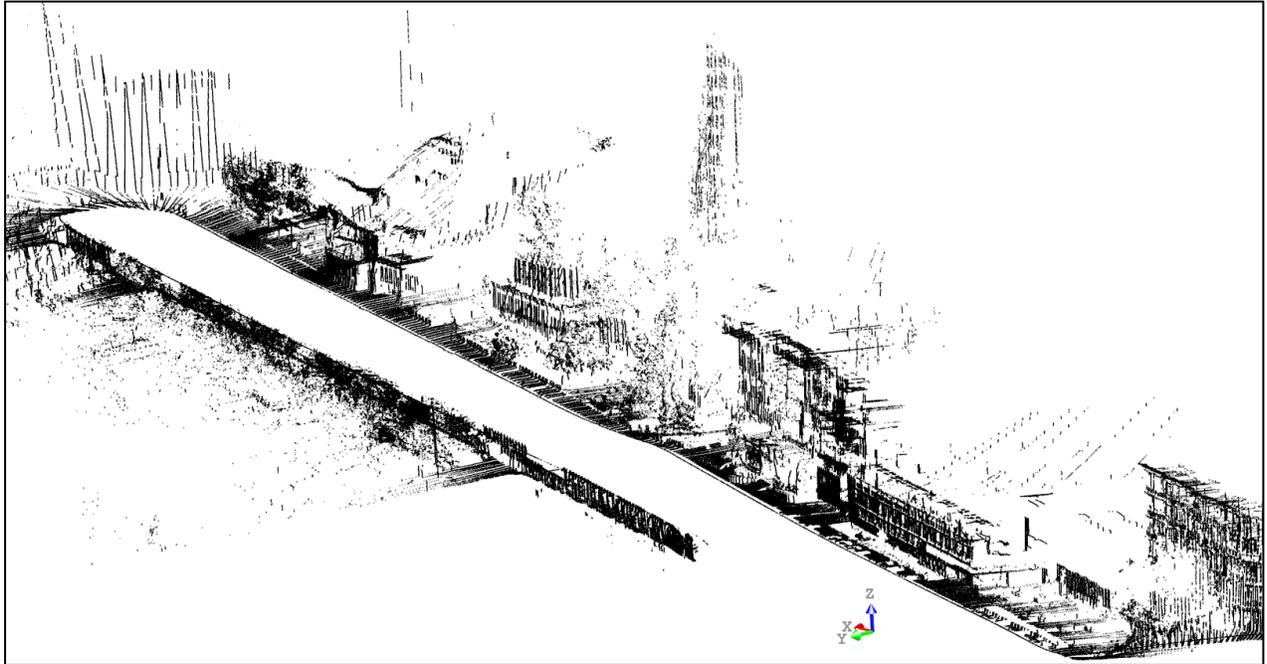


Figure 10.22 Nuage de points acquis à une vitesse moyenne de 12 km/h

Les tests préalables effectués sur les angles de bâtiments et sur les zones balayées à plusieurs reprises (angles droits et auto occlusion) ne font pas apparaître de grosses fautes. Ceci permet de passer aux tests plus exhaustifs pour contrôler l'exactitude du nuage. La validation est faite en comparant le nuage mobile résultant avec un nuage LiDAR (figure 10.23).

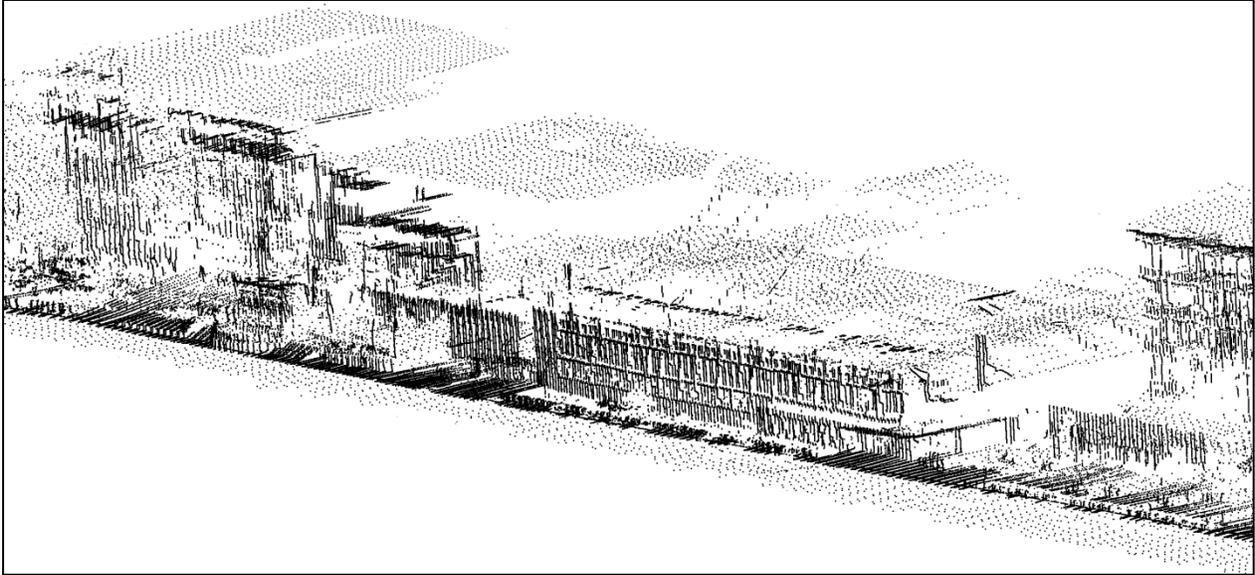


Figure 10.23 Superposition entre le nuage LiDAR et le nuage mobile terrestre

Comme la résolution horizontale du nuage mobile terrestre est égale à 1.27 m en moyenne, la reconnaissance des objets est difficile. Il en va de même pour le nuage LiDAR (1.7 pts/m²). Nous avons recours à la comparaison entre les contours des plans extraits du nuage LiDAR et du nuage mobile terrestre. Les contours sont extraits selon la méthode de la triangulation expliquée plus loin (cf. 12.1.2.2). Des lignes droites sont ajustées ensuite aux points de contour. Un jeu de 11 lignes droites « comparables » est considéré pour la validation d'exactitude du nuage mobile. La figure 10.24 montre quatre lignes comparables car elles présentent théoriquement la même arête.

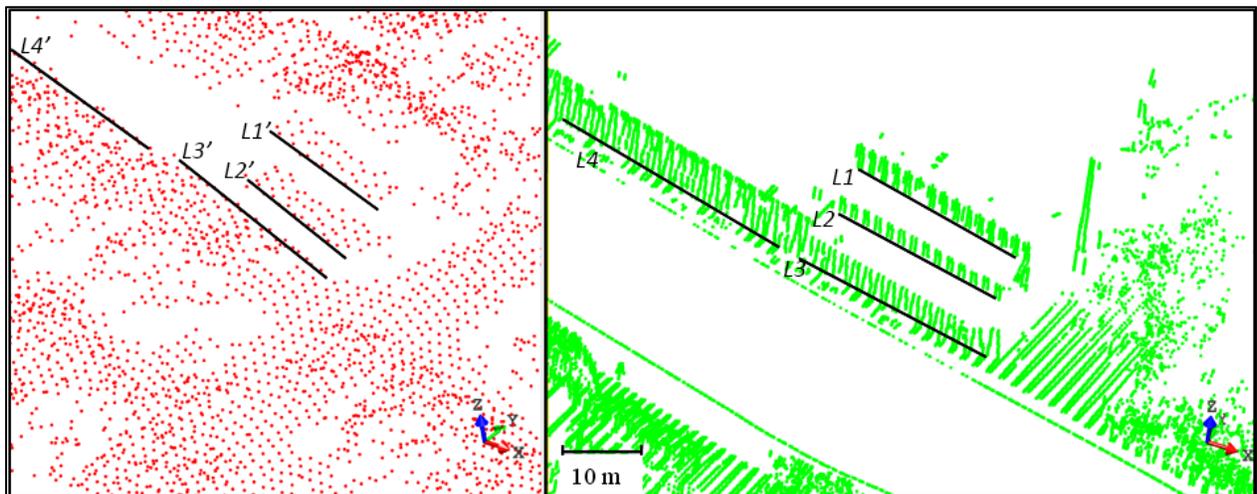


Figure 10.24 Exemple des lignes droites à comparer : nuage LiDAR (en rouge) et nuage mobile terrestre (en vert)

Dans le tableau 10.3, nous montrons les écarts types associés à l'ajustage des lignes droites à chaque jeu de données (LiDAR et terrestre mobile). L'angle entre chaque paire de lignes

comparables est calculé. Puis, l'orientation de la ligne « mobile terrestre » est modifiée de telle manière qu'elle devienne parallèle à la ligne « LiDAR ». Ceci permet ensuite de mesurer la distance entre les deux lignes.

Droite	Ecart-type (LiDAR) (cm)	Ecart-type (mobile terrestre)(cm)	Distance moyenne au trajet (m)	Angle (deg)	Distance (cm)
L1: L1'	35.2	16.1	22.3	1.41	-44.1
L2: L2'	32.1	14.5	18.1	-0.78	51.6
L3: L3'	27.8	10.1	14.3	-0.56	37.1
L4: L4'	21.2	9.6	14.4	-0.46	36.2
L5: L5'	33.1	18.1	27	1.10	-27.9
L6: L6'	34.1	17.2	22.5	1.14	45.8
L6: L6'	31.9	18.2	17.1	1.02	-35.1
L7: L7'	41.1	21.7	24.5	1.61	-40.3
L8: L8'	37.5	19.5	23.1	-0.97	50.8
L9: L9'	28.9	15.6	19.5	-0.89	39.6
L10: L10'	40.3	18.7	23.8	-0.79	40.9
L11: L11'	42.5	19.3	33.8	1.2	-36.6

Tableau 10.3 Ecarts algébriques linéaires et angulaires entre les lignes des arêtes extraites du nuage Lidar et laser terrestre mobile.

La distance mentionnée dans le tableau ci-dessus ne présente pas l'exactitude seule mais aussi l'erreur classique survenue lors de l'extraction des arêtes. En effet, les contours d'un sous-nuage ne présentent pas exactement l'arête physique du plan numérisé par ce nuage. La distance entre les points de contour et l'arête physique est inférieure ou égale à la résolution du nuage de points. Quelque soit la distance entre les couples de droites, elles ne dépassent pas la somme des erreurs théoriques exposées dans 9.4.2 (pour les points de la ligne) et de la résolution des nuages. Les erreurs angulaires ne dépassent non plus la précision de l'attitude calculées comme expliquées en 9.4.1 (page 125).

10.4 Note de conclusion

Nous venons de voir que le système produit des résultats exploitables pour des objets « proches » de la plateforme mobile. Une estimation grossière voire simpliste de la précision du système est de 10 cm à la distance de 10 m. La plupart des façades le long des trajets ne s'éloignent pas plus de 20 m ce qui fournit des parties exploitables des nuages mobiles avec des précisions inférieures à 20 cm.

La confrontation entre la précision et l'exactitude montre que la réalité est plus optimiste que l'estimation théorique. Ceci est dû à l'efficacité du filtrage appliqué sur la position, la vitesse et l'attitude qui dépasse les prévisions de la loi de propagation des erreurs.

Partie 4. Les solutions futures

11. L'apport de la photogrammétrie à la navigation

D'après les calculs et les expériences présentés dans les chapitres précédents, le système ne produit pas des données géométriques à précision centimétrique avec les capteurs embarqués. Ceci limite son utilisation à un domaine étroit d'applications comme la connaissance des motifs prédéfinis et la division des volumes. Le présent chapitre a pour but l'amélioration de la précision en ajoutant un autre capteur à la plateforme mobile : un appareil photo numérique. Nous précisons que l'appareil photo fonctionne principalement comme un capteur de position et d'attitude et secondairement comme capteur imageur. Les étapes nécessaires pour mettre en œuvre l'appareil sont expliquées. Néanmoins, les points communs avec le laser qui concernent la synchronisation, la calibration, et le georéférencement direct sont abordés brièvement par souci d'éviter toute répétition. La solution photogrammétrique par ajustement de bande assistée par GPS, INS et par TLS est détaillée. Enfin, la méthode pour intégrer les résultats du calcul de bande dans l'intégration GPS/INS et TLS est exposée. Le schéma suivant illustre les étapes principales de la solution proposée.

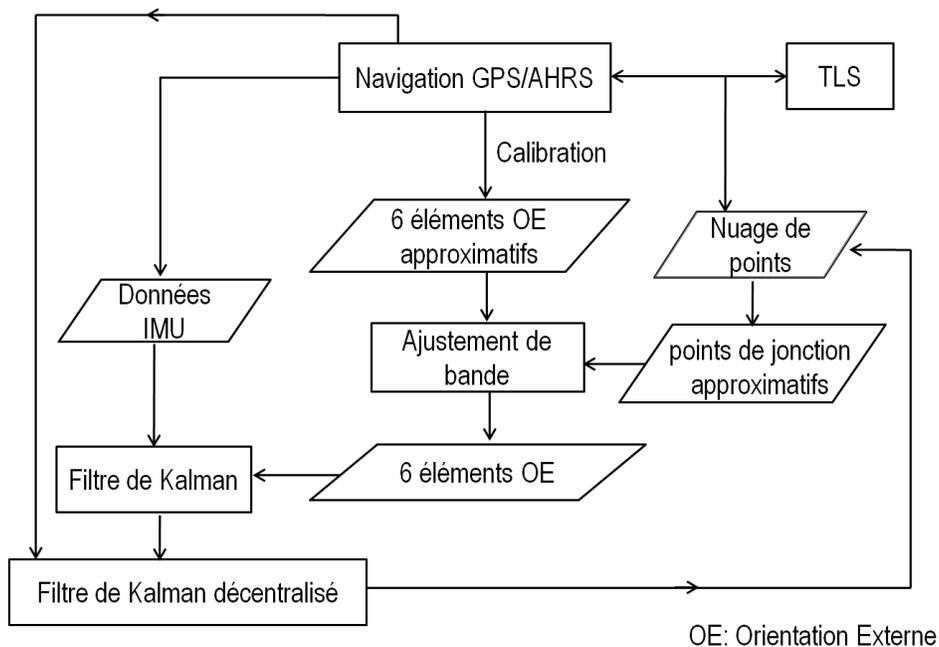


Figure 11.1 Organigramme de la solution photogrammétrique proposée

11.1 L'appareil photo utilisé

Un appareil photo numérique de marque Canon EOS 5D est utilisé. Il est muni d'un mode de prise de vues en chaîne totalement commandé par un logiciel de pilotage (Remote Capture) installé sur l'ordinateur mobile embarqué. La capacité mobile de cet appareil est due à la haute cadence de prises de vue automatiques (jusqu'à 1 photo/s), à la vitesse élevée d'obturation et à la stabilisation gyroscopique des groupes de lentilles contre la vibration. Bien que l'appareil puisse fournir une résolution de 4368×2912 pixels, nous nous contentons d'une résolution de 2496×1664 pour des raisons de stockage, de transfert en temps réel et de facilité de traitement. L'intervalle temporel entre deux déclenchements successifs des prises de vue est choisi en fonction de la vitesse de déplacement et de telle manière qu'il puisse garantir un recouvrement suffisant pour le calcul de la bande de photo.

11.2 La synchronisation

Contrairement au scanner laser, l'appareil photo est pourvu d'une horloge interne avec une résolution d'une milliseconde ce qui facilite énormément la tâche de l'horodatage. Le logiciel du pilotage de l'appareil permet une synchronisation parfaite avec l'horloge interne de l'ordinateur. Etant donné que la précision de la milliseconde n'est pas nécessaire pour la plupart des applications photographiques, elle n'est pas affichée dans l'entête descriptif « EXIF » correspondant à chaque photo.

L'information de temps est enregistrée dans le format brut de la photo dont les clés de décryptage sont disponibles¹⁴. Il faudrait donc acquérir les photos dans ce format pour disposer de l'étiquette temporelle à une milliseconde près selon l'horloge de l'appareil (ou de l'ordinateur maintenu synchronisé). D'autre part, les systèmes d'exploitation enregistrent la date de création des photos avec une précision d'une milliseconde. Pour récupérer les millisecondes cachées, nous avons utilisé une application VB avec l'instruction 'GetFileTime' comme indiqué dans la figure 11.2. Un simple test peut se faire au laboratoire en photographiant une horloge défilant sur l'écran de l'ordinateur. Après le contrôle de plusieurs fichiers, on peut noter que le temps réel de chaque prise de vue est assez similaire au temps donné par l'applicatif VB créé. On peut en déduire que lorsque le logiciel de pilotage ordonne de prendre une photographie, Windows va créer automatiquement un fichier vide pour stocker les prises de vue. Cette constatation permet de substituer l'horodatage existant dans le fichier brut volumineux par l'horodatage de l'ordinateur et par conséquent de travailler avec des petits fichiers.

¹⁴ http://www.sno.phy.queensu.ca/~phil/exiftool/canon_raw.html

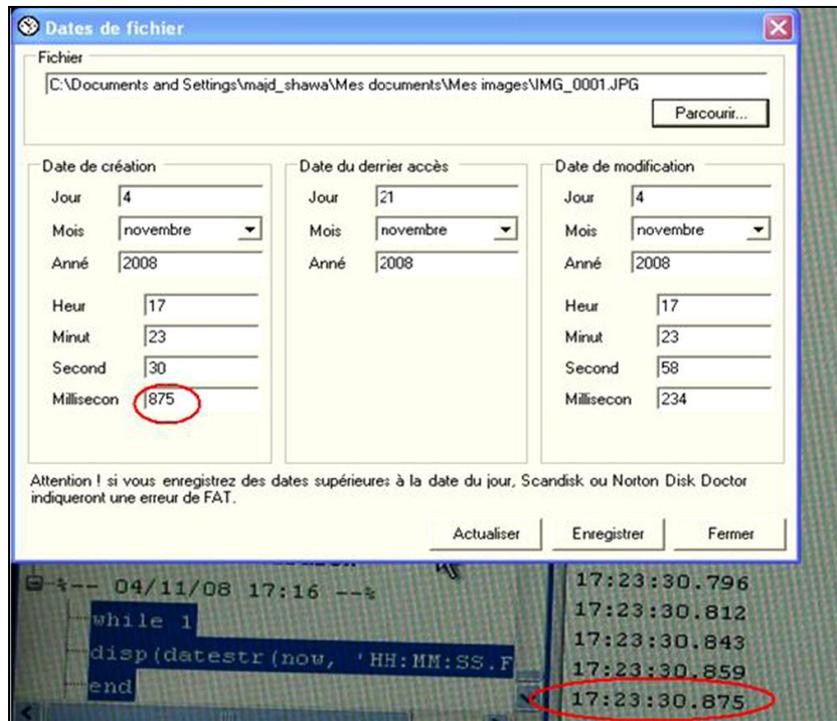


Figure 11.2 Comparaison entre le temps réel de prise de vue lu directement sur la photo et le temps d'enregistrement récupéré de Windows®

11.3 La calibration

Le terme « calibration » englobe toutes les opérations indispensables pour déterminer les constantes nécessaires pour effectuer l'orientation interne et externe des photos acquises par le système. Les paramètres d'orientation interne (coordonnées du point principal, focale, distorsion de la lentille) peuvent être mesurés en laboratoire.

Les éléments d'orientation externe (X_L , Y_L , Z_L , ω_c , ϕ_c , κ_c) varient rapidement et leur évolution doit être suivie et liée aux mesures du GPS et de l'INS en temps réel. Pour ce faire, les excentricités linéaires et angulaires doivent être calculées et sauvegardées comme paramètres du système pour autant que la rigidité soit maintenue. Nous allons plutôt nous intéresser à ce type de calibration qui est en relation avec le contexte de la cartographie mobile.

Au contraire des excentricités angulaires, les excentricités linéaires a^b peuvent être mesurées facilement dans le repère du chariot par des méthodes tachéométriques. On utilise la technique photogrammétrique du relèvement spatial pour déterminer les excentricités angulaires. Il faut prendre une photo pour une zone de calibration munie des points d'ajustage précis et uniformément répartis. On peut utiliser un objet balayé avec une densité élevée par le scanner en mode fixe en tant que mire de calibration (figure 11.3). Le système doit être placé à emplacement fixe dans des conditions idéales d'acquisition GPS.



Figure 11.3 Calibration à partir d'un nuage de points dense et d'une photo

Le relèvement spatial produit les éléments d'orientation externe qui sont à comparer avec les valeurs moyennées d'attitude et de position fournies par l'AHRIS. Les valeurs approchées du relèvement spatial par les moindres carrés peuvent être déduites du montage montré sur la figure 11.4:

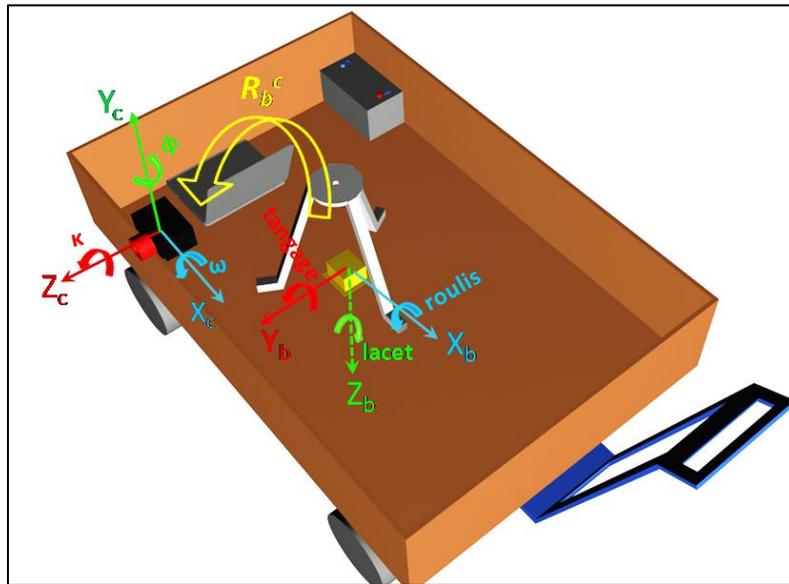


Figure 11.4 Relation entre les repères de l'appareil photo et de l'AHRIS

Les valeurs approchées des éléments d'orientation externe sont considérés comme suit :

$$\begin{aligned}
 X_{L0} &= X_{GPS}, Y_{L0} = Y_{GPS}, Z_{L0} = Z_{GPS} - a_z^b \\
 \omega_{c0} &= \text{roulis} + \pi/2, \phi_{c0} = -\text{lacet}, \kappa_{c0} = \text{tangage}
 \end{aligned}
 \tag{11.1}$$

où a_z^b : composante verticale du vecteur de l'excentricité linéaire a^b .

$\omega_{c0}, \phi_{c0}, \kappa_{c0}$: angles d'Euler (excentricités angulaires) composant la matrice R_c^b .

Les corrections apportées par la solution itérative sont ajoutées à ces valeurs approchées. On peut aussi obtenir la matrice de rotation R_c^g du référentiel de l'appareil au référentiel géodésique. La matrice des excentricités angulaires R_c^b est donnée par la relation :

$$R_c^b = R_c^g \cdot R_b^{g^{-1}} \quad 11.2$$

Le schéma 11.5 résume la procédure permettant de déduire les constantes de calibration du système.

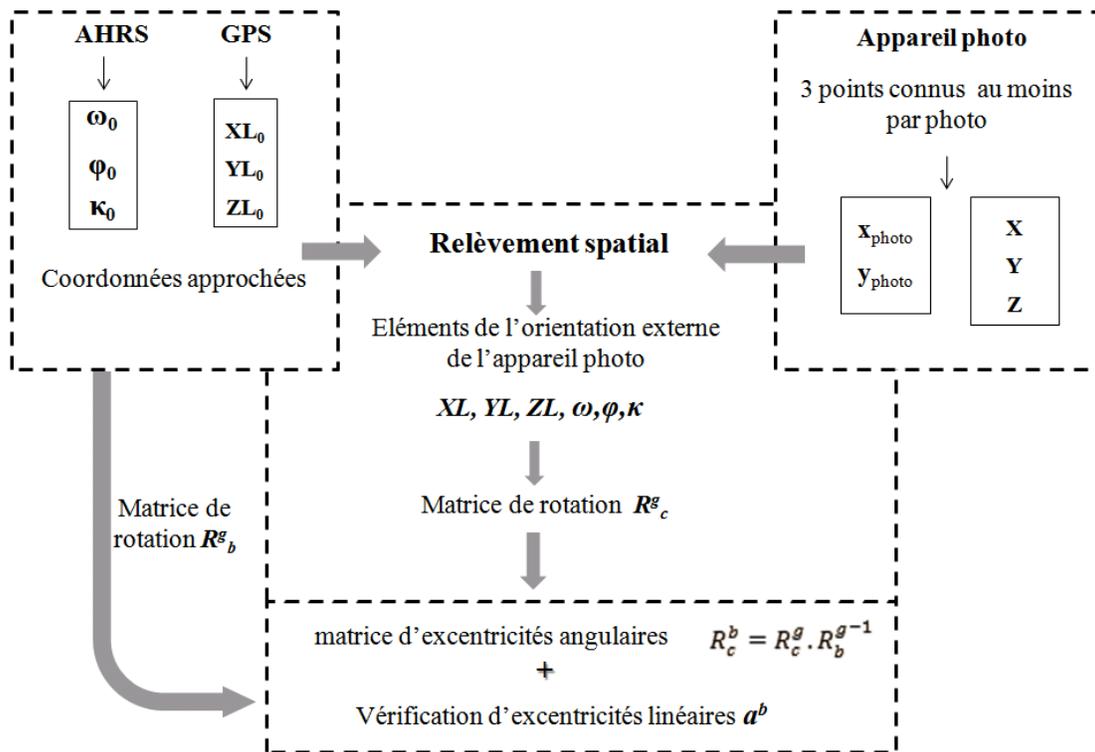


Figure 11.5 Diagramme illustrant les opérations nécessaires pour réaliser la calibration de l'appareil photo dans le système mobile.

11.4 Le géoréférencement direct

L'équation du géoréférencement direct d'une photo est similaire à celle du laser. En revanche, il n'est pas possible de déterminer les coordonnées d'un point en connaissant ses coordonnées photos, ce qui n'est pas le cas pour le laser. Ce problème, classique en photogrammétrie, est dû au fait que la mesure du rapport entre la taille du pixel et l'aire qu'il occupe sur l'objet est inconnue. Ce facteur d'échelle est désigné s_p dans la formulation mathématique suivante :

$$r_p^g(t) = r_{GPS}^g(t) + R_b^g(t)[a^b + s_p R_c^g r_p^c(t)] \quad 11.3$$

avec t : instant précis de la prise de vue.

r_p^g : vecteur des coordonnées du point p dans le référentiel géodésique

r_{GPS}^g : vecteur des coordonnées du GPS dans le repère géodésique

r_p^c : vecteur des coordonnées du point p dans le repère de l'appareil photo

$$r_p^c = [x_p - x_0 \quad y_p - y_0 \quad -f]^T \quad 11.4$$

x_p, y_p : coordonnées photos du point p

x_0, y_0, f : coordonnées du point principal et la distance focale (issues de la calibration)

s_p : facteur d'échelle entre le référentiel photo et le référentiel géodésique (objet) propre à chaque photo et à chaque point. Il est typiquement mesuré par des techniques stéréoscopiques où à l'aide d'un modèle numérique du terrain dans le cas aéroporté. Dans le cas terrestre, la solution stéréoscopique est préférée notamment pour les systèmes équipés de couples d'appareils photos.

Bien qu'on ne compte pas, dans le prototype actuel, calculer les coordonnées du nuage de points à partir du modèle photogrammétrique, il faut en calculer quelques unes : celles des points de jonctions entre les photos. Le prochain paragraphe est consacré à ces calculs photogrammétriques et lasergrammétriques.

11.5 Calcul des coordonnées approchées

Pour pouvoir réaliser le calcul de bande décrit plus loin dans ce chapitre, il est indispensable d'avoir des coordonnées approchées tridimensionnelles pour les points homologues entre la chaîne des photos acquises en mode mobile. Il est possible de déduire ces coordonnées dans un repère relatif par des ajustements consécutifs des couples. On peut ainsi effectuer l'ajustement simultané des photos dans un espace totalement relatif (Wolf et Dewitt, 2000). La solution est recalée à l'espace objet à l'aide des positions de l'appareil photo mesurées par GPS. Ce choix n'est pas adopté dans cette recherche car il n'incorpore pas les angles mesurés par l'AHRS dans la solution.

La solution automatique présentée dans cette thèse bénéficie du fait que l'appareil photo est conjugué avec un TLS. Elle se base, toutefois, sur une hypothèse vraisemblablement satisfaite par la configuration et par le mode d'emploi du système : les points homologues se trouvent dans la fauchée couverte par le balayage laser et la densité du balayage permet de trouver un point laser 'proche' de ces points dans le repère objet (géodésique). On résume les étapes de cette méthode par ce qui suit :

1. Etablissement d'équation du rayon passant par le point principal et par le point mesuré sur la photo dans un repère tridimensionnel de l'appareil photo : cette étape dépend uniquement des paramètres d'orientation interne. L'équation de la ligne droite recherchée est :

$$\begin{pmatrix} x_i^c \\ y_i^c \\ z_i^c \end{pmatrix} = \lambda \cdot \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{pmatrix} \quad 11.5$$

où λ est une variable (ou facteur d'échelle) déterminant la position d'un point i sur la ligne.

On peut autrement exprimer la ligne par les coordonnées de l'origine f et le vecteur de direction $v = (x_p \ y_p \ -f)^T$

2. Transformation de l'équation de la droite en repère géodésique g : la transformation se fait en faisant subir au point principal une translation T_l et au vecteur direction une rotation R_l . On peut calculer ces deux valeurs à partir de l'équation du géoréférencement direct (11.3) comme suit :

$$\begin{aligned} T_l &= r_{GPS}^g(t) + R_b^g(t) \cdot a^b \\ R_l &= R_b^g(t) \cdot R_c^g \end{aligned} \quad 11.6$$

D'où l'équation de la ligne qui s'écrit :

$$\begin{pmatrix} x_i^c \\ y_i^c \\ z_i^c \end{pmatrix} = T_l + R_l \lambda \cdot \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{pmatrix} \quad 11.7$$

3. Détermination du point laser le plus proche de cette droite : pour éviter la recherche dans la totalité du nuage de points, on calcule une valeur moyennée du facteur d'échelle

$$s_{pm} = H/f \quad 11.8$$

où H est la valeur moyenne de la distance entre l'appareil photo et les façades balayées. On peut, par la suite, substituer cette valeur dans l'équation du géoréférencement direct 11.3 pour obtenir une approximation grossière de la position du point mesuré sur la photo. Les points laser qui se trouvent dans un voxel de quelques mètres (selon la complexité des façades balayées) forment le noyau concerné par le calcul. La distance entre chaque point laser j appartenant à ce noyau et la ligne modélisée auparavant est donnée par la relation :

$$d_j = \frac{\text{norme} [(R_l \cdot (x_p \ y_p \ -f)^t) \otimes (T_l - r_j)]}{\text{norme} (R_l \cdot (x_p \ y_p \ -f)^t)} \quad 11.9$$

avec : r_j vecteur position du point laser j dans le repère géodésique.

Les coordonnées du point ayant la distance minimale sont considérées comme les coordonnées-objets approchées du point mesuré sur la photo. Il est toujours utile de considérer les 4 points les plus proches au rayon considéré. Si les quatre points sont rapprochés (la distance entre eux est de même ordre de grandeur que la densité du nuage), on peut prendre la moyenne arithmétique. Dans le cas contraire, le rayon s'intersecte plus d'une fois avec le nuage laser. Dans ce cas, il faut prendre les coordonnées du point le plus proche de l'appareil photo.

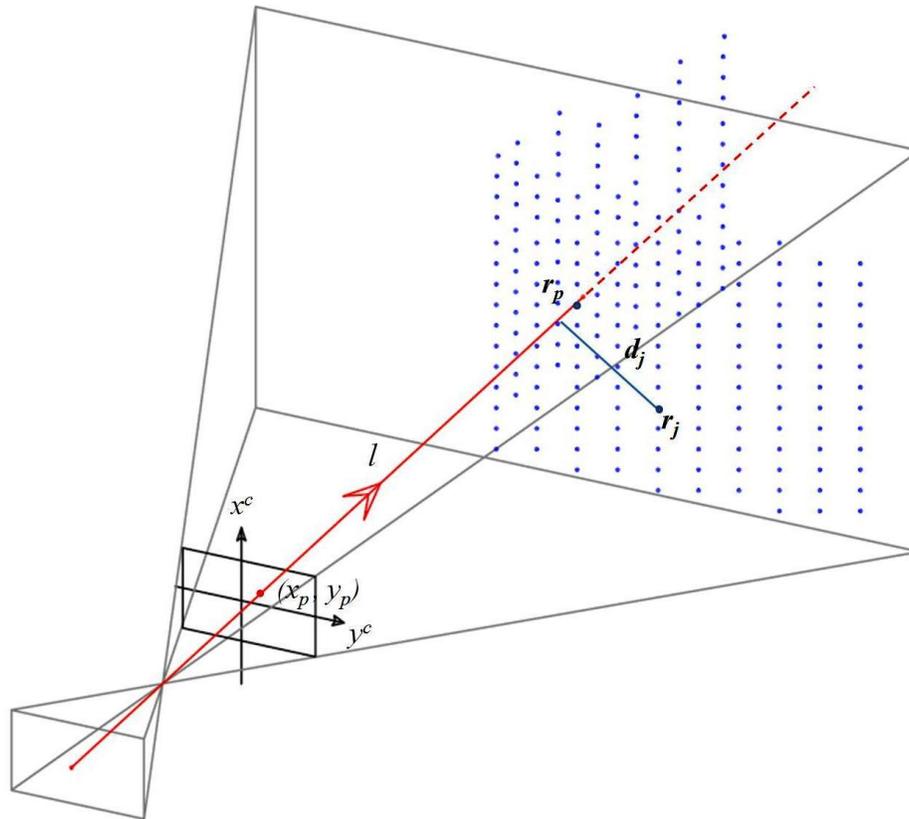


Figure 11.6 Calcul des coordonnées approchées pour un point mesuré sur la photo

La méthode décrite plus haut nous fait éviter la modélisation du nuage de points dans l'objectif de projeter la photo sur des surfaces modélisées, ce qui est la solution générale en couplage lasergrammétrique-photogrammétrique. Du plus, elle peut fournir des coordonnées pour des points reconnaissables sur les photos et non-reconnaissables dans le nuage.

11.6 Calcul en bloc de la bande de photos

Le calcul de bande exposé dans ce paragraphe possède quelques particularités. Pour pouvoir mieux appréhender, on énumère les entrées disponibles et les sorties recherchées :

- Des coordonnées des points mesurés (observés) sur les photos (entrée)
- Éléments d'orientation externe des photos observées (entrée)
- Éléments d'orientation externe des photos inconnues (sortie)

Les coordonnées approchées obtenues par la méthode expliquée ci-dessus ne peuvent pas être considérées comme des observations déduites des observations des éléments d'orientation externe ce qui risque d'introduire une dépendance dans le calcul. Les coordonnées-objets (géodésiques) des points homologues ne font pas partie des variables recherchées. Pourtant, il est nécessaire de développer leurs valeurs au fur et à mesure du calcul itératif. En conséquence, on peut les ajouter aux inconnues recherchées. On peut ainsi résumer les équations à résoudre en deux catégories:

- Les équations de colinéarité : une paire d'équations pour chaque point dans chaque photo. On peut écrire ces équations sous forme d'erreur entre les valeurs calculées et mesurées comme suit :

$$F_x = x_j - x_0 + f \frac{r_{11} (X_j - X_L) + r_{12} (Y_j - Y_L) + r_{13} (Z_j - Z_L)}{r_{31} (X_j - X_L) + r_{32} (Y_j - Y_L) + r_{33} (Z_j - Z_L)} \quad 11.10$$

$$F_y = y_j - y_0 + f \frac{r_{21} (X_j - X_L) + r_{22} (Y_j - Y_L) + r_{23} (Z_j - Z_L)}{r_{31} (X_j - X_L) + r_{32} (Y_j - Y_L) + r_{33} (Z_j - Z_L)}$$

où x_j, y_j : sont les coordonnées photo mesurées pour le point j .
 X_i, Y_i, Z_i sont les coordonnées objet approchées du point j .
 $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}$ les éléments de la matrice de rotation $R_{c(\omega, \varphi, \kappa)}^g$

- Les équations d'observation des éléments d'orientation externe : on peut également écrire ces équations sous forme d'erreur comme suit :

$$\begin{aligned} G_{X_L} &= X_L^{observé} - X_L \\ G_{Y_L} &= Y_L^{observé} - Y_L \\ G_{Z_L} &= Z_L^{observé} - Z_L \\ G_{\omega} &= \omega^{observé} - \omega_c \\ G_{\varphi} &= \varphi^{observé} - \varphi_c \\ G_{\kappa} &= \kappa^{observé} - \kappa_c \end{aligned} \quad 11.11$$

Pour une photo i sur laquelle un point j est mesuré, l'équation linéarisée d'observation peut être écrite sous forme matricielle pour chaque photo comme suit :

$$\begin{pmatrix} J_{oe} & J_{coord} \\ -I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 3} \end{pmatrix}_{8 \times 9} \cdot \begin{pmatrix} \Delta_{oe} 6 \times 1 \\ \Delta_{coord} 3 \times 1 \end{pmatrix}_{9 \times 1} = \begin{pmatrix} F \\ G \end{pmatrix}_{8 \times 1} \quad 11.12$$

avec : J_{par} matrice des dérivées partielles du premier type d'équation (11.10) par rapport aux paramètres de l'orientation externe :

$$J_{oe} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial X_L} & \frac{\partial F_x}{\partial Y_L} & \frac{\partial F_x}{\partial Z_L} & \frac{\partial F_x}{\partial \omega} & \frac{\partial F_x}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_x}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial F_y}{\partial X_L} & \frac{\partial F_y}{\partial Y_L} & \frac{\partial F_y}{\partial Z_L} & \frac{\partial F_y}{\partial \omega} & \frac{\partial F_y}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} \end{pmatrix} \quad 11.13$$

J_{coord} : matrice des dérivées partielles de l'équation 11.10 par rapport aux coordonnées du point j .

$$J_{coord} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial X_j} & \frac{\partial F_x}{\partial Y_j} & \frac{\partial F_x}{\partial Z_j} \\ \frac{\partial F_y}{\partial X_j} & \frac{\partial F_y}{\partial Y_j} & \frac{\partial F_y}{\partial Z_j} \end{pmatrix} \quad 11.14$$

F, G : matrices d'erreurs

$$F = (-F_x \quad -F_y)^T \quad 11.15$$

$$G = (G_{X_L} \quad G_{Y_L} \quad G_{Z_L} \quad G_\omega \quad G_\varphi \quad G_\kappa)^T \quad 11.16$$

$\Delta_{oe}, \Delta_{coord}$: vecteurs des corrections des éléments d'orientation externe et des coordonnées objet respectivement

$$\Delta_{oe} = (\delta X_L \quad \delta Y_L \quad \delta Z_L \quad \delta \omega_c \quad \delta \varphi_c \quad \delta \kappa_c)^T \quad 11.17$$

$$\Delta_{coord} = (\delta X \quad \delta Y \quad \delta Z)^T$$

Après avoir mis l'ensemble des équations pour tous les points et toutes les images sous forme matricielle :

$$B \cdot \Delta = l \quad 11.18$$

La solution par les moindres carrés est donnée par :

$$\Delta = (B^T W B)^{-1} (B^T W l) \quad 11.19$$

avec $W_{6 \times 6}$ la matrice des poids pour les éléments d'orientation externe résultant de l'intégration GPS/AHRS (cf. 5.4.2.3 page 60 et 9.4.1 page 125). Elle est constituée des blocs diagonaux des matrices W_i :

$$W_i = P_{k=i}^{-1} \quad 11.20$$

où P est la matrice de covariance résultant du filtre de Kalman à l'instant k où la photo i est réalisée.

A chaque itération, on calcule les corrections Δ et on les additionne aux valeurs initiales. Dans le cas où les mesures GPS/AHRS assurent de bonnes approximations des éléments d'orientation externe, quelques itérations seront suffisantes pour converger. Néanmoins, on fixe le nombre minimal d'itérations à deux pour pouvoir tester la convergence de l'algorithme.

Finalement, les résidus v sont calculés comme suit :

$$v = B \cdot \Delta - f \quad 11.21$$

Ils permettent également de calculer le facteur d'écart type appelé « l'écart type de l'unité du poids » :

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{v^t W^{-1} v}{ne - nu}} \quad 11.22$$

où ne est le nombre d'équations. En effet, chaque point homologue mesuré fournit deux équations sur chaque photo. De plus, on possède six équations pour les mesures des éléments d'orientation externe pour chaque photo.

La matrice de covariance qui sera utilisée plus tard pour l'intégration photo/GPS/AHRS est donnée par la relation :

$$\Sigma_p = \sigma_0^2 (BWB)^{-1} \quad 11.23$$

Le nombre des inconnues nu est égal aux éléments d'orientation externe de toutes les photos augmenté d'un triplet des coordonnées-objets inconnues pour chaque point homologue. Il est nécessaire de vérifier que $ne > nu$ avant d'entamer le calcul.

Les angles déduits par le calcul photogrammétrique forment la matrice de rotation du repère de l'appareil photo vers le repère géodésique R_c^g . Elle doit être transformée en matrice comparable avec celle mesurée par l'AHRs afin de l'intégrer aux éléments de la trajectométrie :

$$R_b^{gphoto} = R_c^g \cdot R_b^{g-1} \quad 11.24$$

où R_b^{gphoto} : matrice de rotation du repère de l'AHRs vers le repère géodésique mesurée par la triangulation (et non par l'AHRs).

11.7 L'intégration GPS/AHRS/photo

Du point de vue technique, l'intégration des résultats d'ajustement de bande avec les éléments de trajectométrie n'est pas de même nature que l'intégration GPS/AHRS abordée précédemment (cf. 9.4.1 page 125). L'intégration GPS/AHRS se fait en temps réel avec une fréquence de corrections GPS à 4Hz quand il verrouille sur des positions valides. L'apport du GPS à la navigation inertielle provient de la position et de la vitesse mesurées qu'on appelle le vecteur des corrections ou des mesures. Par ailleurs, on adopte le filtre de Kalman embarqué dans le microprocesseur de l'AHRs sans connaître tous les détails de l'algorithme utilisé.

L'apport de la photogrammétrie provient également de la position et de l'attitude calculées en post-traitement. La fréquence de la mesure est beaucoup plus faible que celle du GPS mais sans interruption. De plus, on maîtrise bien toutes les étapes du calcul.

Le cas décrit plus haut évoque directement l'utilisation du filtre de Kalman décentralisé (Brown et Hwang, 1997). Deux filtres locaux seront combinés avec une simple procédure. Le premier est celui du GPS/AHRS abordé dans le chapitre précédent et l'autre est une intégration photo/INS. La contribution des magnétomètres est omise pour le deuxième filtre à cause de la précision insuffisante à ce stade de raffinement de la trajectométrie. Le vecteur d'état est défini de la même manière que l'équation 5.23 (page 60). Néanmoins le modèle mathématique d'observation sera formé comme suit :

$$Z_{2k} = \begin{pmatrix} r_{x_{INS}} - r_{x_{photo}} \\ r_{y_{INS}} - r_{y_{photo}} \\ r_{z_{INS}} - r_{z_{photo}} \\ \phi_{INS} - \omega_c \\ \theta_{INS} - \varphi_c \\ \psi_{INS} - \kappa_c \end{pmatrix} \quad 11.25$$

$$H_{2k} = \begin{pmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{pmatrix} \quad 11.26$$

$$R_{2k} = \Sigma_p \quad 11.27$$

où : Z_{2k} : vecteur d'observation ; l'indice « 2 » distingue le deuxième filtre local.

$$H_{2k} = \frac{\partial Z_k}{\partial p} : p \in x_{2k} \quad 11.28$$

R_{2k} : matrice de bruit de mesures (il est possible à titre de simplification de considérer que : $R_{2k} = \text{diag}(\Sigma_p)$)

r_x, r_y, r_z : les coordonnées cartésiennes des points des prises de vues (en coordonnées WGS84 en l'occurrence)

La boucle de prédiction tourne à une fréquence égale au taux d'échantillonnage de l'AHRS, alors que la boucle de correction tourne à la fréquence des prises de vue. En fin de chaque mise à jour faite par les deux filtres individuels, on calcule le vecteur d'état $\hat{x}_{k_d}^+$ et la matrice de covariance $P_{k_d}^+$ fusionnés. La fusion entre les estimations résultant des deux filtres (GPS/AHRS, INS/photo), à chaque instant k , se fait à l'aide des deux équations suivantes (Wei and Schwarz, 1990):

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k_d}^+ &= P_{k_d}^+ \left[P_{k_d}^{-1} \hat{x}_{k_d}^- + \left(P_{1k}^{+1} \hat{x}_{1k}^+ + P_{2k}^{+1} \hat{x}_{2k}^+ \right) - \left(P_{1k}^{-1} \hat{x}_{1k}^- + P_{2k}^{-1} \hat{x}_{2k}^- \right) \right] \\ P_{k_d}^{+1} &= P_{k_d}^{-1} + \left(P_{1k}^{+1} - P_{1k}^{-1} \right) + \left(P_{2k}^{+1} - P_{2k}^{-1} \right) \end{aligned} \quad 11.29$$

où l'indice d désigne le filtre décentralisé.

Nous n'avons pas choisi de retourner (feedback) le vecteur d'état $\hat{x}_{k_d}^+$ et la matrice de covariance $P_{k_d}^+$ à chaque filtre individuel à cause de la non maîtrise totale du filtre GPS/AHRS.

11.8 Expérimentation

L'exemple exposé ci-dessous montre un trajet parcouru à une vitesse moyenne de 0.56 m/s (environ 2km/h). Les photos sont prises toutes les 5 sec ce qui assure un recouvrement supérieur à 50%. La figure 11.7 illustre un panorama reconstitué à partir de 8 photos acquises par le système.



Figure 11.7 Reconstitution panoramique à partir de 8 photos acquises par l'appareil Canon EOS 5D en mode mobile (objectif 28mm)

L'échantillon traité contient 12 photos couvrant une étendue de numérisation de 40m. La distance plateforme-façade est estimée à 14m.

11.8.1 Traitement du trajet

La longueur du trajet total parcouru est égale à 130m. Le GPS RTK souffre d'une absence du signal de 90 sec pendant les prises de vues de la série de photos considérée. En revanche le GPS à haute sensibilité ne montre aucune interruption de mesure. En figure 11.8 on montre que le trajet acquis par le HSGPS Ublox[®] est décalé vers le trajet acquis par le DGPS RTK Leica[®]. Les positions de l'appareil photo sont reportées à partir des coordonnées HSGPS recalées en fonction des informations de synchronisation.

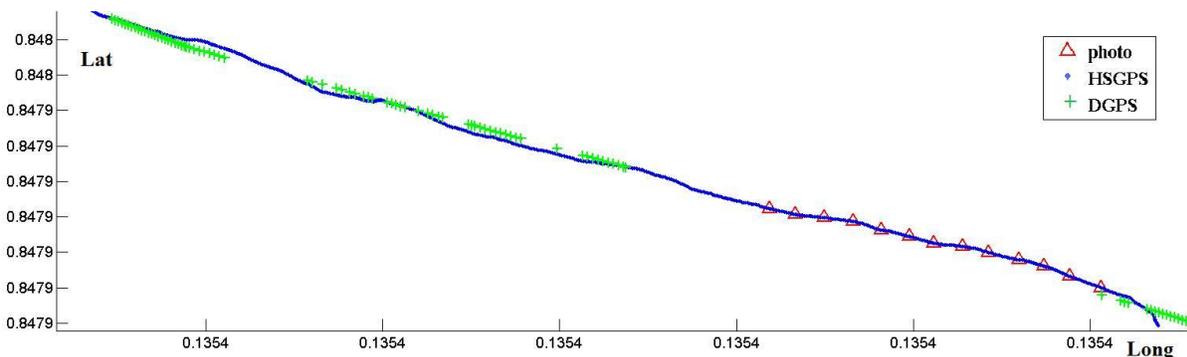


Figure 11.8 Coordonnées du trajet total parcouru (HSGPS en bleu, DGPS en vert et stations de prises de vue en rouge)

Après avoir affiné les coordonnées par la méthode d'ajustement pondéré des polynômes (cf. 8.1.2 page 108), on peut tracer les positions des prises de vues (figure 11.9).

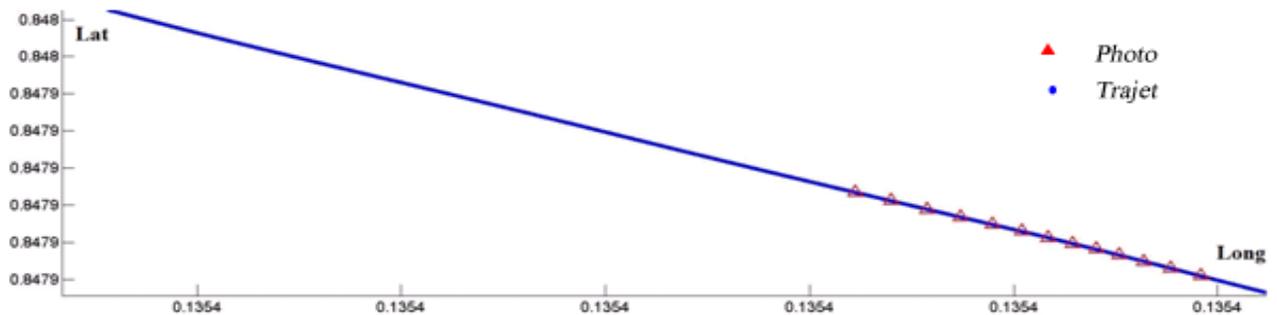


Figure 11.9 Trajet déduit par un ajustement d'une courbe de neuvième degré

11.8.2 Premier calcul du nuage de points

On entend par « premier calcul » le traitement sans prise en compte des opérations photogrammétriques. L'application de l'équation de géo-référencement direct « laser » fournit le nuage de la figure 11.10. La résolution horizontale de ce nuage est estimée à 15 cm.

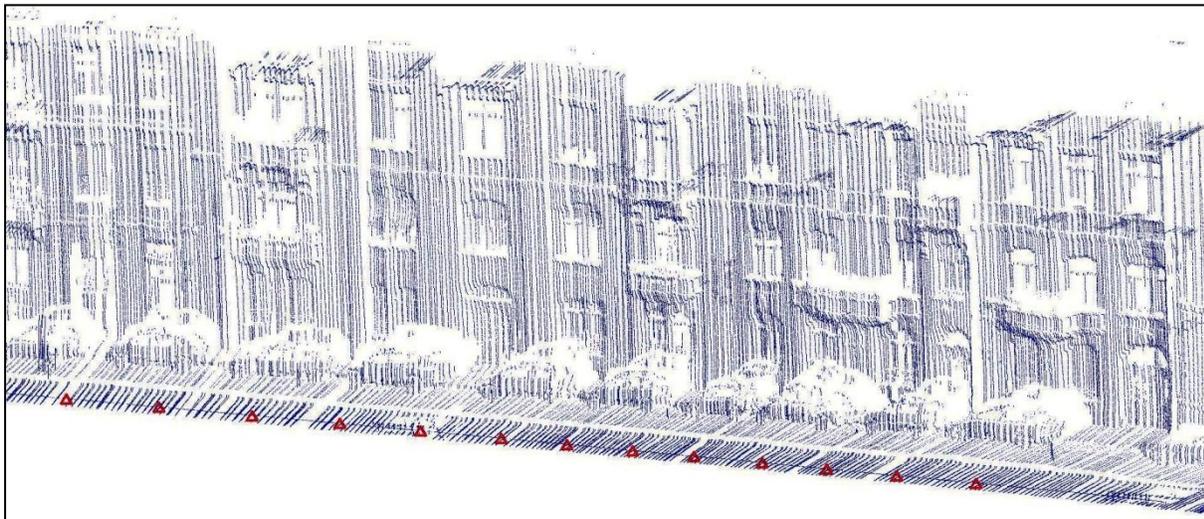


Figure 11.10 Nuage de points correspondant à l'étendue des photos étudiées (positions des prises de vue en rouge)

11.8.3 Le calcul photogrammétrique

La bonne superposition entre les photos a permis de trouver des points communs entre les triplets des photos en moyenne. 70 points sont mesurés ce qui permet d'avoir 420 équations à 282 inconnues (138 degrés de liberté). Les coordonnées- objets approchées des points sont extraites d'après la méthode du paragraphe 11.5. La précision de ces coordonnées est considérée égale à la résolution horizontale du nuage (de l'ordre de 15 cm).

Les écarts entre les éléments de trajectométrie mesurés par l’AHRS et ceux déduits du calcul photogrammétrique sont égaux aux écarts entre les valeurs approchées et finales. Le tableau 13.1 représente les valeurs de ces écarts qui jouent le rôle de corrections pour le filtre de Kalman.

photo	$\Delta x \text{ cm}$	$\Delta y \text{ cm}$	$\Delta z \text{ cm}$	$\Delta \text{roulis deg}$	$\Delta \text{tangage deg}$	$\Delta \text{lacet deg}$
1	-1,09	0,29	-0,77	0,051	0,058	1,26
2	-2,42	1,03	-1,83	0,101	0,111	0,72
3	-1,08	0,34	-2,46	0,123	0,005	0,81
4	-0,93	0,23	-1,97	0,106	0,003	0,34
5	-1,72	0,59	-2,68	0,125	0,007	0,04
6	0,13	-0,47	-2,92	0,126	-0,093	-0,20
7	0,85	-1,17	-2,35	0,106	-0,139	-0,59
8	1,67	-1,29	-2,13	0,084	-0,138	-0,74
9	1,49	-1,32	-2,03	0,091	-0,156	-0,66
10	1,47	-0,55	-2,00	0,087	-0,105	-1,15
11	2,39	-1,47	-1,94	0,096	-0,194	-1,34
12	1,88	-1,49	-1,13	0,070	-0,180	-1,05

Tableau 11.1 Ecart des éléments d’orientation externe (AHRS - photo)

Le caractère aléatoire des écarts confirme l’absence de fautes de synchronisation et de calibration. En revanche, la dégradation des erreurs d’angle de cap de positif au négatif correspond à une dérive importante des mesures par l’AHRS. Le cas du lacet sera considéré comme l’exemple type pour les analyses suivantes.

Le tableau 13.2 montre la covariance moyenne des éléments calculés qu’on déduit directement de la matrice de covariance Σ_p (tout en négligeant les erreurs de calibration).

Photo	$\sigma_x \text{ mm}$	$\sigma_y \text{ mm}$	$\sigma_z \text{ mm}$	$\sigma_{\text{roulis deg}}$	$\sigma_{\text{tangage deg}}$	$\sigma_{\text{lacet deg}}$
1-12	4.5	4.4	4.2	0.00965	0.00970	0.00930

Tableau 11.2 Erreur quadratique moyenne de l’estimation des éléments d’orientation externe par la technique d’ajustement de bande

On peut noter que les valeurs exposées ci-dessus sont très rapprochées. Ceci pourrait être expliqué par le fait que le HSGPS fournit des coordonnées de même précision en permanence. Le filtre de Kalman interne reçoit ces corrections à la fréquence maximale (4Hz) sans interruption. Le calcul inertiel et magnétique est donc achevé sous les mêmes conditions favorables, il atteint quasiment sa précision maximale.

Les écarts sur les coordonnées approchées des points fournis à l’algorithme sont centimétriques. Les points disposant d’erreurs aberrantes peuvent être détectés et traités à la première itération. En cas d’absence de telles erreurs, trois itérations sont suffisantes pour la convergence de la solution.

11.8.4 Intégration INS/photo

Le filtre de Kalman tourne à la même fréquence que la sortie INS. Le passage entre ces deux fréquences se fait à l'aide de l'interpolation linéaire et non pas à l'aide de la boucle de prédiction de Kalman. Nous avons choisi de traiter le tronçon du trajet qui se trouve entre la première et la dernière photo sans étendre la solution hors des limites des corrections photogrammétriques. Comme la précision des résultats de triangulation est bien supérieure à celle de la navigation inertielle, elle possède l'effet principal sur les résultats. Les figures 11.11 et 11.12 illustrent le changement du lacet et les corrections apportées par le filtre étendu de Kalman.

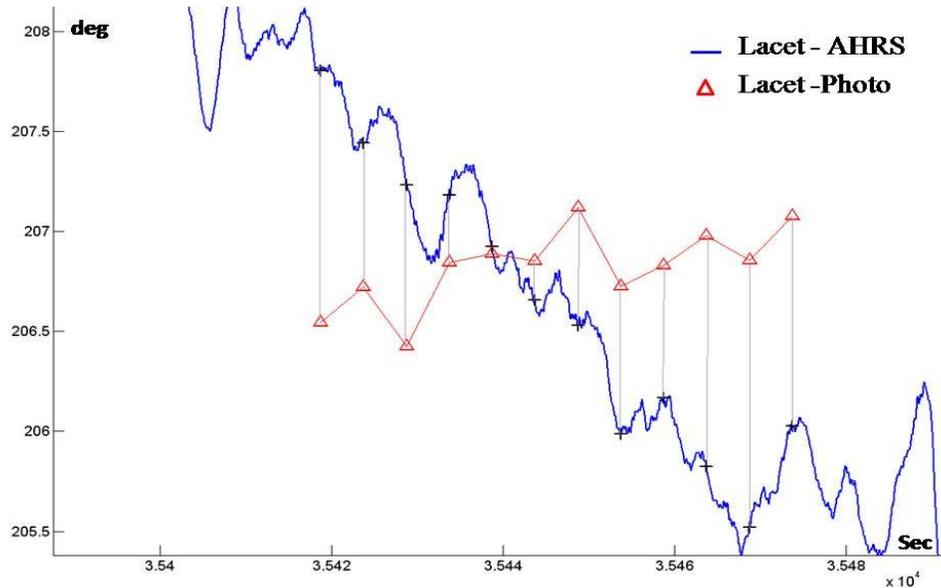


Figure 11.11 Comparaison entre le lacet mesuré par l'AHRS et déduit par le calcul de bande (temps en abscisse et angle en degré en ordonnées)

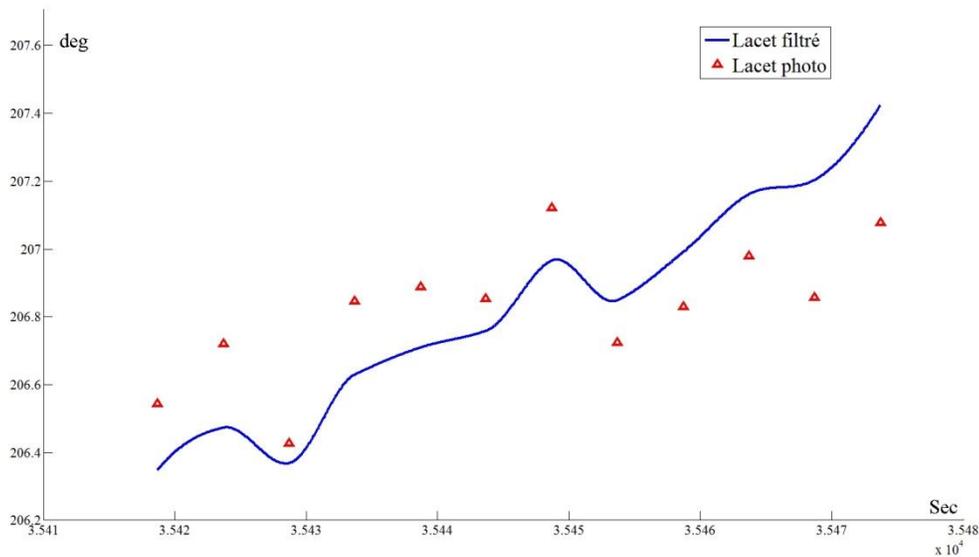


Figure 11.12 Lacet corrigé par le filtre de Kalman étendu

On peut noter que la courbe calculée par filtrage a une inclinaison générale en sens contraire du lacet mesuré par l’AHRS. Ceci aidera à corriger la dérive constatée sur le signal AHRS.

11.8.5 Intégration INS/photo + GPS/AHRS

La dernière étape est de fusionner les résultats du filtrage par photo avec les résultats de l’AHRS qui est muni d’un autre filtre interne. Puisque les deux filtres tournent à la même fréquence (20 Hz), on peut appliquer les équations (11.29 page170) sans interpolation. La forme finale de la courbe montrant le lacet est présentée dans la figure suivante.

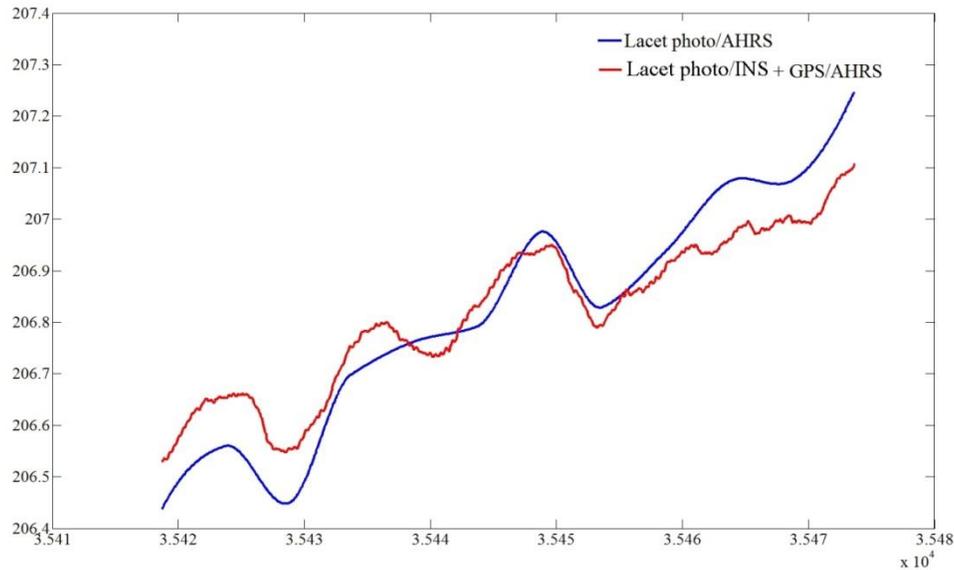


Figure 11.13 Forme finale de la courbe du lacet (rouge) après avoir appliqué le filtre décentralisé de Kalman.

On peut noter que l’intégration des résultats du filtrage interne de l’AHRS change légèrement l’inclinaison de la courbe résultante du filtrage INS/photo. Comme le filtre décentralisé considère la moyenne pondérée par rapport à la précision et comme la précision de l’AHRS est bien inférieure à celle de la photogrammétrie, l’influence de cette dernière est plus importante dans le calcul. La forme de la courbe finale « ressemble » à celle de la courbe INS/photo mais « bruitée » localement par la courbe GPS/AHRS.

Pour quantifier la précision du dernier calcul, nous allons tracer les valeurs de l’erreur moyenne quadratique du lacet p_k^{lacet} par rapport au temps où :

$$p_k^{lacet} = \frac{\sqrt{P_{(9,9)}_k}}{\text{norm}(\text{diag}(P_k))} \quad 11.30$$

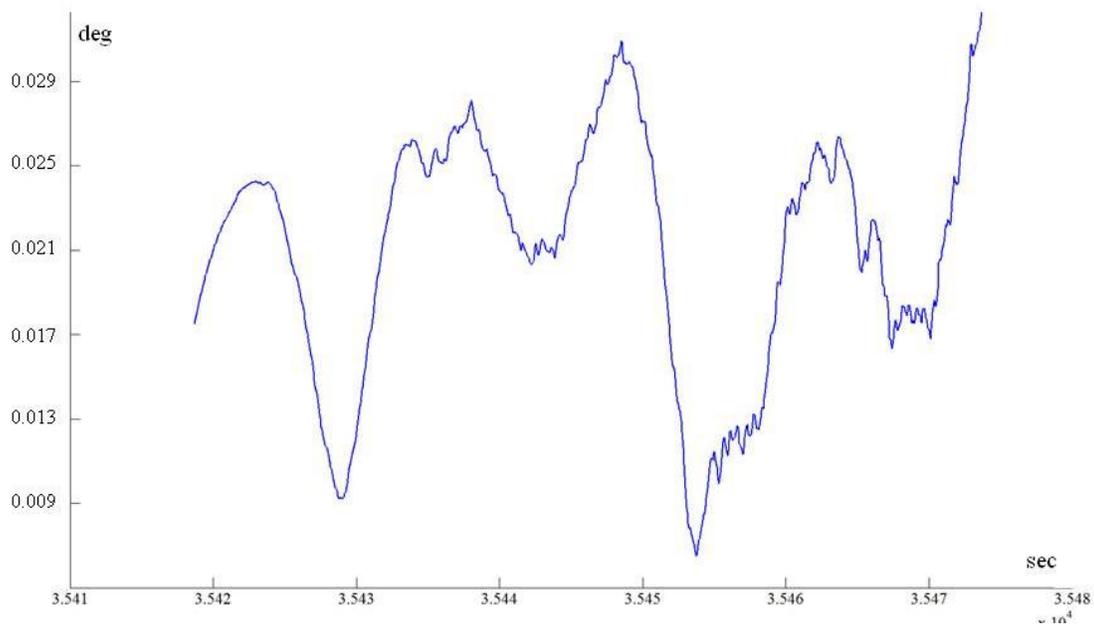


Figure 11.14 Variation de l'erreur moyenne quadratique du lacet avec le temps

Bien qu'on prévoise un nombre de pics « de précision » égal au nombre de photos (12), le nombre de pics paraît inférieur. Quelques photos ont réussi plus que les autres à redresser les mesures de l'AHRs. Ceci semble dû aux différents écarts entre les deux types de mesures (figure 11.11). Le dénominateur dans la relation 11.30 met en évidence l'intervention des neuf éléments de navigation (position, vitesse, attitude) dans le calcul de la précision du lacet.

La précision maximale de l'angle de lacet est de même ordre de grandeur que la précision photogrammétrique (0.009 deg), elle est de 0.03 degré pour les points les plus éloignés de l'instant de la prise de vue.

11.8.6 Le calcul du nuage par géoréférencement direct

Des analyses similaires peuvent être faites pour les six éléments de trajectométrie. L'application du modèle mathématique du géoréférencement direct produit le nuage de la figure 11.15.



Figure 11.15 Nuage de points obtenu après correction des six éléments du trajet par la méthode photogrammétrique proposée.

Il est difficile de détecter directement la différence entre les nuages calculés avec et sans l'aide photogrammétrique. Pourtant, quelques anomalies corrigées à l'aide de la méthode photogrammétrique se manifestent clairement à l'œil nu (figure 11.16). Le prochain paragraphe sera consacré à la comparaison entre ces deux types de nuages.

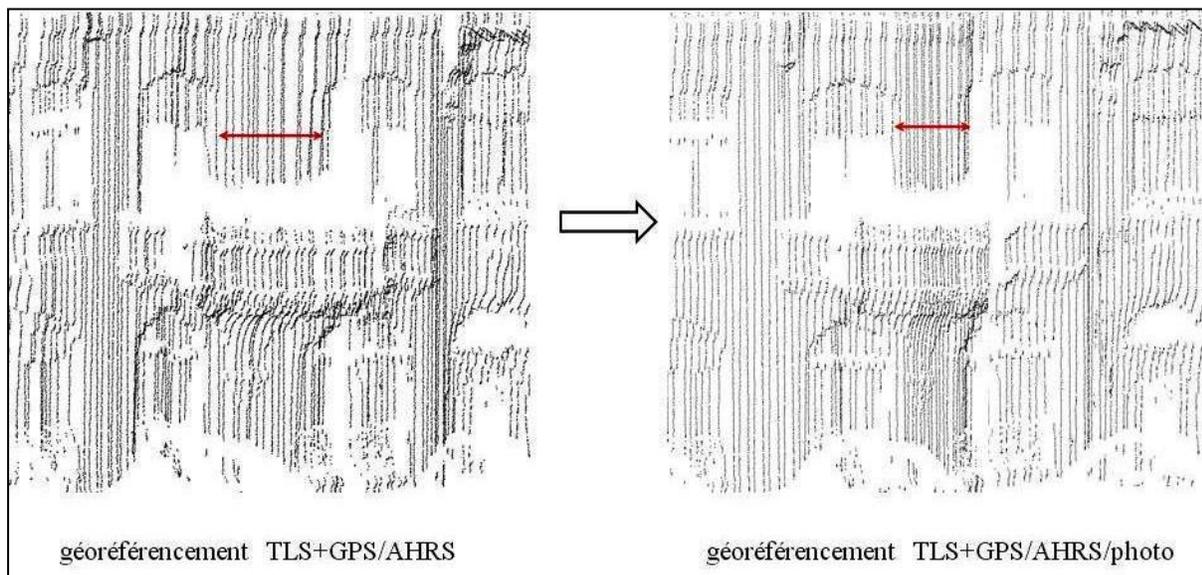


Figure 11.16 Déformation locale corrigée par l'apport de la photogrammétrie (corrections en x,y principalement)

11.8.7 Validation des résultats

Pour contrôler l'exactitude du nuage de points affiné par la méthode photogrammétrique, nous avons choisi une autre source de référence, en l'occurrence : un nuage de points généré automatiquement à partir de la séquence de photos acquises lors des missions mobiles. PhotoModeler Scanner[®] est utilisé pour réaliser l'intersection automatique entre les faisceaux des rayons homologues. Les photos sont importées dans le logiciel avec les points de jonction calculés par l'algorithme d'ajustement de bande exposé auparavant (cf.11.6). Un nuage de points est généré en traitant les couples successifs de photos. La résolution choisie est de 2 cm sur l'objet ce qui donne un nuage dense par rapport au nuage acquis par le laser.

Le nuage dit « photogrammétrique » est superposé au nuage laser mobile. Comme estimation globale de l'exactitude, la méthode ICP est utilisée. Une erreur équivalente (cf. 9.2.2 page 122) de 10 cm est constatée. Une comparaison plus exhaustive est faite à l'aide du logiciel CloudCompare⁽¹⁵⁾. L'atout de ce logiciel est la comparaison entre deux nuages de points sans maillage préalable. L'interface graphique de ce logiciel est montrée à la figure 11.17. Les écarts sont cartographiés sur le nuage mobile.

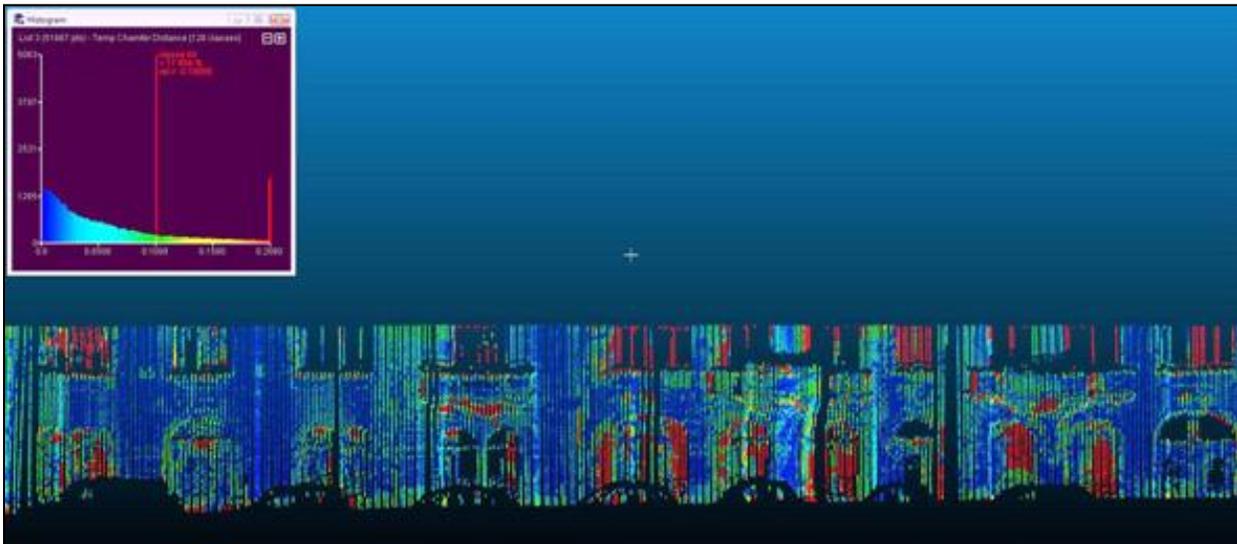


Figure 11.17 Logiciel CloudCompare avec la fenêtre de l'historgramme des différences

Une analyse de l'historgramme des écarts (figure 11.18) montre que 78% des écarts se trouvent en deçà du seuil de 10 cm. Les points ayant des écarts de l'ordre de 20 cm se trouvent principalement dans les zones d'ouverture ou d'occlusion. Ces différences semblent dues à la différence d'angle d'incidence entre la mesure directe (laser) et indirecte (intersection des vecteurs homologues par photogrammétrie). D'ailleurs, la configuration des photos est proche du cas normal, les photos obliques sont absentes ce qui affaiblit la précision pour les détails. De telles parties ne constituent guère une référence idéale pour contrôler l'exactitude le nuage de points.

¹⁵ propriété de EDF & TELECOM ParisTech

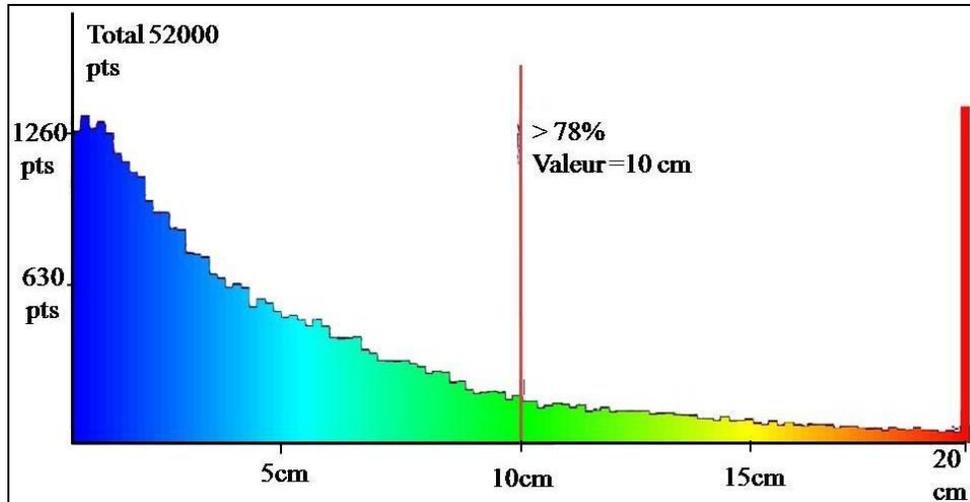


Figure 11.18 Histogramme des écarts entre le nuage laser mobile et le nuage issu des traitements photogrammétriques.

11.9 Note de conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre l'apport de la technique de triangulation photogrammétrique au calcul du système laser mobile. Bien que cette utilisation ne soit pas encore à maturité, nous pouvons tirer quelques conclusions de notre expérimentation.

Contrairement à la numérisation par le laser mobile, la numérisation photogrammétrique est redondante. Un point peut être calculé plusieurs fois (par 3 photos en moyenne). Néanmoins, la redondance n'existe qu'en relatif. Nous essayons de référencer le nuage dans le repère absolu par l'intermédiaire d'observations GPS/AHRS, des coordonnées approchées et par l'intégration des résultats d'ajustage de bande avec les données de navigation. La solution est a priori plus robuste en relatif qu'en absolu.

La méthode proposée cherche les coordonnées approchées, en quelque sorte, dans le nuage laser. Le nuage serait recalculé ensuite à l'aide des corrections photogrammétriques ce qui est susceptible de changer les coordonnées du nuage de départ et par conséquent les coordonnées approchées. L'itération des étapes pourrait améliorer les résultats en absolu.

12. Ouverture vers la modélisation

L'exploitation des nuages de points, issus de notre approche de la cartographie mobile, est exposée brièvement à travers une procédure de modélisation. Cette approche est puisée dans une chaîne d'acquisition et de traitement¹⁶ développée au laboratoire MAP-PAGE.

12.1 La modélisation des données mobiles

12.1.1 Introduction

Puisque les techniques mobiles sont relativement récentes, les concepteurs sont intéressés par la recherche de nouvelles techniques d'acquisition pour produire massivement des données spatiales plutôt que de traiter ces données. Des masses de nuages de points sont ainsi stockés en attendant une méthode de traitement automatique capable de modéliser aussi vite que l'acquisition mobile. Nous donnons quelques perspectives sur la segmentation et sur l'extraction automatique des contours à partir du nuage de points acquis en mobile. Les méthodes présentées sont adaptées des techniques utilisées pour les nuages acquis par un balayage fixe. Cependant, la géométrie et la précision moyenne de la qualité du nuage sont prises en considération.

12.1.2 Traitement des données

Le nuage de points subit normalement une chaîne de traitement pour en extraire un modèle tridimensionnel filaire ou surfacique. Nous allons nous contenter de l'étape de segmentation et de détection des arêtes et des contours des détails architecturaux. A partir du nuage mobile, les façades et une partie des surfaces des routes sont segmentées. Le passage à la modélisation tridimensionnelle proprement dite (SIG ou CAO) n'est pas évoqué dans cette thèse.

12.1.2.1 La segmentation

La méthode RANSAC adaptative :

Pour pouvoir segmenter le nuage de points en groupes de points quasi coplanaires, l'algorithme RANSAC est appliqué (Boulaasssal *et al.*, 2009). Un plan est ajusté par moindres carrés à partir de trois points choisis aléatoirement. Puis, le nombre de points proches à ce plan, déterminé par seuil de distance, est déterminé. Quand ce nombre dépasse un certain seuil, le plan est considéré représenter un plan de l'objet. Les points proches sont considérés comme appartenant à ce plan. La méthode est itérée un nombre de fois déterminé par la loi probabiliste de RANSAC (Fischler et Bolles, 1981).

¹⁶ La thèse de Hakim BOULAASSAL qui se déroule en parallèle dans le laboratoire MAP-PAGE

La subtilité de cette méthode est qu'elle sélectionne le plan contenant le plus grand nombre de points en premier lieu. Ensuite, les points du plan ainsi détectés sont retirés de l'ensemble du nuage de points. A chaque itération, le nombre de points formant un plan est sauvegardé, puis seuls les plans contenant un nombre de points supérieur sont admis. La flexibilité des choix des seuils rend la détection de tous les plans possibles. Seuls les détails non planaires subsistent à la fin de l'application de la méthode.

Pour l'application de la méthode sur les nuages mobiles, le seuil de distance point-plan est fixé à la résolution horizontale des nuages de points (la distance moyenne entre deux lignes successives du balayage). Les résultats de l'application de la méthode RANSAC sur deux nuages relevés par notre système sont montrés dans les figures suivantes.

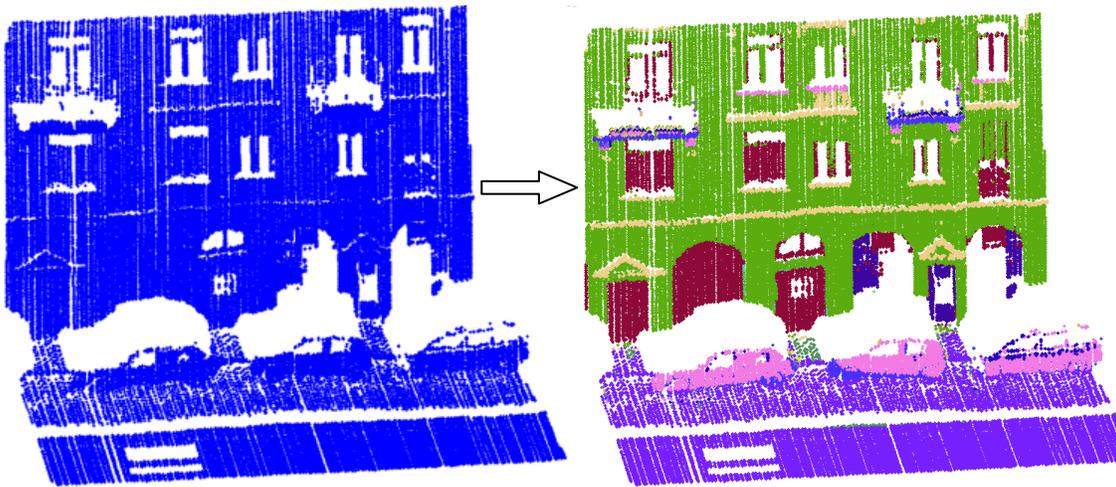


Figure 12.1 Exemple d'un nuage segmenté en sous-groupes coplanaires à l'aide de la méthode de RANSAC adaptative (profils espacés de 12 cm environ).

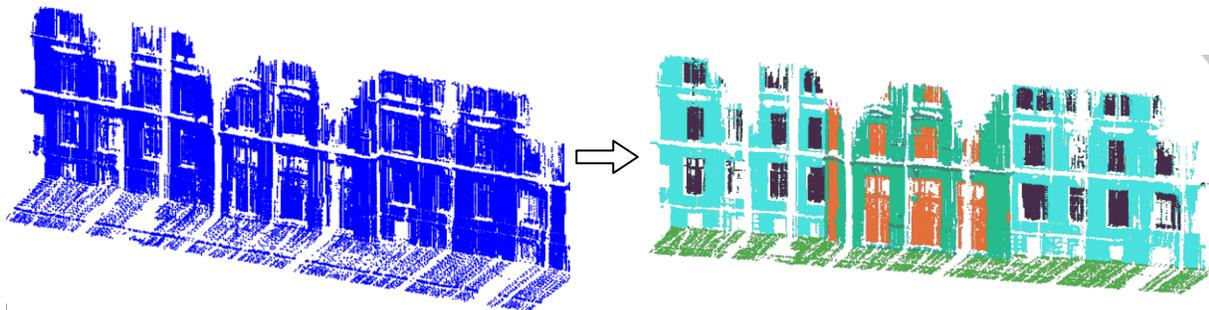


Figure 12.2 Scène segmentée en sous-groupes coplanaires à l'aide de la méthode de RANSAC adaptative (profils espacés de 12 cm environ).

Ajustement des plans par moindres carrés pondérés :

L'ajustement habituel des plans ne produit pas de résultats précis compte tenu de la faible précision et des différences de précision du nuage de points. Nous utilisons donc un ajustement pondéré lors de l'application de la méthode RANSAC. Un plan est normalement défini par un point et par la direction de sa normale. Le point est le barycentre pondéré du sous-nuage de points en question défini par les relations suivantes :

$$x_c = \frac{\sum x_i w_{xi}}{\sum w_{xi}} \quad y_c = \frac{\sum y_i w_{yi}}{\sum w_{yi}} \quad z_c = \frac{\sum z_i w_{zi}}{\sum w_{zi}} \quad 12.1$$

avec $w_{ui} = 1/\sigma_{pi}$, $u_i \in \{x_i, y_i, z_i\}$ les coordonnées des points du nuage exprimé dans le repère géodésique.

La normale du plan est un vecteur singulier correspondant à la valeur singulière minimale de la matrice variance-covariance suivante :

$$B = A^T W A \quad 12.2$$

où:

$$A = [x_i - x_c, y_i - y_c, z_i - z_c] \quad W = \text{diag}[w_{0i}]$$

$$w_{0i} = \frac{1}{\sigma_{0i}} \quad \sigma_{0i} = \sqrt{\sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2 + \sigma_{zi}^2}$$

Les valeurs de covariance sont déduites dans le chapitre 9. Les points utilisés pour le calcul de chaque plan sont pondérés en fonction des erreurs théoriques.

12.1.2.2 Extraction des contours

Une fois les plans détectés, l'extraction des contours peut être entreprise objet par objet. L'algorithme utilisé pour cette tâche est basé sur la triangulation de Delaunay 2D. En effet, il analyse les longueurs des côtés des triangles pour détecter les points des contours. Ces points représentent les extrémités des côtés les plus longs (Boulaassal *et al.*, 2009). Le seuil pour séparer les plus longs côtés doivent être supérieurs à la résolution horizontale du nuage. L'expérimentation montre que cette méthode est capable de détecter les arêtes extérieures de chaque plan et les bords des ouvertures dans le plan même. La figure 12.3 montre la triangulation de Delaunay effectué dans un des plans issu de la segmentation et les points des contours correspondants.

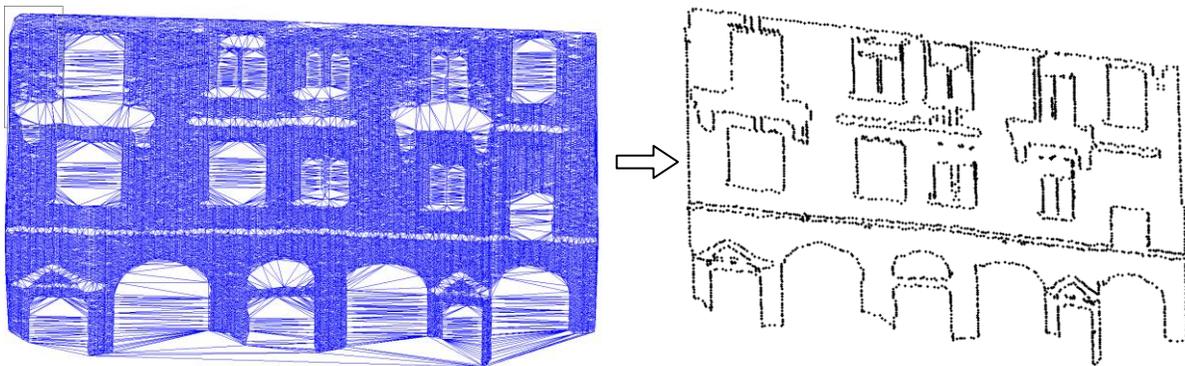


Figure 12.3 Triangulation de Delaunay 2D et détection des points des contours

La modélisation à l'aide des points « zéros »

Les points avoisinant des points « zéros » sont les derniers points acquis avant que le rayon laser balayant ne parte dans le vide (cf. 8.2.3 page 117). Ces points peuvent aider à séparer la

végétation du reste des objets balayé. De plus, ils aident à détecter les arêtes saut non verticale ce qui aide la méthode exposé ci-dessus.

Une procédure similaire à la croissance des régions est appliquée sur les points voisins aux points zéro : un noyau est pris aléatoirement et la distance aux points proches est étudiée. Si la distance à n point est inférieure à un certain seuil, le noyau est agrandi en ajoutant ces points. La procédure est itérée tant que des voisins proches sont trouvés. Quand des points voisins proches ne sont plus trouvés ou quand leur nombre est insignifiant, l'agrandissement de noyau s'arrête pour relancer une autre croissance à partir d'un autre point de départ.

La végétation se différencie aisément des points d'arêtes. En fait, dans la végétation le taux d'interception du rayon laser balayant est aussi important que le taux de passage sans interception. Les points voisins des points « zéros » sont plus denses et distribués aléatoirement. Ceci pourrait être confirmé par des tests statistiques spatiaux. Néanmoins, le processus de regroupement de points expliqué précédemment aide à différencier la végétation des autres points : en effet, quand à chaque agrandissement de noyau plusieurs points sont trouvés à des distances variées, les points étudiés représentent de la végétation.

12.2 Note de conclusion

Le problème de la précision est un problème commun à tous les systèmes de cartographie mobile. Les systèmes, quand bien même de coût élevé, ne peuvent pas fournir de position précise. L'industrie actuelle n'est pas encore capable de produire des accéléromètres aussi précis que les gyromètres à fibre optique ou à anneau laser. Lors de l'absence du signal GPS, les accéléromètres sont seuls responsables du calcul de la position dans le repère du véhicule, tandis que les gyromètres transforment cette position dans un repère terrestre. Par conséquent, la position inertielle est toujours affectée par un défaut de précision. Il est donc important de considérer une méthode de modélisation pour ce type de données.

Notre système est également affecté d'une imprécision d'attitude ce qui impacte directement la précision et l'exactitude du nuage de points mobile. La méthode présentée, dans ce chapitre, bénéficie de la précision calculée auparavant (chapitre 9) pour mettre en évidence les points les plus précis lors de la modélisation. La méthode est efficace quand ces points sont répartis régulièrement dans l'ensemble du nuage.

13. Perspectives et conclusion

Ce chapitre présente les conclusions des travaux effectués dans cette thèse. Les points positifs et négatifs du système conçu sont détaillés. Les compétences acquises et mes participations à la recherche scientifique au cours de cette thèse sont résumées dans ce chapitre. Quelques idées concernant les futurs développements sont mentionnées.

13.1 Perspectives et travaux futurs

Au cours de notre étude, plusieurs propositions et solutions ont été données pour répondre à des cas particuliers ou généraux. Restreintes à quelques types d'instruments ou à quelques jeux de données, elles ouvrent, toutefois, la porte à des développements et des améliorations possibles. La précision du nuage de points peut être améliorée par l'extension des techniques de calcul exposées dans cette thèse. Nous résumons les perspectives sur les méthodes de calcul en post-traitement comme suit :

- L'amélioration de la technique d'ajustement des polynômes : les polynômes permettent une grande flexibilité lors de la reconstitution du trajet. Pourtant, d'autres types de courbes pourraient mieux modéliser le trajet. Une fonction combinée de polynômes et de termes trigonométriques pourrait être plus fidèle à l'ondulation locale du trajet.
- Nous utilisons la relation de navigation à l'estime en tant que filtrage postérieur au filtre de Kalman. Il est possible d'intégrer son équation comme un état dans les équations d'état du filtre de Kalman.
- La technique proposée pour la reconstitution des erreurs d'attitude a montré une bonne fiabilité. Il est donc envisageable de réutiliser cette technique pour améliorer le calcul de l'intégration GPS/AHRS. L'implémentation d'une telle idée nécessite l'application du filtre de Kalman à rebours (du dernier instant vers le premier). La méthode est connue sous le vocable « lissage de Kalman » qui suggère une loi pour fusionner le filtre de marche inverse avec le filtre initial. Une amélioration concrète est attendue car chaque mesure inertielle est liée à deux mesures GPS (la précédente et la suivante).
- La fusion des données lasergrammétriques et photogrammétriques : la modélisation à niveau moyen de détails à partir de nuages mobiles à faible précision a été démontrée comme étant possible. Le modèle obtenu sera certes entachée par des erreurs significatives. Cet artefact peut être corrigé en incorporant des mesures photogrammétriques qui sont nettement plus précises en relatif. La fusion automatique et semi-automatique est envisageable en ce cas. La projection des images sur le nuage de points sert à colorier le nuage de points ; encore faut-il prévoir des techniques pour harmoniser les valeurs radiométriques dans les zones de recouvrement.

- La recherche automatique des points de jonction entre les images acquises par l'appareil photo en mode mobile est résolue par les algorithmes développés par la communauté de la « vision par ordinateur » qui offre plusieurs solutions à ce problème. La méthode de détection des coins homologues à l'aide de corrélation radiométrique et la matrice fondamentale déterminée par RANSAC (Hartley et Zisserman, 2004), a été testée¹⁷. Elle produit un nombre de points appariés largement suffisant pour l'ajustement de bande. La méthode SIFT (Scale-invariant feature transform) (Lowe, 1999) fournit de bons résultats. L'automatisation et l'ergonomie de ces méthodes, notamment en ce qui concerne les points communs entre plus de deux images, fait partie des travaux futurs pour cette recherche.

Le système dans sa version actuelle présente des lacunes notamment en raison du type de matériels utilisés. Une large variété de solutions de conception est possible mais à des coûts différents. La solution la plus logique serait le blocage de la rotation horizontale du scanner ou le remplacement de ce scanner par un scanner 2D à grande ouverture. En fait, l'embarquement d'un TLS 3D sur un système mobile offre deux atouts : la dualité mobile-fixe qui affaiblit le coût de l'utilisation mobile et la liberté du choix de l'angle d'incidence des rayons laser selon la géométrie exigée. En revanche, il impose des contraintes sur le balayage comme la vitesse de déplacement où la densité des nuages résultants. L'investissement dans un scanner 2D peut être rapidement rentabilisé car il permet d'embarquer le système sur une voiture se déplaçant à la vitesse moyenne du trafic dans les villes. Le choix d'un scanner à tête rotative permettrait de balayer les deux côtés de la voie en un seul passage.

13.2 Contributions de la thèse à la recherche scientifique

La présente thèse possède deux aspects : expérimental et théorique. Plusieurs appareils et plusieurs modes d'emploi sont expérimentés au fur et à mesure de l'avancement de la recherche. Ceci aide à établir une connaissance profonde des facteurs primordiaux qui affectent les nuages de points résultant de la numérisation mobile. Les facteurs qui déterminent la numérisation mobile sont rarement évoqués dans la littérature correspondante. On peut citer entre autres, la vitesse de déplacement, la distance plateforme-objet, l'angle d'incidence du rayon laser et la cadence des prises de vue pour l'appareil photo.

De plus, une grande partie de cette thèse est consacrée à l'analyse « boîte noire ». Une première fois, pour le décryptage des trames des données envoyées par le scanner et la seconde fois pour la reconstitution du modèle d'erreur correspondant à la navigation inertielle et magnétique aidées par le GPS.

Les contributions majeures de ce mémoire peuvent être résumées par les points suivants :

- 1- Un mode de géoréférencement direct spécifique au scanner laser tridimensionnel.
- 2- Une solution de navigation hybride spécifique au GPS à précision élevée, au GPS à haute sensibilité et à l'AHRs de gamme « grand public ».
- 3- Le filtrage des données inertielles à l'aide de la navigation à l'estime.
- 4- Le suivi de la transmission des erreurs entachant la cartographie mobile avec un niveau de détail proportionnel à l'impact de chacun.

¹⁷ Nous avons utilisé le code MATLAB fourni par Peter Kovési. URL : <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/Research/MatlabFns/Robust/example/index.html>

- 5- L'usage de l'appareil photo comme capteur de navigation contrairement à sa vocation initiale. Ceci nécessite un ajustement de bande avec des valeurs approchées et sans point de calage. Les résultats sont intégrés dans un processus de filtre de Kalman décentralisé.

13.3 Conclusion

La présente thèse a permis d'aborder le problème de la cartographie mobile de manière différente des approches traditionnelles. La conclusion principale à retenir de cette thèse est l'obtention des nuages de points de précision acceptable à partir d'instruments a priori inadaptés à l'usage mobile. Au vu des contraintes imposées par les matériels, le système conçu n'a pas pu atteindre le niveau commercial ou industriel. L'objectif n'était pas de développer un système destiné à la production. Nous nous sommes donc attelés à l'analyse des résultats et aux méthodes d'amélioration du calcul. Le système est devenu, par conséquent, un outil de recherche et d'apprentissage. Des recommandations ont souvent été données pour le passage à un système de capacité supérieure.

Une méthode de calibration propre au scanner 3D a été présentée. La précision de calibration n'a pas dépassé 2cm ce qui a permis l'utilisation du scanner en même temps que les autres capteurs en mode mobile. De même, une méthode de synchronisation passive sans aucun coût supplémentaire a été introduite. La connaissance des protocoles de communication entre l'ordinateur et le scanner a été indispensable pour accomplir la mission d'horodatage au centième de seconde.

Nous avons montré qu'avec les techniques de filtrage de l'attitude, une précision supérieure à celle attendue initialement des capteurs, pourrait être atteinte. Les solutions techniques, comme l'observation de la disponibilité optimale des satellites, ont prouvé leur efficacité. La plupart des expérimentations faites sont exploitables avec un taux acceptable des mesures GPS. Dans de telles conditions, le système a réussi à acquérir des nuages de précision de 15 à 20 cm pour des objets éloignés de moins de 20 m. L'exactitude a été validée à travers plusieurs comparaisons avec d'autres sources de données spatiales.

Contrairement à la grande majorité des fournisseurs de données mobiles, le nuage mobile obtenu par ce travail n'est pas composé uniquement des coordonnées tridimensionnelles, mais fournit également les erreurs correspondantes. Ceci a pour prix la modélisation complète des erreurs à partir des capteurs les plus élémentaires. Il est évident qu'une centrale inertielle à faible coût ne donne pas une estimation des erreurs dans sa sortie standard. La reconstitution du filtre embarqué sur l'AHRS a été traitée pour permettre de transmettre les erreurs inertielles et magnétiques au nuage de point final. La connaissance des erreurs affectant un nuage de points ouvre ainsi plus d'horizons pour la modélisation 3D. Nous pouvons, désormais, faire contribuer chaque point dans la modélisation selon sa précision. Les premiers résultats obtenus permettent d'envisager une évolution des méthodes de modélisation des données spatiales à précision moyenne et faible (nuages mobiles en l'occurrence).

Les magnétomètres sont rarement utilisés en cartographie mobile terrestre à cause de leur faible précision. Néanmoins, ils peuvent limiter la dérive des gyroscopes MEMS lors d'une longue absence de réception GPS. Ils constituent une assistance à la navigation inertielle en l'absence de perturbation magnétique externe. Pour cela, nous avons pris en considération le comportement des magnétomètres pendant cette étude et nous avons constitué un modèle d'erreurs qui leur est propres, ce qui constitue un des apports de cette thèse.

La photogrammétrie apporte des corrections sur la position et l'attitude de la plateforme mobile. Elle peut apporter des corrections efficaces à la navigation inertielle comme le GPS et contrôlées par l'utilisateur en plus. Néanmoins le traitement des données photogrammétriques (point homologues, coordonnées approchées) est plus difficile. L'automatisation et l'ergonomie de la restitution photogrammétrique peuvent la rendre compétitive par rapport aux autres capteurs des éléments du trajet, notamment parce qu'elle fournit des mesures angulaires.

Annexes

Annexe A : Les standards de connexion GPS

Le protocole NMEA -0183

NMEA sont les initiales de National Marine Electronic Association¹⁸, un standard pour l'échange de données numériques entre les différents appareils électroniques dédiés à la marine. Ce protocole est normalisé, il transmet de nombreuses informations en format texte ASCII selon plusieurs messages dont deux sont détaillés ci-dessous.

La trame : GGA

Position et type de « fixe ».

Définition standard :

\$GPGGA,123519,4807.038,N,01131.324,E,1,08,0.9,545.4,M,46.9,M, , *42

123519 = Acquisition fixe à 12:35:19 UTC

4807.038,N = Latitude 48°07.038' N

01131.324,E = Longitude 11°31.324' E

1 = Fix qualification : 0 = non valide

1 = Fixe GPS

2 = Fixe DGPS

3 = PPS fixe

4 = Real Time Kinematic

5 = RTK flottant

6 = estimé (navigation à l'estime)

7 = mode d'entrée manuelle

8 = mode de simulation

08 = Nombre de satellites en poursuite.

0.9 = DOP (Horizontal dilution of position) Dilution horizontale.

545.4,M = Altitude, en mètres, au dessus du MSL (Mean Sea Level) niveau moyen des Océans.

46.9,M = Correction de la hauteur de la géoïde en mètres par rapport à l'ellipsoïde WGS84

(Champ vide) = nombre de secondes écoulées depuis la dernière mise à jour DGPS.

(Champ vide) = Identification de la station DGPS.

*42 = Checksum

CR et LF : non représentés

La trame : VTG

VTG : cap et vitesse de déplacement

Définition standard :

\$GPVTG,054.7,T,034.4,M,005.5,N,010.2,K

054.7,T = cap réel en Degrés , T (True track made good)

¹⁸ URL : www.nmea.org

034.4,M = cap vrai magnétique en degrés (Magnetic track made good)
 005.5,N = Vitesse de déplacement par rapport au sol en noeuds (N)
 010.2,K = Vitesse de déplacement par rapport au sol en kilomètres /heure. (K)
 CR et LF : non représentés

Le protocole UBX

Les récepteurs Ublox[®] utilisent le protocole¹⁹ UBX propre à cette entreprise pour transmettre leurs données à un terminal par connexion RS-232 asynchrone. Il est codé sur 8 octets et protégé par un test de somme (checksum). Les messages recevables par la centrale AHRS-440 sont détaillés comme suit :

NAV-POSLLH : Solution de la position géodésique

Message	NAV-POSLLH				
Description	Solution de la position géodésique				
Firmware	Soutenue sur u-blox 5 version 4.00 jusqu'à la version 6.00.				
Type	Périodique/directif				
Commentaire	ce message sort la position géodésique dans l'ellipsoïde sélectionné. WGS84 par défaut, mais peut être changé par le message CFG-DAT.				
Message structure	entête	ID	Longueur (oct)	payload	checksum
	0xB50x62	0x01 0x12	28	ci-dessous	CK_A CK_B
Le contenu du payload :					
Translation en oct	Numéro Format	échantillonnage	Nome	unité	Description
0	U4	-	iTOW	ms	Temps de la semaine GPS en milliseconde
4	I4	1e-7	lon	deg	longitude
8	I4	1e-7	lat	deg	latitude
12	I4	-	height	mm	Hauteur de l'Ellipsoïde
16	I4	-	hMSL	mm	Hauteur du niveau de la mer

Solution de la vitesse en NED : NAV-VELNED

Message	NAV-VELNED				
Description	Solution de la vitesse en NED				
Firmware	Soutenue par u-blox 5 de version 4.00 jusqu'à la version 6.00.				
Type	Périodique/directif				
Commentaire	-				
Structure du message	entête	ID	Longueur (oct)	payload	checksum

¹⁹ URL : <http://www.u-blox.com/en/download-center.html?task=summary&cid=77&catid=97>

	0xB50x62	0x01 0x12	36	ci-dessous	CK_A CK_B
Le contenu du payload :					
Translation en oct	Numéro Format	échantillonnage	Nom	unité	Description
0	U4	-	iTOW	ms	Temps de la semaine GPS en milliseconde
4	I4	-	VeIN	cm/s	NED vitesse Nord
8	I4	-	VeIE	cm/s	NED vitesse Est
12	I4	-	VeID	cm/s	NED vitesse bas
16	U4	-	Speed	cm/s	Vitesse (3D)
20	U4	-	gSpeed	cm/s	Vitesse de la Terre (2D)
24	I4	1e-5	heading	deg	Cap 2D
28	U4	-	sAcc	cm/s	Estimation d'exactitude de la vitesse
32	U4	1e-5	cAcc	deg	Estimation grossière d'exactitude du cap

Statut de la réception GPS : NAV-STATUS

Message	NAV-status				
Description	Statut de la réception de navigation				
Firmware	Soutenue sur u-blox 5 version 4.00 jusqu'à la version 6.00.				
Type	Périodique/directif				
Commentaire	-				
Structure du message	entête	ID	Longueur (oct)	payload	checksum
	0xB50x62	0x01 0x12	16	ci-dessous	CK_A CK_B
Le contenu du payload :					
Byte Offset	Numéro Format	échantillonnage	Nom	unité	Description
0	U4	-	iTOW	ms	Temps de la semaine GPS en milliseconde
4	U1	-	gpsFix	-	GPS fixe Type
					- 0x00 = pas de fixe
					- 0x01 = navigation à l'estime seulement
					- 0x02 = 2D-fixe
					- 0x03 = 3D-fixe
					- 0x04 = GPS +navigation à l'estime combinés
					- 0x05 = le temps uniquement déterminé
- 0x06..0xff = réservés					

5	X1	-	flags	-	Les indicateurs d'état de navigation
6	X1	-	diffstat	-	Statut de différentiel
7	U1	-	res	-	Réservés
8	U4	-	tfff	-	Temps pour le premier fixe (milliseconde temps tag
12	U4	-	msss	-	Milliseconde depuis le démarrage /

Annexe B : Les paquets des sorties standards de la centrale AHRS-440-CA-200

La centrale AHRS-440²⁰ permet d'avoir plusieurs formes de sorties standards paramétrées par l'utilisateur. Par défaut, le paquet A1 constitue la sortie standard de cette centrale où on trouve les sorties corrigées des magnétomètres. Le paquet N1 transmet les coordonnées acquises par le GPS. Etant les plus utilisés dans ce travail, les paquets A1 et N1 sont détaillés ci-dessous.

Paquet A1 (angle 1)

Le contenu de la charge utile (payload) du paquet A1					
Translation en octet	Nom	Format	Echantillonnage	Unité	Description
0	rollAngle	I2	$2 \cdot \pi / 2^{16}$ [360°/2 ¹⁶]	Radians [°]	Roulis
2	pitchAngle	I2	$2 \cdot \pi / 2^{16}$ [360°/2 ¹⁶]	Radians [°]	Tangage
4	yawAngleMag	I2	$2 \cdot \pi / 2^{16}$ [360°/2 ¹⁶]	Radians [°]	Lacet
6	xRateCorrected	I2	$7 \cdot \pi / 2^{16}$ [1260°/2 ¹⁶]	rad/s [°/sec]	Vitesse angulaire x corrigée
8	yRateCorrected	I2	$7 \cdot \pi / 2^{16}$ [1260°/2 ¹⁶]	rad/s [°/sec]	Vitesse angulaire y corrigée
10	zRateCorrected	I2	$7 \cdot \pi / 2^{16}$ [1260°/2 ¹⁶]	rad/s [°/sec]	Vitesse angulaire z corrigée
12	xAccel	I2	$20 / 2^{16}$	g	Accélération x
14	yAccel	I2	$20 / 2^{16}$	g	Accélération y
16	zAccel	I2	$20 / 2^{16}$	g	Accélération z
18	xMag	I2	$2 / 2^{16}$	Gauss	Magnétomètre x
20	yMag	I2	$2 / 2^{16}$	Gauss	Magnétomètre y
22	zMag	I2	$2 / 2^{16}$	Gauss	Magnétomètre z
24	xRateTemp	I2	$200 / 2^{16}$	Deg C	Changement de température
26	timeITOW	U4	1	ms	Temps de la semaine GPS
30	BITstatus	U2	-	-	Test embarqué

Paquet N1 (navigation 1)

Le contenu de la charge utile (payload) du paquet N1					
Translation en octet	Nom	Format	échantillonnage	unité	Description

²⁰ http://www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/440_Series_Users_Manual.pdf

0	rollAngle	I2	$2\pi/2^{16}$ [360°/2 ¹⁶]	Radians [°]	Roulis
2	pitchAngle	I2	$2\pi/2^{16}$ [360°/2 ¹⁶]	Radians [°]	Tangage
4	yawAngleTrue	I2	$2\pi/2^{16}$ [360°/2 ¹⁶]	Radians [°]	Lacet
6	xRateCorrected	I2	$7\pi/2^{16}$ [1260°/2 ¹⁶]	rad/s [°/sec]	Vitesse angulaire x corrigée
8	yRateCorrected	I2	$7\pi/2^{16}$ [1260°/2 ¹⁶]	rad/s [°/sec]	Vitesse angulaire y corrigée
10	zRateCorrected	I2	$7\pi/2^{16}$ [1260°/2 ¹⁶]	rad/s [°/sec]	Vitesse angulaire z corrigée
12	xAccel	I2	$20/2^{16}$	g	Accélération x
14	yAccel	I2	$20/2^{16}$	g	Accélération y
16	zAccel	I2	$20/2^{16}$	g	Accélération z
18	nVel	I2	$512/2^{16}$	m/s	Vélocité Nord
20	eVel	I2	$512/2^{16}$	m/s	Vélocité Est
22	dVel	I2	$512/2^{16}$	m/s	Vélocité bas
24	longitudeGPS	I4	$2\pi/2^{32}$ [360°/2 ³²]	Radians [°]	Longitude GPS
28	latitudeGPS	I4	$2\pi/2^{32}$ [360°/2 ³²]	Radians [°]	Latitude GPS
32	altitudeGPS	I2	$2^{14}/2^{16}$	m	Altitude GPS
34	xRateTemp	I2	$200/2^{16}$	deg C	Changement de température
36	timeITOW	U4	1	ms	Temps de la semaine GPS

Annexe C : Le cryptage binaire d'un point numérisé par le scanner GX

Après avoir éliminé les premiers 146 octets exprimant l'entête du fichier binaire transmis par le scanner, on trouve les points décodés périodiquement sur 39 octets (ou 36 si les couleurs ne sont pas acquises). Le tableau ci-dessous montre un exemple de la lecture binaire d'un point acquis par le scanner GX.

n°	Octet		Valeur	Correspondance	Type
x + 1	146	}	1,55501	X [m]	float32
x + 2	10				
x + 3	199				
x + 4	63				
x + 5	33	}	13,98441	Y [m]	float32
x + 6	192				
x + 7	95				
x + 8	65				
x + 9	216	}	1,733455	Z [m]	float32
x + 10	225				
x + 11	221				
x + 12	63				
x + 13	55	}	-0,1107411	Angle horizontal [rad]	float32
x + 14	204				
x + 15	226				
x + 16	189				
x + 17	219	}	0,1225793	Angle vertical [rad]	float32
x + 18	10				
x + 19	251				
x + 20	61				
x + 21	225	}	14,17697	Ditance inclinée [m]	float32
x + 22	212				
x + 23	98				
x + 24	65				
x + 25	4				
x + 26	0				
x + 27	0				
x + 28	0	→			
x + 29	255		255	Intensité	uchar

Annexe D : Les repères référentiels

Cette annexe présente les systèmes de référence et de coordonnées utilisés et les relations de passage d'un système à l'autre. En fait, c'est le système de navigation qui est choisi pour l'élaboration et l'expression des équations inertielles. Nous avons montré que l'utilisation des quatre systèmes est indispensable pour exprimer les équations de la mécanisation inertielle. Ils sont exposés dans ce qui suit.

Les systèmes de référence

Le repère véhicule «*b*» (body)

Ce système est lié au véhicule (le référentiel propre au mobile) et on considère qu'il est le même que celui du capteur inertielle « Strapdown ». Pratiquement, ceci n'est pas possible, et il faudrait alors une transformation rigide (translation/rotation) si un odomètre est utilisé. L'axe *X* (roulis): vers l'avant; axe-*Y* (tangage): vers le droite; axe *Z* (lacet): en bas pour avoir le vecteur de gravité positif (conventionnellement dans la navigation). Le roulis Φ , le tangage θ et le lacet ψ sont des rotations locales autour de ces axes.

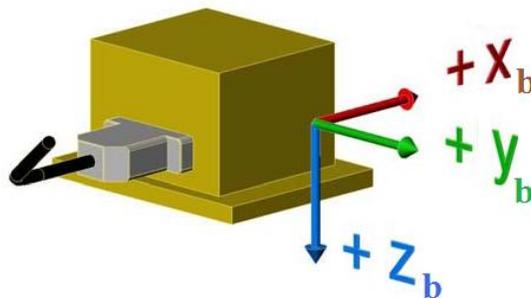


Figure D.1 Système véhicule (*b*)

Le repère navigation «*n*»

Défini dans le plan tangent local (LTP: « Local Tangent Plane »), son origine se trouve à la position courante du véhicule et son plan *x-y* (*n-e*) est tangent à la surface de la Terre. Il existe deux conventions de systèmes LTP qui sont usuelles en navigation:

NED : North, East, Down (Adopté pour ce mémoire).

ENU : East, North, Up.

Nous pouvons mieux comprendre la notion de l'attitude à travers une confrontation entre les repères navigation et véhicule. La figure D.2 montre le concept d'attitude. Par exemple, le lacet autour de Z_b essaie de tourner l'axe X_b vers le Nord.

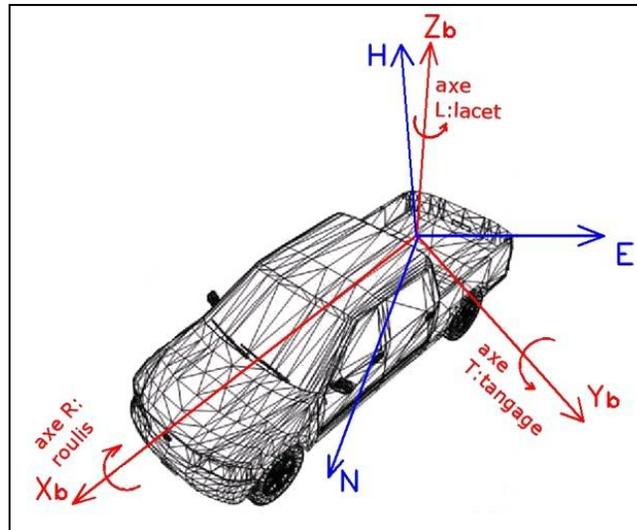


Figure D.2 Repère véhicule, navigation NEU, et les trois angles constituant l'attitude

La rotation entre les deux repères est donnée par la matrice :

$$R_b^n = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \psi + \cos \psi \sin \phi \sin \theta & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \cos \psi \sin \theta \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ -\sin \theta & \cos \beta \sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix}$$

Le repère inertiel «i»

Il s'agit du système dans lequel les lois de Newton sont applicables. Il ne suit pas la rotation de la Terre. L'origine de ce système est le centre de masse de la Terre. Le système de coordonnées correspondant sera un système cartésien avec ses axes notés :

Axe \$X_i\$: vers le point «Vernal Équinoxe »

Axe \$Z_i\$: vers le pôle Nord,

Axe \$Y_i\$: complète le repère direct.

Les gyromètres mesurent les vitesses angulaires par rapport à ce repère.

Le repère Terre «e» (ECEF-Earth Centered Earth Fixed)

Un repère tournant dont l'origine est le centre de la Terre. Il coïncide avec le système inertiel une fois par révolution complète de la terre sur elle même. Les trois axes de ce repère sont définis comme suit :

Axe \$X\$: vers le méridien de Greenwich (Longitude=0),

Axe \$Z\$: vers le pôle Nord,

Axe \$Y\$: pour compléter le repère direct.

Le repère Terre par défaut pour le calcul embarqué de la majorité des GPS et INS est le WGS84.

La rotation entre le repère navigation et le repère Terre est une fonction de position sur la Terre en latitude et longitude. Elle est donnée par la matrice :

$$R_e^n = \begin{pmatrix} -\sin lat \cos long & -\sin lat \sin long & \cos lat \\ -\sin long & \cos long & 0 \\ -\cos lat \cos long & -\cos lat \sin long & -\sin lat \end{pmatrix}$$

Annexes E : la matrice dynamique du modèle des erreurs de l'INS

Nous rappelons l'équation dynamique d'état :

$$\begin{pmatrix} \delta \dot{r} \\ \delta \dot{v} \\ \dot{\epsilon} \\ \delta \dot{f}^b \\ \delta \dot{\omega}^b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ N^e & -2\Omega_{ie}^e & -F^e & R_b^e & 0 \\ 0 & 0 & -\Omega_{ie}^e & 0 & R_b^e \\ 0 & 0 & 0 & -diag(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -diag(\beta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta r^e \\ \delta v^e \\ \epsilon \\ \delta f^b \\ \delta \omega^b \end{pmatrix} \\ + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_b^e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b^e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta f^b \\ \delta \omega^b \\ w_a \\ w_b \end{pmatrix}$$

$$N^e = \begin{pmatrix} \frac{kM}{R^3} \left(\frac{3r_x^2}{R^2} - 1 \right) + \omega_e^2 & \frac{kM}{R^3} \frac{3r_x r_y}{R^2} & \frac{kM}{R^3} \frac{3r_x r_z}{R^2} \\ \frac{kM}{R^3} \frac{3r_x r_y}{R^2} & \frac{kM}{R^3} \left(\frac{3r_y^2}{R^2} - 1 \right) + \omega_e^2 & \frac{kM}{R^3} \frac{3r_x r_z}{R^2} \\ \frac{kM}{R^3} \frac{3r_x r_z}{R^2} & \frac{kM}{R^3} \frac{3r_x r_z}{R^2} & \frac{kM}{R^3} \left(\frac{3r_z^2}{R^2} - 1 \right) \end{pmatrix}$$

$$-\Omega_{ie}^e = \begin{pmatrix} 0 & \omega_e & 0 \\ \omega_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$-F^e = \begin{pmatrix} 0 & f_z & -f_y \\ -f_z & 0 & f_x \\ f_y & -f_x & 0 \end{pmatrix}$$

k : constante générale de la gravité

M : masse de la Terre

$r_{x,y,z}$: position dans le repère Terre selon l'axe indicé

ω_e : vitesse angulaire de la Terre

$f_{x,y,z}$: force spécifique (accélération) mesurée selon l'axe

Annexe F : calcul de la matrice du bruit de mesure R pour l'intégration MAG/IMU

Le vecteur de correction est donné par :

$$\delta z = \begin{pmatrix} \sin^{-1} \frac{\delta g_x}{\delta g} - \phi_{GPS/IMU} \\ \sin^{-1} \frac{\delta g_y}{\delta g \cos \theta_{GPS/IMU}} - \theta_{GPS/IMU} \\ \psi_{Mag} - \psi_{GPS/IMU} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_{gravité} - \phi_{GPS/IMU} \\ \theta_{gravité} - \theta_{GPS/IMU} \\ \psi_{Mag} - \psi_{GPS/IMU} \end{pmatrix}$$

La matrice du bruit G est calculée moyennant la loi de transmission des erreurs comme suit:

$$R = \text{diag}(\sigma_{\phi_{gravité}}^2, \sigma_{\theta_{gravité}}^2, \sigma_{\psi}^2)$$

$$R = \begin{pmatrix} \frac{g_y^2 + g_z^2}{(g_x^2 + g_y^2 + g_z^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \sigma_{g_b}^2 & \frac{g_x}{(g_x^2 + g_y^2 + g_z^2)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{1}{\cos \phi} & \frac{\sin \phi}{\left(1 - \frac{g_x^2}{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \cdot \sigma_{g_b}^2 & \frac{1}{H_x} (\sigma_{H_y}^2 - H_y \cdot \sigma_{H_x}^2) \\ \frac{g_y^2 + g_z^2}{(g_x^2 + g_y^2 + g_z^2)^{\frac{1}{2}}} & \left(1 - \frac{g_x^2}{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}\right)^{\frac{1}{2}} & \frac{1}{1 + \frac{H_y^2}{H_x^2}} \end{pmatrix}$$

La covariance de la détermination du vecteur de gravité

$$g_b = a_{dynamique} + \omega_{ib}^b \times v_b - a_{m\text{seur } \acute{e}e}$$

$$\sigma_{g_b}^2 = \sigma_{a_{dynamique}}^2 + v_b \sigma_{\omega_{ib}^b}^2 + \omega_{ib}^b \sigma_{v_b}^2 + \sigma_{a_{mesur \acute{e}e}}^2$$

Toutes les grandeurs de cette relation sont connues sauf l'accélération propre au déplacement.

$$a_{dynamique} = R_e^b \frac{r^e}{t^2}$$

$$\sigma_{a_{dynamique}}^2 = \sigma_{R_e^b}^2 \cdot \frac{r^e}{t^2} + \sigma_{r^e}^2 \frac{R_e^b}{t^2}$$

La covariance du cap magnétique

Les relations nécessaires pour calculer le cap magnétique sont:

$$H_x = m_x^b \cdot \cos \theta + m_y^b \cdot \sin \phi \cdot \sin \theta - m_z^b \cdot \cos \phi \cdot \sin \theta$$

$$H_y = m_y^b \cdot \cos \phi + m_z^b \cdot \sin \phi$$

$$\psi = \text{atan2} \left(\frac{H_y}{H_x} \right)$$

Les covariances associées à ce type du calcul sont :

$$\sigma_{H_x}^2 = \cos \theta . \sigma_m^2 - m_x^b . \sin \theta . \sigma_\theta^2 + \sin \phi . \sin \theta . \sigma_m^2 + m_y^b . \cos \phi . \sin \theta . \sigma_\phi^2 + m_y^b . \sin \phi . \cos \theta . \sigma_\theta^2 - \cos \phi . \sin \theta . \sigma_m^2 + m_z^b . \sin \phi . \sin \theta . \sigma_\phi^2 - m_z^b . \cos \phi . \cos \theta . \sigma_\theta^2$$

$$\sigma_{H_x}^2 = \sigma_m^2 (\cos \theta + \sin \phi . \sin \theta - \cos \phi . \sin \theta) + \sigma_\theta^2 (m_y^b . \sin \phi . \cos \theta - m_x^b \sin \theta - m_z^b . \cos \phi . \cos \theta) + \sigma_\phi^2 (m_y^b . \cos \phi . \sin \theta + m_z^b . \sin \phi . \sin \theta)$$

$$\sigma_{H_y}^2 = \cos \phi . \sigma_m^2 - m_y^b . \sin \phi . \sigma_\phi^2 + \sin \phi . \sigma_m^2 + m_z^b . \cos \phi . \sigma_\phi^2$$

$$\sigma_{H_y}^2 = \sigma_m^2 (\cos \phi + \sin \phi) + \sigma_m^2 (m_z^b . \cos \phi - m_y^b . \sin \phi)$$

avec $\sigma_m = \sigma_{m_x^b} = \sigma_{m_y^b} = \sigma_{m_z^b}$ la covariance supposée identique pour les trois magnétomètres.

Publications associées à la mémoire :

Revues :

Alshawa M., Grussenmeyer P. and Smigiel E., 2009. L'aspect mobile d'un scanner laser terrestre. Colloque techniques laser pour l'étude des environnements naturels et urbains. Le Mans, 20-21 janvier 2009 (en cour de publication pour un numéro spécial de la revue RFPT)

Alshawa M., Grussenmeyer P. and Smigiel E., 2009. A Low cost TLS based land mobile mapping system assisted by photogrammetry. Special issue of the Bulletin of Geodetic Sciences (Boletim de Ciências Geodésicas), ISSN: 1982-2170

Communication :

Alshawa, M., Smigiel, E., Grussenmeyer, P., Landes, T., 2007. Integration of a terrestrial lidar on a mobile mapping platform: First experiences. 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT2007). Padova – Italy.

Alshawa M., Grussenmeyer P. and Smigiel E., 2008. Integration of a TLS in a low cost mobile mapping system. VSMM 2008 - Conference on Virtual Systems and MultiMedia Dedicated to Digital Heritage. Limassol, Cyprus, October 20th - 25th, 2008, p.1-8.

Alshawa, M., Boulaassal, H., Landes, T., Grussenmeyer, P., 2009. Acquisition and automatic extraction of facade elements on large sites from a low cost laser mobile mapping system. 3D-ARCH'2009. 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures 25-28 February 2009, Trento, Italy.

Alshawa M., Grussenmeyer P. and Smigiel E., 2009. Contribution of photogrammetry to the improvement of navigation data in a low cost TLS based land mobile mapping system. 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology Mobile Mapping Serving the Information Society. 21-24 July 2009 - Presidente Prudente, São Paulo, Brazil

Alshawa M., Grussenmeyer P. and Smigiel E., 2009. A Low cost TLS based land mobile mapping system assisted by photogrammetry. Special issue of the Bulletin of Geodetic Sciences (Boletim de Ciências Geodésicas), ISSN: 1982-2170

Références

Livres

Abuhadrous, I., 2005. Système embarqué temps réel de localisation et de modélisation 3D par fusion multi-capteur. Doctorat Informatique temps réel - Robotique - Automatique, Centre de Robotique, ENSMP. 228 pages.

Brown S.A. et Hwang P.Y. C., 1997. Introduction to random signals and applied Kalman filtering with Matlab. Exercises and solutions, 3rd Edition. ISBN: 978-0-471-12839-7. 496 pages.

Chatfield, A. B., 1997. Fundamentals of high accuracy inertial navigation. Progress in astronautics and aeronautics series. ISBN-13: 978-1-56347-243-5. 339 pages.

Dudek, G. et Jenkin, M., 2000. Computational principles of mobile robotics. ISBN 0-521-56876-5. 280 pages.

Gardner, J.W., Varadan, V. et Awadelkarim, O.O., 2001. Microsensors, MEMS, and smart devices. ISBN: 978-0-471-86109-6. 522 pages.

Gautier, J., 2003. GPS/INS generalized evaluation tool for the design and testing of integrated navigation system. Ph.D. thesis, Stanford University.

Gill, P.E., W. Murray, et Wright., M. H., Practical Optimization, Academic Press, London, UK, 1981.

Grussenmeyer, P., 1994. Contrôle géométrique de la saisie en photogrammétrie. Université de Strasbourg 1. N° 94 STR1 3125. 177 pages.

Hartley, R. et Zisserman, A., 2004. Multiple view geometry in computer vision second edition. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518.

Joffrion, J. M., 2005. Head tracking for 3D audio using a GPS-aided MEMS-IMU. Theses of US Air Force Institute of Technology. March 2005. 130 pages.

Kaplan E. D. et Hegarty, C., 2005. Understanding GPS: Principles and Applications. ISBN 1-58053-894-0. 680 pages.

Mikhail, E. M., Bethel, J. S. et McGlone J.S., 2001. Introduction to Modern Photogrammetry. ISBN-13: 9780471309246. March 2001. 496 pages.

Reshetyuk, Y., 2006. Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners, Department Transport and Economics, KTH publication, 152 pages.

Petovello, M. G., 2003. Real-time integration of a tactical-grade IMU and GPS for high-accuracy positioning and navigation. University of Calgary, department of geomatics engineering. UCGE Reports N° 20173.

Shan, J. et Toth, C. K., 2008. Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. ISBN-13: 9781420051421.

Shin E.H., 2001. Accuracy improvement of low cost INS/GPS for land applications. University of Calgary. UCGE Reports Number 20156. 119 pages.

Smith, J.R., 1997 Introduction to geodesy: The history and concepts of modern geodesy. ISBN 047116660X, 9780471166603. 224 pages.

Tarsha Kurdi, F., 2008. Extraction et reconstruction de bâtiments en 3D à partir de relevés lidar aéroportés. Thèses de doctorat, Université Louis Pasteur. 272 pages.

Tao, C. V. et Li, J., 2007. Advances in Mobile Mapping Technology: ISPRS Series, vol 4, ISBN: 9780415427234. 193 pages.

Titterton, D. et Weston. J., 2004. Strapdown Inertial Navigation Technology. The American Institute of Aeronautics and Astronautics, second edition. ISBN: 1-56347-693-2. 588 pages.

Wertz, J. R. 1984. Spacecraft attitude determination and control. D. Reidel Publishing Company, Holland. 764 pages.

Wolf, P. R. et Dewitt B. A., 2000. Elements of Photogrammetry: With Applications in GIS (3rd edition). ISBN-10: 0072924543 ISBN-13: 9780072924541. 608 pages.

Journaux

Agent, A., 1991, The advantages of absolute encoders for motion control. Sensors, April, pp. 19-24.

Bar-Itzhack, I.Y. et Berman, N., 1988. Control theoretic approach to inertial navigation systems, Journal of Guidance and Control. vol. 11 N° 3. pp.237-245

Bernstein, J., 2003. An overview of MEMS inertial sensing technology. Sensors , vol Feb 2003. 10 pages.

Besl, P. J., et McKay, N. D., 1992. A method for registration of 3-D shapes. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. vol 14, 2, pp.239-256.

Bhatti, I. U., Ochieng, W.Y. et Feng, S., 2007. Integrity of integrated GPS/INS system in the presence of slowly growing errors. Part I: A critical review. GPS Solutions. vol 11, N° 3, juillet 2007.

Boulaassal, H., Landes, T., Grussenmeyer, P., 2009. Automatic Extraction of Planar Clusters and their Contours on Building Façades Recorded by Terrestrial Laser Scanner. *International Journal of Architectural Computing*, vol 7, N° 1, January 2009, pp. 1-20.

Bratland, T., Caruso, J.M., Schneider, R.W., Smith, C.H., 1998. A new perspective on magnetic field sensing. *Sensors*, vol Dec 1998. 19 pages.

Carroll, J., 2006. GPS + LORAN-C: Performance analysis of an integrated tracking system. *GPS world*, vol 17, No 7, 01/07/2006, pp. 40 – 47.

Coleman, T.F. et Y. Li, 1996. A Reflective Newton Method for Minimizing a Quadratic Function Subject to Bounds on Some of the Variables," *SIAM Journal on Optimization*, vol. 6, N° 4, pp. 1040-1058.

De Cecco, M., 2003. Sensor fusion of inertial-odometric navigation as a function of the actual manoeuvres of autonomous guided vehicles. *Measurement Science and Technology*. vol 14 2003. pp.643–653

Fischler, M.A. et Bolles R.C., 1981. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *ACM* vol 24, pp. 381–395.

Fitzpatrick, J. M., West, J.B et Maurer, C.R. 1998. Predicting error in rigid body point based registration. *IEEE transactions on medical imaging*, vol. 17, N° 5, Octobre 1998. pp. 694-702.

Gebre-Egziabher, D., Elkaim, D., Powell, J. and Parkinson, B., 2006 Calibration of Strapdown Magnetometers in Magnetic Field Domain. *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, vol. 19, N° 2, pp. 1–16.

Grejner-Brzezinska, D. A., 2002. Direct Georeferencing at the Ohio state university: a historical perspective. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, vol 68, number 6, june 2002. pp. 557-560.

Guangping, H.E., 2002. Design and application of the GPSvision mobile mapping system. *IAPRS*, vol XXXIV, PART2, Cokkission II, Xi'an, Aug. 20-23, 2002. *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*. 2002, vol 34; part 2, pp.163-168.

Gontran, H., 2005. Technique de lever par véhicule équipé de récepteurs GPS et d'une station totale. *XYZ*, vol 103, June 2005. pp.37-43.

Habib, F.A., Cheng R.W.T., Kim E.M., Mitshit, A. E., Frayne, R and Ronsky, J. L. 2006. Automatic Surface matching for the Registration of LiDAR Data and MR Imagery. *ETRI Journal*, vol. 28, N° 2. pp. 162-174.

Honghui, Q. et Moore, H., 2002. Direct Kalman filtering approach for GPS/INS integration. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 38, N° 2. 2002, pp. 687-693.

King, A. D., 1998. Inertial navigation: forty years of evolution, GEC review ISSN 0267-9337. 1998, vol. 13, N°3, pp. 140-149.

Kong .X, 2004. INS algorithm using quaternion model for low cost IMU. Robotics and Autonomous Systems, vol 46, Issue 4, pp. 221-246.

Labbé, P., Dale A., Li, L. et Ying G., 2007. Self-aware/situation aware - Integrated handhelds for dispersed civilian and military urban operations, Inside GNSS, issu of mars-avril 2007. pp.43-45

Lorusso, A., Eggert, D.W. et Fisher, R.B., 1995. A Comparison of four algorithms for estimating 3-D rigid transformation. British machine vision conference. Birmingham, England vol. 1, pp. 237-246.

Manandhar, D. et Shibasaki, R., 2002. Auto-extraction of urban features from vehicle-borne laser data. IAPRS, vol. 34, Part 4, "GeoSpatial Theory, Processing and Applications", Ottawa, 2002. ISSN 1682-1750.

Markley, F.L., 2002. Fast quaternion attitude estimation from two vector measurements. Journal of Guidance, Control, and Dynamics 2002 .0731-5090, vol.25 N° 2. pp.411-414

Markley, F.L., 1988. Attitude determination using vector observations and the singular value decomposition. Journal of the Astronautical Sciences, vol. 36, N° 3. pp: 245-258.

Oho, S., Kajioka, H., et Sasayama, T., 1995. Optical fiber gyroscope for automotive navigation. IEEE Transactions on vehicular technology, vol. 44, N° 3. August 1995. pp.698-705.

Wehr, A. et Lohr, U., 1999. Airborne laser scanning – an introduction and Overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing N° 54. pp. 68-82.

Wei, M. et Schwarz, K.P., 1990. Position Location and Navigation Symposium, 1990. Record. The 1990's - A Decade of excellence in the navigation sciences. IEEE PLANS '90. pp. 429-435.

Xu, B. et Petr, V., 2000. Navigating by means of a position potential. Navigation. vol. 47, N°3, pp. 227-236.

Zampa, F. et Conforti, D., 2008. Mobile platform terrestrial LiDAR, IMU and GPS. continuous mobile laser scanning. GIM International. January 2008, vol 22, Issue 1.

Autres littératures

Abuhadrous, I. Ammoun, S. Nashashibi, F. Goulette. et Lurgeau. F. C., 2004. Digitizing and 3D modelling of urban environments using vehicle-borne laser scanner system .Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004), Sendai, Japan, Sept. 28 – Oct. 2, 2004. 6pages.

Adiprawita, W., Ahmad, S., Sembiring, J., 2007. Development of AHRS (Attitude and Heading Reference System) for Autonomous UAV (Unmanned Aerial Vehicle). International Conference on Electrical Engineering and Informatics Institut Teknologi Bandung, Indonesia June 17-19, 2007.

Alshawa, M., Smigiel, E., Grussenmeyer, P., Landes, T., 2007. Integration of a terrestrial LiDAR on a mobile mapping platform: First experiences. 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT2007). Padova – Italy. 29-31 May 2007. 6 pages.

Barber, D. M. et Mills, J. P., 2007. Vehicle based waveform laser scanning in a coastal environment. 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT2007) Padova, Italy. 29-31 may 2007. 6 pages.

Blug, A., Baulig, C., Dambacher, M., Wölfelschneider, H. et Höfler, H., 2007. Novel platform for terrestrial 3D mapping from fast vehicles. PIA07- Photogrammetric Image Analysis . Munich, Germany, September 19-21, 2007. vol 36, part 3 / W49B. pp. 7-13.

Brun, X., Deschaud, J.E. et Goulette F., 2007. On-the-way city mobile mapping using laser range scanner and fisheye camera, 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT2007) Padova, Italy. 29-31 may 2007. 6p.

Budiyono A., Adiprawita W. et Muljowidodo., 2008. MEMS-based Inertial Measurement Unit for Unmanned Aerial Vehicle Applications. 5th International Symposium of Nano Manufacturing, ISNM5, Singapore, January 23-25, 2008. 5 pages.

Caruso, M. J., 2000 Application of magnetic sensors for low cost compass system. IEEE position localisation and navigation symposium. San Diego, California, USA Mars 13-16.

De Agostino, M. et Porporato, C., 2008. Development of an Italian low cost GNSS/INS system universally suitable for mobile mapping. Position, Location and Navigation Symposium, May 2008 IEEE/ION. pp. 53-59.

Durieu, C., Aldon, M. J. et Meizel, D., 1996. La fusion de données multisensorielles pour la localisation en robotique mobile. Traitement du Signal [Trait. Signal], 1996, vol. 13, N° 2, pp. 143-166.

Ellum, M. C. et El-Sheimy, N., 2001. Portable mobile mapping. New Technology for a New Century. International conference of FIG working week 2001, Seoul, Korea May. 2001

El-Sheimy, N., Moustafa, M., Toth, C. et Grejner-Brzezinska D., 2007 Mobile mapping system tutorial. 27 May 2007. Padua, Italy.

Goad, C. C., 1991. The Ohio State university mobile mapping system: positioning components. The 47th annual meeting of the Institute of Navigation (ION). June 10-12.

Gontran, H., 2007. Mobile mapping en temps réel pour la saisie automatique d'axes routiers. Laboratoire de topométrie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, thèse N° 3749, 2007. pp. 164.

González, P.R., Aguilera, D.G., et Lahoz, J. G. 2007. From point cloud to surface: modeling structures in laser scanner point clouds. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Commission V, WG V/3. Espoo, September 12-14, 2007, Finland

Gräfe, G., 2007. Quality management in kinematic laser scanning applications. 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT2007) Padova, Italy. 29-31 may 2007. 6 pages.

Grejner-Brzezinska, D. A., Toth ., C. K. Moafipoor, S., 2008. Performance assessment of a multi-sensor personal navigator supported by an adaptive knowledge based system. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008.

Groves, P.D., 2004. Adaptive GPS et INS integration system. United States Patent Application. Pub. N° : 20040012522, 22-Jan-2004.

Hemerly, E. M., 2008. Implementation of a GPS/INS/odometer navigation system. ABCM symposium series in mechatronics. vol. 3 pp.519-524.

Huddle, J.R., 1998. Trends in inertial systems technology for high accuracy AUV navigation. Proceedings of the 1998 workshop on autonomous underwater vehicles, 1998. AUV'98., vol., no., pp.63-73, 20-21 Aug 1998

Kremer, J. et Hunter, G., 2007. Performance of the StreetMapper mobile LiDAR mapping system in “real world” projects, Photogrammetric Week'07, Fritsch (Ed.). Stuttgart september 2007. pp. 215-225

Kukko, A. Andrei ,C.O. Salminen,V.M. Kaartinen, H. Chen, Y. Rönnholm, P. Hyypä, H. Hyypä,J. Chen, R. Haggrén, H. Kosonen, I. Capek, K., 2007. Road environment mapping system of the Finnish geodetic institute - FGI ROAMER - IAPRS vol XXXVI, Part 3 / W52, 2007

Ladetto, Q. et Merminod, B., 2002. Digital magnetic compass and gyroscope integration for pedestrian navigation. 9th Saint Petersburg International conference on integrated navigation systems, Saint Petersburg, Russia. 10 pages.

Lachapelle, G., Kuusniemi, H., Dao, D. T. H., MacGougan G. et Cannon M. E., 2004. HSGPS: Signal analysis and performance under various indoor conditions. Navigation- Los Angeles and Washington. vol 51; Issu 1, pp. 29-44.

Ledig, J., 2009. Global Navigation Satellite System (GNSS) pour le positionnement géodésique. Support de cours, INSA de Strasbourg, laboratoire de topographie. pp. 154

Lenz, J.E., 1990. A review of magnetic sensors. Proceedings of the IEEE, vol.78, N° 6, juin 1990, 11 pages.

Li, D. Zhong, S. D. He, S. X. et Zheng, H., 1999. A mobile mapping system based on GPS, GIS and multi-sensor. International Workshop on Mobile Mapping Technology. Bangkok, Thailand. April 21- 23, 1999. pp. 1-3-1 - 1-3-5.

Li, Y., Wang, J., Rizos, C., Mumford, P.J. et Ding, W., 2006. Low-cost tightly coupled GPS/INS integration based on a nonlinear Kalman filter design. U.S. Institute of Navigation National Tech. Meeting, Monterey, California, 18-20 January, 958-966.

Lichti, D.D. et Gordon, S. J., 2004. Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural heritage recording. FIG Working Week 2004. Athens, Greece, May 22-27, 2004

Lichti, D.D. et Licht, M.G., 2006. Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment. Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology. Dresden, Germany

Lowe, D. G., 1999. Object recognition from local scale-invariant features. Proceedings of the International Conference on Computer Vision. pp. 1150–1157

Madeira, S., Gonçalves, J. A., Bastos, L., 2007. Implementation of a low cost mobile mapping system. Proceeding of MMT07 29 Mai-3June Padova, Italy

Manandhar, D. et Shibasaki, R., 2000. Prototype development for vehicle based laser mapping system (VLMS). IAPRS, vol. XXXIII, Amsterdam, 2000

Manzoni, G., Bolzon, G., Cefalo, R., Gherdevic, D., Martinolli, S., Piemonte, A., Rizzo, R. et Sluga, T. 2006. CER TeleGeomatics applications and projects in central europe. 8th Bilateral Poland Italy Meeting Poland-Wroclaw, Poland 22-24 June 2006

Manzoni, G., Rizzo, R. G., et Robiglio, C., 2005. Mobile mapping systems in cultural heritages survey. CIPA 2005 XX International Symposium, 26 September – 01 October, 2005, Torino, Italy. pp.437-441

Mills, J. et Barber, D., 2003. An Addendum to the metric survey specifications for english heritage – the collection and archiving of point cloud data obtained by terrestrial laser scanning or other methods. Version 11/12/2003.

Mumford, P.J., Li, Y., Wang, J., Rizos, C., et Ding, W., 2006. A time-synchronization device for tightly coupled GPS/INS integration. Symp. on GPS/GNSS (IGNSS2006), Surfers Paradise, Australia, 17-21 July, on CD-ROM procs.

Nasiri, S., 2007. A Critical Review of MEMS Gyroscopes technologies and commercialization status. Publication de Invensense™. <http://www.invensense.com/shared/pdf/MEMSGyroComp.pdf>

Niu, X. Hassan, T. Ellum, C. et El-Sheimy N., 2006. Directly georeferencing terrestrial imagery using MEMS-based INS/GNSS integrated systems. XXIII FIG Congress, Munich, Germany, October 8-13, 2006. PS 5.7

Pfeifer, N., Briese, C., 2007. Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning. ISPRS Workshop Laser scanning 2007 and SilviLaser 2007. Espoo, Finland 12-14 September. IAPRS vol XXXVI, Part 3 / W52, 2007.

Qingwu, H.U. Zhiyong, C. et Sheng G.U.O., 2007. Road facility investigation based on MMT. MMT'07 ; Mobile Mapping Technologies Symposium. Padua – Italy, 28-31 May 2007.

Reed, M.D. Landry, C.E. et Werther, K.C., 1996. The application of air and ground based laser mapping systems to transmission line corridor surveys. Position Location and Navigation Symposium, 1996. IEEE 22-26 Apr 1996, pp.444-451

Rios, J. A. et White, E., 2002 Fusion filter algorithm enhancements for a MEMS GPS/IMU, Proceedings of the 2002 National Technical Meeting of the Institute of Navigation January 28 - 30, 2002 San Diego, California, pp. 126 - 137

Schön, S. et Bielenberg, O. 2005. On the capability of high sensitivity GPS for precise indoor positioning. 5th workshop on positioning, navigation and communication 2008 (WPNC'08)

Schwarz, K. P. et El-Sheimy, N., 2004. Mobile mapping systems – State of the art and future trends. XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey 2004. Part B5. pp. 759-769

Seifert, A. et Kleusberg, A., 2003. An alternative formulation for the integration of GPS and INS measurements. International workshop of ISPRS working Group I/5; Theory, Technology and Realities of Inertial / GPS Sensor Orientation. 22.-23. September 2003, Castelldefels, Spain. 6 pages.

Smith, M. J., Moore, T., Hill, C. J., Noakes, C. J. et Hide, C., 2003. Simulation of GNSS/IMU measurements. ISPRS International Workshop Working Group I/5: Theory, Technology and Realities of Inertial / GPS Sensor Orientation. Session 5. 22.-23. September 2003, Castelldefels, Spain.

Spagnol, C. Muradore, R. Assom, M. Beghi, A. et Frezza, R., 2004. Trajectory reconstruction by integration of GPS and a swarm of MEMS accelerometers: model and analysis of observability. The 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. 3-6 Oct. 2004. pp. 64-69

Sternberg, H., Caspary, W., Heister, H. et Klemm, J., 2001. Mobile Data Capturing On Roads and Railways Utilizing The Kinematic Survey System KiSS. The 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology January 3 – 5, 2001, Cairo, Egypt

Talaya, J. Bosch, E. Alamús, R. Serra, A. et Baron, A., 2004. GEOVAN: The mobile mapping system from the ICC Proceedings of 4th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT'2004). Kuuming, 2004.

Voegtle, T., Schwab, I. et Landes, T., 2008. Influences of different materials on the measurements of a terrestrial laser scanner (TLS). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008

Wang, W., Liu, Z., Xie, R., 2004. INS/GPS/Pseudolite integrated navigation for land vehicle in urban canyon environments. IEEE conference on cybernetics and intelligent systems, 2004, vol.2, no., pp.1183-11860.

Wolf, R., Hein, G.W., Eissfeller, B. et Loehnert, E., 1996. An Integrated Low Cost GPS/INS Attitude Determination and Position Location System. In: Proceedings of ION GPS-96, Alexandria, VA: The Institute of Navigation, pp 975-981

Zhang, A., Hu, S., Chen, Y., Liu, H., Yang, F. et Liu, F., 2008. Fast continuous 360 degree color 3D laser scanner. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. vol. XXXVII. Part B1. WG I/2-SAR and LiDAR Systems Beijing 2008.

Zhao, H. et Shibasaki, R., 2004. Towards the updating of digital geographic database using vehicle-borne laser and line image. XXth ISPRS Congress, Commission 3 WG 6, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey. 6 pages.